

# Grunnmur i murverk av lettklinkerblokk

**Magnus Norum**

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Karl Vincent Høiseth, KT

Medveileder: Tore Kvande, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk





## MASTEROPPGAVE 2016

FAGOMRÅDE: Murkonstruksjoner	DATO: 06.07.2016	ANTALL SIDER: 81 + 30 sider vedlegg
---------------------------------	---------------------	--

TITTEL:

### Grunnmur i murverk av lettklinkerblokk

Foundation Wall of LWA Concrete Masonry Units

UTFØRT AV:

Magnus Norum



SAMMENDRAG:

Denne oppgaven omhandler praktiske forsøk av veggelementer laget av Leca isoblokk 30cm armert med enten stige- eller sikksakkarmering. Sikksakkarmeringen blir brukt til armering av isoblokker under terreng for å sikre samvirket mellom vangene. Forsøkene er utført for å teste om samvirket er større ved bruk av sikksakkarmering enn ved bruk av stigearmring.

I løpet av arbeidet med oppgaven ble det utført 13 forsøk i laboratoriet. Fem av forsøkene ble utført for å etablere E-modulen til polyuretanet. De resterende åtte forsøkene ble utført for å etablere graden av samvirke mellom vangene i veggelementet. E-modulen til polyuretanen ble målt til  $12.57\text{N/mm}^2$ , mens det ikke ble målt noen forskjell i samvirke på veggelementene.

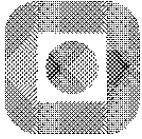
Forsøkene resulterte også i gi veggelementene en flytegrense på ca. 14kN og en bruddgrense på ca. 30kN. Disse kapasitetene peker mot et samvirke på mellom 0% og 80% ved bruk av beregningsmetoden til Mursenteret.

Det er også blitt gjennomført analyser i DIANA som bekrefter resultatet fra laboratorieforsøkene om at det liten til ingen forskjell på om det brukes sikksakk- eller stigearmring i grunnmursvegger bygget med Leca isoblokk 30cm. Analysen av hele grunnmursvegger gjort i DIANA bekrefter grenseverdiene oppgitt av Leca og SINTEF.

FAGLÆRER: Professor Karl Vincent Høiseth

VEILEDER(E): Professor Tore Kvande

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU



NORGES TEKNISK NATURVITENSKAPELIGE  
UNIVERSITET, NTNU  
Institutt for konstruksjonsteknikk

## **MASTEROPPGAVE Vår 2016**

**Stud Techn Magnus Norum**

### **Grunnmur i murverk av lettklinkerblokk Foundation Wall of LWA Concrete Masonry Units**

#### **INNLEDNING**

Skallmuren er en populær og aktuell veggløsning for de fleste typer bygg. Som bærende element består veggene av to vanger bunnet sammen med bindere. Forbindelsen mellom vangerne er viktig for å sikre veggens stabilitet og styrke.

Eurokode 6, *Prosjektering av murkonstruksjoner*, ble innført som nasjonal standard i 2010. Standarden angir retningslinjer for dimensjonering av skallmurer, inklusive bruken av bindere. Likevel synes det å være behov for mer kunnskap om den mekaniske virkemåten til dagens isolerte grunnmursløsninger i lettklinkerblokk murverk, spesielt når det gjelder samvirket mellom binder og murfuge.

Oppgavens overordnede målsetting er å undersøke mekaniske egenskaper til en typisk isolert skallmur i lettklinkerblokk murverk.

#### **OPPGAVE**

Oppgaven er todelt og består i hovedtrekk av å:

1. studere den mekaniske virkemåten til et segment av en skallmur ved hjelp av laboratorieforsøk.
2. teoretiske beregninger av skallmurens lastbærende kapasitet for jordtrykksbelastninger i kombinasjon med vertikalbelastning .

Oppgaven kan inneholde følgende deler:

- Gjennomgang av aktuelle skallmurer, statisk virkemåte og dimensjoneringsregler
- Valg av typisk løsning
- Beskrivelse og gjennomføring av laboratorieforsøk
- Numeriske beregninger av laboratorieforsøk

- Beskrivelse av aktuelle dimensjonerende jordtrykksbelastninger
- numeriske beregninger av skallmurer med ulike randbetingelser og jordtrykksbelastninger

Veiledere: Karl Vincent Høiseeth og Tore Kvande

Oppgaven skal være gjennomført innen 11. juni 2016

Trondheim 11.01.2016

Karl Vincent Høiseeth  
Professor, faglærer

# Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved institutt for konstruksjonsteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet (NTNU) våren 2016 og utgjør 30 studiepoeng. Arbeidet har pågått fra 15. januar frem til 6. juni 2016.

Masteroppgaven har lært meg mye om tidsbruk og det å jobbe i laboratorium. Den har også gitt meg et innblikk i bruken av, og arbeidet med Lecablokker, samt kompleksiteten ved beregningen av belastningene og kapasitetene til grunnmurer.

Jeg ønsker å takke veilederen min Karl Vincent Høiseth for hjelpsomme samtaler gjennom oppgave perioden. Jeg vil også takke Jan Arve Øverli for hjelpsomme samtaler og hjelp med å finne frem rapporter. Et uformelt samarbeid med Silje Christiane Kristiansen den andre masterstudenten til Høiseth har også hjulpet godt.

Forsøkene på laboratoriet ble gjort mulig med materialer og murere skaffet av Leca. Murerne Jan Øyvind Christensen og Hans-Kristian Meling murte opp veggelementene som ble brukt i forsøkene. Forsøkene blev designet og gjennomført med god hjelp fra Steinar Seehuus og Gøran Loraas. Jeg vil derfor understreke at gjennomføringen oppgaven ikke hadde hvert mulig uten dem.

Tilslutt vil jeg også rette en takk til Ellen Bjartnes, Janne Marie Brønstad og min mor Anne Kristine Norum for den hjelpen de har gitt om ikke indirekte til rettskrivning og oppsett av oppgaven.

---

Magnus Norum

# Sammendrag

Denne oppgaven omhandler praktiske forsøk av veggelementer laget av Leca isoblokk 30cm armert med enten stige- eller sikksakkarmoring. Sikksakkarmoringen blir brukt til armering av isoblokker under terreng for å sikre samvirket mellom vangene. Forsøkene er utført for å teste om samvirket er større ved bruk av sikksakkarmoring enn ved bruk av stigearmoring.

I løpet av arbeidet med oppgaven ble det utført 13 forsøk i laboratoriet. Fem av forsøkene ble utført for å etablere E-modulen til polyuretan isolasjonen. De resterende åtte forsøkene ble utført for å etablere graden av samvirke mellom vangene i veggelementet. E-modulen til polyuretanen ble målt til  $12.57N/mm^2$ , mens det ikke ble målt noen forskjell i samvirke på veggelementene.

Forsøkene resulterte også i gi veggelementene en flytegrense på ca.  $14kN$  og en bruddgrense på ca.  $30kN$ . Ved å gjennomføre beregninger i henhold til Eurokode 6 antyder disse kapasitetene et samvirke på mellom 0% og 80% ved bruk av beregningsmetoden til Mursenteret.

Det er også blitt gjennomført analyser i DIANA som bekrefter resultatet fra laboratorieforsøkene om at det liten til ingen forskjell på om det brukes sikksakk- eller stigearmoring i grunnmursvegger bygget med Leca isoblokk 30cm.

Analysen av hele grunnmursvegger gjort i DIANA bekrefter grenseverdiene oppgitt av Leca og SINTEF for jordtrykksbelastninger fra Leca lettklinker. Ved større jordtrykksbelastninger, som for eksempel fra sand/grus, vil ikke grunnmuren holde. Dette resultatet blir bekreftet av beregningene gjort i henhold til Eurokode 6.

# Abstract

This thesis deals with practical tests of wall elements made of Leca isoblokk 30cm, reinforced with either ladder or zigzag reinforcement. Zigzag reinforcement are used for reinforcing isoblokk walls below ground level to ensure interaction between the stringers. The experiments are performed to test whether the interaction is greater using zigzag reinforcement than using ladder reinforcement.

During the production of the thisis there where carried out 13 experiments in the laboratory. Five of the experiments were performed to establish the E-modulus of the polyurethane insulation. The remaining eight experiments were performed to establish the degree of interaction between the stringers of the wall element. E-modulus of the polyurethane was measured to  $12.57N/mm^2$ . There were not measured any difference in displacement between the wall elements.

The experiments also resulted in giving the wall elements a yield strength of about  $14kN$  and a fracture limit of about  $30kN$ . By carrying out calculations according to Eurocode 6 these capacities sugestes a interaction between 0% and 80% using the calculation method from Mursenteret.

It has also been done analyses in DIANA confirming the results from the laboratory experiments. There is little to no difference in using zigzag or ladder reinforcement in foundation walls built with Leca isoblokk 30cm.

The analysis of the entire foundation walls done in DIANA confirms the limits stated by Leca and SINTEF for soil pressure loads from Leca lettklin-ker. At higher soil pressure loads, such as from sand/gravel, the foundation will not hold. This result is confirmed by calculations done according to Eurocode 6.



# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn . . . . .	1
1.2	Formål . . . . .	1
1.3	Begrensninger . . . . .	2
1.4	Oppbygning . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Litteraturstudie</b>	<b>4</b>
2.1	Skallmurer . . . . .	4
2.1.1	Lettklinkerblokker . . . . .	4
2.2	Statisk virkemåte . . . . .	5
2.3	Dimensjonering etter Eurokode 6 . . . . .	7
2.3.1	Horisontalbelastning . . . . .	7
2.3.2	Vertikalbelastning . . . . .	8
2.3.3	Bjelker . . . . .	9
2.4	Valg av løsning . . . . .	12
2.4.1	Jordtrykk . . . . .	12
2.4.2	Vertikalbelastning . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Tidligere forskning</b>	<b>17</b>
3.1	Norges Byggeforskningsinstitutt . . . . .	17
3.2	Mursenteret . . . . .	19
3.3	Phd. avhandling Tore Kvande . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Materialer</b>	<b>22</b>
4.1	Lettklinkerblokk . . . . .	22
4.2	Mørtel . . . . .	23
4.3	Armering . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Laboratorieundersøkelse</b>	<b>26</b>
5.1	Forarbeider . . . . .	26

5.2	Test av polyuretan . . . . .	27
5.2.1	Prøvestykkene . . . . .	27
5.2.2	Prosedyre . . . . .	28
5.2.3	Resultater . . . . .	28
5.2.4	Diskusjon . . . . .	30
5.3	Test av veggelementer . . . . .	30
5.3.1	Bygging av veggelementene . . . . .	30
5.3.2	Oppsett av forsøket . . . . .	32
5.3.3	Prosedyre . . . . .	32
5.3.4	Resultater . . . . .	34
5.3.5	Diskusjon . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Beregninger</b>	<b>37</b>
6.1	Det annet arealmoment ( $I$ ) . . . . .	37
6.2	Armert tverrsnitt . . . . .	39
6.3	$E$ og $I$ fra nedbøyning . . . . .	41
6.4	Kapasitet for vertikalbelastning . . . . .	41
6.5	Diskusjon . . . . .	44
<b>7</b>	<b>Lineær elastisk analyse</b>	<b>46</b>
7.1	Verifisering av element HX24L . . . . .	46
7.1.1	Beskrivelse av element og egenskaper . . . . .	46
7.1.2	Naturlige koordinater . . . . .	47
7.1.3	$\mathbf{B}$ - matrise . . . . .	48
7.1.4	Jacobian . . . . .	48
7.1.5	Virtuell forskyvning . . . . .	49
7.1.6	Løsning . . . . .	50
7.1.7	Resultat . . . . .	51
7.1.8	Løsning i $i$ DIANA . . . . .	51
7.2	Analyse av veggelement . . . . .	54
7.2.1	Hensikt . . . . .	54
7.2.2	Geometri . . . . .	54
7.2.3	Materialer . . . . .	55
7.2.4	Resultat og diskusjon . . . . .	55
7.3	Analyse av grunnmur . . . . .	59
7.3.1	Hensikt . . . . .	59
7.3.2	Geometri . . . . .	59
7.3.3	Materialer . . . . .	60
7.3.4	Resultat og diskusjon . . . . .	60

<b>8 Konklusjon</b>	<b>67</b>
8.1 Konklusjon . . . . .	67
8.2 Videre arbeid . . . . .	69
<b>Bibliografi</b>	<b>70</b>
<b>Vedlegg A</b>	<b>73</b>
<b>Vedlegg B</b>	<b>86</b>

# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Bygging av grunnmurer av lettklinkerblokker er noe som er vært gjort lenge. Blokkene er enkle å bygge med og har vært en favoritt blant selvbyggere i lang tid. Leca, en produsent av lettklikerblokker, har lenge reklamert direkte til selvbyggermarkedet med sine produkter.

I 2010 ble Eurokode 6 innført som nasjonal standard for dimensjonering av murkonstruksjoner. Standarden tar for seg dimensjonering av skallmurer og murt forblending, inkludert bruken av bindere. Selv med god basis for beregning av skallmurer, virker det som om det er behov for mer kunnskap om den mekaniske virkemåten til isolerte grunnmursløsninger i lettklinkermurverk, spesielt løsning for samvirke mellom murvangene.

Kapasiteten til grunnmursvegger bygget med isolerte lettklinkerblokker er ikke dokumentert godt analytisk. Selv Lecas tekniske håndboka skriver at grensene for tillatte høyder og lengder på veggene baserer seg på det som erfaringsmessig har vist seg å være akseptabelt.

Oppgaven skal på bakgrunn av dette undersøke de mekaniske egenskapene til vegger bygget med isolerte lettklikerblokker. Dette skal gjøres ved å forsøke og fastslå graden av samvirke mellom murvangene med to forskjellige armeringstyper, samt og analysere veggmodeller i DIANA.

### 1.2 Formål

Formålet med oppgaven er å bestemme om forskjellig armering endrer kapasiteten til murveggene. Leca anbefaler bruk av to typer armering til Leca isoblokk 30cm. Stigearmering brukes ved bygging av alle typer Lecavegger.

Sikksakkarmering skal brukes i hver andre fuge ved bygging med Leca isoblokk 30cm under terreng. Bruk av sikksakkarmering skal øke samvirket mellom vangene og slik fungere som bindere etter Eurokode 6.

Ingen tidligere forsøk har klart å vise at kapasiteten til isoblokker er nevneverdig dårligere enn normale blokker. Formålet med den numeriske analysen er å få et overblikk over forskyvningene og spenningsfordelingene for å kunne se de små endringene som ikke ble oppdaget i forsøkene.

### 1.3 Begrensninger

Oppgaven er begrenset til følgende i samråd med veileder:

- Vegger bygget med Leca isoblokk 30cm murt opp med Weber Murmørtel M5.
- Kun lineærelastisk analyse.
- Alle materialer er fra samme parti.
- Svært forenklet beregning av belastning fra jordtrykk.

### 1.4 Oppbygning

Oppgaven er delt inn åtte kapitler, der innledningen er kapittel 1.

**Kapittel 2** inneholder en litteraturstudie av lettklikerbliokker og regelverket brukt ved dimensjonering av murkonstruksjoner. Det blir også beskrevet vanlige belastninger en grunnmur kan bli utsatt for.

**Kapittel 3** presenterer tidligere forskning utført av Norges byggforskningsinstitutt og Mursenteret. Arbeidet og resultatene utført i forbindelse med Tore Kvandes Phd. avhandling er også lagt frem.

**Kapittel 4** inneholder beskrivelser av materialene benyttet i laboratorieforsøkene og de numeriske analysene.

**Kapittel 5** beskriver forarbeidet, oppsettet og gjennomføringen av laboratorieforsøkene som er gjort på polyuretanen og veggelementene. Tilslutt diskuteres resultatene.

**Kapittel 6** gir en gjennomgang av resultatene fra kapittel 2 og kapittel 4, og sammenligninger disse med beregninger utført i henhold til Eurokode 6.

**Kapittel 7** beskriver verifiseringen av element HX24L brukt i de lineær elastiske analysene gjort i DIANA. Vidre presenteres analysen av laborieforsøkene og forskjellige grunnmurer. Resultatene sammenlignes med forsøkene og beregningene gjort tidligere i oppgaven.

**Kapittel 8** presenterer konklusjonen sammen med en kort oppsummering, samt forslag til videre arbeid.

**Vedlegg** inneholder beregningene gjort for verifiseringen av element HX24L og .HIS og .DCF filene brukt ved produksjonen av de lineær elastiske analysene.

# Kapittel 2

## Litteraturstudie

### 2.1 Skallmurer

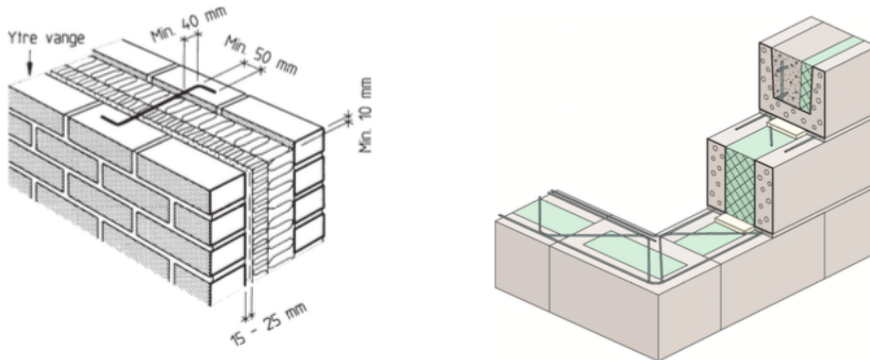
Skallmur er en av mange murtyper som brukes for å bygge murvegger [1]. Skallmuren består av en ytre og en indre vange med et luftrom mellom, som i dag isoleres. Det blir i dag laget et hulrom mellom isolasjonen og ytterveggen for å hindre fuktovergang og gi mulighet til at luftgjennomstrømning skal få tørket opp fuktdannelsen.

Ytre og indre vange er bundet sammen av bindere. Det er normalt indre vange som er bærende, mens den ytre vangen er klimaskjoldet. Binderne er brukt for å forankre klimaskjoldet til den indre vangen og for å skape samvirke mellom vangene. Skal en kunne bruke dette samvirke i beregningene må antall bindere per kvadratmeter samfalle med kravene i Eurokoden.

Ettersom tidene forandrer seg og det kommer nye produkter på markedet blir disse også tilpasset måten det bygges på. Med lettklinkerblokker er det mulig å bygge skallmur uten å måtte mure opp to separate vanger. Figur 2.1 viser den mer tradisjonelle skallmuren og den mer moderne løsningen med lettklinkerblokker isolert med polyrutanskum mellom vangene.

#### 2.1.1 Lettklinkerblokker

Lett tilslag i murverk er en gammel oppfinnelse. Det første eksempelet som er funnet, er fra Romerriket omkring 500 år f.Kr. Det ble da brukt vulkansk stein som pimpstein. På midten av 1800-tallet ble denne typen tilslag tatt i bruk av tyskerne, før resten av Europa begynte noen år senere. Det var først på 1900-tallet produksjonen av betong med lett tilslag begynte. Produksjonen i Norge startet rundt 1930 med pimpstein som tilslag. Norsk Leca startet opp i 1954 på dansk lisens med produksjonen av LECA (Light Expanded



(a) Skalmur bygget med murstein [1].

(b) Grunnmur av Leca isoblokk armert med sikksakkarmering [2].

Figur 2.1: En tradisjonell skalmur og en grunnmur bygget med Leca isoblokk. Begge fungerer som skallmurer.

Clay Aggregate) [3].

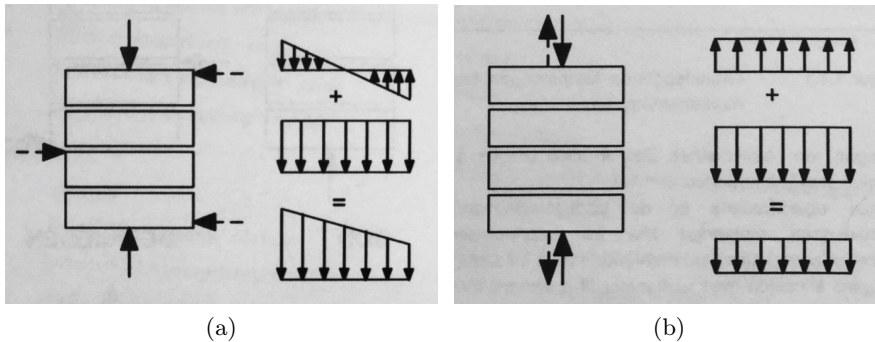
Lettklinkerblokker er laget ved at brente ekspanderte leirekuler blir blandet sammen med sement og støpt ut til ønsket fasong og størrelse [4]. Dette gir et stort potensial i mulige produkter og bruksområder. Det kan også lages isolasjonsblokker ved å sprøyte polyrutanskum inn mellom to blokker.

Murer bygget med isoblokker virker ikke som en tradisjonell skalmur med en ytre og indre vange som er separate. Den ytre vangen er et klimaskjold, men er også en del av den bærende konstruksjonen. Den indre vangen fungerer som normalt og er en del av den bærende konstruksjonen. Vegger bygget med isoblokker bruker ikke bindere og har derfor ikke noe samvirke mellom vangen utover det som kommer fra polyrutanskummet. Dette er ansett som tilstrekkelig for vegger som bygges over terrenget. For vegger som er bygget under terrenget må isoblokkene armeres med sikksakkarmering i hver andre fuge for at vangen skal ha tilstrekkelig samvirke [2, 4].

## 2.2 Statisk virkemåte

Som alle andre byggematerialer har murverk sine karakteristiske trekk. Det grunnleggende trekket er at det er blokker sammenføyd av mørtel. Til tross for at murverket kan være sammensatt av forskjellige materialer har de alle to fellestrekk. Fellestrekene er murverkets relativt høye vekt og mangelen på strekkfasthet [5].





Figur 2.2: Strekk- og bøyestrekkspenninger tatt opp av trykkspenningene fra murverkets egenvekt [5].

Ved å se på murverkets fellestrekk i sammenheng kan de være med på å motvirke hverandre. Stor egenlast fra konstruksjonen kan motvirke både strekk- og bøyestrekkspenninger med de permanente trykkspenningene den genererer, se figur 2.2.

Når murverket er utsatt for krefter det ikke er i stand til å oppta, kan tverrsnittet armeres. Armerte murkonstruksjoner har økt skjær- og momentkapasitet. Armeringen av områder i murkonstruksjoner med små permanente trykkklaster, som toppetasjene, vil være med på å gi veggene tilstrekkelig kapasitet og hindre oppsprekning [5].

Denne oppgaven tar for seg grunnmursvegger bygget med Leca isoblokk 30cm. Grunnmursvegger er belastet med en skråfordelt last fra jordtrykket og er fastholdt på alle kanter. Beregning av kapasiteten til en slik vegg er svært komplisert, og for boliger på inntil 2 etasjer er det blitt brukt tommelfingerregler som erfaringsmessig har vist seg å være akseptable [5, 6]. Hvis en anser grunnmuren som en normal yttervegg, vil jordtrykket være med på å gi en utbøyning av veggen i motsatt retning av det som normalt oppstår fra eksentrisitet av vertikallasten. Dermed kan jordtrykket være med på å øke kapasiteten til veggen.

Ved oppmuring av veggen som blir studert i denne oppgaven er det krav til at det skal brukes Leca sikksakkarmering i hver andre fuge [4, 6]. Denne armeringen vil være med på å binde sammen ytre og indre vange av isoblokken og dermed fungere som en binder. Hvis grunnmurens kapasitet dimensjoneres etter Eurokoden er tilstrekkelig antall bindere viktig med hensyn til slankhet og andreordens virkninger.

## 2.3 Dimensjonering etter Eurokode 6

I Eurokode 6 blir murvegger delt inn i to hovedtyper: Veggene som er utsatt for hovedsakelig vertikalbelastning og veggene som er utsatt for horisontalbelastning. For veggene som er utsatt for horisontalbelastning styres kapasiteten av mometegenskapene til murverket. I veggene som utsettes for hovedsakelig vertikalbelastning endres momenter og horisontalbelastninger til eksentrisiteter som reduserer vertikalkapasiteten til veggen.

Når en skallmur skal dimensjoneres etter Eurokoden blir den indre vangs tykkelse en del av tykkelsen som brukes i beregningen av veggens slankhet. Denne nye tykkelsen beregnes ved bruk av ligning 2.1.

$$t_{ef} = \sqrt[3]{k_{tef} t_1^3 + t_2^3} \quad (2.1)$$

$t_{ef}$  er veggens effektive tykkelse.

$k_{tef}$  er  $E_1/E_2 \leq 2.5$ .

$t_i$  er tykkelsen på vange nummer  $i$ .

For at ligning 2.1 skal kunne brukes til å gi en effektiv tykkelse til veggen som dimensjoneres må det være tilstrekkelig samvirke mellom vaneene. I Norge er kravet til samvirke med bindere, på fire bindere per kvadratmeter for skallmurer og to per kvadratmeter for murte forblendinger.

En annen varierende størrelse i beregningene i henhold til Eurokoden er høyden til veggen uttrykt med  $h_{ef}$ . Avhengig av i hvilke randbetingelser veggen har varierer verdien til  $\rho$  i ligning 2.2:

$$h_{ef} = \rho_i h \quad (2.2)$$

$h_{ef}$  er veggens effektive høyde.

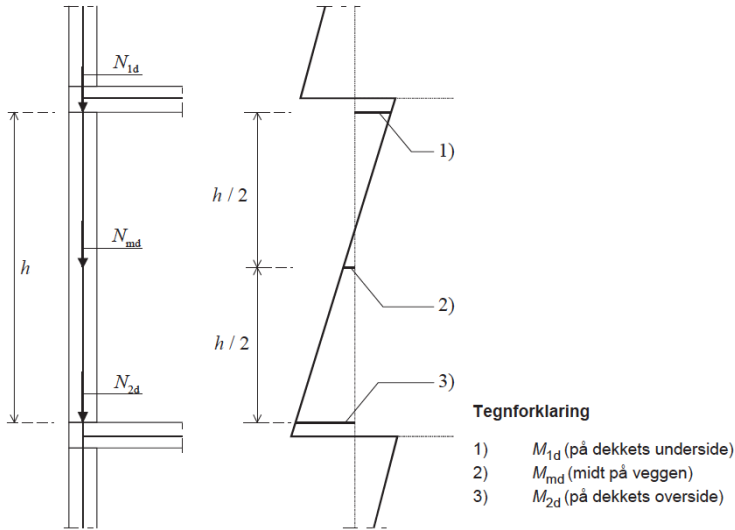
$\rho_i$  er faktor nummer  $i$  fra Eurokoden.

$h$  er høyden til veggen.

### 2.3.1 Horisontalbelastning

Når murvegger dimensjoneres for horisontalbelastninger bruker Eurokoden bruddlinjeteori. I formlene og tabellene Eurokoden bruker er resultatet fra bruddlinjeberegningene gitt med faktorene  $\alpha_i$  avhengig av hvilken akse momentet kreftene er om. Ligning 2.3a og 2.3b gir momentbelastning per lengde-enhet basert på horisontalbelastningen.

$$M_{Ed1} = \alpha_1 W_{Ed} l^2 \quad (2.3a)$$



Figur 2.3: Vertikalkrefter, momenter og eksentrisiteter ved beregning av kapasitet [7].

$$M_{Ed2} = \alpha_2 W_{Ed} l^2 \quad (2.3b)$$

$M_{Edi}$  er momentbelastningen per lengdeenhet i retning  $i$ .  
 $\alpha_i$  er retningsfaktorer i retning  $i$ .  
 $W_{Ed}$  er belastningen per arealenheter.  
 $l$  er veggens lengde.

### 2.3.2 Vertikalbelastning

Dimensjoneringen av murvegger med hovedsakelig vertikalbelastning er gjort i Eurokoden med introduksjonen av reduksjonsfaktoren  $\Phi$ .  $\Phi$  reduserer kapasiteten til veggen ved å ta hensyn til eksentrisiteter, horisontalkrefter og momenter. Alle disse påvirkningene gjøres om til en total eksentrisitet som brukes til å finne  $\Phi$ . Kapasiteten til murveggen finnes dermed med ligning 2.4.

$$N_{Rd} = \Phi t f_d \quad (2.4)$$

$N_{Rd}$  er vertikal kapasitet.  
 $\Phi$  er reduksjonsfaktoren.  
 $t$  er tykkelsen til veggen.  
 $f_d$  er murverkets trykkfasthet.

