ANKER - ZEMER Engineering A/S

Räddningscentral (“RC 90”) utsatt för explosionslast vid markytan, Sjöbo sand

Explicita lösare som använts är
ANSYS / LS-DYNA och AUTODYN

Leo Laine

Oslo, november 2000

Förord

Rapporten redovisar arbetsläget i projektet ’Modellering av RC 2000 betongbyggnad i mark vid explosionslast vid markytan’.

Arbetet som presenteras i rapporten har utförts från mars till november 2000. Projektet finansieras av Statens Räddningsverk.

Ett stort tack till Björn Ekengren på Räddningsverket som både har visat stort intresse och bidragit till projektets framfart. Tack också till Håkon Heyerdahl och Christian Madshus, Norges Geotekniske Institutt (”NGI”) för deras givande arbete och diskussioner inom projektet. Morgan Johansson, Reinertsen, har varit till stor hjälp i de diskussioner som vi har haft kring projektet. Tack också till Rickard Forsén, Tyrens, för inslag och givande kommentarer. Tyrens är involverad i studier av komponenter och personal hos RC.

Oslo, november 2000

Leo Laine

Innehåll

FÖRORD **2**

INNEHÅLL **3**

SAMMANFATTNING **5**

1. INLEDNING **6**

1.1 KORTFATTAD BESKRIVNING AV FE-MODELLEN FÖR ANSYS/LS-DYNA 6

2. TERMINOLOGI **6**

3. ANTAGANDEN **7**

4 PARAMETRISK FE-MODELL FÖR LS-DYNA AV RC 90 SJÖBO **8**

4.1 GEOMETRI 8
4.2 RANDVILLKOR, PROCESSORER (LAGRANGE OCH EULER), OCH KOPPLINGAR 13
4.3 MATERIALMODELLER 14

5 CHOCK ABSORBERANDE LAGER SOM FYLLNADSMATERIAL **24**

5.1 INLEDNING 24
5.2 MATERIALDATA FÖR LECA OCH EPS 24
5.3 STUDIE AV LECA’S ABSORPTIONSFÖRMÅGA (1D) ENAXLIG TÖJNINGSTILLSTÅND 29
5.4 STUDIE AV LECA’S ABSORPTIONSFÖRMÅGA (2D) AXI-SYMMETRI 31
5.5 SLUTSATSER KRING FÖRSTUDIEN AV CHOCK ABSORBERANDE LAGER 39

6. RESULTAT FRÅN TVÅ LASTFALL FRÅN LS-DYNA MODELL **39**

6.1 HELHETSRESULTAT 43
6.2 STRUKTURRESPONS HOS RC 90 46

6 SLUTSATSER OCH DISKUSSIONER **50**

8. REFERENSER **51**

BILAGA 1: INDATAFILEN RC2000M.TXT TILL PRE-PROCESSORN ANSYS/LS-DYNA™. **53**

BILAGA 2: FLUID/STRUKTUR KOPPLING MELLAN MARK UTANFÖR BYGGNAD (EULER) OCH MARKEN UNDER BYGGNAD (LAGRANGE) I ANSYS/LS-DYNA. **68**

BILAGA 3: KEYWORDFILEN RC2000DIST5.K TILL LS-DYNA V950 ..... **69**

BILAGA 4: FRAMTAGNING AV MATERIALPARAMETRAR TILL LS-DYNA FÖR SJÖBO SAND **72**

TILLSTÅNDSEKVATIONEN (”EOS”) 72
POISSON’S TAL, ν 73
SKJUVMODUL, G 74
FLYTGRÄNSYTOR OCH PLASTICITET 74

BILAGA 5: 1-ELEMENT TEST AV FRAMTAGNA MATERIALPARAMETRAR FÖR SJÖBO SAND. **79**

SIMULERING AV DEN STEGVISA ISOTROPISKA KONSOLIDERINGEN 79
SIMULERING AV DE TRIAXIELLA SKJUVPROVEN 80

BILAGA 6: FRAMTAGNING AV MATERIALPARAMETRAR FÖR LECA, EPS, SAMT SAND FÖR AUTODYN. **86**

TILLSTÅNDSEKVATIONEN (”EOS”) FÖR LS-DYNA 86

TILLSTÅNDSEKVATIONEN (”EOS”) FÖR AUTODYN 87
MATERIALMODELL MOHR-COLOUMB I AUTODYN 89

BILAGA 7: 1-ELEMENT TEST AV FRAMTAGNA MATERIALPARAMETRAR FÖR LECA OCH EPS. 90

1-ELEMENT TEST AV DE PASSIVA TRIAXIALFÖRSÖKEN FÖR LECA OCH EPS FÖR LS-DYNA 90

Sammanfattning

I Sverige finns existerande och planerade Räddningscentraler (”RC 90”) för ledning av civilförsvaret under höjd beredskap och i krig. Dessa byggs alltid i samband med brandförsvars centraler. Detta ger RC 90 en meningsfull användning under fred. Räddningscentralerna konstrueras som en- eller tvåvånings byggnader. Bottenvåningen är belägen under marknivå. Byggnadsstommen består huvudsakligen av armerad betong, där väggtjocklekar ofta utförs tjockare än i normala bostadshus. Normal väggtjocklek hos RC 90 brukar vara 400 till 800 millimeter. RC 90 är av kostnadsskäl inte utförd fullträffsäker. De är dimensionerade för konventionella vapenlaster som detonerar på ett visst avstånd från strukturen.

Skydd av installationer och nyckelpersoner mot vibrationer och accelerationer är mycket viktigt för att Räddningscentralen skall kunna upprätthålla sin lednings funktion vid och efter den här typen av laster.

Luft- och markstötsvågor samt splitter är vanligt förekommande vapenlaster. Dessa laster introducerar chockvågor in i den skyddande byggnadsstommen. Dessa kan beräknas med hjälp av explicita koder, som till exempel LS-DYNA och AUTODYN.

Rapporten behandlar framtagning av materialdata från provning som utförts av NGI på sand från platsen där Sjöbos Räddningscentral är lokaliserad. I rapporten diskuteras också chock-absorberande lager såsom LECA och EPS. LECA har flera positiva effekter som gör den intressant att använda som fyllnadsmaterial vid Räddningscentraler för att skydda mot markstötvåg.