Metoden for å beregne  $\Phi$  varierer avhengig av om kapasiteten skal beregnes for topp og bunn av veggen eller for midten av veggen. På topp og bunn av veggen beregnes  $\Phi_i$  som vist i ligning 2.5.

$$\Phi_i = 1 - 2\frac{e_i}{t} \quad (2.5)$$

I ligning 2.5 er  $e_i$  uttrykt som vist i ligning 2.6.

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} + e_{init} \geq 0.05t \quad (2.6)$$

$M_{id}$  er momentet i topp eller bunn av veggen.

$N_{id}$  er vertikalbelastningen i topp eller bunn av veggen.

$e_{he}$  er eksentrisiteten som resulterer av moment skapt av horisontallasten.

$e_{init}$  er initiell eksentrisitet som er lik  $h_{ef}/450$ .

$h_{ef}$  er høyden redusert med en faktor  $\rho$  basert på randbetingelsene.

Når  $\Phi$  for midten av veggen skal beregnes brukes ligning 2.7, der  $e_{mk}$  brukes til å hente ut  $\Phi$  fra grafene i tillegg G i Eurokode 6.

$$e_{mk} = e_m + e_k \geq 0.05t \quad (2.7)$$

I ligning 2.7 er  $e_m$  uttrykt som vist i ligning 2.6, men belastningene er hentet midt i tverrsnittet, og  $e_k$  er uttrykt som i ligning 2.8.

$$e_k = 0.002 \phi_\infty \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{t e_m} \quad (2.8)$$

$\phi_\infty$  er kryptallet til murproduktet.

$h_{ef}$  er høyden redusert med faktor  $\rho$  som er basert på randbetingelsene.

$t_{ef}$  er den effektive tykkelsen til veggen.

$t$  er tykkelsen til veggen.

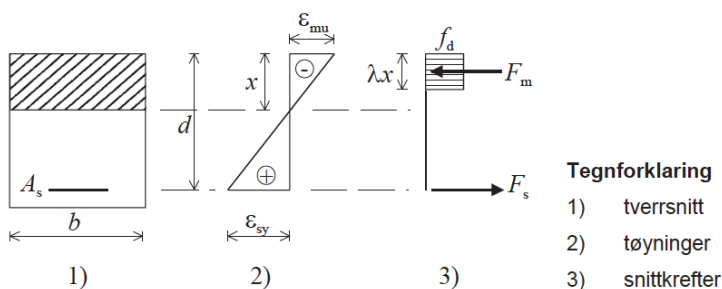
$e_m$  beregnes som  $e_i$ , men for midten av veggen.

I ligning 2.8 er  $\phi_\infty$  kryptallet til murverket som varierer mellom 0.5 – 2.0 avhengig av materialet.

### 2.3.3 Bjelker

Ved beregning av momentkapasiteten ( $M_{Rd}$ ) til armerte murbjelker fokuseres det på armeringen. De avgjørende faktorene for beregning av  $M_{Rd}$  er som sett i ligning 2.9.

$$M_{Rd} = A_s f_{yd} z \quad (2.9)$$



Figur 2.4: Spennings- og tøyningsfordeling i en murbjelke [7]

$A_s$  er armeringsarealet.

$f_{yd}$  er dimensjonerende stålfasthet.

$z$  er momentarmen.

$$z = d \left( 1 - 0.5 \frac{A_s f_{yd}}{b d f_d} \right) \leq 0.95d \quad (2.10)$$

$d$  er effektiv høyde som sett i figur 6.2.

$A_s$  er armeringsarealet.

$f_{yd}$  er dimensjonerende stålfasthet.

$b$  er bredden til bjelken.

$f_d$  er dimensjonerende fasthet til murverket i den aktuelle retningen.

Avhengig av hvilken gruppe murproduktene som er brukt kan ikke  $M_{Rd}$  være større enn:

Gruppe 1:

$$M_{Rd} \leq 0.4 f_d b d^2 \quad (2.11)$$

Gruppe 2, 3 og 4, samt murprodukter med lett tilslag:

$$M_{Rd} \leq 0.3 f_d b d^2 \quad (2.12)$$

$f_d$  er dimensjonerende fasthet til murverket i den aktuelle retningen.

$d$  er effektiv høyde som sett i figur 6.2.

$b$  er bredden til bjelken.

Siden Eurokoden ikke har noen metode for å beregne kapasiteten til uarmerete murbjelker, kan den gamle standarden brukes [5]. NS3475 har følgende ligning for momentkapasiteten til uarmerete bjelker:

$$M_{Rd} = 0.7 f_{xd2} \frac{bh^2}{6} \quad (2.13)$$

$f_{xd2}$  er dimensjonerende momentfasthet.

$b$  er bredden til bjelken.

$h$  er høyden til bjelken.

I ligning 2.13 er faktoren 0.7 der for å ta hensyn til at egenvekten er konstant og at bøyestrekkfastheten brukes til beregning av kapasitet for kortidslaster [5].

Skjærkapasiteten til murverk i henhold til Eurokode 6 beregnes etter følgende ligning:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd1} + V_{Rd2} \quad (2.14)$$

Hvis det ikke er skjærarmering i bjelketverrsnittet settes  $V_{Rd2} = 0$ . Ved beregning av skjærkapasitet både med og uten skjærarmering beregnes  $V_{Rd1}$  etter ligning 2.15.

$$V_{Rd1} = f_{vd} b d \quad (2.15)$$

$f_{vd}$  er murverkets dimensjonerende skjærfasthet.

$b$  er bjelkens bredde.

$d$  er bjelkens effektive høyde som vist i figur 6.2.

Med skjærarmering i tverrsnittet beregnes  $V_{Rd2}$  som vist i ligning 2.16.

$$V_{Rd2} = 0.9 d \frac{A_{sw}}{s} f_{yd} (1 + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (2.16)$$

$A_{sw}$  er arealet til skjærarmeringen.

$s$  er senteravstanden mellom skjærarmenringen.

$\alpha$  er skjærarmeringens vinkel til bjelkeaksen (mellom  $45^\circ$  og  $90^\circ$ ).

Skjærkapasiteten til et tverrsnitt med skjærarmering kan ikke overgå en fjerdedel av bjelkens trykkapasitet, så det må også påvises at:

$$V_{Rd1} + V_{Rd2} \leq 0.25 f_d b d \quad (2.17)$$

$f_d$  er murverkets dimensjonerende trykkfasthet.

$b$  er bredden til bjelken.

$d$  er effektiv høyde som sett i figur 6.2.

Maksimal avstand i meter mellom murte, avstivende tverrvegger ved tilbakefyllingshøyder inntil 2,0 m og 2,5 m. Avstandene vil avvike for enkelte blokkprodukter. Kontroller derfor alltid med blokkleverandørens retningslinjer.

Blokktype i yttervegg	Tykkelse mm	Tilbakefyllingsmasser			
		Konvensjonelle <sup>1)</sup>		Løs lettklinker	
		Høyde ≤ 2,0 m	Høyde ≤ 2,5 m	Høyde ≤ 2,0 m	Høyde ≤ 2,5 m
Normal- blokk	250	6,0	4,5	9,0	7,0
	300	6,0	5,0	9,0	7,5
Isolasjons- blokk	250	5,0	3,5	7,0	5,5
	300	6,0	4,0	9,0	6,0
	350	6,0	4,5	9,0	7,0

<sup>1)</sup> Pukk, sand, grus, sprengstein 0–250 mm o.l. For å unngå teletrykk mot veggene må man ikke benytte telefarlige masser.

Figur 2.5: Tabell som tilsier tillat høyde og lengde på Leca grunnmurer [2]

## 2.4 Valg av løsning

Løsningen som blir behandlet i denne oppgaven er grunnmurer bygget av 30cm Leca isoblokker. Dette er en blokk som kan brukes til å bygge alle veggene i et hus etter dagens standard. Valget av denne blokken gjør det derfor mulig å gjøre raske overslagsberegninger for belastninger som grunnmuren vil utsettes for. Leca har fått teknisk godkjenning på bruk av denne blokken med egen designet armering i grunnmurer.

Ved valget av denne løsningen vil det dermed med sikkerhet bli testet løsninger som er tatt i bruk, i eksisterende bygninger.

### 2.4.1 Jordtrykk

En grunnmur kan utsettes for varierende grad av belastning. En lettklinker grunnmur kan ikke utsettes for, for tunge fyllmasser. Valget av fyllmasser bestemmer avstanden mellom skjærveggene, med lettere masser som løse lettklinker kan avstanden mellom skjærveggene være større enn ved bruk av tyngre masser. Avhengig av tilbakefyllingshøyde og massetype kan avstanden mellom skjærveggene variere mellom 3.5m og 9.0m, og maksimal tilbakefyllingshøyde varierer mellom 2.0m og 2.5m, se figur 2.5.

Når jordtrykksbelastningene skal beregnes er det to faktorer som må evalueres. Den ene er egenvekten til massen og den andre er den aktive jordtrykkskoeffisienten [8]. Jordtrykkskoeffisienten kan enten finnes i en ta-

bell eller beregnes på bakgrunn av friksjonsvinkelen til den drenerte massen [9]. Brukes friksjonsvinkelen til å beregne jordtrykkskoeffisient er det ligning 2.18 som må brukes.

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (2.18)$$

$K_a$  er jordtrykkskoeffisienten.

$\phi$  er friksjonsvinkelen til den aktuelle massen.

Siden grunnmurer av Leca skal bygges for å unngå frostsprengning kan beregningen av jordtrykket forenkles til:

$$\sigma_a = K_a \gamma z \quad (2.19)$$

$\sigma_a$  er jordtrykket.

$K_a$  er jordtrykkskoeffisienten til den aktuelle massen.

$\gamma$  er egenvekten til den aktuelle massen.

$z$  er tilbakefyllingshøyden.

For å få en frostsikker konstruksjon brukes det i denne oppgaven enten Leca lettklinker eller en sand-/grusblanding som tilbakefyllingsmasser.

	Leca lettklinker	Sand/grus
$\phi$	40.5°	35°
$\gamma$	5.5kN/m <sup>3</sup>	20kN/m <sup>3</sup>

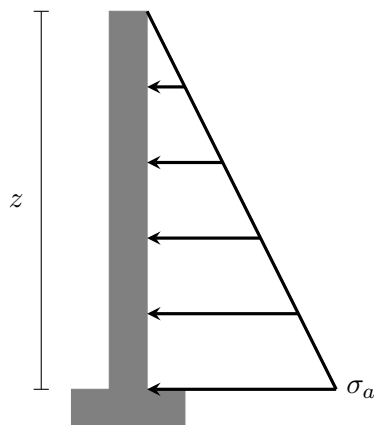
Tabell 2.1: Materialegenskaper for Leca lettklinker og sand/grus [10]

Med bakgrunn i verdiene i tabell 2.1 og ligning 2.18 og 2.19 kan jordtrykket vist i figur 2.6 beregnes. Når jordtrykket er funnet er det mulig å beregne de dimensjonerende belastningene for kjellerveggen. Resultatene for en slik beregning er vist i tabell 2.2.

Beregningene i tabell 2.2 er gjort med antagelsen at en grunnmur kan tilnærmes en fritt opplagt bjelke med skrått fordelt last. Siden det er jordtrykk for kjellervegger som beregnes er verdien av  $K_a$  økt med 50%, dette fordi kjellervegger i liten grad gir etter for trykk [8].

Det er også mulig å bruke Eurokode 6, tillegg E samt ligning 2.3a og 2.3b til å beregne belastningen på kjellerveggen ved hjelp av bruddlinjeteori. Disse beregningene vil bli svært konservative siden tillegget gjelder for uniforme laster og vegger med en tykkelse mindre enn 250mm. Kjellerveggen er 300mm tykk, og beregningene som er blit utført her er for skråbelastning som blir konvertert til uniform belastning ved å la  $\sigma_a$  være størrelsen på hele belastningen. Høyde og lengde på veggene finnes i figur 2.5. Siden antagelsen





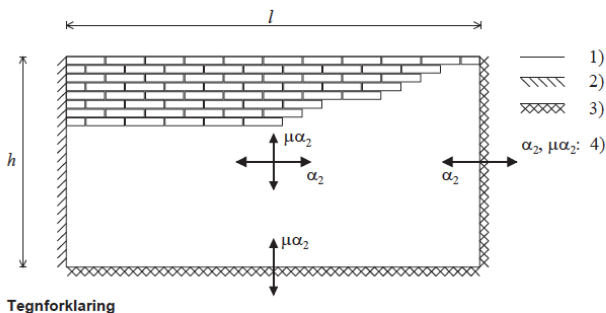
Figur 2.6: Kjellervegg belastet med jordtrykk.  $\sigma_a$  er skråbelastningens maksimum, mens  $z$  er høyden på kjellerveggs belastede område.

Leca lettklinker		
Høyde	$\sigma_a$	$M_{Ed}$
2.0m	3.5kN/m <sup>2</sup>	0.9kNm/m
2.5m	4.4kN/m <sup>2</sup>	1.4kNm/m

Sand/grus		
Høyde	$\sigma_a$	$M_{Ed}$
2.0m	16.3kN/m <sup>2</sup>	4.2kNm/m
2.5m	20.3kN/m <sup>2</sup>	5.2kNm/m

Tabell 2.2: Resulterende belastninger på en grunnmur fra mulige fyllmasser og murhøyder.  $\sigma_a$  er som vist i figur 2.6, mens  $M_{Ed}$  er det maksimale momentet om horisontalaksen til grunnmuren som et resultat av jordtrykket.

**Bøyemomentkoeffisienter,  $\alpha_2$ , i enkeltvegger med en tykkelse mindre enn eller lik 250 mm med tverrbelastning**



**Tegnforklaring**

- 1) fri kant
- 2) fritt opplagret kant
- 3) fast innspent/kontinuerlig kant
- 4) momentkoeffisienter i de angitte retningene

Figur 2.7: figur fra Eurokode 6 som illustrerer verdiene ved beregning av belastninger ved bruddlinjeteori [7].

for belastningsstørrelsen var konservativ gjøres en lite konservativ antagelse for opplagerene. De følgende resultatene er beregnet ved at alle kantene er antatt fast innspent. Dette fører til bruk av «opplagerforhold I» i tillegg E i Eurokode 6 som gir resultatene for momentbelastning om vertikalaksen som vist i tabell 2.3.

Ved bruk av tillegg E er  $\mu = f_{xd1}/f_{xd2} = 0.46$ . Dette betyr som vist i figur 2.7 at momentbelastningen om horisontalaksen reduseres med en faktor på 0.46. Dette er den samme faktoren som kapasiteten er redusert med.

	Høyde	
	2m	2.5m
Sand/grus	4.70kNm/m	6.30kNm/m
Leca lettklinker	1.98kNm/m	1.82kNm/m

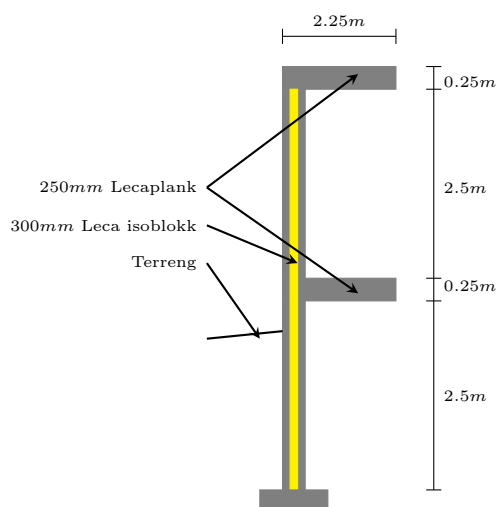
Tabell 2.3: Ved bruk av bruddlinjeteorien blir momentbelastningen om vertikalaksen som følger av denne tabellen ved maksimal lysåpning gitt av figur 2.5.

## 2.4.2 Vertikalbelastning

Vekten på resten av bygningsmassen er også avgjørende for kapasiteten til grunnmuren. Trykket fra vekten til resten av bygningsmassen er med på

å redusere strekkreftene som oppstår i grunnmuren som resultat av jordtrykket.

Ved å modellere en forenklet enebolig med en etasje, flatt tak og kjeller, kun bygget med Lecaprodukter er det mulig å gi et anslag på kreftene som vil bli påført toppen av grunnmuren, se figur 2.8. Oppmurt vegg med  $300\text{mm}$  isoblokk har en egenvekt på  $180\text{kg}/\text{m}^2$ , mens  $250\text{mm}$  Lecaplank har en egenvekt på  $250\text{kg}/\text{m}^3$  [11, 12]. Hvis huset er  $9\text{m}$  bredt med en bærevegg i midten slik at ytterveggene må bære  $2.25\text{m}$  av Lecaplanken vil grunnmuren få følgende belastning per meter:  $5.8\text{kN}$  fra Lecaplank og  $4.4\text{kN}$  fra vegg. Dette gir grunnmuren en normalbelastning i topp på  $16\text{kN}/\text{m}$ .



Figur 2.8: Forenklet modell av et Lecahus.

# Kapittel 3

## Tidligere forskning

### 3.1 Norges Byggforskningsinstitutt

Rapport O2796 fra NBI [13] tar for seg prøvingen av vegger bygget med isoblokk  $250\text{mm}$  fra Leca i 1989. rapporten beskriver fem forskjellige forsøk. Tre av forsøkene tester vegger bygget med isoblokken, mens de to resterende forsøkene tester fastheten til mørtelen og blokkene som er brukt til å bygge veggene. Formålet med forsøkene var å dokumentere de styrkemessige egenskapene til vegger bygget med Leca isoblokker.

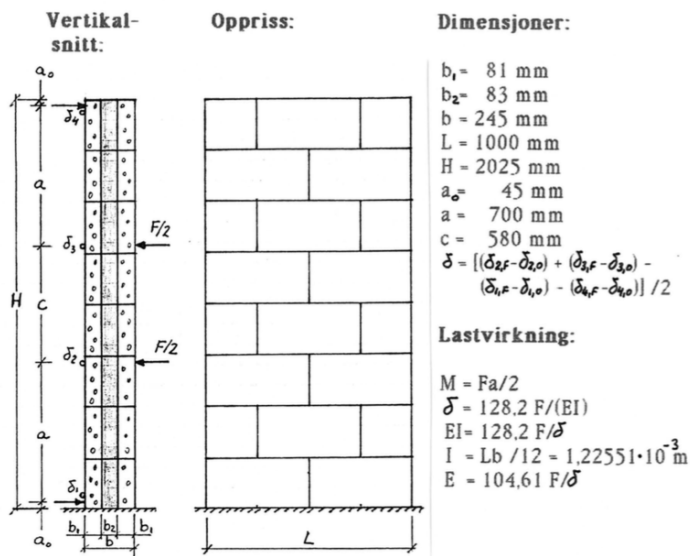
Forsøk 1 - 10 testet bøyefastheten til vegger bygget med isoblokker. Forsøkene var designet som stående firepunktsbøyetester,  $1000\text{mm}$  brede og  $2025\text{mm}$  høye. Deformasjon ble målt ved opplagerene og under lastene, se figur 3.1 og 3.2. Forsøk 1 - 5 testet bøyning i vertikalretning (parallelt med mørtelfugene), mens test 6 - 10 undersøkte bøyning i horisontalretning (normalt på mørtelfugene).

Prøvene ble utført stående, og ble belastet med 60% av forventet bruddlast tre ganger før prøvestykket blir belastet til brudd.

Resultatet fra prøvene viser at veggene tåler henholdsvis  $7.5\text{kN}$  og  $34.3\text{kN}$  avhengig av om bøyningen er i vertikalretningen eller horisontalretningen. Variasjonen i kapasitet for prøveveggene med momentbelastning i vertikal retning var for stor til at rapporten kunne konkludere med en karakteristisk verdi for kapasiteten til veggen. For veggene med momentbelastning i horisontalretning var variasjonen i kapasiteten liten nok til å beregne en karakteristisk kapasitet.

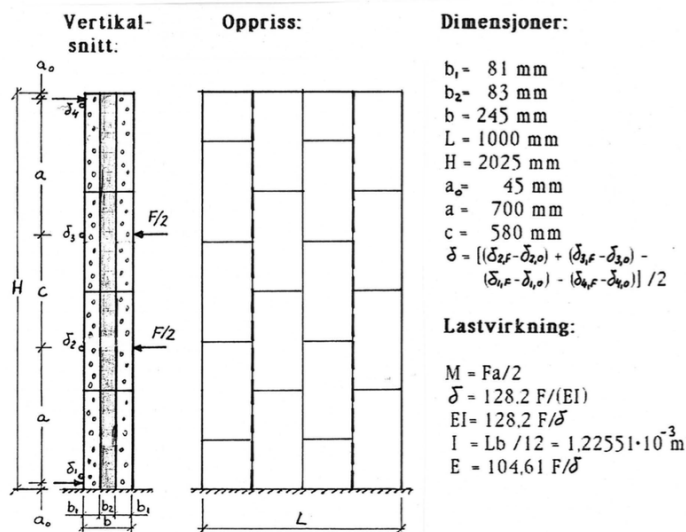
Rapporten sammenligner også resultatene med resultatene fra tidligere rapporter og konkluderer med at det er armeringen som gir veggen den høye bøyingskapasiteten i horisontalretning. Dette er fordi resultatet fra testing av isoblokkveggene gir tilsvarende kapasitet som massive Lecavegger med

### BØYNING I VERTIKALRETNING. PRØVENE 1 - 5.



Figur 3.1: Oppsett for test av firepunktsbøyeforsøk (vertikalretning) på Leca-vegg utført av NBI [13]

### BØYNING I HORIZONTALRETNING. PRØVENE 6 - 10.



Figur 3.2: Oppsett for test av firepunktsbøyeforsøk (horisontalretning) på Leca-vegg utført av NBI [13]

samme armering. Massive Lecavegger hadde en moment kapasitet på mellom  $4.3kNm/m$  og  $11.9kNm/m$  avhengig av hvilken armering som ble brukt. Den karakteristiske momentkapasiteten for isoblokkveggen ble beregnet til å være  $6.7kNm/m$ .

Rapporten konkluderer med at isoblokkvegger har den samme kapasiteten som massive Lecavegger ved bruk av samme armering og utsatt for korttidslast.

## 3.2 Mursenteret

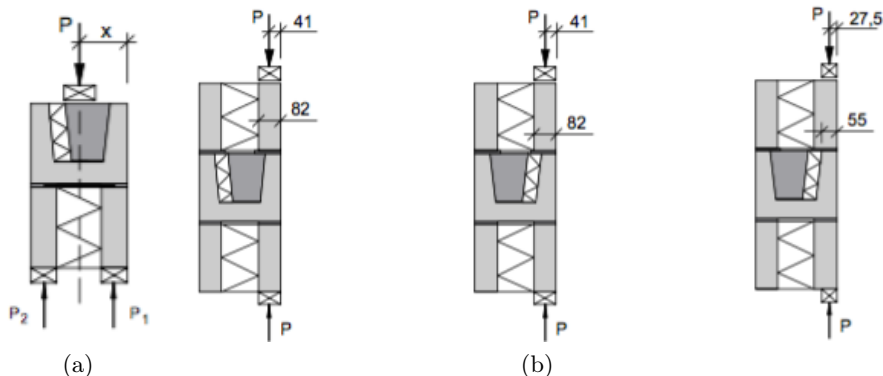
Rapporten fra Mursenteret tester bæreevnen til den «nye»  $300mm$  Leca isoblokken [14]. Rapporten fokuserer på i hvilken grad det er samvirke mellom ytre og indre vange i Leca isoblokker og i hvilken grad U-blokker er i stand til å overføre belastningene mellom vangene. Rapporten tar også for seg tidligere forsøk og rapporter, og bruker disse som en basis for beregning av samvirke og kapasiteter for Lecavegger.

I forbindelse med rapporten ble det utført fem forskjellige forsøk. To forsøk der lasten ble fordelt ned i veggen via en U-blokk. Tre forsøk der lasten ble påført en isoblokk. Det ble også testet om en U-blokk midt i prøvestykket forringer kapasiteten, se figur 3.3.

For forsøkene der lasten ble fordelt ned i veggen via en U-blokk ble det gjort totalt seks tester. I tre av testene var veggene oppmurt med sikksakkarmoring i fugen, og i de tre andre testene var fugen uarmert. Resultatet av forsøkene indikerte at en U-blokk i topp av veggen er tilstrekkelig til å overføre lasten mellom vangene, og at sikksakkarmoringen gjør samvirket mellom vangene bedre. På tross av dette bør det tilstrebes å få plassert laster sentrisk på veggen.

Forskjellene på de tre forsøkene med innmurt U-blokk var plasseringen av lasten, se figur 3.3. Lasten var enten plassert sentrisk på den sterke vangen, sentrisk på den svake vangen eller sentrisk på den svake U-blokkvangen. På hver av disse lastoppsettene ble det utført tre tester. Resultatet av forsøkene indikerer at en vegg med innmurte U-blokker får redusert kapasitet. Dette er grunnet reduksjonen i vangetykkelse fra  $82mm$  for isoblokken til  $55mm$  for U-blokken. Denne reduksjonen i veggetykkelse fører også til en økning av eksentrisiteten i veggen. For å ta hensyn til dette foreslår rapporten at en kan bruke en reduksjonsfaktor på 0.7 for vegger svekket med innmurte U-blokker.

Vedleggene til rapporten tar for seg tidligere forsøk og rapporter og gir forslag til kapasiteter for Lecavegger. I denne oppgaven er det arbeidet gjort i vedlegg C og D som er interessant.



Figur 3.3: Strekk- og bøyestrekkspenninger tatt opp av trykkspenningene fra murverkets egenvekt [14].

I vedlegg C blir forventet samvirke mellom vangene beregnet på bakgrunn av tidligere forsøk. Samvirke blir beregnet ved å måle kapasiteten til en prøve opp mot kapasitet ved 100% samvirke (beregnet) og 0% samvirke (kapasiteten til en vange). Konklusjonen som trekkes er at graden av samvirke er på 40% for moment i vertikalretning og 100% i horisontalretning, ved kortidslast. For langtidslast reduseres samvirkegraden til halvparten.

I vedlegg D blir kapasiteten for både vindlast og jordtrykk beregnet. dette gjøres på bakgrunn av mengden armering som blir brukt, og forutsetningen om at det er 100% samvirke mellom vangene. Med armering i hver andre fuge blir kapasiteten beregnet til  $3.7kNm/m$ .

### 3.3 Phd. avhandling Tore Kvande

Kvandes doktor avhandling tar for seg egenskapene til Lecablokker av kvaliteten «3/770» [15]. Kvande fokuserer spesielt på krypegenskapene til fastspent Lecamurverk, siden dette skaper opprissing. Kvande har også funnet materialegenskaper som er relevante for dimensjonering av Leca konstruksjoner. Disse er listet opp i figur 3.4.

Kvande fokuserte også på å gjøre det lettere å gjennomføre elementmetodeberegninger på Lecakonstruksjoner ved å gjennomføre relevante forsøk. Disse forsøkene ble utført i samarbeid med Karl Vincent Høiseith og indikerte at det er mulig og modellere Leca i programmer som DIANA.

Forsøkene som ble utført som er relevante for arbeidet med denne oppgaven er «*Deformation Controlled Tensile Test on LECA Masonry*» og «*Con-*

Table 1:  
Summary of material properties experimentally obtained in this thesis work

Material property	Symbol <sup>1)</sup>	Obtained value of LECA masonry in this thesis work	Design value of Eurocode 6 <sup>2)</sup>	Unit
Compressive stress-strain relationship	$f_c$	2.7	-	N/mm <sup>2</sup>
	$E_c$	4 100	2 300	N/mm <sup>2</sup>
	$\varepsilon_{cn}$	0.66	-	mm/m
	$\varepsilon_{cl}$	0.92	2	mm/m
	$\varepsilon_{cu}$	1.8	3.5	mm/m
Poisson's ratio	$\nu$	0.2	-	-
Final shrinkage value	$\varepsilon_{sh}$	30 % RH: -0.65	-0.4	mm/m
		50 % RH: -0.55		
		85 % RH: -0.40		
Creep coefficient	$\phi_{in}$	1.7 – 8.0	2.0	-
Coefficient of thermal expansion	$\alpha_T$	6.7 – 7.4 · 10 <sup>-6</sup> dependent of moisture content	10 · 10 <sup>-6</sup>	1/K
Tensile stress-deformation relationship	$f_t^u$	0.5	-	N/mm <sup>2</sup>
	$f_t^j$	0.25	-	N/mm <sup>2</sup>
	$E_o^u$	3 000	-	N/mm <sup>2</sup>
	$E_o^j$	1 300	-	N/mm <sup>2</sup>
	$G_n^u$	0.030	-	N/mm
	$G_n^j$	0.011	-	N/mm
Support Hordijk-softening				
Shear stress-deformation relationship	$\tau_u$	$\sigma_c = 0.06$ N/mm <sup>2</sup> : 0.88	-	N/mm <sup>2</sup>
		$\sigma_c = 0.15$ N/mm <sup>2</sup> : 0.93	-	N/mm <sup>2</sup>
		$\sigma_c = 0.23$ N/mm <sup>2</sup> : 0.97	-	N/mm <sup>2</sup>
	$G_o$	$\sigma_c = 0.06$ N/mm <sup>2</sup> : 1 500	-	N/mm <sup>2</sup>
		$\sigma_c = 0.15$ N/mm <sup>2</sup> : 1 500	-	N/mm <sup>2</sup>
		$\sigma_c = 0.23$ N/mm <sup>2</sup> : 1 500	-	N/mm <sup>2</sup>
	$G_{III}$	$\sigma_c = 0.06$ N/mm <sup>2</sup> : 0.092	-	N/mm
		$\sigma_c = 0.15$ N/mm <sup>2</sup> : 0.137	-	N/mm
		$\sigma_c = 0.23$ N/mm <sup>2</sup> : 0.138	-	N/mm
	$\mu$	0.88	-	-
Support partly exponential cohesion-softening and dilatancy softening				

<sup>1)</sup> See list of symbols for explanations.

<sup>2)</sup> Due to general application only design values from the European Prestandard for design of masonry structures is included in the table.

Figur 3.4: Materialegenskapene til Lecablokker [15]

*stitutive Properties of Lightweight Concrete Masonry*». Disse forsøkene utforsket egenskapene til Lecablokker, og murer bygget med Leca blokker. Forsøkene så på om det var mulig å analysere Lecamurverkets oppførsel numerisk ved brudd og oppsprekking. Disse forsøkene resulterte i å gi materialeegenskaper for Lecamurverk samt å vise at det er mulig å analysere selv kompliserte forsøk numerisk.



# Kapittel 4

## Materialer

### 4.1 Lettklinkerblokk

Denne oppgaven omhandler grunnmursvegger bygget med lettklinkerblokker. Lettklinkerblokker kommer i mange forskjellige varianter og formater tilpasset forskjellige bruksområder. Standardblokker brukes gjerne til generelle konstruksjoner, finblokker som har finere struktur brukes når blokkene ikke skal pusses, mens sandwichblokker som har et lag med varmeisolasjon i midten brukes i isolerende konstruksjoner.

Lettklinkerblokkene leveres i forskjellige kvaliteter som er bestemt av trykkfasthet [ $N/mm^2$ ] og densitet [ $kg/m^3$ ]. Dette tallparet er oppgitt på formen trykkfasthet/densitet som for eksempel 2/650 for Lecas universalblokk 25cm.

Siden oppgaven omhandler grunnmurer bygget i Norge ble det valgt å bruke Leca isoblokker som er et mye brukt produkt på markedet. Etter samtaler med Leca ble det bestemt å bruke Leca isoblokk 30cm siden det er denne som oftest blir brukt i grunnmurer. Produktdetaljene er vist i tabell 4.1.

I henhold til Eurokode 6 er E-modulen til murverk med Leca isoblokk 30cm og M5 mørtel  $3\,500N/mm^2$ .

Tore Kvande fant tre forskjellige E-moduler avhengig av forutsetningene. Ved trykkbelastning fant Kvande en E-modul på  $4\,100N/mm^2$  og ved strekkrefter var E-modulen enten  $3\,000N/mm^2$  eller  $1\,300N/mm^2$  avhengig av om det var ren Leca eller Leca/mørtelfuge.

Siden denne oppgaven fokuserer på egenskapene til bygde grunnmurer vil den offisielle E-modulen bli brukt.

<b>Produktdata</b>	<b>Leca isoblokk 30cm</b>
Mål ( $b \times h \times l$ )	300mm $\times$ 250mm $\times$ 500mm
Fasthet	4 N/mm <sup>2</sup>
Densitet	900 kg/m <sup>3</sup>
U-verdi	0.024 W/mK
Lyd, R'w+	40 dB
Brannklasse	REI120
Egenvekt	180 kg/m <sup>2</sup>

Tabell 4.1: Produktdata til Leca isoblokk 30cm [11]

## 4.2 Mørtel

Mørtelen er bindemiddelet som holder murverket sammen. Mørtelens egenskaper har betydning for murverkets evne til å ta opp laster og forskyvninger. Derfor er det viktig å velge rett mørtel slik at murverket får de rette egenskapene [16].

<b>Produktdata</b>	<b>Murmørtel M5</b>
Vannbehov	3.6 – 4.0 liter pr. 25kg
Bindemiddel	Sement og hydratalk
Tilslag	Natursand 0 – 2mm
Luftinnhold	14 - 20%
Trykkfasthet	> 5N/mm <sup>2</sup> (28 døgn)
Bøyestrekfasthet	> 2.2N/mm <sup>2</sup> (28 døgn)
Frostsikker	Ja
Brannklasse	A1 (NS-EN 13501-1)

Tabell 4.2: Produktdata til Leca isoblokk 30cm [11]

Mørtel til murkonstruksjoner leveres i normalt i seks klasser, M1, M2, M5, M10, M15 og M20. Disse klassene bestemmes av trykkfastheten til mørtelen etter 28 døgn med herding. M5 har en trykkfasthet på 5N/mm<sup>2</sup> og så videre. Mørtel består av sement, kalk, sand og spesielle tilsetningsstoffer. Disse stoffene blir tilsatt for å gi mørtelen spesielle egenskaper. I Norge tilsettes det stoffer for å gjøre frostmotstandsevnen til mørtelen bedre [16].

Det er viktig å bruke riktig mørtel til riktig type murverk. Mørtelen påvirker egenskapene til veggen i like stor grad som mursteinen. En vegg murt opp med stein som har høy trykkfasthet og mørtel med lav trykkfasthet vil ha tilnærmet de samme egenskapene som en vegg med en svakere stein og

sterkere mørtel. Ved valg av mørtel er det viktig at egenskapene til mørtelen passer overens med egenskapene til mursteinen. For å få god heft mellom murstein og mørtel må mørtelen tilpasses steinens sugeevne [17].

Mursteinen det er valgt å bruke i denne oppgaven er Leca isoblokk 30cm. Weber som er eierne av Leca produserer en egen tørrmørtel kalt Murmørtel M5 som er tilpasset til muring av Leca og teglstein med middels sug [18]. Produktdata til Murmørtel M5 som ble brukt til oppmuring av veggelementene er listet opp i tabell 4.2.

### 4.3 Armering

Ved bygging av bærende vegger i Leca må minimum hver andre mørtelfuge armeres [4, 6]. Typen armering som brukes bestemmes av hvilken type blokk det bygges med og hvilke laster veggen utsettes for.

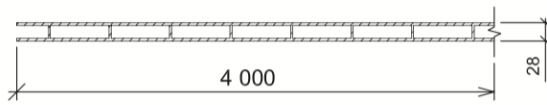
Armeringen som brukes i nesten alle tilfeller er Leca fugarmering, også er kalt stige-armering. Armeringen legges i hver mørtelfuge, noe som betyr at det legges en armeringsstige på både yttersiden og innersiden av Lecablokken. Formålet med stige-armeringen er å hindre rissdannelse grunnet bevegelser fra temperatur, kryp og svelling.

Ved bygging under terreng med Leca iso-blokk 30cm må det brukes Leca siksakk-armering i hver andre fuge. Dette er for å få fullt samvirke mellom vangene og dermed øke kapasiteten til grunnmuren, slik som beskrevet i rapporten til Mursenteret.

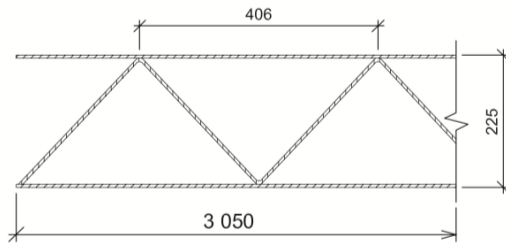
Egenskapene og utformingene til de to armeringstypene kan ses i figur 4.1 og tabell 4.3.

Produktdata	Leca fugearmering	Leca siksakk-armering
Stangdiameter	$2 \times 4mm$	$5mm$
$A_s$	$25mm^2$	$19.5mm^2$
$f_{yk}$	$690 N/mm^2$	$500N/mm^2$
Overflatebehandling	Rustfri	Epoxy

Tabell 4.3: Produktdata til Leca armering [19]



(a) Leca fugearmering



(b) Leca sikksakkarmering

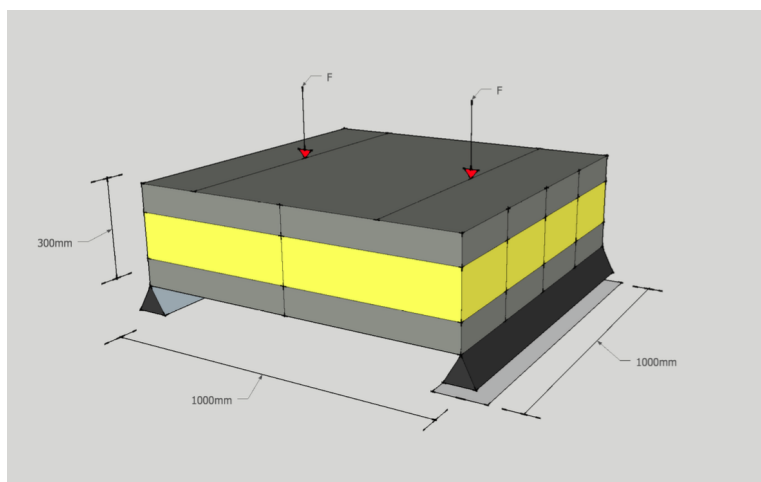
Figur 4.1: Mål på armeringstypene [19]

# Kapittel 5

## Laboratorieundersøkelse

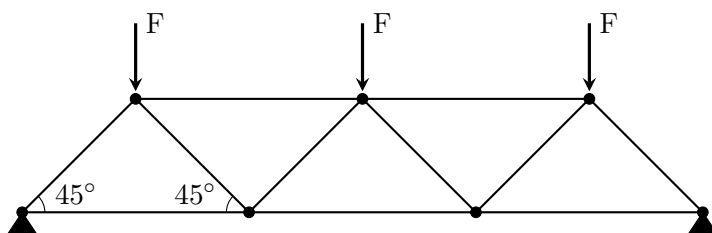
### 5.1 Forarbeider

Når det var bestemt at forsøkene som skulle utføres var bøyetesting av isolerte lettklinkerblokker i veggelementer måtte forsøket utarbeides. Etter samtaler med de ansatte på laboratoriet og med veileder ble det bestemt at det skulle utføres en firepunkts bøyetest som vist i figur 5.1. Forberedelsene til laboratorieundersøkelsene innebar også å finne ut hvor mye veggelementene måtte belastes før det ville oppstå brudd.



Figur 5.1: Skisse av laboratorieforsøket.

Den delen av veggelementene som tåler mest er sikksakksarmeringen. For å få en øvre grense på hvor mye et veggelement kan belastes med gjøres en



Figur 5.2: Forenklet modell brukt til beregning av maksimal belastning Leca-elementene kan motstå.

forenklet beregning på sikksakksarmeringen. Modellen for denne beregningen er vist i figur 5.2. Utregningen av fagverket i figur 5.2 viser at stavene med den største belastningen er utsatt for  $\frac{3}{2}F$ . Armeringen har en kapasitet på  $\sigma_u = 500N/mm^2$  og en diameter  $A_s = 20mm^2$  [6]. Dette gir følgende størrelse på  $F$ , se ligning 5.2.

$$\frac{3}{2}F = \sigma_u \cdot A_s \quad (5.1)$$

$$F = 2084N \quad (5.2)$$

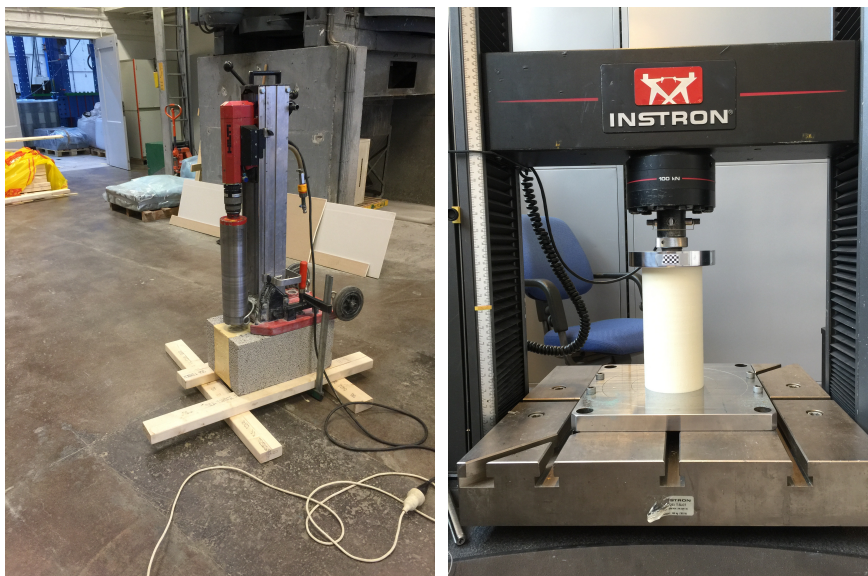
ligning 5.2 gir  $F = 2084N$  dette betyr at veggelementene tåler maksimalt  $3F = 6252N$  per fagverksarmering som blir murt inn. Den mest normale metoden for bygging av isolerte kjellervegger med Leca isblokk benytter fagverksarmering i hver andre fuge. Dette betyr at testriggeren må kunne generere minimum  $12504N$ .

## 5.2 Test av polyuretan

I forbindelse med denne oppgaven blir det gjort en FEM analyse av veggelementene og av en forenklet grunnmur bygget med isblokker. Det ble derfor utført tester på sylindere boret ut av isblokkene for å etablere E-modulen til polyuretanen som brukes som isolasjonsmateriale i Lecas isblokker.

### 5.2.1 Prøvestykkene

Polyuretanen ble testet ved at det ble boret ut sylindere fra isolasjonen i Leca blokkene, se figur 5.3 (a). Diameteren på de utborede sylindrene var  $104mm$ . Ved testing av E-modul på sylindere må høyden være minimum dobbelt så lang som diameteren. For å få riktig lengde og vinkelrette ender ble sylindrene kappet til en lengde på  $213mm$  på en kapp- og gjerdesag.



(a) Utboring av isolasjonssyllindere.

(b) Testing av isolasjonssyllindere.

Figur 5.3: Arbeidet med polyretansyllindrene.

### 5.2.2 Prosedyre

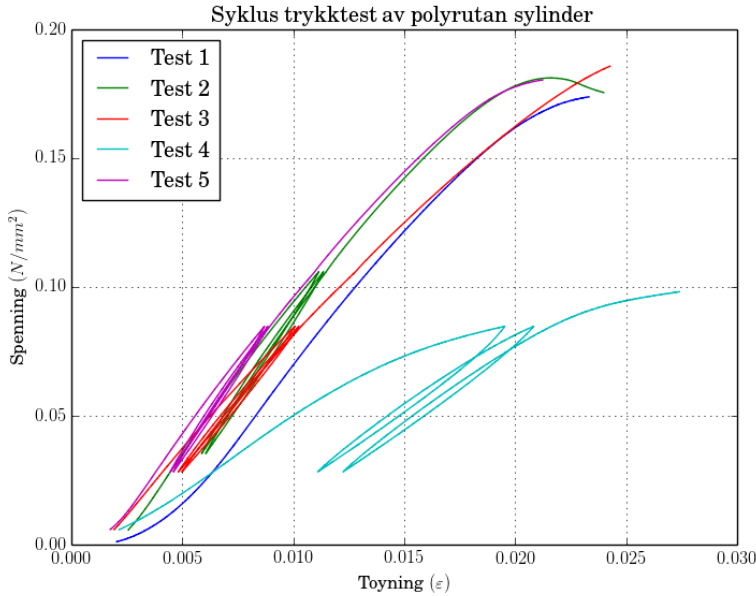
Det ble utført tester på fem prøvestykker i testmaskinen INSTRON, se figur 5.3 (b). Det ene prøvestykket ble brukt til å finne bruddstyrken til polyuretananen. De resterende fire prøvestykkene ble belastet med tre lastsykluser der belastningen varierte fra 20% til 60% av bruddlasten. Alle testene hadde en lastpåføringshastighet på  $0.25\text{mm}/\text{min}$ .

### 5.2.3 Resultater

figur 5.4 viser resultatene av alle testene i form av en spenning-/tøyningskurve. Test 1 ble utført for å etablere bruddlasten. Etter test 2 ble det mer uklart om bruddlasten var på  $1500\text{N}$ , så de resterende testene ble utført med antagelsen om at bruddlasten var på  $1200\text{N}$ .

Test 1 ble utført for å etablere bruddlasten og resultatet til test 4 er veldig avvikene fra de andre testene, så ved beregning av E-modulen er det kun Test 2, 3, og 5 som blir brukt.

Hooks lov kan ses i ligning 5.3. Dette er det lineære området, og det vil derfor være mulig å bruke topunktsformelen for å finne E-modulen, se ligning 5.4. Ved å bruke Hooks lov og topunktsformelen til å finne E-modulen vil



Figur 5.4: Spenning/tøyning kurver for polyrutansylindrene.

E-modulen være uttrykt som brøken i topunktsformlen.  $y_i$ -verdiene er kjente spenninger og  $x_i$ -verdiene er kjente tøyninger.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5.3)$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (5.4)$$

Det er dermed mulig og beregne E-modulen basert på resultatene vist i figur 5.4. Dette er gjort i tabell 5.1 med et gjennomsnittlig resultat på  $12.57N/mm^2$ .

Test	$y_2$	$y_1$	$x_2$	$x_1$	E-modul
Test 2	0.1053	0.0112	0.0348	0.0060	13.56
Test 3	0.0838	0.0278	0.0101	0.0049	10.78
Test 5	0.0839	0.0278	0.0088	0.0046	13.36
Gjennomsnitt					12.57

Tabell 5.1: Beregning av E-modul til polyuretan



## 5.2.4 Diskusjon

Av de fem testene som ble utført, var det kun en av dem som ga et betraktelig annerledes resultat. Det ble derfor valgt å ikke ta hensyn til denne testen når E-modulen til polyuretanen ble beregnet. Denne avgjørelsen anses som fornuftig siden prøvestykket hadde omtrent halvparten av kapasiteten som ble observert i resten av testene, og spredningen i resultatet under syklus lastene var også avvikende fra hverandre.

Av testene som ble brukt til beregningen av E-modulen, ga test 2 og 5 nesten det samme resultatet, mens test 3 hadde et avvik fra disse på 17%. Dette anses ikke som problematisk siden formålet med testen ikke er å bestemme materialegenskapene til polyuretanen, men å finne en E-modul som er bedre enn ren gjetning.

## 5.3 Test av veggelementer

Det ble lagd åtte veggelementer for testing. Fire av elementene ble murt med vanlig stigearming og de fire resterende elementene ble murt med sikksakkarming, se figur 5.5.

Forsøket som ble gjennomført var en firepunkts bøyetest. Målet var å teste samvirket mellom ytre og indre vange av veggelementet ved moment belastning. Elementene med stigearming skulle gi en kontroll for minimalt samvirke mellom vangene, mens elementene med sikksakkarming skulle testes for å se hvor mye samvirke sikksakkarmingen gir i forhold til stigearmingen.

### 5.3.1 Bygging av veggelementene

Hvert veggelement besto av åtte Lecablokker og målte  $1m \times 1m$ . Hvert element ble murt opp i fire skift i halvsteinsforband og armeringen ble plassert i den nederste og øverste mørtelfugen, se figur 5.5. Når veggene skulle herdes ble elementene pakket inn i plast og det ble lagt to mørtelsekker oppå det øverste skiftet på hver vegg. Veggene fikk herde, pakket inn i plast, i 36 dager før testingen startet, se figur 5.5 (d).

Hele oppmuringprosessen ble utført av murere som ble engasjert av Leca for å bistå i prosessen. All mørtelblanding, armering og steinkapping ble utført av disse murerne. Innpakkingen av veggene og herdeprosessen ble utført som anbefalt av dem. Alt dette ble gjort for at testene som ble utført skulle bli gjort på veggelementer som er tro mot de grunnmurene som blir bygget på reelle byggeplasser.



(a) Den ferdig kappede sikksakkarmeringen ble presset ned i mørtelen for å gi ordentlig heft.



(b) Den ferdig kappede stigearmeringen ble presset ned i mørtelen på hver vange for å gi ordentlig heft.

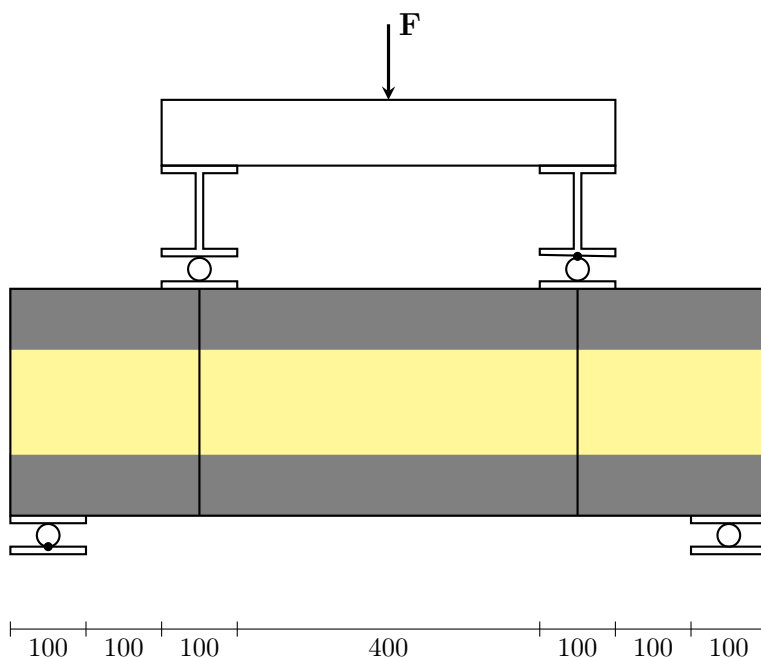


(c) Det ble bygget åtte veggelementer i halvsteinsforband.



(d) Veggelementene ble satt til herding pakket inn i plast og belastet med to sekker med mørtel.

Figur 5.5: Bygging av veggelementene.



Figur 5.6: Skisse av testoppsettet.

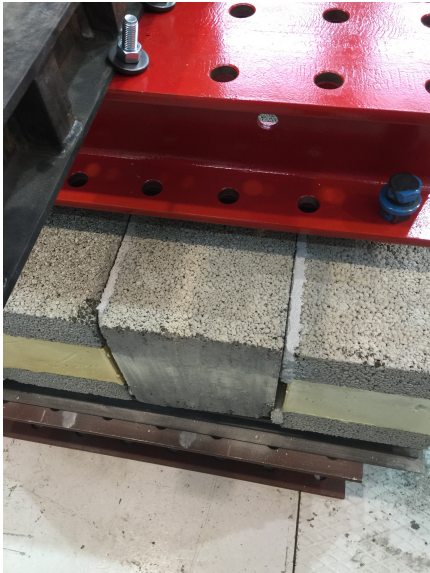
### 5.3.2 Oppsett av forsøket

Veggelementet ble lagt opp på et fastlager i den ene enden og et rullelager i den andre enden. Lasten ble påført med et stempel med en lastcelle der belastningen ble fordelt ut til to linjelaster ved hjelp av H-bjelker. Linjelastene ble påført via et fastlager og et rullelager. På alle belastningspunktene ble lasten fordelt ved hjelp av  $10\text{mm}$  tykke,  $100\text{mm}$  brede stålplater, se figur 5.6. Bilder av oppsettet kan også ses i figur 5.7.

### 5.3.3 Prosedyre

Etter at veggelementene hadde herdet i 36 dager ble bøyetestene utført. Elementene ble lagt som vist i figur 5.6 slik at linjelastene ble påført normalt på armeringen i veggelementene.

Veggelementene ble forbelastet med en kraft på  $1.5\text{kN}$  og de ble deretter påført last med en påføringshastighet på  $2\text{mm}/\text{min}$ . Pålastingen fortsatte til det var tydelig brudd i veggelementet eller at det var sikkert at maksimal kapasitet var nådd. Mens kraften ble påført ble last og deformasjon registrert hvert andre sekund.



(a) Ved ca.  $14kN$  oppstod det riss mellom mørtelen og blokken.



(b) Risset langs mørtelfugene og deformasjonen førte tidvis til at hele blokker falt ut.

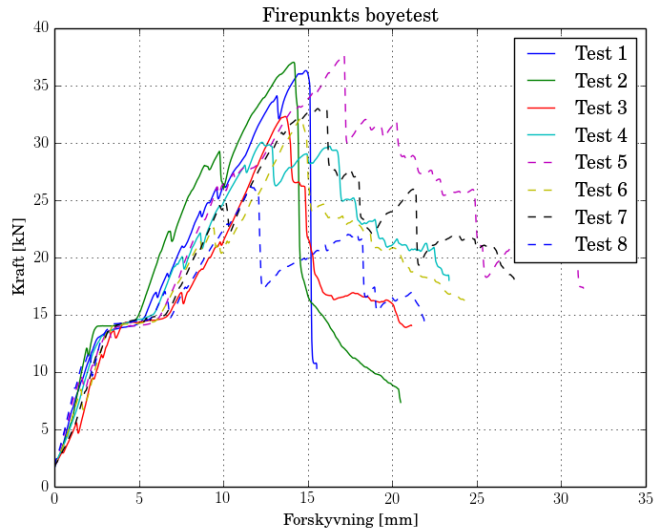


(c) Etter at rissene hadde oppstått ble det en omfordeling av spenninger som forårsaket brudd i strekkvangene.



(d) Ved videre belastning forplantet bruddet i strekkvangen seg gjennom isolasjonen over i trykkvangen.

Figur 5.7: Testing av veggelementene.



Figur 5.8: Kraft/forskyvning graf for laboratorieforsøkene. Hel linje for sikksakkarmering og stiptet linje for stigearmring.

### 5.3.4 Resultater

Alle elementene oppførte seg forholdsvis likt, uavhengig av hvilken type armering som ble brukt, se figur 5.8. Ved en belastning på ca.  $14kN$  slapp mørtelen i fugene, se figur 5.7 (a) og (b). Dette førte til en omfordeling av spenninger som senere førte til et brudd i nederste Lecavange. Dette bruddet forplantet seg gjennom isolasjonen og over i den øverste vangen ved videre belastning. Bruddet gjennom hele tverrsnittet førte til slutt til et brudd i veggelementet ved ca.  $30kN$ , se figur 5.7 (c) og (d).

Det kommer frem fra figur 5.8, men tydligere hvis en sammenligner figur 5.9 (a) og (b), at veggelementene med stigearmring motstår forskyvningene bedre, men har ikke den samme maksimale kapasiteten. Det virker også som det er mindre spredning i resultatene til elementene med sikksakkarmeringen.

### 5.3.5 Diskusjon

Det er usikkert i hvilken grad disse testene faktisk har målt bøyingskapasitet, men isteden målt skjærkapasitet. Dette er fordi forsøket er designet med basis i bjelketeori. Problemet med dette kan være at veggelementet er forholdsvis høyt og ikke spesielt langt, noe som gjør at bjelketeori ikke fungerer

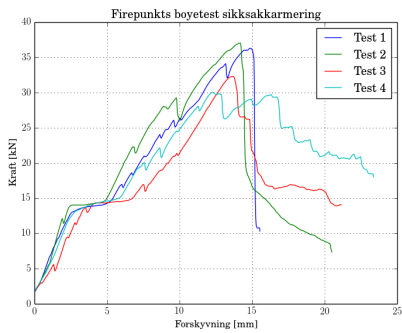
godt til å forklare oppførselen til veggelementene.

At det er skjærkapasiteten som måles er tvilsomt hvis Eurokode 6 legges til grunn. Da kapasiteten er på  $8.6kN$  for kun en vange, beregnet etter ligning 2.15, og veggelementet er utsatt for en skjærkraft på ca.  $7kN$  når bruddet oppstår.

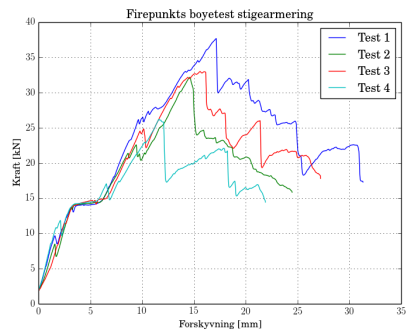
Hvis det ikke er skjærkapasiteten som blir målt i disse forsøkene, tyder det på at det ikke har noe å si hvilken type armering det er som blir brukt når det bygges vegger av Leca isoblokker. Denne antagelsen styrkes av figur 5.9 (c) og (d), der en kan se at standardavviket ligger oppå gjennomsnittet i deler av det lineære området.