I rapporten redovisas en parametrisk finita element modell av en RC 90 uppbyggd med hjälp av ANSYS / LS-DYNA™. Fluid / struktur koppling används för att generera vapenlaster på den skyddande byggnadsstommen. Fluiden (euler) består av en mix av tre material: sprängämne, luft, och jord. Betongkonstruktionen modelleras med solida element (lagrange) med solida lager av armering. Två produktionskörningar avrapporteras här där placeringen av bomben varieras: fullt nergrävd på 1.5 meters djup med olika avstånd till byggnaden 5.0 och 3.5 meter. Tidigare rapporter inom projektet är [1]-[4]:

[1] behandlar framtagning av materialdata från provning som utförts av NGI på White Sand (c=250-300 [m/s] och densiteten 1620 [kg/m^3]) från Los Alamos.

[2] och [4] behandlar vattenmättad sandig lera (c=1500 [m/s] och densiteten 1900 [kg/m^3]) och vilka materialdata som kan användas för att beskriva dessa med existerande materialmodeller i LS-DYNA.

[3] behandlar grundläggande uppbyggnad av en FE-modell i ANSYS/LS-DYNA som tar hänsyn till detonationen av en laddning i mark och luft och dess respons på en byggnad.

1. Inledning

FE-modellen för ANSYS / LS-DYNA så simuleras själva sprängningen av ett konventionellt vapen som detonerar på ett visst horisontellt avstånd från RC 90. Detonationen kan ske ovan mark eller delvis eller fullt begravt läge. Chockvågor i omgivande luft och mark introduceras på grund av detonationen. För att generera dessa luft- och markstötvågor används en fluid (euler-nät) bestående av en mix av tre material, sprängämne, luft, och jord.

Räddningscentralens betongstomme är uppbyggd av solida element med lager av utsmetad armering. Detta nät är ett rörligt element nät (lagrange) som beskriver strukturens beteende vid vapenverkan. I LS-DYNA version 950 finns det en implementerad algoritm för att lösa kopplingen mellan fluid (euler) och struktur (lagrange).

1.1 Kortfattad beskrivning av FE-modellen för ANSYS/LS-DYNA

Byggnad: RC 90 Sjöbo, en 2- våningsbyggnad där bottenvåningen är placerad under marknivå. Byggnadsstommen är av slakarmerad betong. Betongkvalitet K40 och armeringskvalitet Ks400, där ytterväggar har 2 lager korslagd armering ϕ14 [mm], centrumavstånd 200 [mm], och täckskickt 40 [mm]. Ytterväggstjockleken är 500 [mm].

Hotbild: MK 82, med ett horisontellt avstånd på 5 och 3.5 meter till RC 90. Fullt nergrävd med tyngdpunkten placerad på 1.5 [m] djup under markytan. Ekvivalent laddningsmängd i TNT används i simuleringarna.

Jordtyp: I rapporten har materialdata för sand från Sjöbo tagits fram från materialprovningen som har utförts av NGI, see [5]. In situ densiteten är 1674 [kg/m^3] seismiska ljudhastigheten är cirka 250-350 [m/s].

Två produktionskörningar redovisas i rapporten:

Modell D: Fullt nergrävd bomb med dess tyngdpunkt placerad 1.5 meter under markytan, 5 meters avstånd till RC 90.

Modell E: Samma som modell D förutom att endast avståndet mellan laddning och RC 90 har ändrats från 5.0 till 3.5 meter.

2. Terminologi

En del ord och förkortningar som har använts i rapporten som förklaras i korthet nedan:

RC 90	Räddningscentral av typen RC 90, med en typisk utformning; 2- våningsbyggnad med byggnadsstomme av slakarmerad betong, där ytterväggar har en tjocklek på 400 till 800 [mm]. Bottenvåning är placerad under marknivå.
Utsmetad armering	Skickt av hexaederelement som ger armeringens bidrag till strukturens globala styvhet (LS-DYNA).

Parametrisk FE-modell	Geometrimodellen är uppbyggd av parametrar vilket förenklar arbetet med parameter studier av olika versioner av RC 90, placering av laddning m.m (LS-DYNA).
Euler	LS-DYNA’s algoritm för att lösa EULER och ALE, se [7]-[9]. Kortfattat beskrivet: ett ’normalt’ lagrange steg beräknas sedan uppdateras elementnätet tillbaka, med hjälp av en splitoperationsteknik, med denna teknik får fluiden ett ’fast element nät’ där massor, rörelsemängd och energi transporteras genom elementen.
Fluidmix	I LS-DYNA används en algoritm, *ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP som gör det möjligt att sammansätta maximalt 3 material, här sammansätts sprängämne, luft, och jord.

3. Antaganden

Vid uppbyggnaden av FE-modellen för ANSYS/LS-DYNA av RC 90 Sjöbo har följande antaganden gjorts:

Endast strukturrespons av RC 90 studeras, byggnader sammanhängande med RC 90 modelleras inte. Samt att deras påverkan i strukturresponsen anses ringa.

Att den globala strukturresponsen hos RC 90 kan tas hänsyn till genom att jordfyllning med begränsad utbredning används på motsatt sida till angreppssidan.

Att kontakten mellan mark under byggnad och byggnaden kan simuleras med vanlig kontakt algoritm *CONTACT_SURFACE_TO_SURFACE med en friktionskoefficient på cirka 0.5.

Att ekvivalent massa av sprängämnet TNT kan beskriva detonationen av bomben MK 82. Här tas ej hänsyn till höljets energiupptagande förmåga.

Två symmetriplan kan användas för att minimera modellen. De sammanfaller i laddningens centrumaxel.

Armering i innerväggar kan försummas, p.g.a. att de huvudsakligen upplever tryckspänning och skjuvspänning i planets riktning vid aktuell geometri av RC 90 och lastfall.

Jordens gravitation har ringa eller mycket liten betydelse vid den här typen av last.

4 Parametrisk FE-modell för LS-DYNA av RC 90 Sjöbo

SI- enheter har använts för att definiera geometri och materialegenskaper. Viktigaste enheterna [m], [s], [Kg], [N] och [Pa]=[N/m^2].

4.1 Geometri

En förenklad modell av RC 90 vid Sjöbo har utförts på den existerande modell som har tidigare redovisats i [1]-[4]. Den största skillanden är att jorden under byggnaden har tagits med.