På bakgrunn av disse forsøkene er det tydelig at det lineære området slutter ved en belastning på ca.  $14kN$  som tilsvarer et moment på  $1.75kNm$ . Bruddet oppstår ved en belastning på  $30kN$  som tilsvarer et moment på  $3.75kNm$ . Dette passer ikke overens med den dimensjonerende kapasiteten beregnet av NBI som var på  $6.7kNm$ . Kapasiteten beregnet av NBI er på bakgrunn av testing av Leca isoblokk  $250mm$  med en armeringstype som ikke brukes i dag. Resultatet passer bedre med resultatene til Mursenteret. Mursenteret kom frem til en kapasitet på  $3.7kNm$  for isoblokker armert med sikksakkarmoring.

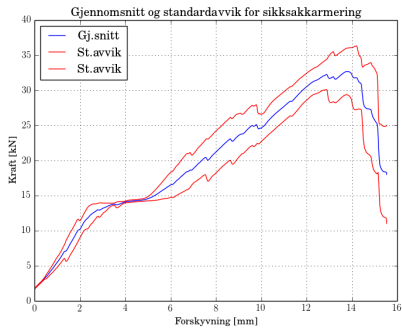
Begrunnelsen til NBI for at isoblokker skulle ha den samme kapasiteten som ordinære blokker ved korttidsbelastning, var at det er armeringen som stod for kapasiteten. Hvis det hadde vært tilfelle i disse forsøkene burde kapasitetsforskjellen mellom stige og sikksakkarmoringen vært større. Ved bruk av stigearmering er både armeringsarealet og strekkfastheten til armeringen større, noe som burde resultert i større kapasitet. Det er mulig at det samvirke som sikksakkarmoringen skal skape mellom vangene, veier opp for dette, og det er derfor kapasitetene til veggelementene er like.



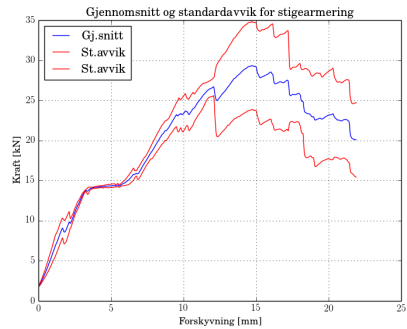
(a) Sikksakkarmering.



(b) Stigearmring.



(c) Sikksakkarmering, gjennomsnitt og standardavvik.



(d) Stigearmring, gjennomsnitt og standardavvik.

Figur 5.9: Kraft/forskyvnings-grafer.

# Kapittel 6

## Beregninger

Laboratorietestene indikerte at det ikke er noen reell forskjell på om det blir brukt sikksakk- eller stigearming i Lecavegger. Forklaringen på dette kan være at det er en svært liten del av tverrsnittet som er armering. I dette kapittelet blir det forsøkt å finne egenskaper til vegger bygget med isoblokker ved å bruke forskjellige beregningsmetoder og antagelser basert på forsøksresultatene.

Kreftene som virker på veggen samt skjærkreftene og momentene som veggen må dimensjoneres for kan ses i figur 6.1.

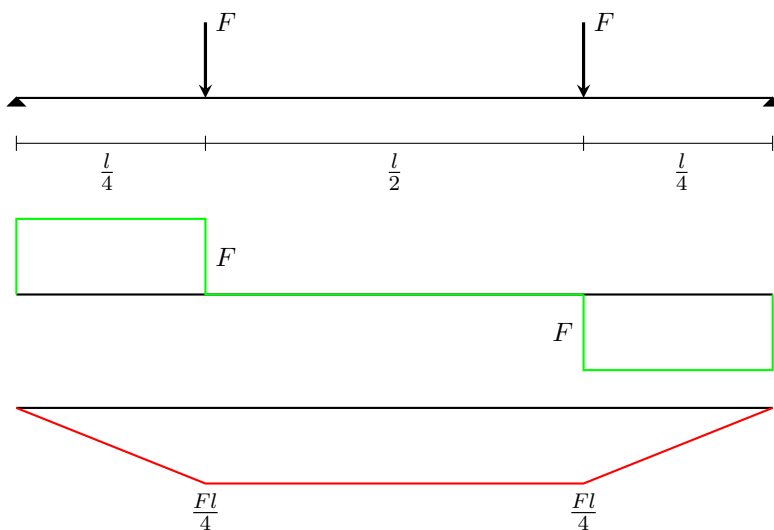
Fra forsøkene presentert i kapittel 5 er det to belastninger som er relevante i dette kapittelet.  $14kN$  er belastningen i slutten av det lineære området. Fra figur 6.1 kan en se at dette tilsvarer et moment på  $1.75kNm$ . Bruddlasten i forsøkene var på ca.  $30kN$  ved en nedbøyning på  $10mm$ , noe som tilsvarer et moment på  $3.75kNm$ . Det er disse to belastningene som vil bli brukt som basis for noen beregningene.

### 6.1 Det annet arealmoment ( $I$ )

En veldig konservativ antagelse for  $I$  er at det kun er den ene vangen som tar belastningen, en annen antagelse er at hele tverrsnittet tar belastningen. Mellom disse to antagelsene er det mulig å se på grad av samvirke mellom murvangene.

$$\begin{aligned} I_{full} &= \frac{bh^3}{12} \\ &= \frac{1000 \cdot 300^3}{12} \\ I_{full} &= 2\,250\,000\,000mm^4 \end{aligned} \tag{6.1}$$





Figur 6.1: Skjær- og momentdiagram for forsøkene.

$$\begin{aligned}
 I_{vange} &= \frac{bh^3}{12} \\
 &= \frac{1000 \cdot 82^3}{12} \\
 I_{vange} &= 45\,947\,333\text{mm}^4
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

$$\begin{aligned}
 I_1 = I_2 &= \frac{bh^3}{12} + r^2A \\
 &= \frac{1000 \cdot 82^3}{12} + 109^2 \cdot 1000 \cdot 82 \\
 I_1 = I_2 &= 1\,020\,189\,333\text{mm}^4 \\
 I_{sam} &= 2\,040\,378\,667\text{mm}^4
 \end{aligned}
 \tag{6.3}$$

Ligning 6.1, 6.2 og 6.3 gir tre forskjellige verdier som kan brukes for  $I$ . Verdien for  $I$  i ligning 6.2 vil være for konservativ, men de andre formlene vil gi et for stift resultat. Den korrekte verdien for  $I$  vil ligge et sted mellom verdiene i ligning 6.2 og 6.3.

$$W = \frac{2I}{h}
 \tag{6.4}$$

Ved beregning av momentkapasiteten ( $M_{Rd}$ ) brukes motstandsmomentet ( $W$ ), som sett i ligning 6.4, sammen med kapasiteten til murverket ( $f_{ck}$ ). For mørtelen og Lecablokkene som er brukt er  $f_{ck} = 0.5\text{N/mm}^2$ .

Så avhengig av hvilken antagelser en gjør for  $I$  får veggen forskjellig momentkapasitet:

$$M_{Rd} = W_{full} f_{ck} = 7.5\text{kNm} \quad (6.5)$$

$$M_{Rd} = W_{vange} f_{ck} = 0.56\text{kNm} \quad (6.6)$$

$$M_{Rd} = W_{sam} f_{ck} = 6.8\text{kNm} \quad (6.7)$$

I ligning 6.7 ble høyden til hele tverrsnittet brukt ved beregningen av  $W$ .

På bakgrunn av den målte kraften og formlene som brukes til å bestemme momentkapasiteten er det mulig å regne seg bakover til en verdi for motstandsmomentet og dermed også  $I$ .

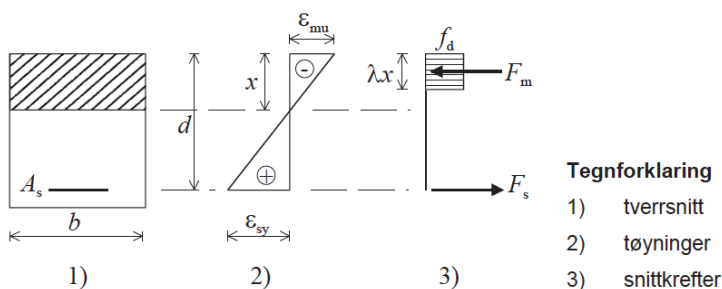
$$\begin{aligned} M_{Ed} &= 1.75\text{kNm} \\ M_{Rd} &= W f_{ck} \geq M_{Ed} \\ W &= \frac{M_{Ed}}{f_{ck}} = 3\,500\,000\text{mm}^3 \\ h &= 145\text{mm} \\ I &= 254\,052\,083\text{mm}^4 \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} M_{Ed} &= 3.75\text{kNm} \\ M_{Rd} &= W f_{ck} \geq M_{Ed} \\ W &= \frac{M_{Ed}}{f_{ck}} = 7\,500\,000\text{mm}^3 \\ h &= 212\text{mm} \\ I &= 795\,495\,129\text{mm}^4 \end{aligned} \quad (6.9)$$

Beregningen i ligning 6.9 indikerer et samvirke på 51%, etter Mursenterets definisjon.

## 6.2 Armert tverrsnitt

Når forsøkene ble gjort var det to versjoner av armeringen. Sikksakkarmering som blir lagt inn for å binde vengene sammen og stigearmering som kun



**Tegnforklaring**  
 1) tverrsnitt  
 2) tøyninger  
 3) snittkrefter

Figur 6.2: Kraftfordelingen i et armert murtersnitt [7].

armerte hver vange for seg. Når Lecatverrsnittet har et areal på  $82000\text{mm}^2$  er ikke armeringsstålets bidrag på mellom  $40 - 50\text{mm}^2$  avgjørende. I figur 6.2 kraftfordelingen som antas ved beregningen av kapasiteten til en armert murbjelke.

Beregningene i formlene under bruker sikksakkarmeringen til definisjonen av armeringsegenskapene. Dette gir et armeringsareal på  $40\text{mm}^2$  og  $f_{yd} = 434\text{N/mm}^2$ . Når murtersnittet beregnes med armering brukes  $b$  isteden for  $h$ .  $b$  er avstanden mellom toppen av tverrsnittet og tyngdepunktet til armeringen.

$$\begin{aligned}
 M_{Rd} &= A_s f_{yd} z \\
 z &= d \left( 1 - \frac{0.5 A_s f_{yd}}{b d f_{ck}} \right) \\
 z &= 246.46 \\
 M_{Rd} &= 4.6 \text{ kNm}
 \end{aligned}
 \tag{6.10}$$

Forskjellen på ligning 6.10 og 6.11 er om det er antatt samvirke eller ikke mellom vangene. Dette samvirke representeres i ligningen som lengden på  $d$ . For ligning 6.10 er det antatt fullt samvirke, og  $d$  er derfor avstanden ned til armeringen i strekkvangen. I ligning 6.11 er det ikke noe samvirke, og  $d$  er kun avstanden til armeringen i den øverste vangen.

$$\begin{aligned}
 M_{Rd} &= A_s f_{yd} z \\
 z &= d \left( 1 - \frac{0.5 A_s f_{yd}}{b d f_{ck}} \right) \\
 z &= 20.14 \\
 M_{Rd} &= 0.349 \text{ kNm}
 \end{aligned}
 \tag{6.11}$$

Hadde stigearmering blitt brukt isteden for sikksakkarmering hadde både  $A_s$  og  $f_{yd}$  blitt større og dermed også kapasiteten.

Brukes ligning 6.10 og 6.11 som kapasiteter ved samvirke beregningene vil veggelementene fra forsøkene få et samvirke på 80%.

### 6.3 $E$ og $I$ fra nedbøyning

En annen metode å beregne de ukjente faktorene i tverrsnittet er å bruke ligningen for nedbøyning basert på bjelketeori. Formlen for nedbøyning midt på bjelken i figur 6.1 er vist i ligning 6.12. Ved å anta en verdi for enten  $E$  eller  $I$  er det mulig å regne ut den andre verdien på bakgrunn av nedbøyningen funnet i forsøkene. Nedbøyningen i slutten av det lineære området er  $3mm$  som et resultat av en belastning på  $14kN$ .

$$\begin{aligned}\delta_{max} &= \frac{Fa}{24EI}(3l^2 - 4a^2) \\ a &= \frac{l}{4} \\ \delta_{max} &= \frac{11}{384} \frac{Fl^3}{EI}\end{aligned}\tag{6.12}$$

Hvis det er fullt samvirke mellom vangene og verdien for  $I$  fra ligning 6.3 blir brukt vil  $E$  for hele tverrsnittet være  $327.6N/mm^2$

En bedre måte å beregne  $E$  kan være å bruke verdien for  $I$  som ble funnet i ligning 6.8. I denne ligningen er  $I$  blitt beregnet på bakgrunn av kapasiteten. Ved bruk av ligning 6.12 blir verdien til  $E$  dermed  $263N/mm^2$ .

En bedre innfallsvinkel kan være å bruke Eurokodens  $E$ -verdi for is-oblokker. Ved å bruke maksimal nedbøyning fra det lineære området vil  $I = 19\,097\,222mm^4$  som tilsvarer en samvirke grad på 0%. Dette er fordi  $I < I_{vanke}$  som er basisen for 0% samvirke.

### 6.4 Kapasitet for vertikalbelastning

Som beskrevet i kapittel 2.3 dimensjoneres murvegger med hovedsakelig vertikalbelastning ved å redusere kapasiteten ved å bruke eksentrisiteter. Disse eksentrisitetene kommer fra momenter, lastplasseringer og horisontalbelastninger.

I kapittel 2.4.2 blir belastningen i toppen av en kjellervegg beregnet til  $16kN/m$ . Siden dette er i toppen av veggen kan egenvekten brukes til å finne belastningen på  $20.4kN/m$  i bunn av veggen. Denne belastningen brukes for hele veggen for å være konservativ. Det vil da være interessant å se hvor

stor horisontalbelastningen kan være før veggen ikke har kapasitet til å ta vertikalbelastningen.

For å være konservativ antas det at  $\rho = 1.0$  slik at  $h_{ef} = 2.5$ . Dette har noe å si for om veggen er slank eller ikke og om det må tas hensyn til knekking. En murvegg bør ikke ha en slankhet  $\lambda = h_{ef}/t_{ef} \leq 27$ .  $t_{ef}$  beregnes som vist i ligning 2.1, som gir  $t_{ef} = 103\text{mm}$ . Dette gir  $\lambda = 24.7$  som er innenfor grensen.

For beregning av kapasiteten av veggen brukes ligning 2.4:  $N_{Ed} < N_{Rd} = \Phi t f_d$ . Dette betyr at følgende grense kan beregnes for  $\Phi$ :

$$\Phi > \frac{N_{Ed}}{t f_d} = \frac{20.4\text{N/mm}}{82\text{mm} \cdot 3.16\text{N/mm}^2} = 0.08 \quad (6.13)$$

Siden det ble antatt at  $h_{ef} = h$  er veggen fritt opplagt, og av den grunn er det få muligheter til å øke eksentrisiteten i topp og bunn av veggen. Moment fra horisontallasten beregnes som en fritt opplagt bjelke og blir derfor stort.

Ligningen for beregning av  $\Phi$  i topp og bunn av veggen er som følger:

$$\Phi_i = 1 - 2 \frac{e_i}{t} \quad (6.14)$$

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} + e_{init} \geq 0.05 t \quad (6.15)$$

Med en fritt opplagt vegg og antagelsen at det ses bort fra eksentriske belastninger blir  $\Phi_i$  som vist i ligning 6.16.

$$\begin{aligned} e_i &= 0 + 0 + 5.56 \geq 5.15 \\ \Phi_i &= 1 - 2 \frac{5.56}{82} = 0.86 \end{aligned} \quad (6.16)$$

Resultatet fra ligning 6.16 på  $0.89 > 0.08$  betyr at kapasiteten i både topp og bunn av veggen ikke påvirkes av jordtrykket med de antagelsene som er gjort.

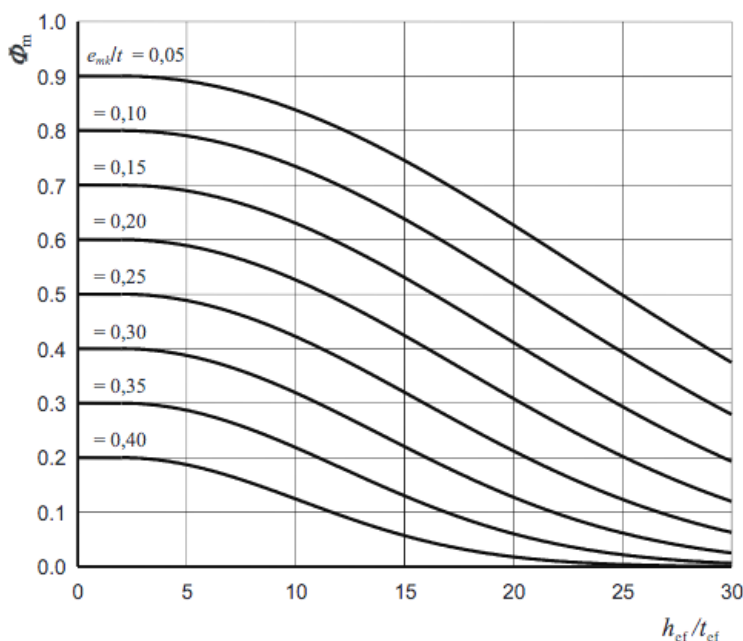
For å beregne  $\Phi$  for midten av veggen ( $\Phi_m$ ) må følgende formler benyttes:

$$e_{mk} = e_m + e_k \geq 0.05 t \quad (6.17)$$

$$e_m = \frac{M_{md}}{N_{md}} + e_{hm} + e_{init} \quad (6.18)$$

$$e_k = 0.001 \frac{h_{ef}}{t_{ef}} \sqrt{t e_m} \quad (6.19)$$

Siden  $\Phi_m$  er kjent, og det er maksimalt tillat moment som skal finnes, er det  $e_{mk}$  som er interessant. Ved å bruke E-modulen som Kvande fant for Leca,



Figur 6.3: Verdier for  $\Phi_m$  i forhold til slankhet for forskjellige eksentrisiteter når  $E = 1000f_k$  [7].

og trykkfastheten fra tabell 4.1, kan figur 6.3 brukes til å finne  $e_{mk} = 24.6$ . Ved å sette inn kjente verdier i ligning 6.17 - 6.19 får vi:

$$e_{mk} = e_m + 0.024\sqrt{82 e_m}$$

$$e_m = 23.5 \quad (6.20)$$

I Eurokode 6 er  $e_{init} = h_{ef}/450 = 5.56mm$ . Det er dermed mulig å anta null eksentrisiteten i topp og bunn av veggen for å gjøre  $M_{md} = 0$ . Ved å sette inn i ligning 6.18 fås det følgende uttrykket:

$$23.5 = 0 + \frac{M_{md}}{20.4} + 5.56$$

$$M_{md} = 0.37kNm \quad (6.21)$$

Ved å ikke være fullt så konservativ, og anta at veggen er fastinnspent i topp og bunn blir  $\rho = 0.75$  og  $h_{ef} = 1875mm$ . Dette fører til et redusert moment i midten av veggen, og momenter i topp og bunn. Momentet i midten av veggen blir  $\frac{ql^2}{12}$ , mens momentet i topp og bunn blir  $\frac{ql^2}{24}$ . Selv med større eksentrisitet i topp og bunn av veggen vil det være midten av veggen som

er dimensjonerende. Den nye effektive høyden gir  $\lambda = 18.2$  som fører til at  $e_{mk} = 28.7$  som deretter gir et momment på  $M_{md} = 0.47kNm$

Ved bruk av ligning 6.14 og 6.15 er det mulig og beregne momentet som gir veggen for lite kapasitet i topp og bunn.

$$\begin{aligned} 0.08 &= 1 - 2\frac{e_i}{82} \\ e_i &= 75.44 \\ 75.44 &= 0 + \frac{M_{id}}{20.4} + 5.56 \\ M_{id} &= 1.4kNm \end{aligned} \tag{6.22}$$

Alle beregningene som er gjennomført i dette kapitlet er gjort uten eksentrisk last påføring. En slik belastning kunne både gjort nødvendig horisontalbelastning større eller mindre. Dette har ikke noe å si fra eller til siden momentbelastningen som veggen er utsatt for er på et sted mellom  $1.4kNm$  og  $6.3kNm$  (fra tabell 2.2 og 2.3), og maksimalt tillatt moment fra formlene i dette kapitlet er på  $1.4kNm$ .

## 6.5 Diskusjon

Avhengig av hvilke antagelser som gjøres varierer momentkapasiteten til veggelementet mellom  $0.349kNm$  og  $7.5kNm$ . Veggelementet i forsøkene hadde en bruddstyrke på ca.  $3.75kNm$ . Ligningen som passer best til dette resultatet, er 6.10 som antar fulltsamvirke gjennom polyuretanen. Dette er den samme kapasiteten som Mursenteret kom frem til. Med belastninger som varierer mellom  $0.9kNm$  og  $6.3kNm$ , se tabell 2.2 og 2.3, er kapasiteten generelt god nok til å få jordtrykksbelastning fra Leca lettklinker, men ikke sand/grus.

Beregningene kan også brukes til å få et inntrykk av graden av samvirke mellom vangene. Ved brudd på prøvestykkene hadde vangene et samvirke på 70% basert på beregningene i ligning 6.8. Brukes derimot ligningen for nedbøyning til å beregne  $I$  er det et samvirke på 6%. Forskjellen i disse resultatene kommer av at ligning 6.12 tar hensyn til stivheten til materialet, mens ligning 6.10 tar hensyn til fastheten.

Ved bruk av beregningene for vertikalkapasitet var maksimalt tillatt moment  $1.4kNm$ . Disse beregningene baserer seg på kapasiteten til den ytre vangen som får redusert slankhet grunnet samvirke med den indre. Det er ikke denne måten en Leca isoblokk er bygget på. Lasten er fordelt på begge vangene i Lecakonstruksjoner. Dette kan øke kapasiteten, men dette vil

hindre den indre vangens mulighed til å redusere slankheten til veggen. Dette vil totalt sett ikke gjøre en stor endring i kapasiteten.



# Kapittel 7

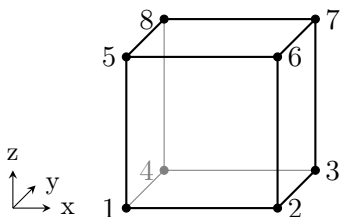
## Lineær elastisk analyse

Dette kapitlet tar for seg verifisering av elementet som er brukt i DIANA analysen. Kapitlet omhandler også de numeriske modellene som ble utarbeidet for å simulere forsøkene, og en grunnmur belastet med jordtrykk. Alt arbeidet er utført i DIANA kort for DISplacement ANAlyse et program gitt ut av TNO.

### 7.1 Verifisering av element HX24L

Før arbeidet med numeriske analyser av laboratorieundersøkelsene starter gjøres en verifisering av elementet brukt i analyseprogrammet DIANA. Dette er for å kontrollere at DIANA får de resultatene som er forventet.

#### 7.1.1 Beskrivelse av element og egenskaper



Figur 7.1: Elementet brukt i beregningene

Elementet i figur 7.1 er et tredimensjonalt element med tre frihetsgrader i hver node, en i hver retning. I DIANA kalles dette elementet HX24L [20]. HX brukes siden elementet er et heksaeder, og 24 siden elementet har totalt 24 frihetsgrader.

For å gjøre beregningen av dette elementet lettere plasseres node 1 i pkt.  $(0, 0, 0)$  og alle sider settes til  $2m$ . Nodene vil også fastholdes i alle retninger med unntak av node 5, 6, 7 og 8 som vil være frie til å bevege seg i z-retning.

Belastningen som blir påført elementet i figur 7.1 er en jevnt fordelt last på flaten som omkranses av node 5, 6, 7 og 8, denne lasten har en størrelse på  $-1Pa$  i z-retning.

$\nu$  settes lik 0 og  $E = 1Pa$ . Dette gir følgende **C**-matrise [21]:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

### 7.1.2 Naturlige koordinater

Bevegelsesmatrisen **N** lages i naturlige koordinater for å gjøre integreringen og utregningene lettere. Dette koordinatsystemet har retningene  $\xi$ -,  $\eta$ -, og  $\zeta$ -retning. Senteret av dette koordinatsystemet er i senteret av elementet, slik at for eksempel node 1 har koordinatene  $(-1, -1, -1)$  mens node 7 har koordinatene  $(1, 1, 1)$ .

Ved å bruke de naturlige koordinatene får vi følgende bevegelsesmatrise.

$$N^T = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \\ (1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \\ (1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta) \\ (1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta) \\ (1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta) \\ (1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \zeta) \\ (1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta) \\ (1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta) \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Siden vi har bevegelse i tre dimensjoner blir bevegelsesmatrisen en  $3 \times 24$ -matrise som er vist i neste ligning 7.3.

$$\mathbf{N} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & \cdots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \cdots & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \cdots & N_8 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

### 7.1.3 B - matrise

For å finne stivhetsmatrisen ved hjelp av prinsippet for virtuell forskyvning må en først finne  $\mathbf{B}$  - matrisen.

$$\mathbf{B} = \mathbf{\Delta N} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \eta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} & \frac{\partial}{\partial \xi} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \zeta} & \frac{\partial}{\partial \eta} \\ \frac{\partial}{\partial \zeta} & 0 & \frac{\partial}{\partial \xi} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{8} \begin{bmatrix} N_1 & 0 & \cdots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \cdots & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & \cdots & N_8 \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Denne ligningen gir oss følgende  $\mathbf{B}$  - matrise:

$$\mathbf{B} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} -(1-\eta)(1-\zeta) & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & -(1-\xi)(1-\zeta) & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & -(1-\xi)(1-\eta) & \cdots \\ -(1-\xi)(1-\zeta) & -(1-\eta)(1-\zeta) & 0 & \cdots \\ 0 & -(1-\xi)(1-\eta) & -(1-\xi)(1-\zeta) & \cdots \\ -(1-\xi)(1-\eta) & 0 & -(1-\eta)(1-\zeta) & \cdots \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

### 7.1.4 Jacobian

I normaliseringen av elementet brukes Jacobianen til å mappe det originale elementet til det normaliserte elementet. Jacobianmatrisen er som følger:

$$\mathbf{J} = \sum_{i=1}^8 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} y_i & \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} z_i \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

Siden dimensjonene på det originale og det naturlige elementet er like vil Jacobianmatrisen være som følger:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

Med Jacobianmatrisen kan Jacobianen regnes ut, dette er determinanten til Jacobianmatrisen.

$$J = J_{11}(J_{22}J_{33} - J_{23}J_{32}) - J_{12}(J_{21}J_{33} - J_{23}J_{31}) + J_{13}(J_{21}J_{32} - J_{23}J_{31}) \quad (7.8)$$

Ligning 7.8 tilsier at Jacobianen skal være  $J = 1$ .

### 7.1.5 Virtuell forskyvning

En måte å formulere elementmetoden på er ved bruk av prinsippet for virtuell forskyvning. Ved bruk av dette prinsippet kan ligning 7.11 utledes med bakgrunn i ligning 7.9 og 7.10.

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\mathbf{v} \quad (7.9)$$

$\mathbf{u}$  er en vektor som inneholder forskyvningskomponentene, mens  $\mathbf{N}$  inneholder formfunksjonene og  $\mathbf{v}$  nodenes forskyvning [21].

$$\varepsilon = \Delta\mathbf{u} = \Delta\mathbf{N}\mathbf{v} = \Delta\mathbf{N}\mathbf{v} = \mathbf{B}\mathbf{v} \quad (7.10)$$

$$\mathbf{S} = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dV \mathbf{v} - \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \varepsilon_0 dV - \int_{V_e} \mathbf{N}^T \mathbf{F} dV + \int_{S_T} \mathbf{N}^T \Phi dS \quad (7.11)$$

Ligning 7.11 kan forkortes ved å skrives på følgende måte:

$$\mathbf{S} = \mathbf{k}\mathbf{v} + \mathbf{S}^0 \quad (7.12)$$

Der ligningen for stivhetsmatrisen er:

$$\mathbf{k} = \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dV \quad (7.13)$$

Og de fordelte lastene uttrykkes ved:

$$\mathbf{S}^0 = \mathbf{S}_{\varepsilon_0}^0 + \mathbf{S}_F^0 + \mathbf{S}_{\Phi}^0 \quad (7.14)$$

der  $\mathbf{S}_{\varepsilon_0}^0$  er krefter fra initielle tøyninger,  $\mathbf{S}_F^0$  er volumkrefter og  $\mathbf{S}_{\Phi}^0$  er overflatekrefter. Disse kreftene kan uttrykkes:

$$\mathbf{S}_{\varepsilon_0}^0 = - \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \varepsilon_0 dV \quad (7.15a)$$

$$\mathbf{S}_F^0 = - \int_{V_e} \mathbf{N}^T \mathbf{F} dV \quad (7.15b)$$

$$\mathbf{S}_{\Phi}^0 = - \int_{S_T} \mathbf{N}^T \Phi dS \quad (7.15c)$$

Dette gir følgende ligning:

$$\mathbf{S} = \mathbf{k}\mathbf{v} + \mathbf{S}^0 \quad (7.16)$$

## Stivhetsmatrise

Både kreftene som påvirker elementet og hvilke noder som kan bevege seg er kjent. Det som må finnes er sammenhengen mellom bevegelser og krefter. Dette samvirket er stivhetsmatrisen. Med overgangen fra ordinære til naturlige koordinater vil integralet fra ligning 7.13 lyde:

$$\mathbf{k} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} J d\xi d\eta d\zeta \quad (7.17)$$

### 7.1.6 Løsning

Siden elementet som skal løses bare har fire frihetsgrader som kan forskyves blir ligningssettet som skal løses lettere. Ligningssettet går fra å ha 24 ligninger med 24 ukjente til å ha fire ligninger med fire ukjente. Dette betyr at det kun er nødvendig å beregne en  $4 \times 4$   $\mathbf{k}$ -matrise. Det blir dermed lettere å bruke ligning 7.17 til å multiplisere sammen og integrere de aktuelle delene av  $\mathbf{B}$ -matrisen. De aktuelle delene av  $\mathbf{B}$ -matrisen er rad 15, 18, 21 og 24, disse representerer forskyvninger i z-retning for henholdsvis node 5, 6, 7 og 8.

Ved beregningene kan det ses bort fra kolonne 1 og 2 i  $\mathbf{B}$ -matrisen siden disse vil bli null for de aktuelle radene. Matrisen som da skal brukes i integralet for å finne  $\mathbf{k}$  er vist i ligning 7.18.

$$\mathbf{B}^T = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} (1-\xi)(1-\eta) & 0 & -(1-\xi)(1+\zeta) & -(1-\eta)(1+\zeta) \\ (1+\xi)(1-\eta) & 0 & -(1+\xi)(1+\zeta) & (1-\eta)(1+\zeta) \\ (1+\xi)(1+\eta) & 0 & (1+\xi)(1+\zeta) & (1+\eta)(1+\zeta) \\ (1-\xi)(1+\eta) & 0 & (1-\xi)(1+\zeta) & -(1+\eta)(1+\zeta) \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

### Numerisk integrasjon

Ved integrasjon av ligning 7.17 er det enkelt å bruke den numeriske integrasjonsmetoden til Gauss, se ligning 7.19.

$$I = \int_{-1}^1 g(\xi) d\xi \approx \sum_{k=1}^n w_k g(\xi_k) \quad (7.19)$$

Fordelen ved å bruke Gaussintegrasjon ved numerisk integrering er at løsningen vil være presis hvis antall integrasjonspunkter ( $n$ ) =  $2p - 1$  der  $p$  er polynomets grad [21]. Ved integrasjonen av ligning 7.17 vil det største polynom bli et andregradspolynom, og det vil dermed bli nødvendig med to integrasjonspunkter. Det gir oss følgende verdier som settes inn i ligning 7.19:  $\xi_k = \pm 1/\sqrt{3}$  og  $w_k = 1.0$ .

Gaussintegrasjon av ligning 7.17 fører til  $\mathbf{k}$ -matrisen i ligning 7.20.

$$\mathbf{k} = \frac{1}{128} \begin{bmatrix} \frac{512}{9} & \frac{64}{9} & -\frac{64}{9} & \frac{64}{9} \\ \frac{64}{9} & \frac{512}{9} & \frac{64}{9} & -\frac{64}{9} \\ -\frac{64}{9} & \frac{64}{9} & \frac{512}{9} & \frac{64}{9} \\ \frac{64}{9} & -\frac{64}{9} & \frac{64}{9} & \frac{512}{9} \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

### 7.1.7 Resultat

For å finne forskyvningene til node 5, 6, 7 og 8 må ligning 7.16 endres til følgende uttrykk:

$$\mathbf{v} = \mathbf{k}^{-1}(\mathbf{S} - \mathbf{S}^0) \quad (7.21)$$

Siden det ikke er noen krefter som virker direkte i nodene blir  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$ , men med en jevnt fordelt last blir  $\mathbf{S}^0$ :

$$\mathbf{S}^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

Den inverterte stivhetsmatrisen blir seende slik ut:

$$\mathbf{k}^{-1} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 6 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 6 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 6 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 6 \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

Løsningen for  $\mathbf{v}$  blir dermed:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} -2 \\ -2 \\ -2 \\ -2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{z5} \\ v_{z6} \\ v_{z7} \\ v_{z8} \end{bmatrix} \quad (7.24)$$

### 7.1.8 Løsning i iDIANA

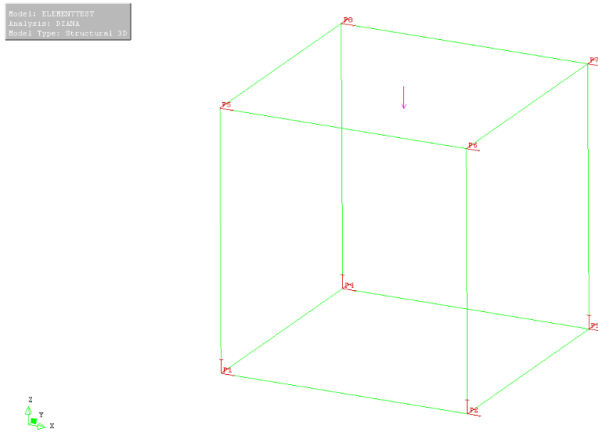
Ved å lage den samme figuren i DIANA, bruke det samme elementet og den samme belastningen får en muligheten til å bekrefte at utregning på papir og med beregningsprogram gir det samme resultatet.

## Modellen

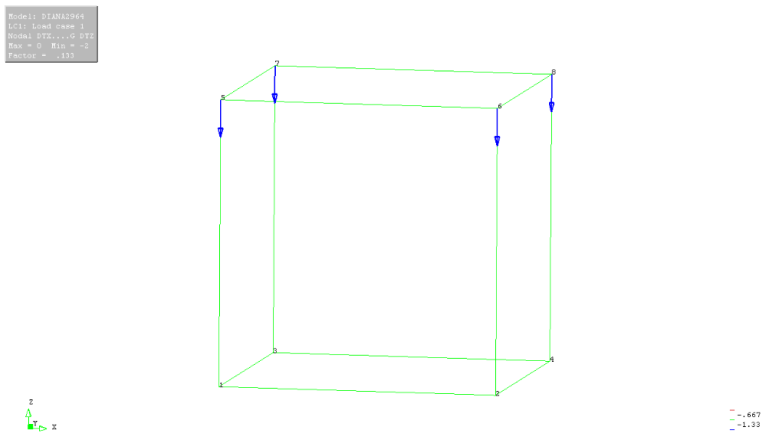
Modellen som ble laget i DIANA er identisk elementet i figur 7.1. Dette kommer godt frem på figur 7.2 der det er mulig å se nodene, belastningen og opplagrene. Den lilla pila representerer en belastning på  $1Pa$ .

## Resultat

figur 7.3 viser resultatet fra utregningen i DIANA. Som det kommer frem fra figuren er det en forskyvning i z-retning på  $-2$ . Dette er det samme resultatet som ble funnet med beregningene som ble gjort manuelt og som vises i ligning 7.24.

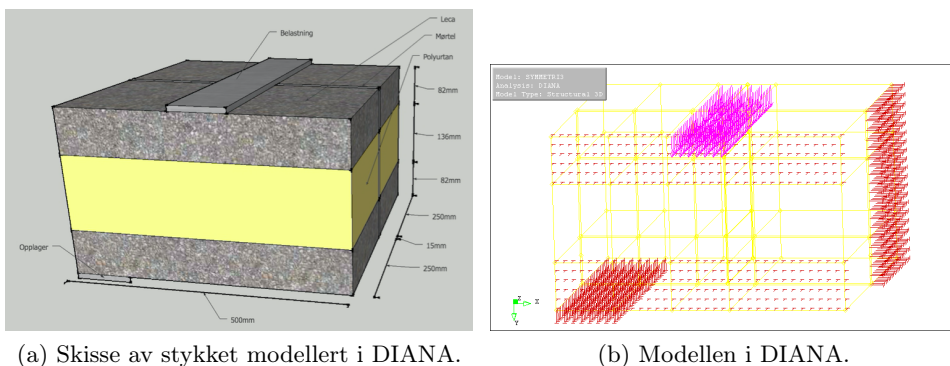


Figur 7.2: Modellen brukt i DIANA, en kube som består av ett HX24L-element.



Figur 7.3: Resultatet fra beregningen i DIANA.





Figur 7.4: Geometrien til veggelementet i DIANA.

## 7.2 Analyse av veggelement

Veggelementene som ble testet hadde dobbelt symmetri og det var derfor kun nødvendig modellere en fjerdedel av veggelementet i DIANA. På samme vis som ved laboratorietestene ble det laget to forskjellige veggelementer, ett med sikksakkarmring og ett med stigearmring.

### 7.2.1 Hensikt

Hensikten med å utføre en lineær elastisk analyse av veggelementene er å se om det er mulig å modellere en isoblokkvegg i DIANA og få korrekte resultater. Med en modell i DANA vil det også være enkelt å se hvilke antagelser som kan gjøres om  $E$ -modulene til veggelementet og fortsatt få riktig nedbøyning.

Erfaringen som gjøres ved analyseringen av disse modellene kan brukes videre ved modelleringen av grunnmuren.

### 7.2.2 Geometri

Grunnet den doble symmetrien var det kun nødvendig å modellere en fjerdedel av veggelementet. Delen som ble modellert var den øvre venstre delen av veggelementet, sett i figur 5.1. Delen av veggelementet måler da totalt  $515\text{mm}$  dypt,  $300\text{mm}$  høyt og  $500\text{mm}$  bredt, som vist i figur 7.4.

Som det er mulig å se fra figur 7.4 er modellen fastholdt mot forskyvning i  $y$ -retning langs en  $100\text{mm}$  bred stripe i bunn av modellen og mot forskyvning i  $z$ -retning langs mørtelfugene. Modellen er også fastholdt mot forskyvning i  $x$ -retning langs flaten til steinen som ble kuttet. Lasten er på  $250\text{N}$  og er jevnt fordelt over en  $100\text{mm}$  bred flate på toppen av modellen. Ved å bruke

en belastning på  $250N$  på en fjerdedel av belastningsområdet er det enkelt å skalere opp belastningen hvis det antas at det er innenfor det lineærelastiske området.

For å representere veggelementene fra prøvene ordentlig er det ikke noe samvirke mellom koppflatene på Lecasteinene. Det er derfor det ikke er noen randbetingelser på den ene steinen og en skjøt under lasten. Området mellom mørtelfugene er det modellert ingenting eller tilnærmet luft ved å gi elementene en lav E-modul.

### 7.2.3 Materialer

Ved gjennomkjøringen av modellen i DIANA har det blitt brukt flere typer materialer, verdiene kan finnes i tabell 7.1.

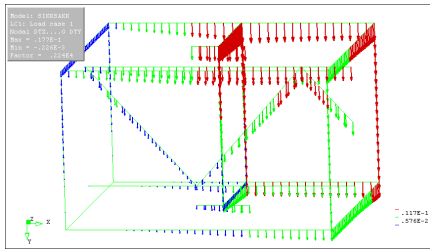
	E-modul	$\nu$
Lecavegg	$3\,500\text{ N/mm}^2$	0.2
Leca	$3\,500\text{ N/mm}^2$	0.2
Mørtel	$20\,000\text{ N/mm}^2$	0.2
Polyuretan	$12.57\text{ N/mm}^2$	0.2
Armering	$200\,000\text{ N/mm}^2$	0.3
Luft	$0.1\text{ N/mm}^2$	0.2

Tabell 7.1: Materialeegenskapene brukt ved beregning i DIANA.

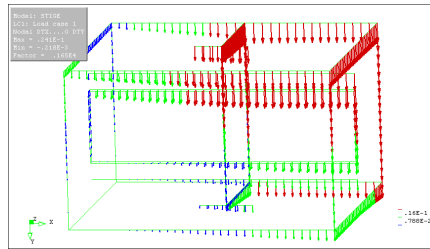
### 7.2.4 Resultat og diskusjon

Resultatet fra beregningen med DIANA gir nesten det samme resultatet som ved forsøkene i laboratoriet hvis resultatene multipliseres med 10. Disse resultatene kan ses i figur 7.5 (a), (b) og (c), og viser henholdsvis en nedbøyning på  $0.027mm$ ,  $0.0351mm$  og  $0.0392mm$ . Siden beregningene gjort i DIANA er lineære kan resultatene multipliseres opp for å finne nedbøyning ved høyere belastninger. Med en belastning på  $14kN$  ga laboratorieforsøkene en nedbøyning på ca.  $3mm$ . Ved å multiplisere nedbøyningene fra DIANA med 140 fås en nedbøyning på ca.  $4mm$ .

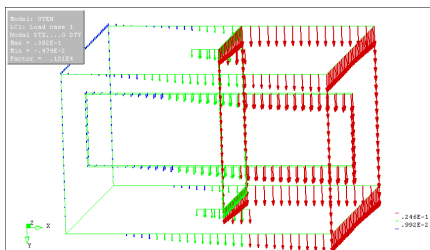
En annen måte å modellere tverrsnittet på er å gi hele modellen en E-modul. I kapittel 7.3 blir en mulig E-modul beregnet til ca.  $330N/mm^2$  basert på nedbøyningen. Med denne E-modulen blir nedbøyningen på  $0.0392mm$ , se figur 7.5 (d). Dette er den samme nedbøyningen som ble funnet for tverrsnittet uten armering. Dette tyder på at en E-modul på  $330N/mm^2$  for Leca isoblokk  $30cm$  kan være en god approksimasjon.



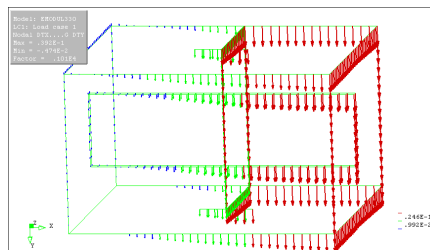
(a) Med sikksakkarmering.



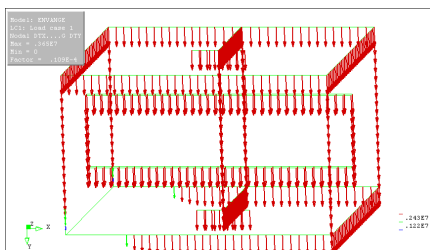
(b) Med stigarmering.



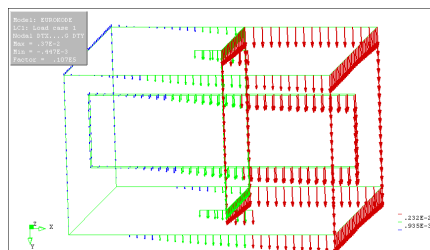
(c) Uten armering



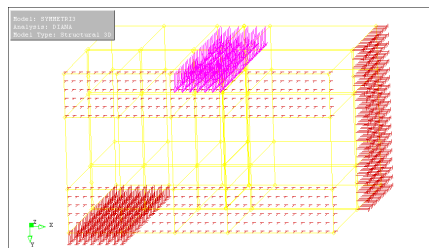
(d) Hele tverrsnittet har  $E = 330N/mm^2$ .



(e) Kun en murvange.

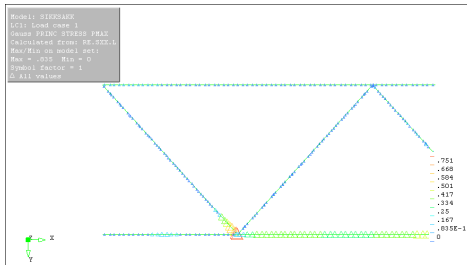


(f) Hele tverrsnittet har E-modulen oppgitt i Eurokode 6.

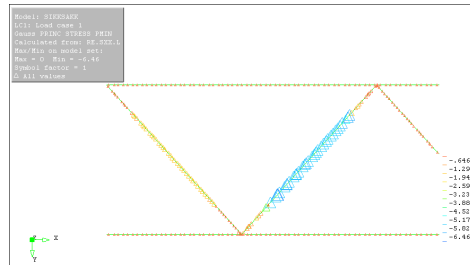


(g) Modellen i DIANA.

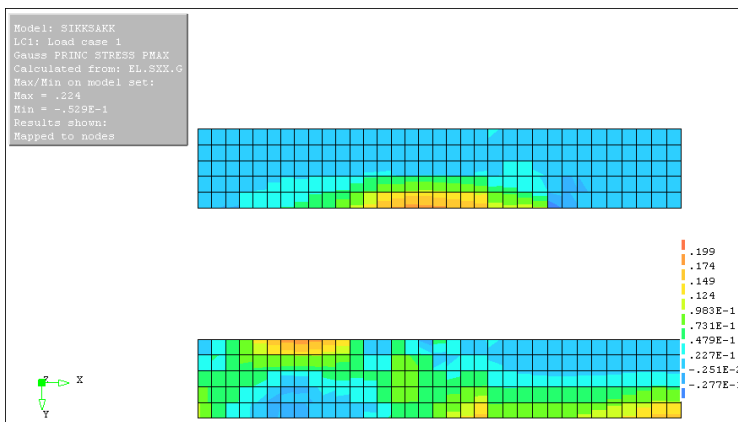
Figur 7.5: Forskyvninger i y-retning fra analysen med DIANA med forskjellige antagelser.



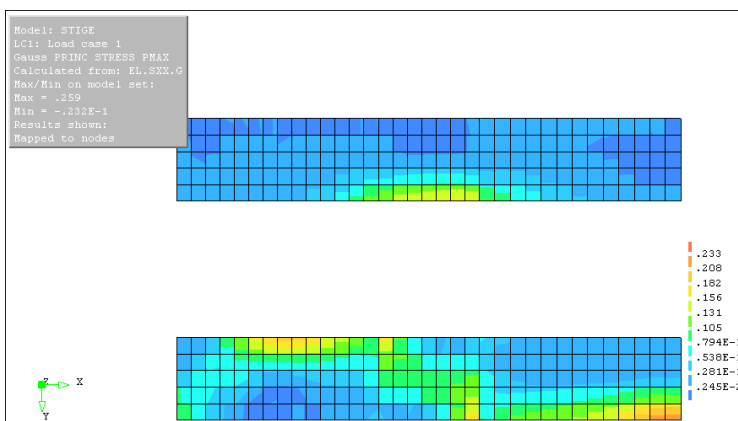
(a) Første hovedspenning i sikksakkarmeringen



(b) Tredje hovedspenning i sikksakkarmeringen



(c) Første hovedspenning i mørtelfugen med sikksakkarmering.



(d) Første hovedspenning i mørtelfugen med stigarmering.

Figur 7.6: Spenninger i mørtelfugen og i sikksakkarmeringen fra analysen med DIANA.

Ved å endre E-modulen til hele modellen til  $3\,500\text{N}/\text{mm}^2$  i henhold til det nasjonale tillegget til Eurokode 6 blir nedbøyningen fra  $1\text{kN}$  på  $0.0037\text{mm}$ , se figur 7.5 (f). Dette stemmer ikke overens med med forsøkene og kan forklares med at verdien for E-modulen i Eurokoden kun er for Lecavangene og ikke for hele blokken.

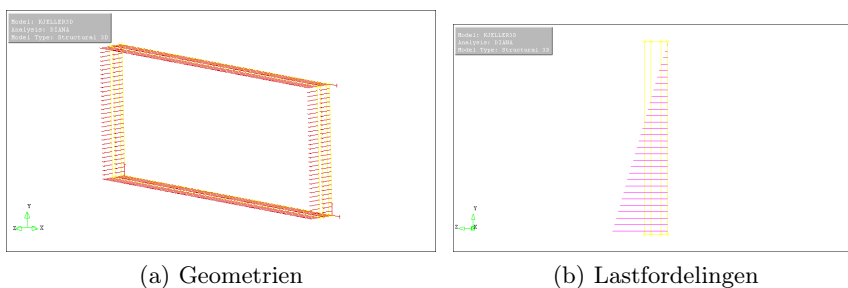
Ved å fjerne bidraget til vangen som ikke er direkte belastet ved å gi den en E-modul på  $1\text{Pa}$ , blir maksimal forskyvning  $3.65 \cdot 10^6\text{mm}$ , se figur 7.5. Dette tyder på at det må være samvirke mellom Lecavangene, slik at nedbøyning blir som den var observert i laboratorieforsøkene.

Figur 7.6 viser forskjellen på bruken av stige- og sikksakkarmering. figuren viser fordelingen av første hovedspenning i mørtelfugene og sikksakkarmeringen. Ved studie av hele modellen kom det tydelig frem at det var i mørtelfugen de største spenningene oppsto. Figur 7.6 viser at veggelementet med sikksakkarmeringen fordeler spenningene mellom mørtelfugen bedre enn veggelementet med stige- og sikksakkarmeringen. Dette fører til lavere maksimal hovedspenning og dermed høyere kapasitet, noe som ikke ble observert i laboratorieforsøkene. Dette kan være fordi forskjellen i maksimal hovedspenning er relativt liten  $0.224\text{N}/\text{mm}^2$  mot  $0.259\text{N}/\text{mm}^2$ .

Første hovedspenning er en strekkspenning når verdien er positiv. Fra figur 3.4, som er hentet fra dr. avhandlingen til Kvande, finnes to strekkkapasiteter.  $0.5\text{N}/\text{mm}^2$  for Lecablokken og  $0.25\text{N}/\text{mm}^2$  for skjøten mellom mørtelen og Lecablokken. Disse kapasitetene antyder at bruddet vil begynne i skjøten allerede ved en belastning på  $1\text{kN}$ . Dette kan også være forklaring på hvorfor forskyvningene er for små. Når brudd allerede oppstår ved en belastning på  $1\text{kN}$  vil bruddene bli større ved økt belastning samtidig som kapasiteten synker. På figur 7.6 (c) og (d) er meste parten av tverrsnittet utsatt for en spenning på  $0.02\text{N}/\text{mm}^2$ , ved en økning av belastningen med en faktor på 10 vil det dermed være brudd i hele tverrsnittet. Dette betyr at for å få nøyaktige modeller for nedbøyning for isoblokk tverrsnitt må den numeriske analysen være ikke lineær.

Måten sikksakkarmering virker på antyder at det ikke er spenninger fra momentet som blir overført mellom vangene. Det er nesten ikke strekkspenninger i diagonalene, se figur 7.6 (a). Det er derimot trykkspenninger, se figur 7.6 (b). Trykkspenninger som virker i diagonalene til sikksakkarmeringen antyder at armeringene hindrer sammentrykning av polyuretanen og ikke overfører spenninger fra momentet.

Resultatene fra modelleringen i DIANA indikerer det samme som laboratorieforsøkene, at det er lite forskjell på vegger der det er brukt stige- eller sikksakkarmering.



Figur 7.7: Geometrien til kjellerveggen.

## 7.3 Analyse av grunnmur

I denne delen av oppgaven blir en det gjennomført en numerisk analyse av en Leca grunnmursvegg med maksimalt tillatt høyde og lengde i henhold til de veiledende verdiene gitt av Weber og SINTEF [4, 6].

### 7.3.1 Hensikt

Formålet med den numeriske analysen er å få en forståelse for hvordan skallmursvegger belastet med med jordtrykk og fastholdt av ulike randbetingelser oppfører seg. Ved å bruke DIANA er det mulig å raskt sjekke hvordan forskjellige randbetingelser påvirker hvordan og ved hvilken belastning et brudd oppstår.

### 7.3.2 Geometri

Det ble modellert to grunnmurer basert på verdiene i tabell 2.5. Veggene som ble modellert var en vegg med målene  $2.5m \times 9m$  og en annen med målene  $2.5m \times 4m$ . Dette er vegger som er på grensen til maksimal lengde og høyde avhengig av om de er belastet med lette eller tunge masser. Modellene ble sende ut som vist i figur 7.7.

Belastningen som ble påført var et trykk på  $1kN/m^2$  som ble redusert til null i toppen av veggene ved hjelp av kommandoen SCURVE i DIANA, se figur 7.7 (b). Belastningen på  $1kN/m^2$  er brukt fordi det dermed blir enkelt å multiplisere opp til større belastninger når en antar lineær elastisitet. Den ene analysen er gjennomført med en vertikal linjelast i toppen på  $16kN/m$ . Dette er gjort for å se om vertikalbelastning øker kapasiteten. Linjelasten er påført som et trykk på ytre og indre vanage, der halvparten er påført hver av dem. Siden lasten er påført som et trykk på en flate som er  $0.082m \times 6m$  blir belastningen avrundet til  $100kN/m^2$ .

Randbetingelsene ble variert, men for å hindre translasjon ble punkt 2 fastholdt mot bevegelse i x- og y-retning, punkt 1 for bevegelse i y-retning, og punkt 22 for bevegelse i x-retning. Siden modellen skal representere en grunnmur er det i hvilken grad kantene skal være fast innspent eller fritt opplagt som vil variere. Fast innspenning ble representert som vist i figur 7.7 (a) ved at både den ytre og indre kanten ble fastholdt mot forskyvning i z-retning. Fritt opplagt ble representert ved at det var kun den indre kanten som ble fastholdt mot forskyvning i z-retning. Veggen som er påført vertikalbelastning er i tillegg fastholdt mot forskyvning i y-retning i bunn av veggen.

### 7.3.3 Materialer

I henhold til Eurokode 6 og dr. avhandlingen til Kvande har en murvegg murt opp med 300mm Leca iso-blokker egenskapene som vist i tabell 7.2.

	E-modul	$\nu$
Leca	3 500 N/mm <sup>2</sup>	0.2
Polyuretan	12.57 N/mm <sup>2</sup>	0.2

Tabell 7.2: Materialeegenskapene brukt ved beregning i DIANA.

### 7.3.4 Resultat og diskusjon

De fast innspente veggene fikk begge den samme forskyvningen på 0.16mm, men forskjellig maksimal hovedspenning. I begge veggene oppstod den maksimale hovedspenning i den indre vangen. I veggen med 9m lengde var spenningen 0.0417N/mm<sup>2</sup>, mens i 4m veggen var spenningen 0.0357N/mm<sup>2</sup>, se figur 7.8 og 7.9. Strekkapasiteten til murverk av Leca er enten 0.5N/mm<sup>2</sup> eller 0.25N/mm<sup>2</sup> avhengig av forutsetningene [15], se figur 3.4. Dette betyr at veggene kan utsettes for et jordtrykk på mellom 5.99kN/m<sup>2</sup> og 14kN/m<sup>2</sup> i bunn av veggen.

De fritt opplagte veggene hadde en forskyvning på 0.2mm for 9m veggen og 0.17mm for 4m veggen. Hovedspenningen var stor over et større areal for de fritt opplagte veggene, se figur 7.10 og 7.11. Maksimal spenning var også større for veggene, 0.042N/mm<sup>2</sup> for 9m veggen og 0.0381N/mm<sup>2</sup> for 4m veggen. Dette betyr at de fritt opplagte veggene kan tåle et jordtrykk på mellom 5.95kN/m<sup>2</sup> og 13kN/m<sup>2</sup> i bunn av veggen.

Veggen med linjelast i toppen av vangene ble utsatt for både lavere spenninger og forskyvninger enn de andre veggene, se figur 7.12. Veggen hadde

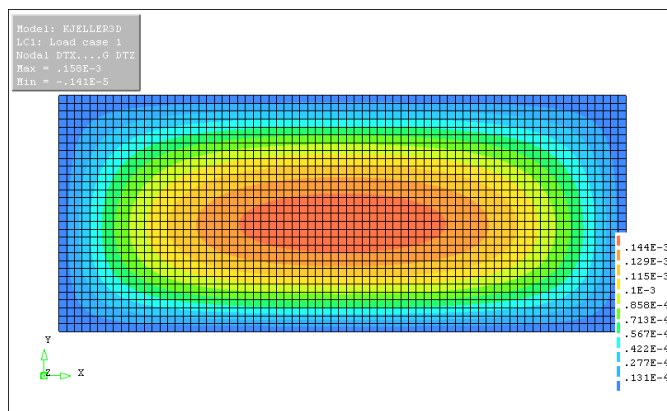
en forskyvning på  $0.125\text{mm}$  i z-retning og en maksimal hvoedspenning på  $0.0176\text{N/mm}^2$  i den indre vangen. Dette betyr at veggen kan tåle en jordtrykksbelastning på mellom  $14.2\text{kN/m}^2$  og  $28\text{kN/m}^2$ .