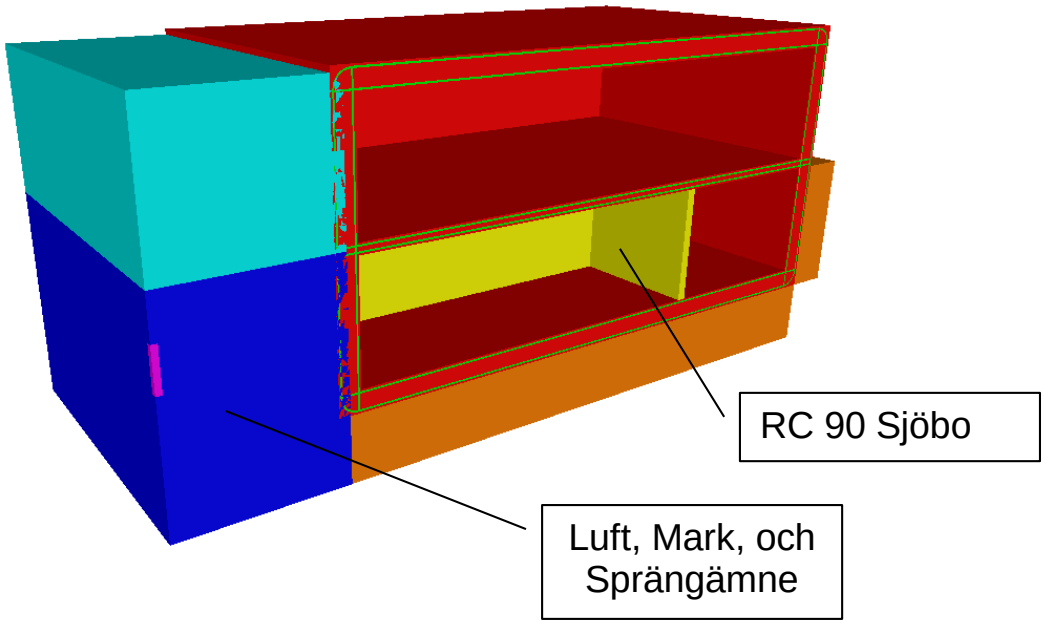
Pre-processorn ANSYS/LS-DYNA™ användes, se [6]. Geometrin byggs huvudsakligen av primitiva volymer såsom rätblock, cylindrar, och sfärer, med dessa utförs boliska operationer för att skapa nya volymer. Volymerna har även beskurits med hjälp av ytor och arbetsplan (Workingplane). Dessa primitivers position, längder, och radier m.m. har givits med parametrar definierade högst upp i indatafilen *RC2000m.txt*, se Bilaga 1. De viktigaste parametrarna för geometrin av RC 90 Sjöbo och fluidmixen är redovisade nedan (siffror i parentes är använda värden i analyserna):

DISTX (5.0 och 3.5 [m])	Horisontellt avstånd mellan laddning och RC 90 (x-rikning).
DISTY (7.15 [m])	Horisontell längd hos RC 90 (y-riktning). Den totala byggnadens längd är DISTY+THICK. P.g.a. symmetri modelleras halva byggnaden.
DISTZ (5.65 [m])	Vertikal höjd hos RC 90 (z-riktning). Den totala byggnadens höjd är DISTZ+2*THICK.
DISTZEX (1.0 [m])	Extra jord i vertikalled (z-riktning).
THICK (0.5 [m])	Ytterväggtjocklek hos RC 90. Yttre tak- och golvbjälklag har samma tjocklek.
COVER1 (0.04 [m])	Yttre täckskickt, i alla armerade betongväggar och bjälklag har detta värde använts.
COVER2 (0.04 [m])	Inre täckskikt, i alla armerade betongväggar och bjälklag har detta värde använts.
REINF1 (0.04 [m])	Yttre utsmetat armeringslager, i alla armerade betongväggar och bjälklag har detta värde använts.
REINF2 (0.04 [m])	Inre utsmetat armeringslager, i alla armerade betongväggar och bjälklag har detta värde använts.
XWALL (12.0 [m])	RC 90’s horisontala längd i x-riktning.
MFTHICK (0.25 [m])	Mellanbjälklagets tjocklek.
IWTHICK (0.2 [m])	Innerväggstjocklek i källarplan.

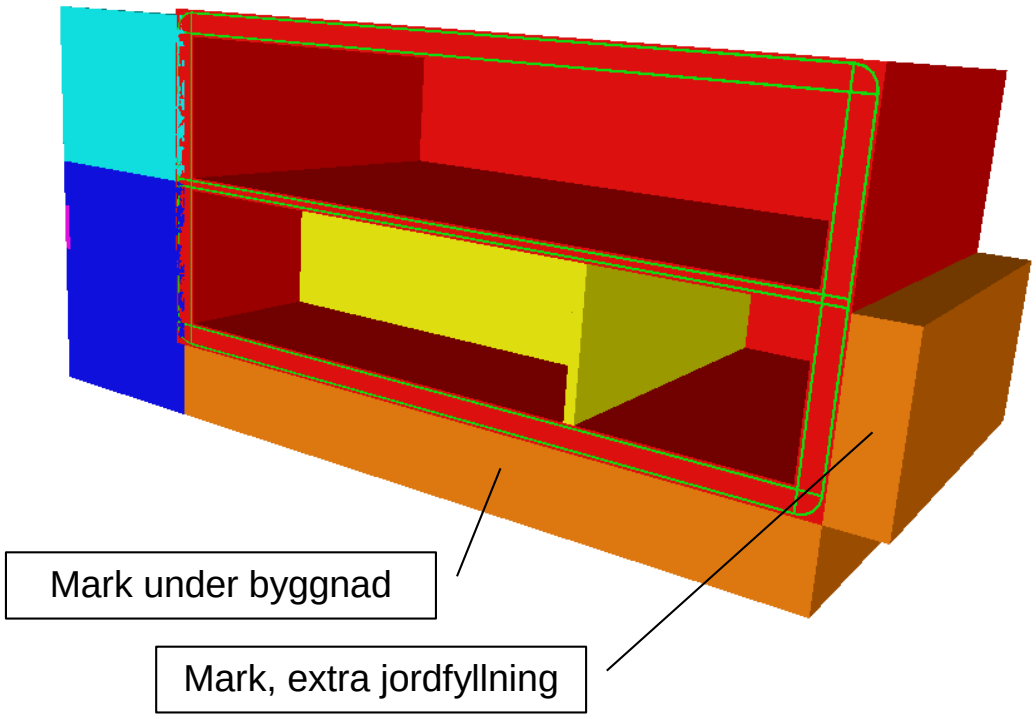
LNOWALL (3.8 [m])	Längd i x-riktning där ingen innervägg existerar.
YINNER (3.15 [m])	Placering av innervägg i källarplan i y-riktning.
OVERLAPX (0.25 [m])	Överlappning av EULER / LAGRANGE.
D (0.02 [m])	Tolerans vid selektering av volymer, areor, linjer, knutpunkter m.m.
A (0.132 [m])	Sprängämnets halva tvärsnittsbredd.
L (0.55 [m])	Sprängämnets halva höjd.