Ved å sammenligne kapasiteten med tabell 2.2 finner vi at veggene vil holde hvis det etterfylles med Leca lettklinker, men veggen vil ikke tåle etterfylling med sand/grus med mindre de er utsatt for vertikalbelastning. Analysen var gjennomført uten bruk av armering, noe som kan ha redusert kapasiteten noe. Selv om kapasiteten skulle bli økt er forskjellen på en kapasitet på  $14\text{kN/m}^2$  og en belastning på  $20.3\text{kN/m}^2$  så stor at det er tvilsomt om armeringen vil hjelpe.

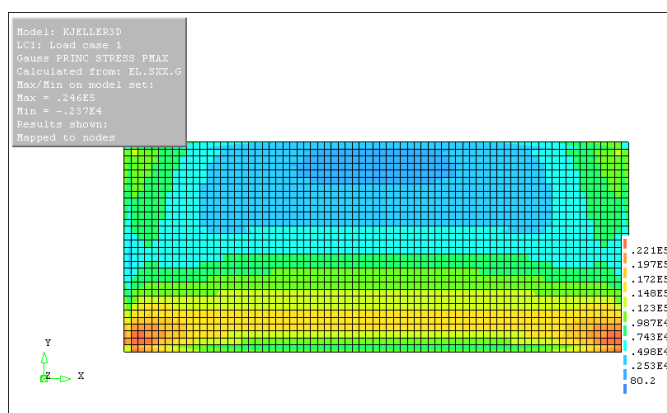
Selv med en vertikalbelastning på  $100\text{kN/m}^2$  vil ikke nødvendigvis veggen tåle jordtrykket fra sand/grus. Sand/grus har et jordtrykk på  $20.3\text{kN/M}^2$  for en  $2.5\text{m}$  høy vegg. Dette er  $6\text{kN/m}^2$  over den laveste kapasiteten for veggen. I hvilken grad armering vil øke kapasiteten på denne veggen tilstrekkelig, er uvisst.

Det er ikke overraskende at veggene har tilstrekkelig kapasitet siden veggen er designet etter grenseverdiene i figur 2.5 som oppgir maksimale parametere for grunnmurer. Det er litt spesielt at kapasiteten er god nok for Lecakuler, men ikke sand/grus.

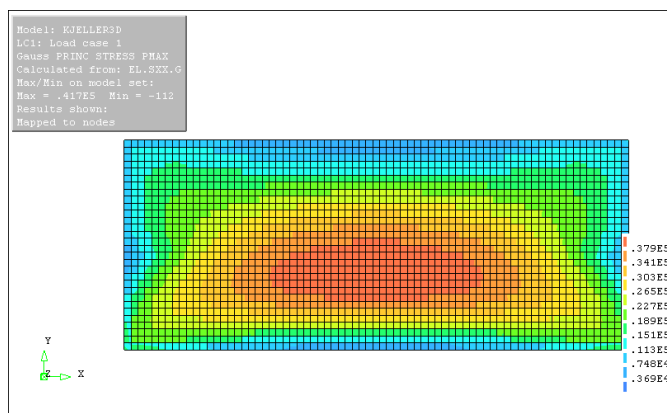




(a) Forskyvning i z-retning.

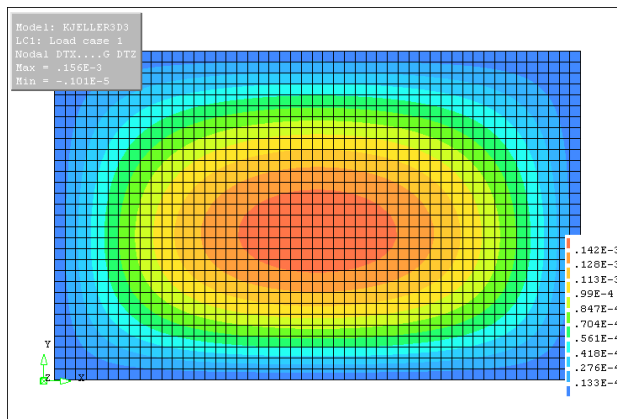


(b) Første hovedspenning, for ytre vange.

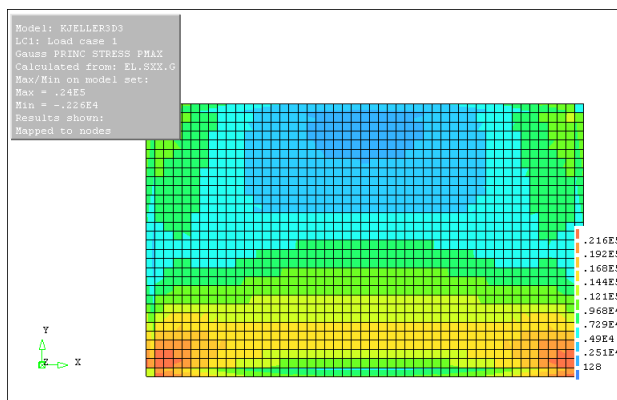


(c) Første hovedspenning, for indre vange.

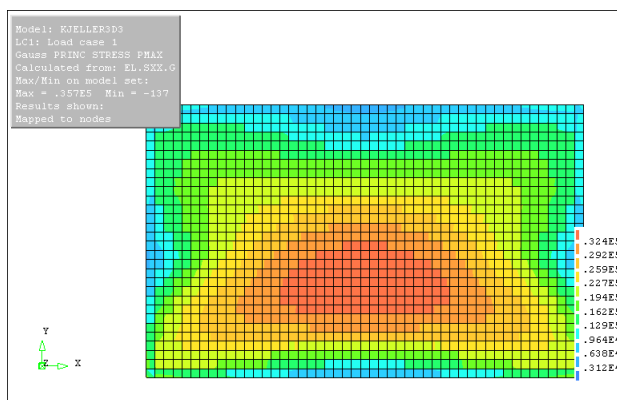
Figur 7.8: Resultater fra analyse av fast innspent  $2.5m \times 9m$  kjellervegg i DIANA.



(a) Forskyvning i z-retning.

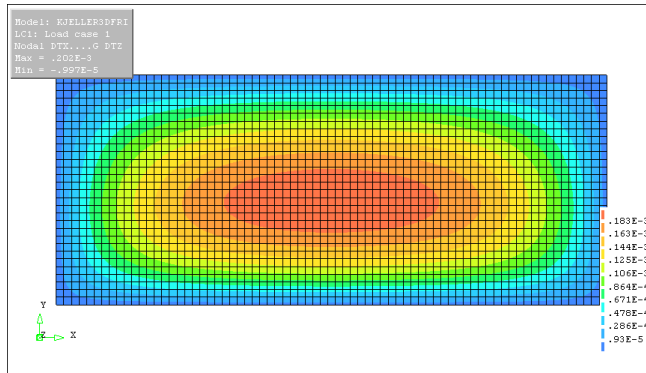


(b) Første hovedspenning, for ytre vange.

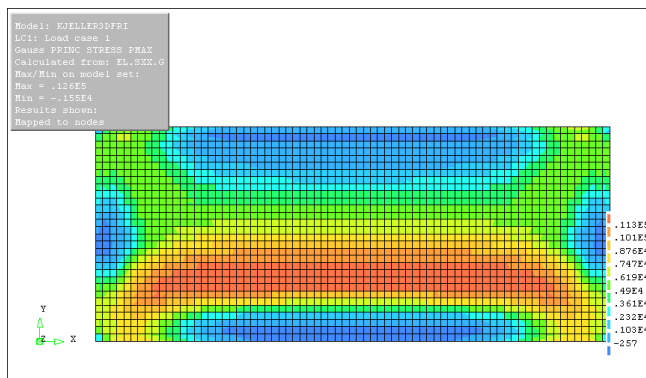


(c) Første hovedspenning, for indre vange.

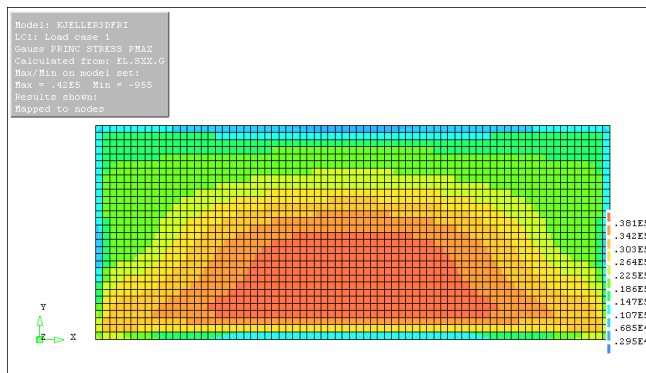
Figur 7.9: Resultater fra analyse av fast innspent  $2.5m \times 4m$  kjellervegg i DIANA.



(a) Forskyvning i z-retning.

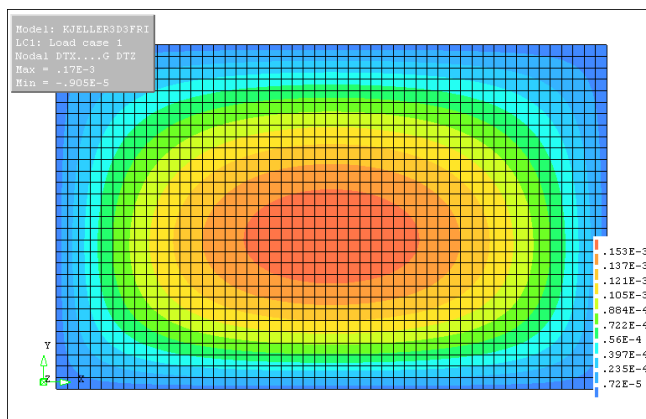


(b) Første hovedspenning, for ytre vange.

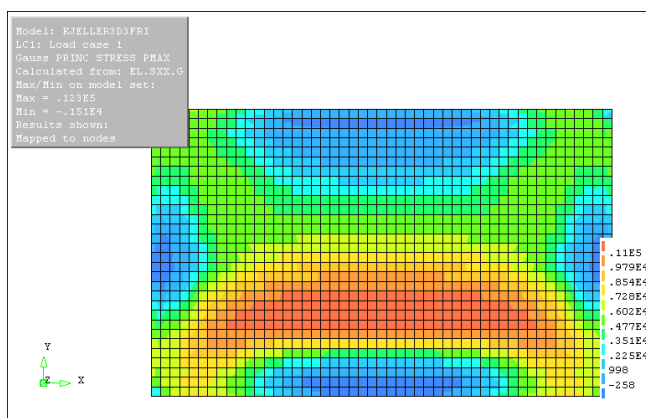


(c) Første hovedspenning, for indre vange.

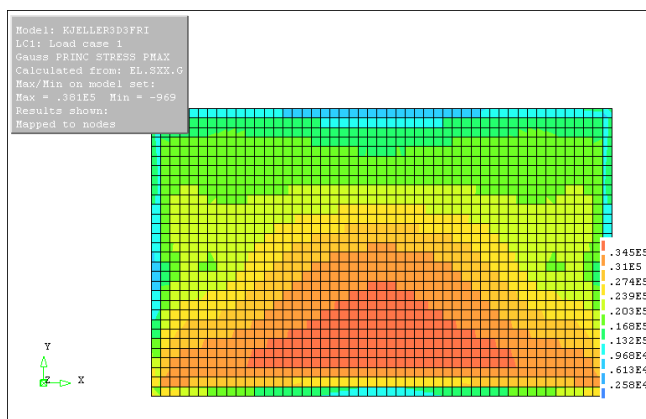
Figur 7.10: Resultater fra analyse av fritt opplagt  $2.5m \times 9m$  kjellervegg i DIANA.



(a) Forskyvning i z-retning.

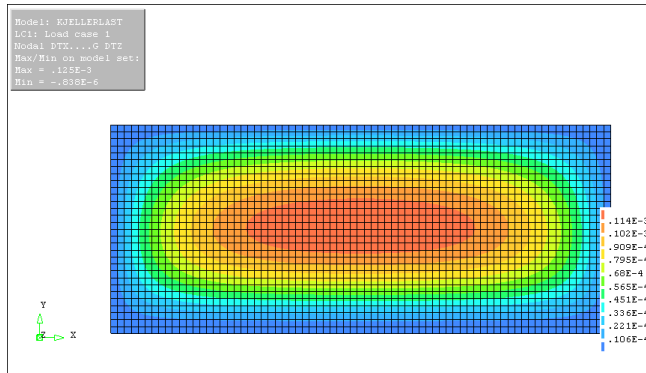


(b) Første hovedspenning, for ytre vange.

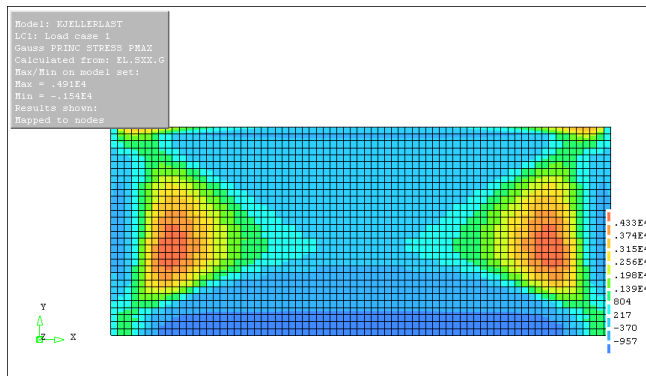


(c) Første hovedspenning, for indre vange.

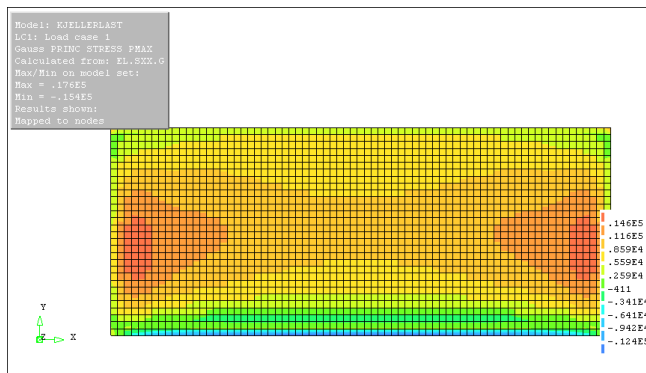
Figur 7.11: Resultater fra analyse av fritt opplagt  $2.5m \times 4m$  kjellervegg i DIANA.



(a) Forskyvning i z-retning.



(b) Første hovedspenning, for ytre vange.



(c) Første hovedspenning, for indre vange.

Figur 7.12: Resultater fra analyse av fritt opplagt  $2.5m \times 9m$  kjellervegg belastet  $16kN/m$  vertikalbelastning i DIANA.

# Kapittel 8

## Konklusjon

### 8.1 Konklusjon

I denne oppgaven har murvegger bygget med isolerte lettklinkerblokker blitt presentert. Hvordan blokkene blir brukt til bygging og hvordan dimensjonering blir gjort etter det gjeldene regelverket har blitt gjennomgått. Blokken Leca isoblokk 30cm som det ble valgt å gjennomføre tester på blir beskrevet. Forskning som er grunnlaget for regelverket og egenskapene til blokken som er behandlet blir presentert.

Det er gjennomført forenklede beregninger av belastningene en grunnmur utsettes for. Ved å anta en forenklet en etasjes bolig med kjeller var det mulig å gjøre noen enkle beregninger for å finne belastningene. *Jordtrykket fra Leca lettklinker er på maksimalt  $4.4kN/m^2$  mens jordtrykket fra sand/grus er på  $20.3kN/m^2$ .* Vertikalbelastningen blir på  $16kN/m$  ved å anta at det kun er brukt Lecaprodukter ved byggingen.

Norges Byggforskningsinstitutt (NBI) har gjennomført forsøk på vegger bygget med Leca isoblokk 250mm. Forsøkene NBI gjennomførte indikerte at isoblokkene hadde den samme kapasiteten som massive Lecablokker ved korttidslast grunnet armeringsbruken. *De beregnet også en karakteristisk momentkapasitet i horisontalretning på  $6.7kNm/m$ .* Rapporten til NBI går også gjennom tidligere forsøk og ser om resultatene fra de forsøkene stemmer overens med deres resultater, Mursenteret har også skrevet en tilsvarende rapport om overføringen av vertikalbelastningen mellom vangene i Leca isoblokk 300mm. Rapporten til Mursenteret går også gjennom tidligere forsøk for å kartlegge grad av samvirke mellom vangene når isoblokkvegger er utsatt for moment, og anbefaler at det skal antas 100% samvirke mot momentbelastning om vertikalaksen. Beregninger i rapporten til Mursenteret på bakgrunn av dette tilsier at sikksakkarmerte vegger bygget med Leca is-

oblokk 30cm vil ha en kapasitet på  $3.7kNm/m$ . Phd. avhandlingen til Tore Kvande tar for seg egenskapene til Lecablokker med kvaliteten 3/770 ved hjelp av en rekke forsøk i samarbeid med Karl Vincent Høiseth. Resultatene fra disse forsøkene er materialegenskapene som kan ses i figur 3.4, deriblant tverkontraksjonstallet og tre forskjellige E-moduler.

Forskningsartiklene ga grunnlaget for egenskapene til materialene samt fokuset til oppgaven. Er det forskjell på vegger armert med stige- eller sikksakkarmoring? Hvor stort er samvirket mellom vangene i Leca isoblokk 300mm?

Videre blir produktene som blir benyttet i forsøkene beskrevet og materialegenskapene presentert. Phd. avhandlingen til Kvande fører til usikkerhet rundt hvilken E-modul Lecamurverk egentlig har. I avhandlingen er det presentert en E-modul for trykk som er større enn den som er oppgitt i Eurokode 6, og to E-moduler ved strekk avhengig av omstendighetene. Ved beregningene og analysene i oppgaven er det valgt å bruke E-modulen oppgitt i Eurokode 6. Eurokode 6 oppgir også en høyere trykkfasthet for isoblokken enn det Leca gjør. I dette tilfellet er det valgt å bruke Leca sin verdi. *Denne observasjonen fører til en viss usikkerhet rundt verdiene for fasthet presentert i Eurokode 6, er de korrekte?*

I laboratoriet ble det utført to forskjellige forsøk. Et forsøk der E-modulen til polyuretanen mellom Lecavangene blir bestemt, og et forsøk der åtte vegg-elementer blir testet for momentkapasitet. Fire av veggementene var armert med sikksakkarmoring og de fire andre var armert med stigearmoring. *Resultatene fra laboratorieforsøkene ga polyuretanen en E-modul på  $12.57N/mm^2$  og indikerte at det ikke er noe forskjell i kapasiteten på vegger med stige- eller sikksakkarmoring.* Kraft/forskyvning grafene ligger oppå hverandre i det lineære området og bruddet oppstår ved den samme nedbøyningen, ved rundt  $30kN$ . Forsøket er satt opp med bakgrunn i bjelketeori der en av antagelsene er at bjelken skal være betraktelig lengre enn den er høy. For veggementet som er brukt er  $l = 3 \cdot h$  noe som nødvendigvis ikke er tilstrekkelig når bjelketeori benyttes ved beregningene.

I Kapittel 6 blir resultatene fra forsøkene og belastningene fra kapittel 2 sammenlignet. Metoden til Mursentert for beregning av samvirke blir også brukt med forskjellige forutsetninger. *Beregningene som blir gjennomført gir murverket enten for liten eller for stor kapasitet sammenlignet med forsøket. Kapasiteten er også god nok til å ta jordtrykk fra Leca lettklinker, men ikke fra sand/grus. Samvirkeberegningene som ble gjennomført indikerer at samvirket til veggementet brukt i forsøkene ligger et sted mellom 0 og 80%, avhengig av beregningsmetode.* Ved å anta vertikalbelastning som dimensjonerende, i stedet for horisontalbelastning etter Eurokode 6, kunne

ikke veggen utsettes for et jordtrykk større enn  $0.6kN/m^2$ . Dette tyder på at det er bruddlinjeteori som er den rette fremgangsmåten.

I kapittel 7 blir elementet som er brukt i de numeriske analysene testet ved å gjøre en enkel beregning for hånd. Beregningen illustrerer godt verdien av datamaskiner da deler av beregningen krever trippelintegrasjon og invertering av en  $24 \times 24$  matrise.

Målet med analysene som ble gjennomført i DIANA, var å se hvilke egenskaper som påvirker nedbøyningen og kapasiteten til veggelementet, og hvordan spenningene forplanter seg i en kjellervegg. Analysen av veggelementet som ble testet i laboratoriet, ble for stiv med en faktor på 10, men indikerte også at vegger med sikksakkarmring har litt større kapasitet enn vegger med stigearmring. Det kommer også frem av analysene at det vil oppstå brudd mellom mørtel og Leca ved en belastning på  $1kN$ . Dette indikerer at stivheten til veggelementet er et resultat av at analysen er lineær. Hadde det vært utført en ikke lineær analyse der brudd hadde ført til spenningsomfordelinger kunne nedbøyningene fra analysen stemt bedre med forsøksresultatene.

Analysen av kjellerveggen bekrefter begrensningene Leca og SINTEF har satt for høyde og lengde på kjellervegger belastet med jordtrykk fra Leca lettklinker. Når belastningen er fra sand/grus er det tvilsomt om veggen vil holde selv om den er belastet med vertikallast. Dette bekreftes av beregningene gjort i henhold til Eurokode 6.

Gjennom beregningene og forsøkene som er gjort i denne oppgaven, *kommer det frem at det er liten eller ingen forskjell på om det brukes stige- eller sikksakkarmring i grunnmursvegger bygget med Leca isoblokk 30cm*. Forsøkene bekrefter denne konklusjonen, og analysene i DIANA gir minimal økning i kapasitet ved bruk av sikksakkarmring. Den økningen i kapasitet som ble registrert i DIANA anses ikke som stor nok til at den vil bli registrert ved bygging.

## 8.2 Videre arbeid

På bakgrunn av funnene som er gjort i denne oppgaven foreslås følgende videre arbeid:

- Gjennomføre en ikke lineær analyse av modellen som er brukt i denne oppgaven.
- Utføre testing på større veggelementer da helst med  $2.5m$  høyde.
- Gjennomføre langtidstesting på Leca isoblokker.



- Teste både mørtel, Lecablokk og polyuretan for E-modul ved nye numeriske analyser.
- Gjøre forsøk i felt ved byggingen av grunnmurer med Leca isoblokk.

# Bibliografi

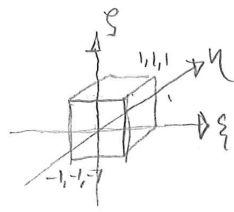
- [1] SINTEF, “523.231 skallmurvegg med vanger av murstein og murblokker,” *Byggforskserien*, 1996.
- [2] SINTEF, “523.133 murte yttervegger av lettklinkerblokker mot terreng,” *Byggforskserien*, 2014.
- [3] T. Kvande and O. H. Krokstrand, “Lettklinkerbetong: Blokk og blokkmurverk,” *Murkatalogen*, 2001.
- [4] T. H. Erichsen, “Leca isoblokk 25 cm og 30 cm,” *SINTEF Certification*, 2011.
- [5] K. V. Høiseth, *Dimmensjonering av murkonstruksjoner etter NS3475*. NTNU, 2015.
- [6] Leca, “Leca teknisk håndbok,” 2006.
- [7] NS-EN 1996-1-1:2005+A1:2012+NA:2013, *Eurokode 6: Prosjektering av murkonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler for armerte og uarmerte murkonstruksjoner*. European Committee of Standardization (CEN), 2013.
- [8] SINTEF, “511.101 byggegrunn og terreng,” *Byggforskserien*, 2012.
- [9] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*. Thomson, 2007.
- [10] Saint-Gobain Byggevarer AS, “Leca lett fyllmasse,” 2010.
- [11] Weber, “Leca® isoblokk 30 cm.” <http://www.weber-norge.no/lecar-blokk/produkter-loesninger/leca-blokker/isoblokk/lecar-isoblokk-30-cm.html>, 04.05.2016.
- [12] Weber, “Leca® byggeplank.” <http://www.weber-norge.no/lecar-elementer/produkter-loesninger/leca-byggeplank/leca-byggeplank/lecar-byggeplank.html>, 04.05.2016.

- [13] S. E. Torgersen, "Rapport om leca isoblokk 81-83-81 mm," 1989.
- [14] G. Wold-Hansen, "«ny» leca iso blokk 300 mm bæreevnevurderinger," 2002.
- [15] T. Kvande, *Investigation of some Material Properties for Structural Analysis of LECA Masonry*. PhD thesis, NTNU, 2001.
- [16] SINTEF, "572.222 murmørtler typer og egenskaper," *Byggforskserien*, 2015.
- [17] SINTEF, "571.201 murverk. materialer, typer og egenskaper," *Byggforskserien*, 2011.
- [18] Weber, "weber murmørtel m5." <http://www.weber-norge.no/moertel-fasade/produkter-loesninger/moertel-og-fasade-produkter/muring/weber-murmoertel-m5.html>, 04.05.2016.
- [19] Weber, *Proffhåndbok*, 2013.
- [20] TNO DIANA BV, *DIANA User's Manual*, 9.6 ed.
- [21] K. Bell, *An engineering approach to finite element analysis of linear structural mechanics problems*. Fagbokforlaget, 2013.

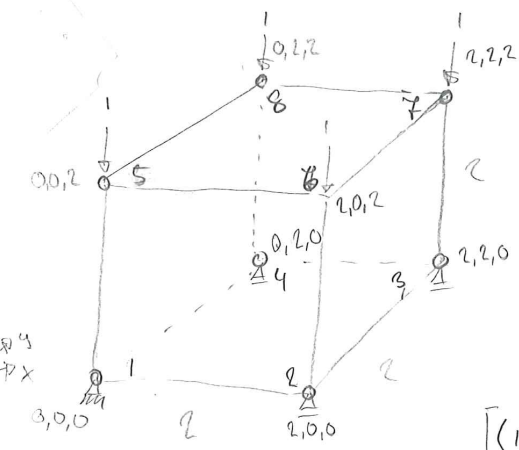
# Vedlegg A

Verifikasjon av HX24L

Reduziert int  $1 \times 1 \times 1$   
 Full int  $2 \times 2 \times 2$



$$N_i = \frac{1}{8} (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) (1 + \zeta_i \zeta)$$



$$N^T = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} (1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta) & \textcircled{1} \\ (1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta) & \textcircled{2} \\ (1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta) & \textcircled{3} \\ (1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta) & \textcircled{4} \\ (1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta) & \textcircled{5} \\ (1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta) & \textcircled{6} \\ (1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta) & \textcircled{7} \\ (1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta) & \textcircled{8} \end{bmatrix}$$

$$\int_V N^T D N dV$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{1/K}$

$$J = \sum_{i=1}^8 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\textcircled{1} & +\textcircled{2} & +\textcircled{3} & -\textcircled{4} & -\textcircled{5} & +\textcircled{6} & +\textcircled{7} & -\textcircled{8} \\ -\textcircled{1} & -\textcircled{2} & +\textcircled{3} & +\textcircled{4} & -\textcircled{5} & -\textcircled{6} & +\textcircled{7} & +\textcircled{8} \\ -\textcircled{1} & -\textcircled{2} & -\textcircled{3} & -\textcircled{4} & +\textcircled{5} & +\textcircled{6} & +\textcircled{7} & +\textcircled{8} \end{bmatrix} \begin{matrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \end{bmatrix}$$

$$J_{11} = \left( 2(1-\eta)(1-\rho) + 2(1+\eta)(1-\rho) + 2(1-\eta)(1+\rho) + 2(1+\eta)(1+\rho) \right) \frac{1}{8} =$$

$$= \frac{1}{8} (2 - 2\eta - 2\rho + 4\rho + 2 + 2\eta - 2\rho - 4\rho + 2 - 2\eta + 2\rho - 4\rho + 2 + 2\eta + 2\rho + 4\rho) =$$

$$J_{11} = \frac{1}{8} (8) = 1$$

$$J_{12} = \left( 2(1+\eta)(1-\rho) - 2(1+\eta)(1-\rho) + 2(1+\eta)(1+\rho) - 2(1+\eta)(1+\rho) \right) \frac{1}{8} = 0$$

$$J_{13} = \left( -2(1-\eta)(1+\rho) + 2(1-\eta)(1+\rho) + 2(1+\eta)(1+\rho) - 2(1+\eta)(1+\rho) \right) \frac{1}{8} = 0$$

$$J_{21} = \frac{1}{8} \left( -2(1+\xi)(1-\rho) + 2(1+\xi)(1-\rho) - 2(1+\xi)(1+\rho) + 2(1+\xi)(1+\rho) \right) = 0$$

$$J_{22} = \frac{1}{8} \left( 2(1+\xi)(1+\rho) + 2(1-\xi)(1-\rho) + 2(1+\xi)(1+\rho) + 2(1-\xi)(1+\rho) \right) = 1$$

$$J_{23} = \frac{1}{8} \left( -2(1-\xi)(1+\rho) - 2(1+\xi)(1+\rho) + 2(1+\xi)(1+\rho) + (1-\xi)(1+\rho) \right) = 0$$

$$J_{31} = \frac{1}{8} \left( -2(1+\xi)(1-\eta) - 2(1+\xi)(1+\eta) + 2(1+\xi)(1-\eta) + 2(1+\xi)(1+\eta) \right) = 0$$

$$J_{32} = \frac{1}{8} \left( -2(1+\xi)(1+\eta) - 2(1-\xi)(1+\eta) + 2(1+\xi)(1-\eta) + 2(1-\xi)(1+\eta) \right) = 0$$

$$J_{33} = \frac{1}{8} \left( 2(1-\xi)(1-\eta) + 2(1+\xi)(1-\eta) + 2(1+\xi)(1+\eta) + 2(1-\xi)(1+\eta) \right) = 1$$

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow J = 1 \Rightarrow J^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

med sidor 1 isteden for 2  $\Rightarrow J = \frac{1}{8}$

$$E = \Delta u = \Delta \bar{N} - Bv$$

$$N = \bar{N}$$

$$B = \Delta \bar{N} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N & 0 & 0 \\ 0 & N & 0 \\ 0 & 0 & N \\ \frac{\partial N}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N}{\partial z} \\ \frac{\partial N}{\partial y} & \frac{\partial N}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N}{\partial z} & \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$u_1 = v_1 = w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 0$$

$$F_{25} = F_{26} = F_{27} = F_{28} = -1 \quad F_{x1} = F_{y1} = F_{z1} = F_{z2} = F_{z3} = F_{z4} = ? \quad \text{resten } 0$$

$$S = K_W + S^0 = \int N^T C B dV \cdot W - \int N^T F dV$$

$$V = 0 \Rightarrow C = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{8} \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 & B_{41} & 0 & B_{61} \\ 0 & B_{12} & 0 & B_{42} & B_{52} & 0 \\ 0 & 0 & B_{13} & 0 & B_{53} & B_{63} \\ B_{14} & 0 & 0 & B_{44} & 0 & B_{64} \\ 0 & B_{25} & 0 & B_{45} & B_{55} & 0 \\ 0 & 0 & B_{26} & 0 & B_{56} & B_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2B_{11} & 0 & 0 & B_{41} & 0 & B_{61} \\ 0 & 2B_{12} & 0 & B_{42} & B_{52} & 0 \\ 0 & 0 & 2B_{13} & 0 & B_{53} & B_{63} \\ 2B_{14} & 0 & 0 & B_{44} & 0 & B_{64} \\ 0 & 2B_{25} & 0 & B_{45} & B_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 2B_{26} & 0 & B_{56} & B_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 & B_{14} & 0 & 0 & B_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{12} & 0 & 0 & B_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{28} \\ 0 & 0 & B_{13} & 0 & 0 & B_{12} & 0 & 0 & 0 & B_{28} \\ B_{41} & B_{42} & 0 & B_{44} & B_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{45} \\ 0 & B_{51} & B_{52} & 0 & B_{53} & B_{54} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{61} & 0 & B_{62} & B_{63} & 0 & B_{64} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & 2B_{11} + B_{41} + B_{61} \quad | \quad B_{42} \cdot B_{41} \quad | \quad B_{62} \cdot B_{61} \quad | \quad 2B_{11} \cdot B_{12} + B_{41} \cdot B_{52} \\ & 2B_{12} + B_{42} + B_{52} \quad | \quad B_{51} \cdot B_{52} \quad | \quad B_{61} \cdot B_{62} \quad | \quad B_{41} \cdot B_{42} \end{aligned}$$

Sym





17	18	19	20	21
$B_{41} B_{412}$	$B_{61} B_{612}$	$2B_{11} B_{17} + B_{41} B_{413} + B_{61} B_{63}$	$B_{41} B_{414}$	$B_{61} B_{614}$
$2B_{41} B_{66} + B_{42} B_{417} + B_{51} B_{511}$	$B_{51} B_{512}$	$B_{42} B_{413}$	$2B_{41} B_{47} + B_{42} B_{414} + B_{51} B_{512}$	$B_{51} B_{514}$
$B_{52} B_{511}$	$2B_{61} B_{66} + B_{52} B_{512} + B_{62} B_{612}$	$B_{62} B_{613}$	$B_{52} B_{517} + B_{513}$	$2B_{51} B_{57} + B_{52} B_{514} + B_{62} B_{64}$
$B_{43} B_{412}$	$B_{63}$	$2B_{12} B_{17} + B_{43} + B_{63}$	$B_{43} B_{414}$	$B_{63}$
$2B_{12} B_{46} + B_{44} + B_{53}$	$B_{53}$	$B_{44}$	$2B_{22} B_{27} + B_{44} + B_{53}$	$B_{53}$
$B_{54} B_{511}$	$2B_{42} B_{46} + B_{54} B_{512} + B_{64} B_{612}$	$B_{64}$	$B_{54}$	$2B_{21} B_{27} + B_{54} + B_{64}$
$B_{45} B_{412}$	$B_{65}$	$2B_{13} + B_{45} + B_{65}$	$B_{45}$	$B_{65}$
$2B_{23} B_{26} + B_{46} + B_{55}$	$B_{55}$	$B_{46}$	$2B_{23} + B_{46} + B_{55}$	$B_{55}$
$B_{56} B_{511}$	$2B_{33} B_{36} + B_{56} + B_{66}$	$B_{66}$	$B_{56}$	$2B_{29} + B_{56} + B_{66}$
$B_{47} B_{412}$	$B_{67}$	$2B_{14} + B_{47} + B_{67}$	$B_{47}$	$B_{67}$
$2B_{24} B_{26} + B_{48} + B_{57}$	$B_{57}$	$B_{68}$	$2B_{14} + B_{48} + B_{57}$	$B_{57}$
$B_{58} B_{511}$	$2B_{34} + B_{58} + B_{68}$	$B_{68}$	$B_{58}$	$2B_{24} + B_{58} + B_{68}$
$B_{49} B_{412}$	$B_{69}$	$2B_{15} + B_{49} + B_{69}$	$B_{49}$	$B_{69}$
$2B_{25} B_{26} + B_{46} + B_{59}$	$B_{59}$	$B_{410}$	$2B_{15} + B_{410} + B_{59}$	$B_{59}$
$B_{510} B_{511}$	$2B_{35} + B_{510} + B_{610}$	$B_{610}$	$B_{510}$	$2B_{25} + B_{510} + B_{610}$
$B_{411} B_{412}$	$B_{611}$	$2B_{16} + B_{411} + B_{611}$	$B_{411}$	$B_{611}$
	$B_{511}$	$B_{412}$	$2B_{26} + B_{412} + B_{511}$	$B_{511}$
		$B_{612}$	$B_{512}$	$2B_{36} + B_{512} + B_{612}$
		$2B_{17}^2 + B_{413}^2 + B_{613}^2$	$B_{413}$	$B_{613}$
				$B_{513}$

22	23	24
$2B_{11}B_{18} + B_{111}B_{415} + B_{61}B_{615}$	$B_{41}B_{416}$	$B_{61}B_{616}$
$B_{42}B_{415}$	$2B_{21}B_{28} + B_{42}B_{416} + B_{51}B_{55}$	$B_{51}B_{516}$
$B_{62}B_{615}$	$B_{52}B_{515}$	$2B_{31}B_{38} + B_{42}B_{516} + B_{62}B_{616}$
$2B_{12}B_{43}B_{63}$	$B_{43}B_{416}$	$B_{63}$
$B_{44}$	$2B_{22}B_{44}B_{53}$	$B_{53}$
$B_{64}$	$B_{54}$	$2B_{32}B_{54}B_{64}$
$2B_{13}B_{45}B_{65}$	$B_{45}$	$B_{65}$
$B_{46}$	$2B_{23}B_{46}B_{55}$	$B_{55}$
$B_{66}$	$B_{56}$	$2B_{33}B_{56}B_{66}$
$2B_{14}B_{47}B_{67}$	$B_{47}$	$B_{67}$
$B_{48}$	$2B_{24}B_{48}B_{57}$	$B_{57}$
$B_{68}$	$B_{58}$	$2B_{34}B_{58}B_{68}$
$2B_{15}B_{49}B_{69}$	$B_{49}$	$B_{69}$
$B_{410}$	$2B_{25}B_{410}B_{59}$	$B_{59}$
$B_{610}$	$B_{510}$	$2B_{35}B_{510}B_{610}$
$2B_{16}B_{411}B_{611}$	$B_{411}$	$B_{611}$
$B_{412}$	$2B_{26}B_{412}B_{511}$	$B_{511}$
$B_{612}$	$B_{512}$	$2B_{36}B_{512}B_{612}$
$2B_{17}B_{413}B_{613}$	$B_{413}$	$B_{613}$
$B_{414}$	$2B_{27}B_{414}B_{513}$	$B_{513}$
$B_{614}$	$B_{514}$	$2B_{37}B_{514}B_{614}$
$2B_{18}B_{415}B_{615}$	$B_{415}$	$B_{615}$
	$2B_{28}B_{416}B_{515}$	$B_{515}$
		$2B_{38}B_{516}B_{616}$

22

$B_1$	$-(1-n)(1-s)$	$(1-n)(1-s)$	$(1+n)(1-s)$	$(1+s)(1-s)$	$-(1+n)(1-s)$	$(1-s^2)(1-s)$
$B_2$	$-(1-s)(1-s)$	$-(1+s)(1-s)$	$-(1+s)^2(1-n)$	$-(1+s)^2(1-n)$	$-(1+s)^2(1+n)$	$-(1+s^2)(1+n)$
$B_3$	$-(1-s)(1-s)$	$-(1-n)(1-n)$	$-(1+s)(1-s)$	$-(1+s)(1-s)$	$-(1+s)(1-s)$	$-(1-s)(1-s)$
$B_4$	$-(1-s)(1-s)$	$-(1-s)(1-s)$	$-(1+s)(1-n)$	$-(1+s)(1-n)$	$-(1+s)(1-n)$	$-(1-s)(1-n)$
$B_5$	$-(1-s)(1-s)$	$-(1-s)(1-s)$	$-(1+s)(1-n)$	$-(1+s)(1-n)$	$-(1+s)(1-n)$	$-(1-s)(1-n)$
$B_6$	$-(1-s)(1-n)$	$-(1-n)(1-s)$	$-(1+s)(1-n)$	$-(1+s)(1-n)$	$-(1+s)(1-n)$	$-(1-s)(1+n)$

$B_1$	$-(1-n)(1+s)$	$(1-n)(1+s)$	$(1-n)(1+s)$	$(1+n)(1+s)$	$-(1+n)(1+s)$	$-(1+n)(1+s)$
$B_2$	$-(1-s)(1+s)$	$-(1-s)(1+s)$	$-(1-s)(1+s)$	$-(1-s)(1+s)$	$-(1-s)(1+s)$	$-(1-s)(1+s)$
$B_3$	$-(1-s)(1+n)$	$(1-s)(1-n)$	$(1-s)(1-n)$	$(1+s)(1-n)$	$-(1+s)(1-n)$	$(1-s)(1+n)$
$B_4$	$-(1-s)(1+s)$	$-(1-n)(1+s)$	$-(1+n)(1+s)$	$-(1+n)(1+s)$	$-(1+n)(1+s)$	$(1-s)(1+s)$
$B_5$	$-(1-s)(1-s)$	$(1-s)(1-n)$	$(1-s)(1-n)$	$(1+s)(1-n)$	$-(1+s)(1-n)$	$(1-s)(1+n)$
$B_6$	$-(1+n)(1-s)$	$-(1-n)(1-s)$	$-(1-n)(1-s)$	$(1+n)(1-s)$	$-(1+n)(1-s)$	$(1-s)(1+n)$

$B_1$						
$B_2$	$(1-s)(1+s)$					
$B_3$	$-(1+n)(1+s)$	$(1-s)(1+n)$				
$B_4$	$(1-s)(1+s)$					
$B_5$	$(1-s)(1+s)$					
$B_6$	$-(1+n)(1+s)$					

$$(1+\alpha)^2 = (1-\alpha)^2 = 2$$

$$(1-\alpha^2) = \frac{1}{3}$$

$$(1+\alpha^2) = (1+\alpha)^2 = (1-\alpha^2)^2 = \frac{8}{3}$$

4



$$k_{112} = \frac{16}{3} \quad k_{113} = \frac{64}{9} \quad k_{114} = \frac{16}{3} \quad k_{115} = \frac{32}{3} \quad k_{116} = -\frac{160}{9} \quad k_{117} = -\frac{16}{3} \quad k_{118} = -\frac{32}{3} \quad k_{119} = -\frac{128}{9}$$

$$k_{212} = -\frac{32}{3} \quad k_{213} = \frac{16}{3} \quad k_{214} = \frac{64}{9} \quad k_{215} = \frac{32}{3} \quad k_{216} = \frac{16}{3} \quad k_{217} = -\frac{64}{9} \quad k_{218} = \frac{16}{3} \quad k_{219} = -\frac{16}{3}$$

$$k_{312} = \frac{64}{9} \quad k_{313} = -\frac{32}{3} \quad k_{314} = -\frac{32}{3} \quad k_{315} = -\frac{128}{9} \quad k_{316} = -\frac{32}{3} \quad k_{317} = -\frac{16}{3} \quad k_{318} = -\frac{160}{9} \quad k_{319} = \frac{16}{3}$$

$$k_{412} = \frac{16}{3} \quad k_{413} = -\frac{160}{9} \quad k_{414} = \frac{16}{3} \quad k_{415} = \frac{32}{3} \quad k_{416} = \frac{128}{9} \quad k_{417} = -\frac{16}{3} \quad k_{418} = -\frac{16}{3} \quad k_{419} = -\frac{32}{3}$$

$$k_{512} = -\frac{16}{3} \quad k_{513} = -\frac{16}{3} \quad k_{514} = -\frac{64}{9} \quad k_{515} = \frac{16}{3} \quad k_{516} = -\frac{16}{3} \quad k_{517} = \frac{64}{9} \quad k_{518} = \frac{64}{9} \quad k_{519} = \frac{32}{3}$$

$$k_{612} = -\frac{64}{9} \quad k_{613} = \frac{32}{3} \quad k_{614} = -\frac{16}{3} \quad k_{615} = -\frac{160}{9} \quad k_{616} = \frac{32}{3} \quad k_{617} = -\frac{32}{3} \quad k_{618} = -\frac{128}{9} \quad k_{619} = \frac{16}{3}$$

$$k_{712} = \frac{32}{3} \quad k_{713} = -\frac{128}{9} \quad k_{714} = -\frac{16}{3} \quad k_{715} = \frac{16}{3} \quad k_{716} = -\frac{64}{9} \quad k_{717} = \frac{16}{3} \quad k_{718} = \frac{16}{3} \quad k_{719} = \frac{64}{9}$$

$$k_{812} = -\frac{16}{3} \quad k_{813} = \frac{16}{3} \quad k_{814} = \frac{64}{9} \quad k_{815} = \frac{16}{3} \quad k_{816} = -\frac{16}{3} \quad k_{817} = -\frac{160}{9} \quad k_{818} = -\frac{160}{9} \quad k_{819} = \frac{16}{3}$$

$$k_{912} = \frac{64}{9} \quad k_{913} = \frac{16}{3} \quad k_{914} = \frac{16}{3} \quad k_{915} = -\frac{128}{9} \quad k_{916} = \frac{16}{3} \quad k_{917} = \frac{32}{3} \quad k_{918} = \frac{32}{3} \quad k_{919} = \frac{32}{3}$$

$$k_{1012} = \frac{32}{3} \quad k_{1013} = -\frac{64}{9} \quad k_{1014} = -\frac{16}{3} \quad k_{1015} = \frac{16}{3} \quad k_{1016} = -\frac{128}{9} \quad k_{1017} = \frac{16}{3} \quad k_{1018} = \frac{16}{3} \quad k_{1019} = \frac{16}{3}$$

$$k_{1112} = -\frac{32}{3} \quad k_{1113} = \frac{16}{3} \quad k_{1114} = -\frac{160}{9} \quad k_{1115} = \frac{32}{3} \quad k_{1116} = \frac{16}{3} \quad k_{1117} = \frac{16}{3} \quad k_{1118} = -\frac{128}{9} \quad k_{1119} = \frac{16}{3}$$

$$k_{1212} = \frac{512}{9} \quad k_{1213} = -\frac{16}{3} \quad k_{1214} = \frac{32}{3} \quad k_{1215} = -\frac{160}{9} \quad k_{1216} = -\frac{16}{3} \quad k_{1217} = \frac{16}{3} \quad k_{1218} = \frac{16}{3} \quad k_{1219} = \frac{16}{3}$$

$$k_{1312} = \frac{512}{9} \quad k_{1313} = \frac{16}{3} \quad k_{1314} = \frac{64}{9} \quad k_{1315} = -\frac{32}{3} \quad k_{1316} = -\frac{128}{9} \quad k_{1317} = -\frac{32}{3} \quad k_{1318} = -\frac{32}{3} \quad k_{1319} = -\frac{32}{3}$$

$$k_{1412} = \frac{512}{9} \quad k_{1413} = \frac{64}{9} \quad k_{1414} = \frac{32}{3} \quad k_{1415} = -\frac{32}{3} \quad k_{1416} = \frac{32}{3} \quad k_{1417} = \frac{64}{9} \quad k_{1418} = \frac{64}{9} \quad k_{1419} = \frac{64}{9}$$

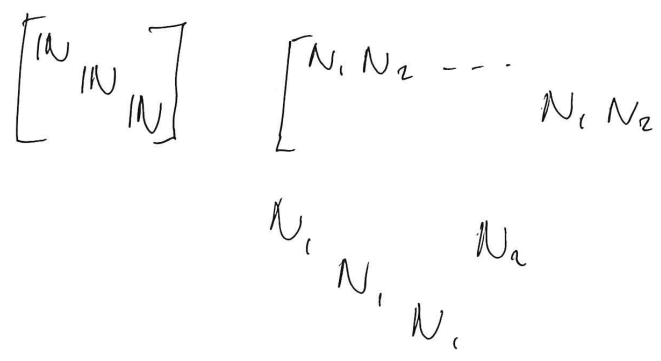
$$k_{1512} = \frac{512}{9} \quad k_{1513} = -\frac{16}{3} \quad k_{1514} = -\frac{160}{9} \quad k_{1515} = -\frac{16}{3} \quad k_{1516} = -\frac{128}{9} \quad k_{1517} = -\frac{16}{3} \quad k_{1518} = -\frac{16}{3} \quad k_{1519} = -\frac{16}{3}$$

$$k_{1612} = \frac{512}{9} \quad k_{1613} = \frac{64}{9} \quad k_{1614} = \frac{32}{3} \quad k_{1615} = -\frac{32}{3} \quad k_{1616} = \frac{32}{3} \quad k_{1617} = \frac{64}{9} \quad k_{1618} = \frac{64}{9} \quad k_{1619} = \frac{64}{9}$$

$$k_{1712} = \frac{512}{9} \quad k_{1713} = -\frac{16}{3} \quad k_{1714} = -\frac{160}{9} \quad k_{1715} = -\frac{16}{3} \quad k_{1716} = -\frac{128}{9} \quad k_{1717} = -\frac{16}{3} \quad k_{1718} = -\frac{16}{3} \quad k_{1719} = -\frac{16}{3}$$

$$k_{1812} = \frac{512}{9} \quad k_{1813} = \frac{64}{9} \quad k_{1814} = \frac{32}{3} \quad k_{1815} = -\frac{32}{3} \quad k_{1816} = \frac{32}{3} \quad k_{1817} = \frac{64}{9} \quad k_{1818} = \frac{64}{9} \quad k_{1819} = \frac{64}{9}$$

20	21	22	23	24
$k_1 = \frac{16}{3}$	$k_1 = -\frac{16}{3}$	$k_1 = \frac{64}{9}$	$k_1 = \frac{16}{3}$	$k_1 = \frac{16}{3}$
$k_2 = -\frac{64}{9}$	$k_2 = -\frac{32}{3}$	$k_2 = -\frac{16}{3}$	$k_2 = -\frac{160}{9}$	$k_2 = -\frac{32}{3}$
$k_3 = -\frac{16}{3}$	$k_3 = -\frac{128}{9}$	$k_3 = -\frac{16}{3}$	$k_3 = \frac{32}{3}$	$k_3 = -\frac{160}{9}$
$k_4 = \frac{16}{3}$	$k_4 = -\frac{16}{3}$	$k_4 = -\frac{128}{9}$	$k_4 = \frac{16}{3}$	$k_4 = \frac{16}{3}$
$k_5 = -\frac{128}{9}$	$k_5 = -\frac{32}{3}$	$k_5 = \frac{16}{3}$	$k_5 = -\frac{128}{9}$	$k_5 = -\frac{16}{3}$
$k_6 = -\frac{32}{3}$	$k_6 = -\frac{160}{9}$	$k_6 = \frac{16}{3}$	$k_6 = -\frac{16}{3}$	$k_6 = -\frac{128}{9}$
$k_7 = -\frac{16}{3}$	$k_7 = -\frac{32}{3}$	$k_7 = -\frac{160}{9}$	$k_7 = -\frac{16}{3}$	$k_7 = \frac{32}{3}$
$k_8 = -\frac{128}{9}$	$k_8 = -\frac{32}{3}$	$k_8 = \frac{16}{3}$	$k_8 = -\frac{64}{9}$	$k_8 = -\frac{16}{3}$
$k_9 = \frac{32}{3}$	$k_9 = -\frac{128}{9}$	$k_9 = \frac{32}{3}$	$k_9 = \frac{16}{3}$	$k_9 = -\frac{128}{9}$
$k_{10} = -\frac{16}{3}$	$k_{10} = -\frac{32}{3}$	$k_{10} = \frac{64}{9}$	$k_{10} = -\frac{16}{3}$	$k_{10} = \frac{32}{3}$
$k_{11} = \frac{64}{9}$	$k_{11} = -\frac{16}{3}$	$k_{11} = -\frac{16}{3}$	$k_{11} = \frac{64}{9}$	$k_{11} = -\frac{32}{3}$
$k_{12} = \frac{16}{3}$	$k_{12} = -\frac{160}{9}$	$k_{12} = -\frac{32}{3}$	$k_{12} = \frac{32}{3}$	$k_{12} = \frac{64}{9} - \frac{128}{9}$
$k_{13} = \frac{32}{3}$	$k_{13} = \frac{16}{3}$	$k_{13} = \frac{64}{9}$	$k_{13} = \frac{32}{3}$	$k_{13} = -\frac{16}{3}$
$k_{14} = -\frac{32}{9}$	$k_{14} = \frac{16}{3}$	$k_{14} = -\frac{32}{3}$	$k_{14} = -\frac{128}{9}$	$k_{14} = \frac{32}{3}$
$k_{15} = -\frac{16}{3}$	$k_{15} = -\frac{64}{9}$	$k_{15} = -\frac{16}{3}$	$k_{15} = -\frac{32}{3}$	$k_{15} = +\frac{64}{9}$
$k_{16} = -\frac{32}{3}$	$k_{16} = \frac{16}{3}$	$k_{16} = -\frac{160}{9}$	$k_{16} = \frac{32}{3}$	$k_{16} = -\frac{32}{3}$
$k_{17} = -\frac{64}{9}$	$k_{17} = \frac{32}{3}$	$k_{17} = \frac{32}{3}$	$k_{17} = -\frac{128}{9}$	$k_{17} = \frac{16}{3}$
$k_{18} = -\frac{32}{3}$	$k_{18} = \frac{64}{9}$	$k_{18} = \frac{16}{3}$	$k_{18} = -\frac{16}{3}$	$k_{18} = -\frac{64}{9}$
$k_{19} = -\frac{32}{3}$	$k_{19} = \frac{32}{3}$	$k_{19} = -\frac{128}{9}$	$k_{19} = -\frac{32}{3}$	$k_{19} = -\frac{64}{9}$
$k_{20} = \frac{512}{9}$	$k_{20} = \frac{32}{3}$	$k_{20} = -\frac{32}{3}$	$k_{20} = \frac{64}{9}$	$k_{20} = \frac{16}{3}$
	$k_{21} = \frac{512}{9}$	$k_{21} = -\frac{32}{3}$	$k_{21} = \frac{16}{3}$	$k_{21} = \frac{64}{9}$
	$k_{22} = \frac{512}{9}$	$k_{22} = -\frac{32}{3}$	$k_{22} = -\frac{32}{3}$	$k_{22} = -\frac{32}{3}$
		$k_{23} = \frac{512}{9}$	$k_{23} = \frac{32}{3}$	
			$k_{24} = \frac{512}{9}$	



$$2(1-\xi)(1-\eta)$$

(

$$\frac{1}{8}$$

15

$$2(1-\xi)(1-\eta)$$

0

$$-(1-\xi)(1+\xi)$$

$$-(1+\xi)(1+\xi)$$

$$(1+\xi)(1+\xi)$$

$$(1-\xi)(1+\xi)$$

18

$$2(1+\xi)(1-\eta)$$

0

$$(1+\xi)(1+\xi)$$

$$(1-\xi)(1+\xi)$$

21

$$2(1+\xi)(1+\eta)$$

0

$$(1-\xi)(1+\xi)$$

24

$$2(1-\xi)(1+\eta)$$

)

12k

15d

$$2(1-\xi)(1-\eta)$$

$$0 \quad -(1-\xi)(1+\xi)$$

$$-(1+\eta)(1+\xi)$$

$$2(1+\xi)(1-\eta)$$

$$0 \quad -(1+\xi)(1+\xi)$$

$$(1-\eta)(1+\xi)$$

$$2(1+\xi)(1+\eta)$$

$$0 \quad (1+\xi)(1+\xi)$$

$$(1+\eta)(1+\xi)$$

$$2(1-\xi)(1+\eta)$$

$$0 \quad (1-\xi)(1+\xi)$$

$$-(1+\eta)(1+\xi)$$

$$2(1-\xi)(1+\eta)$$

$$0 \quad (1-\xi)(1+\xi)$$

$$-(1+\eta)(1+\xi)$$

$$2(1-\xi)(1+\eta)$$

$$0 \quad (1-\xi)(1+\xi)$$

$$-(1+\eta)(1+\xi)$$

sym

$$|k_{ISIS} = \frac{512}{9} \quad |k_{ISIS}$$

|k

$$|k^{-1} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 6 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 6 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 6 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 6 \end{bmatrix}$$



# Vedlegg B

Filgrunlaget for analysene gjort i DIANA

**.DCF-fila brukt til DIANA analysene**

```

: Transformed by d8com: rev 7
*FILOS
  INITIA
*INPUT
*LINSTA
  BEGIN OUTPUT TABULA
    BEGIN SELECT
      BEGIN ELEMEN  1 /
        INTPNT 1 /
      END ELEMEN
    END SELECT
    STRAIN GREEN  LOCAL INTPNT
    STRESS CAUCHY LOCAL INTPNT
    STRESS CAUCHY INVARI LODE NODES
  END OUTPUT
  BEGIN OUTPUT TABULA APPEND
    BEGIN SELECT
:   LOADS 1 8 12 /
      LOADS 1 /
    END SELECT
    STRESS PRINCI NODES
  END OUTPUT
  BEGIN OUTPUT FEMVIE
    BEGIN SELECT
      LOADS 1 /
    END SELECT
:   BEGIN OUTPUT TABULA
      DISPLA
      STRESS CAUCHY GLOBAL INTPNT
:   STRESS CAUCHY PRINCI NODES AXES
      STRESS CAUCHY PRINCI NODES
      STRAIN GREEN  GLOBAL NODES
:   END OUTPUT
      STRAIN GLOBAL INTPNT
      STRAIN GLOBAL NODES
      STRESS LOCAL  INTPNT
      STRESS LOCAL  NODES
      STRESS VONMIS INTPNT
      STRESS CAUCHY INVARI NODES
    END OUTPUT
*END