Mer parametrar kan utan större arbete byggas in i FE-modellen. Exempel på parametrar som kan vara bra att bygga in; Fluidmixens utbredning i x-, y- och z-led, hur mycket av fluidmixen som ska överlappa strukturen (just nu används ett värde på THICK/2), placering av innerväggar m.m.

Figur 4.1.1 – 4.1.2 visar geometrin hos FE-modellen. Modellens globala koordinatsystems origo är placerat i höjd med källarplanets golv samt vid laddningens centrum. Detta medför att laddningens tyngdpunkt är (0.0, 0.0, 1.5). Markytan ligger på planet (x, y, DISTZ/2). Närmaste punkten från laddningens centrum till RC 90 är (DISTX, 0.0, 1.5).



Figur 4.1.1. Vy av geometri hos FE-modell, **modell E**.



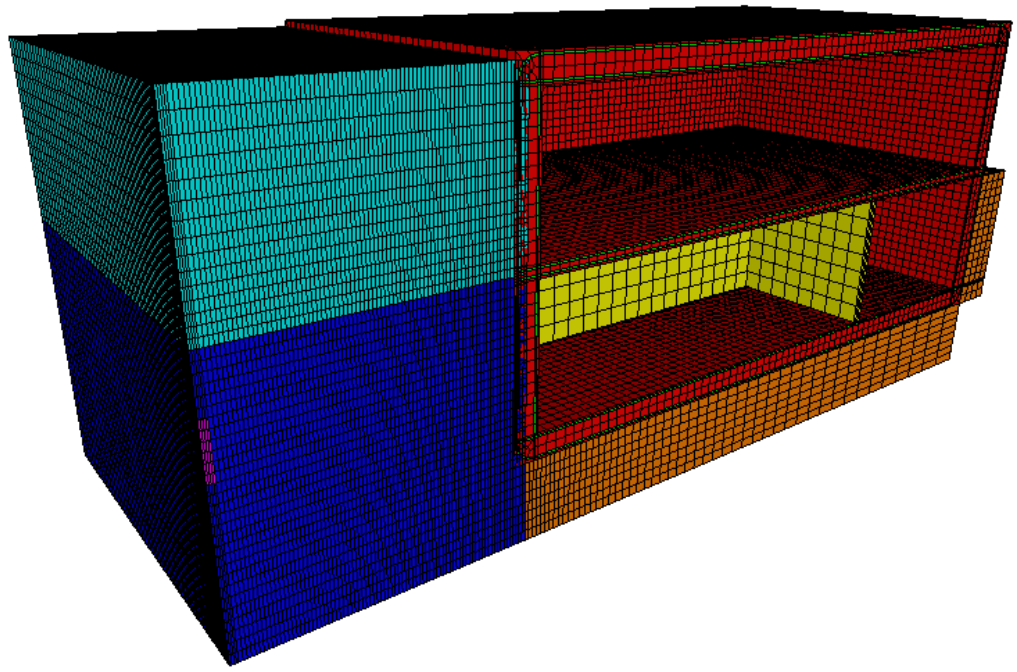
Figur 4.1.2. Vy av geometri hos FE-modell, **modell E**.

Elementtätheten styrs med hjälp av parametrar nedan redovisas några av de mest elementära:

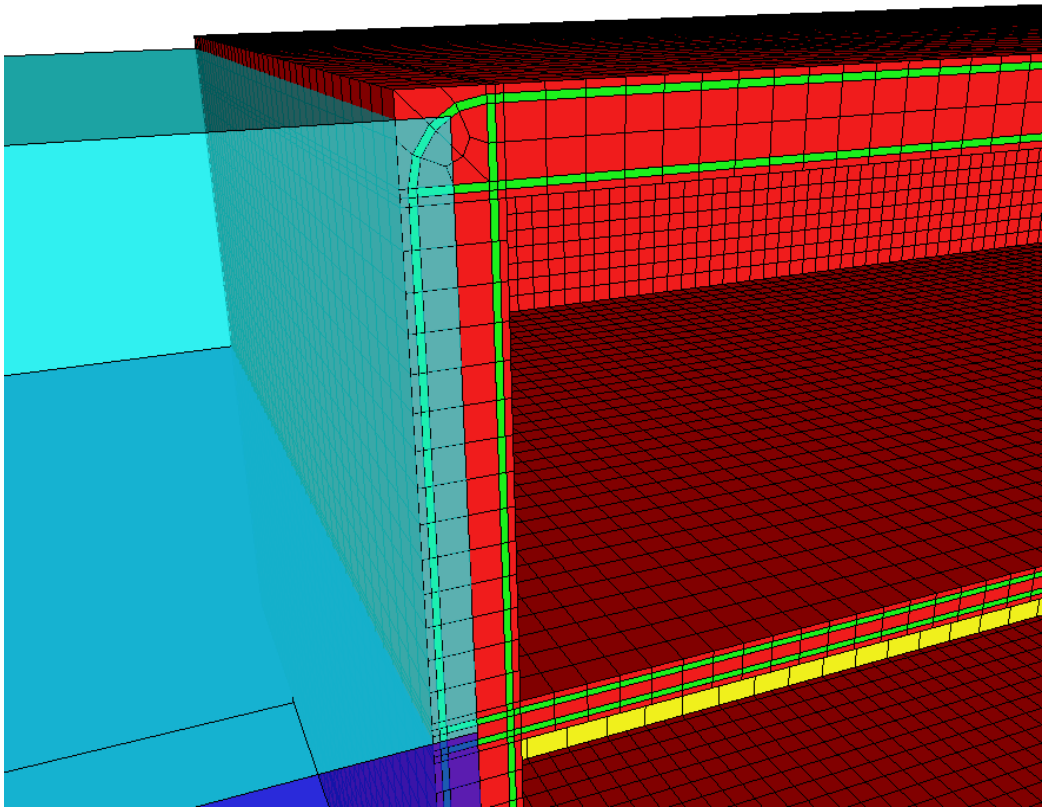
CC (0.2 [m])	Centrumavstånd hos armering, har använts som maximal storlek hos volymselement i RC 90.
MX1 (1 [-])	Heltal som beskriver antalet element genom yttre täckskiktslagret.
MX11 (1 [-])	Heltal som beskriver antalet element genom yttre utsmetat armeringslager.
MXM (2 eller 4 [-])	Heltal som beskriver antalet element genom mellan lagret av ’ren’ betong.
MX22 (1 [-])	Heltal som beskriver antalet element genom inre utsmetat armeringslager.
MX2 (1 [-])	Heltal som beskriver antalet element genom inre täckskiktslagret.
ELLENGTH (0.2 [m])	Maximal elementstorlek hos fluidmixen.
MANSX (80 o 60 [-])	Beskriver antalet element i x-riktning hos fluidmixen.

MANSY (60 [-])	Beskriver antalet element i y-riktning hos fluidmixen.
MANSZ (21 [-])	Beskriver halva antalet element i z-riktning hos fluidmixen.
AEX (4 [-])	Beskriver antalet element i x-riktning vid sprängämnet.
AEY (4 [-])	Beskriver antalet element i y-riktning vid sprängämnet.
EDIVZ (8 [-])	Beskriver antalet element i z-riktning hos marken under byggnad.
EDIVX (50 [-])	Beskriver antalet element i x-riktning hos marken under byggnad.
RATIOX (8 [-])	Förändring av elementlängden i x-riktning hos marken under byggnad.

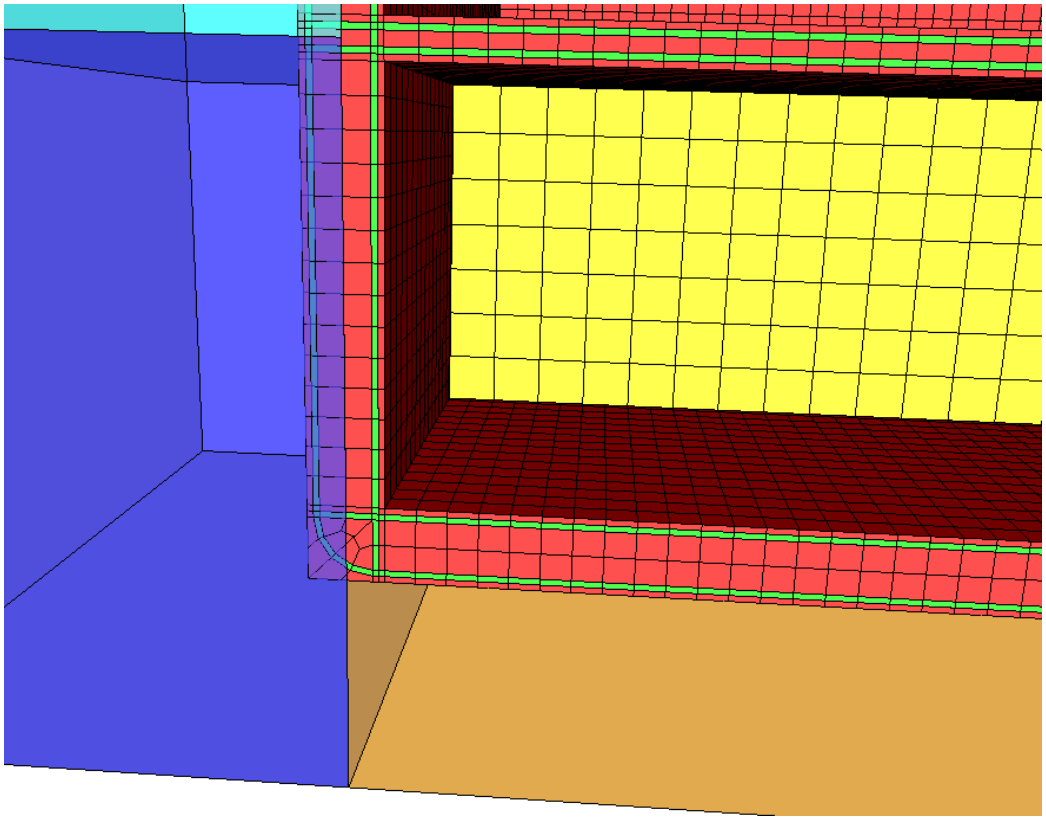
Det kan finnas anledning att optimera elementnätet i större utsträckning än ovan givna möjligheter. Till exempel finare elementnät i fluiden lokalt t.ex. vid laddning och vid RC 90’s vägg. Bakre delen av RC 90 kunde modelleras med grövre elementnät. Figurerna 4.1.3-4.1.5 redovisar elementnätet.