```

**.HIS-fila til veggelementmodellen i DIANA**

```
! iDIANA Version 10.0 Release 07
! Installed for : Norwegian Institute of Sc.&Tec
! History file for model : SYMMETRI
! Session started at 19 MAR 2016 12:29:43
FEMGEN SYMMETRI
PROPERTY FE-PROG DIANA STRUCT_3D ; YES
UTILITY SETUP UNITS LENGTH MILLIMETER
UTILITY SETUP UNITS MASS KILOGRAM
UTILITY SETUP UNITS FORCE NEWTON
UTILITY SETUP UNITS TIME SECOND
UTILITY SETUP UNITS TEMP KELVIN
UTILITY SETUP UNDO ON
UTILITY SETUP BINSET OFF
MESHING OPTIONS CHECK STRUCTURED OFF
UTILITY SETUP OPTIONS ANALYSIS SOLVER-COMMAND DianaIE
EYE DIRECTION 0 -1 0
GEOMETRY POINT COORD P1 0
GEOMETRY POINT COORD P2 100 0 0
GEOMETRY POINT COORD P3 200 0 0
GEOMETRY POINT COORD P4 300 0 0
GEOMETRY POINT COORD P5 500
GEOMETRY POINT COORD P6 500 0 250
GEOMETRY POINT COORD P7 300 0 250
GEOMETRY POINT COORD P8 200 0 250
GEOMETRY POINT COORD P9 100 0 250
GEOMETRY POINT COORD P10 0 0 250
GEOMETRY POINT COORD P11 0 0 265
GEOMETRY POINT COORD P12 100 0 265
GEOMETRY POINT COORD P13 200 0 265
GEOMETRY POINT COORD P14 250 0 265
GEOMETRY POINT COORD P15 251 0 265
GEOMETRY POINT COORD P16 300 0 265
GEOMETRY POINT COORD P17 500 0 265
GEOMETRY POINT COORD P18 500 0 515
GEOMETRY POINT COORD P19 300 0 515
GEOMETRY POINT COORD P20 251 0 515
GEOMETRY POINT COORD P21 250 0 515
GEOMETRY POINT COORD P22 200 0 515
GEOMETRY POINT COORD P23 100 0 515
GEOMETRY POINT COORD P24 0 0 500
GEOMETRY POINT COORD P25 0 82 0
GEOMETRY POINT COORD P26 100 82 0
GEOMETRY POINT COORD P27 200 82 0
GEOMETRY POINT COORD P28 300 82 0
GEOMETRY POINT COORD P29 500 82 0
GEOMETRY POINT COORD P30 500 82 250
GEOMETRY POINT COORD P31 300 82 250
GEOMETRY POINT COORD P32 200 82 250
GEOMETRY POINT COORD P33 100 82 250
GEOMETRY POINT COORD P34 0 82 250
GEOMETRY POINT COORD P35 0 82 265
GEOMETRY POINT COORD P36 100 82 265
GEOMETRY POINT COORD P37 200 82 265
GEOMETRY POINT COORD P38 250 82 265
```

GEOMETRY POINT COORD P39 251 82 265  
GEOMETRY POINT COORD P40 300 82 265  
GEOMETRY POINT COORD P41 500 82 265  
GEOMETRY POINT COORD P42 500 82 515  
GEOMETRY POINT COORD P43 300 82 515  
GEOMETRY POINT COORD P44 251 82 515  
GEOMETRY POINT COORD P45 250 82 515  
GEOMETRY POINT COORD P46 200 82 515  
GEOMETRY POINT COORD P47 100 82 515  
GEOMETRY POINT COORD P48 0 82 515  
GEOMETRY POINT COORD P49 0 218  
GEOMETRY POINT COORD P50 100 218  
GEOMETRY POINT COORD P51 200 218  
GEOMETRY POINT COORD P52 300 218  
GEOMETRY POINT COORD P53 500 218  
GEOMETRY POINT COORD P54 500 218 250  
GEOMETRY POINT COORD P55 300 218 250  
GEOMETRY POINT COORD P56 200 218 250  
GEOMETRY POINT COORD P57 100 218 250  
GEOMETRY POINT COORD P58 0 218 250  
GEOMETRY POINT COORD P59 0 218 265  
GEOMETRY POINT COORD P60 100 218 265  
GEOMETRY POINT COORD P61 200 218 265  
GEOMETRY POINT COORD P62 250 218 265  
GEOMETRY POINT COORD P63 251 218 265  
GEOMETRY POINT COORD P64 300 218 265  
GEOMETRY POINT COORD P65 500 218 265  
GEOMETRY POINT COORD P66 500 218 515  
GEOMETRY POINT COORD P67 300 218 515  
GEOMETRY POINT COORD P68 251 218 515  
GEOMETRY POINT COORD P69 250 218 515  
GEOMETRY POINT COORD P70 200 218 515  
GEOMETRY POINT COORD P71 100 218 515  
GEOMETRY POINT COORD P72 0 218 515  
GEOMETRY POINT COORD P73 0 300 0  
GEOMETRY POINT COORD P74 100 300 0  
GEOMETRY POINT COORD P75 200 300 0  
GEOMETRY POINT COORD P76 300 300 0  
GEOMETRY POINT COORD P77 500 300 0  
GEOMETRY POINT COORD P78 500 300 250  
GEOMETRY POINT COORD P79 300 300 250  
GEOMETRY POINT COORD P80 200 300 250  
GEOMETRY POINT COORD P81 100 300 250  
GEOMETRY POINT COORD P82 0 300 250  
GEOMETRY POINT COORD P83 0 300 265  
GEOMETRY POINT COORD P84 100 300 265  
GEOMETRY POINT COORD P85 200 300 265  
GEOMETRY POINT COORD P86 250 300 265  
GEOMETRY POINT COORD P87 251 300 265  
GEOMETRY POINT COORD P88 300 300 265  
GEOMETRY POINT COORD P89 500 300 265  
GEOMETRY POINT COORD P90 500 300 515  
GEOMETRY POINT COORD P91 300 300 515  
GEOMETRY POINT COORD P92 251 300 515

GEOMETRY POINT COORD P93 250 300 515  
GEOMETRY POINT COORD P94 200 300 515  
GEOMETRY POINT COORD P95 100 300 515  
GEOMETRY POINT COORD P96 0 300 515

SAVE

! Confirm save?

YES

! Enter model description =>

\* M423: Saved to database file

LABEL GEOMETRY POINTS

GEOMETRY SURFACE 4POINTS S1 P1 P2 P26 P25  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S2 P25 P26 P50 P49  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S3 P49 P50 P74 P73  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S4 P2 P3 P27 P26  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S5 P26 P27 P51 P50  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S6 P51 P75 P74 P50  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S7 P3 P4 P28 P27  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S8 P27 P28 P52 P51  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S9 P51 P52 P76 P75  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S10 P4 P5 P29 P28  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S11 P28 P29 P53 P52  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S12 P52 P53 P77 P76

\* E3200: Incorrect command: < label > geom points

LABEL GEOMETRY POINTS

GEOMETRY SURFACE 4POINTS S13 P73 P74 P81 P82  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S14 P74 P75 P80 P81  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S15 P75 P76 P79 P80  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S16 P76 P77 P78 P79  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S17 P49 P73 P82 P58  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S18 P50 P74 P81 P57  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S19 P51 P75 P80 P56  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S20 P52 P76 P79 P55  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S21 P53 P77 P78 P54  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S22 P49 P50 P57 P58  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S23 P50 P51 P56 P57  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S24 P51 P52 P55 P56  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S25 P52 P53 P54 P55  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S26 P25 P49 P58 P34  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S27 P26 P50 P57 P33  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S28 P27 P51 P56 P32  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S29 P28 P52 P55 P31  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S30 P29 P53 P54 P30  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S31 P25 P26 P33 P34  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S32 P26 P27 P32 P33  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S33 P51 P28 P31 P32  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S33 P27 P28 P31 P32

! Confirm modification?

YES

GEOMETRY SURFACE 4POINTS S34 P28 P29 P30 P31  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S35 P1 P25 P34 P10  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S36 P2 P26 P33 P9  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S37 P3 P27 P32 P8  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S38 P4 P28 P31 P7

```

GEOMETRY SURFACE 4POINTS S39 P5 P29 P30 P6
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S40 P1 P2 P9 P10
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S41 P2 P3 P8 P9
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S42 P3 P4 P7 P8
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S43 P4 P5 P6 P7
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S44 P58 P57 P81 P82
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S45 P57 P37 P61 P81
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S45 P81 P80 P56 P57
! Confirm modification?
YES
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S46 P56 P55 P79 P80
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S47 P55 P54 P78 P79
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S48 P34 P33 P57 P58
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S49 P33 P32 P56 P57
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S50 P32 P31 P55 P56
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S51 P31 P30 P54 P55
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S52 P10 P9 P33 P34
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S53 P9 P8 P32 P33
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S54 P8 P7 P31 P32
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S55 P7 P6 P30 P31
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S56 P74 P14 P15 P74
* E0118:Transformed points coincide. TOL is too large.
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S57 P59 P83 P82 P58
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S58 P60 P57 P81 P84
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S59 P56 P61 P85 P80
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S60 P64 P55 P79 P88
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S61 P65 P54 P78 P89
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S62 P83 P82 P81 P84
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S63 P85 P80 P79 P88
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S64 P88 P79 P78 P89
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S65 P84 P81 P80 P85
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S66 P59 P58 P57 P60
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S67 P57 P56 P61 P60
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S68 P56 P55 P64 P61
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S69 P64 P55 P54 P65
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S70 P35 P34 P58 P59
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S71 P36 P33 P57 P60
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S72 P37 P32 P56 P61
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S73 P40 P31 P55 P64
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S74 P41 P30 P54 P65
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S75 P35 P34 P33 P36
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S76 P33 P32 P37 P36
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S77 P32 P31 P40 P37
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S78 P31 P30 P41 P40
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S79 P35 P11 P10 P34
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S80 P12 P9 P33 P36
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S81 P37 P13 P8 P32
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S82 P40 P16 P7 P31
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S83 P41 P17 P6 P30
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S84 P11 P10 P9 P12
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S85 P9 P8 P13 P12
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S86 P8 P7 P16 P13
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S87 P7 P6 P17 P16
VIEW GEOMETRY ALL

```



LABEL GEOMETRY LINES  
UTILITY DELETE LINES L67  
! Confirm delete?  
YES  
\* W0011:Deleted- L67  
UTILITY DELETE LINES L69  
! Confirm delete?  
YES  
\* W0011:Deleted- L69  
VIEW GEOMETRY ALL  
LABEL GEOMETRY SURFACES  
LABEL GEOMETRY LINES  
LABEL GEOMETRY OFF  
LABEL GEOMETRY LINES  
VIEW GEOMETRY L87  
LABEL GEOMETRY LINES L87  
VIEW GEOMETRY ALL  
LABEL GEOMETRY LINES L87  
UTILITY DELETE LINES L87  
! Confirm delete?  
YES  
\* W0011:Deleted- L87  
LABEL GEOMETRY LINES  
LABEL GEOMETRY LINES L85  
LABEL GEOMETRY LINES L85  
LABEL GEOMETRY LINES OFF  
LABEL GEOMETRY LINES L85  
UTILITY DELETE LINES L85  
! Confirm delete?  
YES  
\* W0011:Deleted- L85  
VIEW GEOMETRY OFF  
LABEL GEOMETRY POINTS  
VIEW GEOMETRY ALL  
LABEL GEOMETRY LINES  
UTILITY DELETE LINES L139  
! Confirm delete?  
NO  
VIEW GEOMETRY OFF  
LABEL GEOMETRY OFF  
VIEW GEOMETRY ALL  
LABEL GEOMETRY POINTS  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S88 P83 P84 P60 P59  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S89 P84 P85 P61 P60  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S90 P85 P86 P62 P61  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S91 P86 P87 P63 P62  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S92 P87 P88 P64 P63  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S93 P88 P89 P65 P64  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S94 P59 P35 P36 P60  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S95 P60 P61 P37 P36  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S96 P61 P62 P38 P37  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S97 P62 P63 P39 P38  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S98 P63 P64 P40 P39  
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S99 P64 P65 P41 P40

GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S100	P35	P36	P12	P11
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S101	P36	P37	P13	P12
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S102	P37	P38	P14	P13
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S103	P38	P39	P15	P14
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S104	P39	P40	P16	P15
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S105	P40	P41	P17	P16
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S106	P96	P95	P84	P83
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S107	P95	P94	P85	P84
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S108	P94	P93	P86	P85
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S109	P93	P92	P87	P86
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S110	P92	P91	P88	P87
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S111	P91	P90	P89	P88
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S112	P72	P96	P83	P59
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S113	P71	P95	P84	P60
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S114	P70	P94	P85	P61
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S115	P69	P93	P86	P62
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S116	P68	P92	P87	P63
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S117	P67	P91	P88	P64
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S118	P66	P90	P89	P65
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S119	P72	P71	P60	P59
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S120	P60	P61	P70	P71
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S121	P61	P62	P69	P70
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S122	P62	P63	P68	P69
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S123	P63	P64	P67	P68
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S124	P64	P65	P66	P67
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S125	P48	P35	P59	P72
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S126	P36	P60	P71	P47
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S127	P46	P37	P61	P70
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S128	P38	P62	P69	P45
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S129	P44	P39	P63	P68
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S130	P40	P64	P67	P43
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S131	P41	P65	P66	P42
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S132	P48	P35	P36	P47
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S133	P36	P37	P46	P47
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S134	P37	P38	P45	P46
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S135	P38	P39	P44	P45
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S136	P39	P40	P43	P44
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S137	P40	P41	P42	P43
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S138	P48	P35	P11	P24
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S139	P12	P36	P47	P23
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S140	P13	P37	P46	P22
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S141	P14	P38	P45	P21
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S142	P15	P39	P44	P20
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S143	P16	P40	P43	P19
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S144	P17	P41	P42	P18
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S145	P24	P11	P12	P23
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S146	P23	P22	P13	P12
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S147	P13	P14	P21	P22
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S148	P14	P15	P20	P21
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S149	P15	P16	P19	P20
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S150	P16	P17	P18	P19
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S151	P96	P95	P71	P72
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S152	P95	P94	P70	P71
GEOMETRY	SURFACE	4POINTS	S153	P70	P69	P93	P94

```

GEOMETRY SURFACE 4POINTS S154 P69 P68 P92 P93
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S155 P68 P67 P91 P92
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S156 P67 P66 P90 P91
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S157 P42 P66 P67 P43
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S158 P44 P43 P67 P68
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S159 P45 P44 P68 P69
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S160 P46 P45 P69 P70
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S161 P47 P46 P70 P71
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S162 P48 P47 P71 P72
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S163 P24 P23 P47 P48
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S164 P47 P23 P22 P46
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S165 P46 P22 P21 P45
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S166 P45 P21 P20 P44
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S167 P44 P20 P19 P43
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S168 P43 P19 P18 P42
VIEW GEOMETRY ALL
LABEL GEOMETRY SURFACES
* E3200: Incorrect command: LABEL GEOMETRY < s3 > s44 s13 s22 s17
s18
GEOMETRY BODY 6SURFS B1 S3 S44 S13 S22 S17 S18
GEOMETRY BODY 6SURFS B2 S2 S48 S22 S31 S26 S27
GEOMETRY BODY 6SURFS B3 S1 S52 S31 S40 S35 S36
GEOMETRY BODY 6SURFS B4 S4 S53 S36 S37 S28 S41
* E0030: Incorrect definition of body B4 at surface S41
GEOMETRY BODY 6SURFS B5 S4 S53 S36 S37 S32 S41
GEOMETRY BODY 6SURFS B6 S37 S38 S7 S54 S33 S42
GEOMETRY BODY 6SURFS B7 S33 S39 S43 S34 S10 S55
* E0030: Incorrect definition of body B7 at surface S55
GEOMETRY BODY 6SURFS B8 S38 S39 S10 S55 S34 S43
GEOMETRY BODY 6SURFS B9 S49 S5 S27 S28 S23 S32
GEOMETRY BODY 6SURFS B10 S50 S8 S33 S24 S28 S29
GEOMETRY BODY 6SURFS B11 S11 S51 S29 S30 S34 S25
GEOMETRY BODY 6SURFS B12 S6 S45 S18 S19 S23 S14
GEOMETRY BODY 6SURFS B13 S9 S46 S24 S15 S19 S20
GEOMETRY BODY 6SURFS B14 S12 S47 S21 S20 S16 S25
LABEL GEOMETRY POINTS
* E0030: Incorrect definition of body B4 at surface S41
* E0030: Incorrect definition of body B7 at surface S55
LABEL GEOMETRY SURFACES OFF
* E0030: Incorrect definition of body B4 at surface S41
* E0030: Incorrect definition of body B7 at surface S55
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S169 P13 P37 P40 P16
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S170 P37 P61 P64 P40
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S171 P61 P85 P88 P64
LABEL GEOMETRY POINTS OFF
* E0030: Incorrect definition of body B4 at surface S41
* E0030: Incorrect definition of body B7 at surface S55
LABEL GEOMETRY SURFACES ALL
GEOMETRY BODY 6SURFS B15 S79 S80 S23 S100 S75 S84
* E0030: Incorrect definition of body B15 at surface S84
LABEL GEOMETRY SURFACES
* E0030: Incorrect definition of body B4 at surface S41
* E0030: Incorrect definition of body B7 at surface S55
* E0030: Incorrect definition of body B15 at surface S84

```

```

* E3200: Incorrect command: LABEL GEOMETRY SURFACES S75 < s84 >
s79 s80 s52 s10
GEOMETRY BODY 6SURFS B16 S75 S84 S79 S80 S52 S100
GEOMETRY BODY 6SURFS B17 S49 S85 S53 S101 S80 S81
* E0030: Incorrect definition of body B17 at surface S81
GEOMETRY BODY 6SURFS B18 S76 S85 S53 S101 S80 S81
GEOMETRY BODY 6SURFS B19 S77 S86 S81 S82 S54 S169
GEOMETRY BODY 6SURFS B20 S82 S83 S78 S87 S55 S105
GEOMETRY BODY 6SURFS B21 S44 S88 S58 S57 S62 S66
GEOMETRY BODY 6SURFS B22 S65 S67 S59 S58 S45 S89
GEOMETRY BODY 6SURFS B23 S46 S171 S60 S59 S63 S68
GEOMETRY BODY 6SURFS B24 S64 S69 S61 S60 S47 S93
GEOMETRY BODY 6SURFS B25 S150 S137 S168 S105 S144 S143
GEOMETRY BODY 6SURFS B26 S99 S157 S137 S124 S131 S130
GEOMETRY BODY 6SURFS B27 S156 S93 S118 S117 S124 S111
GEOMETRY BODY 6SURFS B28 S88 S151 S112 S113 S106 S119
GEOMETRY BODY 6SURFS B29 S119 S132 S125 S126 S162 S94
GEOMETRY BODY 6SURFS B30 S100 S163 S138 S139 S132 S145
GEOMETRY BODY 6SURFS B31 S89 S141 S113 S114 S107 S120
* E0030: Incorrect definition of body B31 at surface S141
GEOMETRY BODY 6SURFS B32 S89 S152 S113 S114 S107 S120
GEOMETRY BODY 6SURFS B33 S161 S95 S120 S133 S126 S127
GEOMETRY BODY 6SURFS B34 S164 S101 S133 S146 S139 S140
GEOMETRY BODY 6SURFS B35 S102 S165 S140 S141 S147 S134
GEOMETRY BODY 6SURFS B36 S104 S167 S149 S136 S142 S143
GEOMETRY BODY 6SURFS B37 S160 S96 S127 S128 S134 S121
GEOMETRY BODY 6SURFS B38 S158 S98 S129 S130 S136 S123
GEOMETRY BODY 6SURFS B39 S92 S155 S117 S116 S110 S123
GEOMETRY BODY 6SURFS B40 S90 S153 S115 S114 S108 S121
SAVE
! Confirm save?
YES
* M423: Saved to database file
LABEL GEOMETRY OFF
* E0030: Incorrect definition of body B4 at surface S41
* E0030: Incorrect definition of body B7 at surface S55
* E0030: Incorrect definition of body B15 at surface S84
* E0030: Incorrect definition of body B17 at surface S81
* E0030: Incorrect definition of body B31 at surface S141
LABEL GEOMETRY BODIES
* E0030: Incorrect definition of body B4 at surface S41
* E0030: Incorrect definition of body B7 at surface S55
* E0030: Incorrect definition of body B15 at surface S84
* E0030: Incorrect definition of body B17 at surface S81
* E0030: Incorrect definition of body B31 at surface S141
UTILITY DELETE BODIES B4
* E0030: Incorrect definition of body B4 at surface S41
! Confirm delete?
YES
* W0011:Deleted- B4
UTILITY DELETE BODIES B7
* E0030: Incorrect definition of body B7 at surface S55
! Confirm delete?
YES

```

```

* W0011:Deleted- B7
UTILITY DELETE BODIES B15
* E0030: Incorrect definition of body B15      at surface      S84
! Confirm delete?
YES
* W0011:Deleted- B15
UTILITY DELETE BODIES B17
* E0030: Incorrect definition of body B17      at surface      S81
! Confirm delete?
YES
* W0011:Deleted- B17
UTILITY DELETE BODIES B31
* E0030: Incorrect definition of body B31      at surface      S141
! Confirm delete?
YES
* W0011:Deleted- B31
SAVE
! Confirm save?
YES
* M423: Saved to database file
GEOMETRY POINT COORD P97 0 50 257.5
GEOMETRY POINT COORD P98 500 50 257.5
GEOMETRY POINT COORD P99 0 250 257.5
GEOMETRY POINT COORD P100 500 250 257.5
SAVE
! Confirm save?
YES
* M423: Saved to database file
PROPERTY MATERIAL LECA ELASTIC ISOTROP 3500 .2
PROPERTY MATERIAL ISO ELASTIC ISOTROP 12.57 .2
PROPERTY MATERIAL STEEL ELASTIC ISOTROP 200000 .3
PROPERTY PHYSICAL REBAR GEOMETRY TRUSCABL 20
MESHING DIVISION ELSIZE ALL 15
* E3200: Incorrect command: CONSTRUCT SET STEIN < open >
CONSTRUCT SET OPEN STEIN
* E3200: Incorrect command: CONSTRUCT SET APPEND BODIES B3 B5 B6
B8 B1 B12 B13
CONSTRUCT SET APPEND BODIES B3 B5 B6 B8 B1 B12 B13 B14
CONSTRUCT SET APPEND BODIES B30 B34 B35 B36 B25 B28 B32 B40 B39
B27
CONSTRUCT SET CLOSE
CONSTRUCT SET OPEN POLY
CONSTRUCT SET APPEND BODIES B2 B9 B10 B11 B29 B33 B37 B38 B26
CONSTRUCT SET CLOSE
CONSTRUCT SET OPEN CEMENT
CONSTRUCT SET APPEND BODIES B21 B16 B22 B18 B23 B19 B24 B20
CONSTRUCT SET CLOSE
CONSTRUCT SET OPEN LAST
CONSTRUCT SET APPEND SURFACES S42 S86 S147 S148
CONSTRUCT SET CLOSE
SAVE
! Confirm save?
YES
* M423: Saved to database file

```

PROPERTY MATERIAL MORTEL ELASTIC ISOTROP 20000 .2  
LABEL GEOMETRY POINTS  
REINFORCE BAR SECTION RE1 P97 P98  
REINFORCE BAR SECTION RE2 P99 P100  
PROPERTY ATTACH STEIN LECA  
PROPERTY ATTACH POLY ISO  
PROPERTY ATTACH CEMENT MORTEL  
SAVE  
! Confirm save?  
YES  
\* M423: Saved to database file  
MESHING GENERATE  
VIEW MESH  
VIEW GEOMETRY ALL  
LABEL GEOMETRY SURFACES  
PROPERTY LOADS PRESSURE L01 LAST 0.005 Y  
CONSTRUCT SET OPEN FUGE  
CONSTRUCT SET APPEND S1 S3 S4 S6 S7 S9 S10 S12  
CONSTRUCT SET CLOSE  
CONSTRUCT SET OPEN SKJOT  
CONSTRUCT SET APPEND S144 S118 S83 S61 S131  
CONSTRUCT SET CLOSE  
CONSTRUCT SET OPEN OPP  
CONSTRUCT SET APPEND S106 S62 S13  
CONSTRUCT SET CLOSE  
PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT C01 OPP Y  
PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT C02 SKJOT NOROTATE  
PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT C03 FUGE Z

**.HIS-fila til grunnmursmodellen i DIANA**

```
! iDIANA Version 10.0 Release 07
! Installed for : Norwegian Institute of Sc.&Tec
! History file for model : KJELLER3D
! Session started at 23 MAY 2016 12:27:23
FEMGEN KJELLER3D
PROPERTY FE-PROG DIANA STRUCT_3D ; YES
UTILITY SETUP UNITS LENGTH METER
UTILITY SETUP UNITS MASS KILOGRAM
UTILITY SETUP UNITS FORCE NEWTON
UTILITY SETUP UNITS TIME SECOND
UTILITY SETUP UNITS TEMP KELVIN
UTILITY SETUP UNDO ON
UTILITY SETUP BINSET OFF
MESHING OPTIONS CHECK STRUCTURED OFF
UTILITY SETUP OPTIONS ANALYSIS SOLVER-COMMAND DianaIE
DRAWING DISPLAY
GEOMETRY POINT COORD P1 0
GEOMETRY POINT COORD P2 4 0
GEOMETRY POINT COORD P3 4 2.5
GEOMETRY POINT COORD P4 0 2.5
GEOMETRY POINT COORD P5 0 0 .82E-1
GEOMETRY POINT COORD P6 4 0 .82E-1
GEOMETRY POINT COORD P7 4 2.5 .82E-1
GEOMETRY POINT COORD P8 0 2.5 .82E-1
GEOMETRY POINT COORD P9 0 0 .218
GEOMETRY POINT COORD P10 4 0 .218
GEOMETRY POINT COORD P11 4 2.5 .218
GEOMETRY POINT COORD P12 0 2.5 .218
GEOMETRY POINT COORD P13 0 0 .3
GEOMETRY POINT COORD P14 4 0 .3
GEOMETRY POINT COORD P15 4 2.5 .3
GEOMETRY POINT COORD P16 0 2.5 .3
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S1 P1 P2 P3 P4
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S2 P5 P6 P7 P8
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S3 P1 P2 P6 P5
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S4 P4 P3 P7 P8
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S5 P1 P5 P8 P4
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S6 P2 P3 P7 P6
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S7 P9 P10 P11 P12
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S8 P5 P6 P10 P9
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S9 P8 P7 P11 P12
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S10 P5 P8 P12 P9
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S11 P6 P7 P11 P10
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S12 P13 P14 P15 P16
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S13 P9 P10 P14 P13
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S14 P12 P11 P15 P16
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S15 P13 P9 P12 P16
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S16 P14 P10 P11 P15
GEOMETRY BODY 6SURFS B2 S2 S7 S11 S10 S9 S8
GEOMETRY BODY 6SURFS B3 S7 S12 S13 S14 S15 S16
PROPERTY MATERIAL ISO ELASTIC ISOTROP 12.57E6 0
PROPERTY MATERIAL STEEL ELASTIC ISOTROP 200000E6 0.3
PROPERTY MATERIAL LECA ELASTIC ISOTROP 4100E6 0.2
CONSTRUCT SET OPEN STEIN
```



```
CONSTRUCT SET APPEND B1 B3
CONSTRUCT SET CLOSE
PROPERTY LOADS PRESSURE L01 S1 1000 Z
CONSTRUCT SCURVE SC1 SURFACE CORNERS 1 1 0 0
PROPERTY ATTACH L01 SC1
MESHING TYPES 6SURFS HE8 HX24L
MESHING DIVISION ELSIZE ALL .82E-1
* W0133:Mesh cancelled above NN= 0 and NE= 0
MESHING GENERATE
VIEW MESH
EYE ZOOM .417 .36 .585 .228
EYE FRAME
EYE ZOOM .381 .549 .637 .199
LABEL MESH LOADS
VIEW GEOMETRY ALL
LABEL GEOMETRY LINES
CONSTRUCT SET OPEN UTE
CONSTRUCT SET APPEND L1 L2 L3 L4
CONSTRUCT SET CLOSE
CONSTRUCT SET OPEN INNE
CONSTRUCT SET APPEND L21 L22 L23 L24
CONSTRUCT SET CLOSE
PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT C01 UTE Z
PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT C02 INNE Z
PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT C03 P1 y
PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT C04 P2 X Y
PROPERTY BOUNDARY CONSTRAINT C05 P3 X
CONSTRUCT SET OPEN POLY
CONSTRUCT SET APPEND B2
CONSTRUCT SET CLOSE
PROPERTY ATTACH POLY ISO
PROPERTY ATTACH STEIN LECA
SAVE
! Confirm save?
YES
DRAWING DISPLAY
```