Figur 4.1.3. Elementnät hos hela FE-modellen, **modell D.**



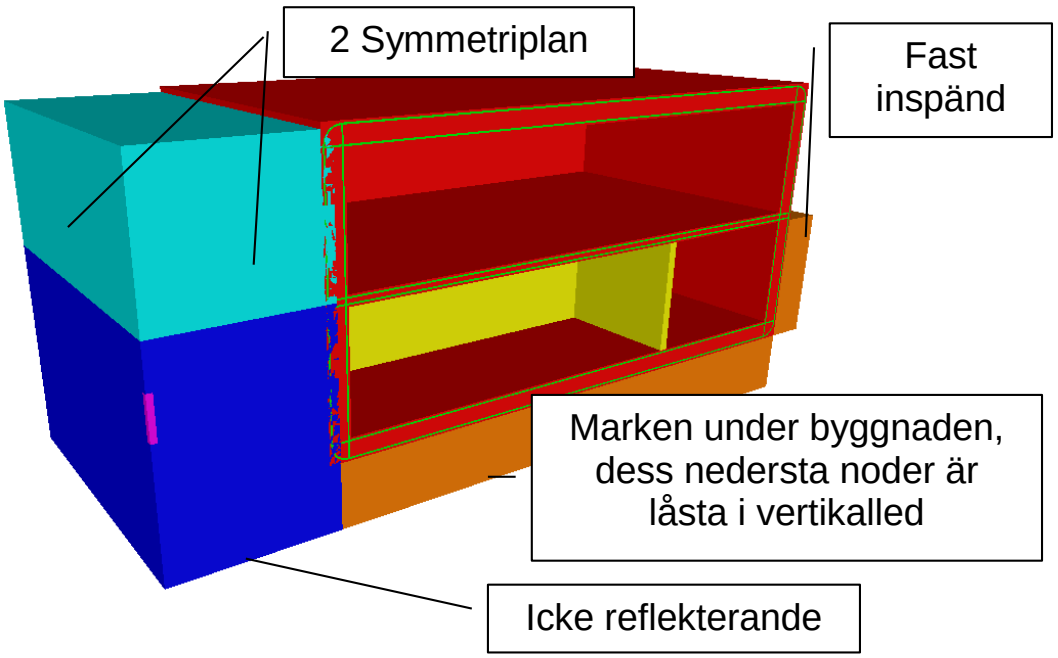
Figur 4.1.4. Elementnät hos ramhörn.



Figur 4.1.5. Elementnät hos hörn, bottenbjälklag, och mellanbjälklag.

4.2 Randvillkor, processorer (Lagrange och EULER), och kopplingar

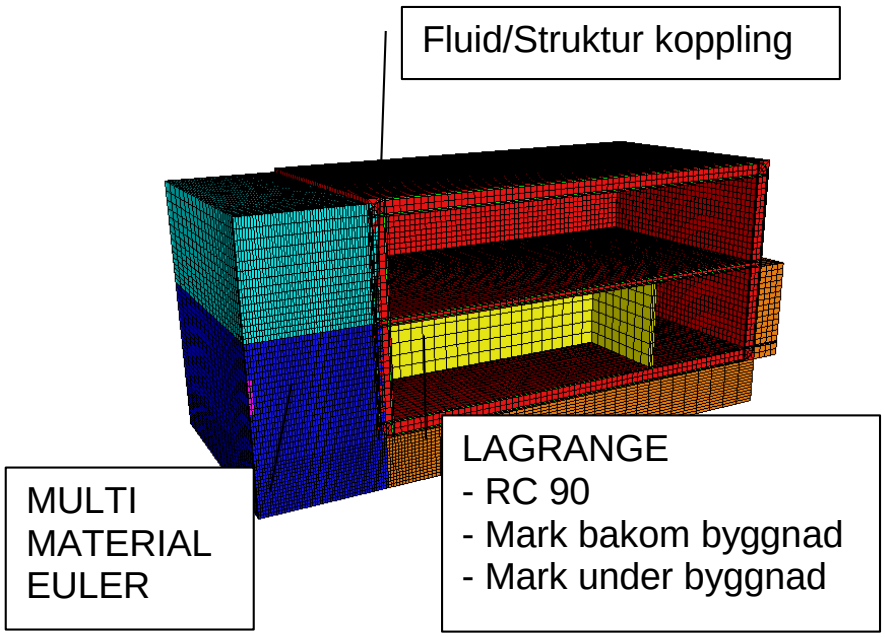
Två symmetriplan används i modellen, de korsar varandra genom bombens centrumaxel. Icke reflekterande randyta används på bottenytan hos jorden på angreppssidan. Detta är viktigt för att kunna minska jordens utbredning. På motsatt sida till angreppssidan används en jordfyllnad för att kunna ta hänsyn till byggnadens globala respons. Bakre ytan av jordfyllnaden anses som fast inspänd, se figur 4.2.1. Jorden under byggnaden har tagits med för att kunna beskriva källarbjälklagets respons med hänsyn till marken under byggnaden.



Figur 4.2.1. Randvillkor på FE-modellen, **modell E**.

Processorn EULER används för fluidmixen. Den åstadkoms genom en splitoperations teknik , samma som för ALE. Vid varje beräkningscykel utförs en klassisk Lagrange fas som följes av en ’omzonings-’ och advektionfas, där de konservativa variablerna, massa, rörelsemängd, och energi transporteras. Antalet Lagrange faser mellan advektionsfas är satt till ett. En multi-material algoritm finns i LS-DYNA v950, den tillåter upp till tre material blandas i ett element. Simple Line Interface Calculation (”SLIC”) används för advektion av material mellan mixade element, se [7]-[9].

Fluid/Strukturkoppling används för att transportera information mellan Fluidmixen till Lagrange strukturen, RC 90. Fluidmixen måste överlappa Lagrange strukturen för att interaktionen skall uppstå. Alla EULER element som innehåller en lagrange punkt är kopplade, [9]. I figur 4.2.2. visas de olika processorerna. För fluid/struktur koppling mellan marken utanför och marken under har noderna sammanslagits, vilket gör att randnoderna i EULER rör sig som Lagrange, vilket överför lasten till marken under byggnad som är av typen Lagrange, se bilaga 2.



Figur 4.2.2 Processorer, koppling, **modell E**.

4.3 Materialmodeller

I bilaga 3 redovisas ett exempel av indatafil till LS-DYNA med kontrollkort och materialkort som används vid exekveringen av modell D och E. Nedan beskrivs de materialmodeller som har använts i FE-modellen för ANSYS/LS-DYNA:

SPRÄNGÄMNE

Sprängämne av typen TNT med densiteten 1630 [kg/m^3] användes i fluidmixen. Spränggaserna modelleras med hjälp av en modell enligt JWL (JONES-WILKINS-LEE) vilket ger en noggrann beskrivning av tryck i närheten av sprängämnet. Materialmodellen *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN samt tilltståndsekvationen (”EOS”) *EOS_JWL. I tabell 4.3.1 redovisas använda materialvärden. Värden för olika sprängämnen återfinns i [10].

Tabell 4.3.1 Använda materialvärden för TNT.

*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN	
Densitet, [kg/m^3]	1630
Detonationshastighet, [m/s]	6930
Chapman-Jouget (C-J) tryck [Pa]	$21.0 \cdot 10^9$
*EOS_JWL	
Parameter A, [Pa]	$3.738 \cdot 10^{11}$
Parameter B, [Pa]	$3.747 \cdot 10^9$
Parameter R_1, [-]	4.1500001
Parameter R_2, [-]	0.9
Parameter OMEG, [-]	0.35
E_0, C-J energi/enhet, [J/m^3]	$6.0 \cdot 10^9$
V_0, Initiell relativ volym, [-]	1.0

Sprängämnets tillståndsekvation (”EOS”):

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) e^{-R_2 \cdot V} + \frac{\omega \cdot E}{V} \qquad \text{ekv. 4.3.1}$$

LUFT

Luften i fluidmixen modellerades som en ideal gas enligt tillståndsekvation γ-lagen med densiteten 1.3 [kg/m^3], $\gamma = C_p/C_v = 1.4$ och en inre energi 192 [kJ/kg] vilket motsvarar temperaturen 0 grader celsius och atmosfärs tryck på cirka 100 [kPa]. En modifierad tillståndsekvation används, se ekvation 4.3.2. En extra konstant, C_0, har lagts till för att undvika komplikationer med FE-modellen som innehåller Multi-material algoritmen. Där små initiella tryck skulle leda till oönskade hastigheter, se även [11]. Materialmodellen *MAT_NULL och tillståndsekvationen *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL användes för luften. I tabell 4.3.2 redovisas använda materialvärden.

Tabell 4.3.2 Använda materialvärden för LUFT.

*MAT_NULL	
Densitet, [kg/m^3]	1.3
P_c, [Pa]	0.0
Viskositetskoefficient, [Pa/s]	$17.1 \cdot 10^{-6}$
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL	
$C_1 = C_2 = C_3 = C_6$	0.0
$C_4 = C_5 = \gamma - 1$	0.4
E_0, [Pa]	$2.5 \cdot 10^5$
V_0, Initiell relativ volym, [-]	1.0
C_0, Extra konstant, [Pa]	$-100 \cdot 10^3$

Tillståndsekvationen för luften blir:

$$p = (\gamma - 1) \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \cdot E + C_0 \qquad \text{ekv. 4.3.2}$$

JORD

Här har materialparametrar för Sjöbo Sand tagits fram ur försök [5]. Hur materialparametrar för tillståndsekvation (”EOS”) och tryckhårdnande flytgränsytor såsom Mohr-Coulomb skall tas fram ur försök redovisas i [14].

Materialprovningen hos NGI utfördes för in situ (aktuell) densitet för sanden och en hög densitet. Två tillståndsekvationer togs fram: en för in situ densitet och en för hög densitet. För båda tillståndsekvationerna används samma flytgränsytor för materialmodellen. Detta har visat sig ge rimlig överensstämmelse för ett brett spektrum av spänningsfall.

Materialmodellen *MAT_PSEUDO_TENSOR har använts tillsammans med tillståndsekvationen *EOS_TABULATED_COMPACTION. Framtagandet av materialparametrar från försök och simulering av dessa försök redovisas i Bilaga 4 och Bilaga 5.

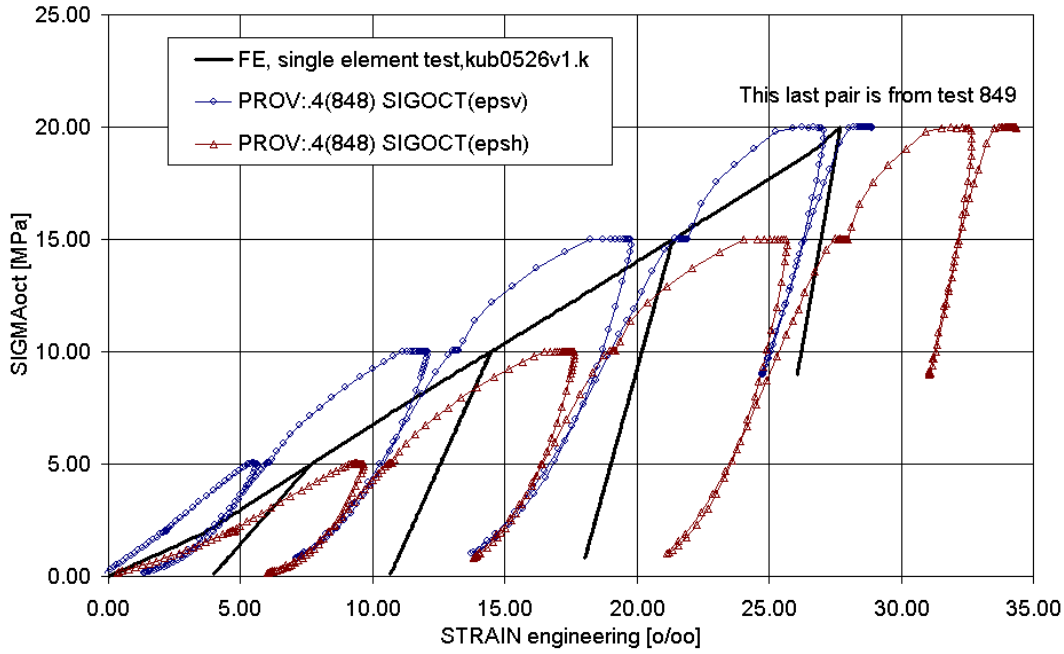
De framtagna tillståndsekvationen för hög densitet ges i tabellerad form, hydrostatiskt tryck som funktion av volymetrisk töjning, den elastiska av och pålastningsbulkmodulen ges också, se Tabell 4.3.3.

Tabell 4.3.3 Framtagen tillståndsekvation för Sjöbo sand med hög densitet.

*EOS_TABULATED_COMPACTION		
ε_{vi}, $\ln(V/V_0)$, [-]	C_i, [Pa]	K_i, [Pa]
0.00	0.00	$4.201\cdot10^{8}$
$-0.110\cdot10^{-1}$	$0.195\cdot10^{7}$	$4.201\cdot10^{8}$
$-0.225\cdot10^{-1}$	$0.484\cdot10^{7}$	$4.201\cdot10^{8}$
$-0.332\cdot10^{-1}$	$0.751\cdot10^{7}$	$7.450\cdot10^{8}$
$-0.560\cdot10^{-1}$	$0.129\cdot10^{8}$	$9.889\cdot10^{8}$
$-0.814\cdot10^{-1}$	$0.190\cdot10^{8}$	$2.172\cdot10^{9}$
-0.111	$0.293\cdot10^{8}$	$2.300\cdot10^{9}$
-0.134	$0.377\cdot10^{8}$	$2.426\cdot10^{9}$
-0.168	$0.588\cdot10^{9}$	$1.053\cdot10^{10}$
-0.300[1]	$0.571\cdot10^{9}$[1]	$1.071\cdot10^{10}$[1]

[1]Antagna värden

Tillståndsekvationen för hög densitet togs fram från proverna 848 och 849. Den stegvisa isotropiska ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=p$) konsolideringen för prov har simulerats med hjälp av ett element, se figur 4.3.1. Notera att ett korrekt medelvärde räknas ut med avseende på vertikal och horisontell töjning som den verkliga cylindriska provkroppen upplever.



Figur 4.3.1 1-element simulering av den stegvisa isotropiska konsolideringen av prov 848 (hög densitet). Från provet ges oktaederspänningen (p) som funktion av vertikal töjning och horisontal töjning.

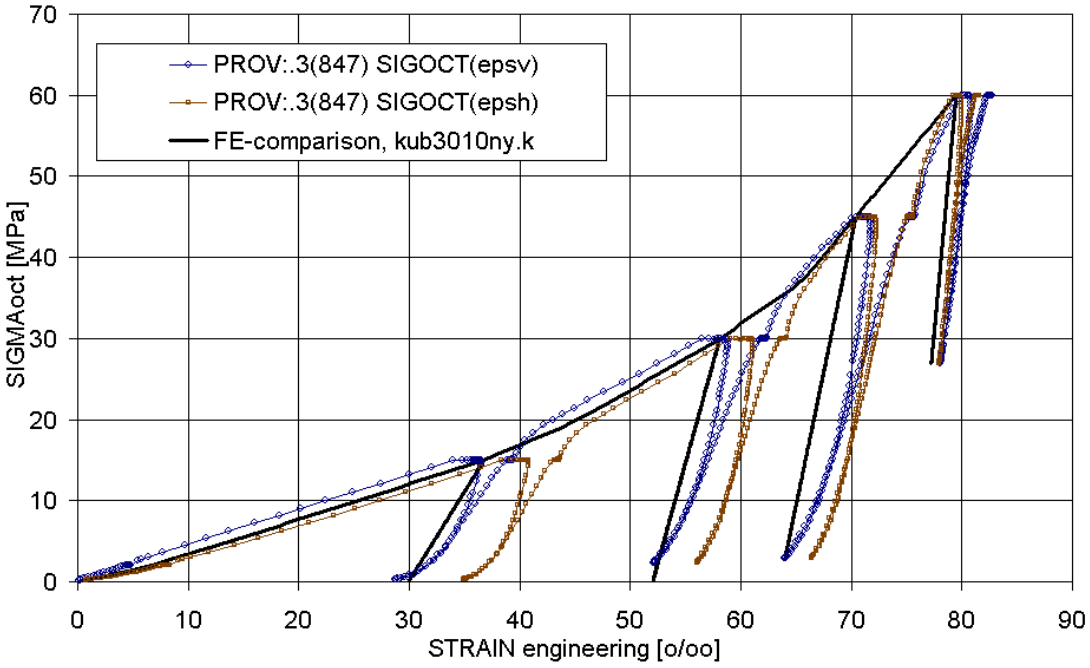
Tabell 4.3.4 redovisar tillståndsekvationen för in situ densiteten som är framtagen från prov 845 och 847.

Tabell 4.3.4 Framtagen tillståndsekvation för Sjöbo sand, in situ densitet

*EOS_TABULATED_COMPACTION		
ε_{vi}, $\ln(V/V_0)$, [-]	C_i, [Pa]	K_i, [Pa]
0.00	0.00	$2.406\cdot10^{8}$
$-2.149\cdot10^{-2}$	$2.05\cdot10^{6}$	$2.406\cdot10^{8}$
$-1.128\cdot10^{-1}$	$1.498\cdot10^{7}$	$7.085\cdot10^{8}$
$-1.398\cdot10^{-1}$	$1.999\cdot10^{7}$	$7.085\cdot10^{8}$
$-1.799\cdot10^{-1}$	$2.994\cdot10^{7}$	$1.554\cdot10^{9}$
$-2.043\cdot10^{-1}$	$3.715\cdot10^{7}$	$1.554\cdot10^{9}$
$-2.193\cdot10^{-1}$	$4.487\cdot10^{7}$	$2.023\cdot10^{9}$
$-2.490\cdot10^{-1}$	$5.998\cdot10^{7}$	$4.516\cdot10^{9}$
$-3.400\cdot10^{-1}$**[1]**	$5.000\cdot10^{8}$**[1]**	$1.000\cdot10^{10}$**[1]**
$-3.600\cdot10^{-1}$ **[1]**	$1.037\cdot10^{10}$**[1]**	$5.000\cdot10^{11}$**[1]**

[1]Antagna värden

Den stegvisa isotropiska ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=p$) konsolideringen för prov har simulerats med hjälp av ett element för prov 847, se figur 4.3.2.



Figur 4.3.2 1-element simulering av den stegvisa isotropiska konsolideringen av prov 847 (in situ densitet). Från provet ges oktaederspänningen (p) som funktion av vertikal töjning och horisontal töjning.

Använda materialvärden för *MAT_PSEUDO_TENSOR redovisas i tabell 4.3.3. Det elastiska spänningstillståndet med hänsyn till deviator spänningar beräknas med hjälp av en variabel skjuvmodul G_i om skjuvmodulen anges vara lika med 0 och ett poisson’s tal ges, i

detta fall 0.28. Då beräknas den variabla skjuvmodulen från den elastiska av- och pålastningsbulkmodulen, K_i som fås från tillståndsekvationen:

$$G_i = \frac{3K_i \cdot (1-2\upsilon)}{2(1+\upsilon)} \qquad \text{ekv. 4.3.3}$$

Det är viktigt att poisson’s tal inte ges för orimligt värde, för då kan elastisk energi bildas.

Tabell 4.3.3 Framtagna materialvärden för Sjöbo sand.

*MAT_PSEUDO_TENSOR	
Densitet, [kg/m^3]	1784[1], 1674[2]
Skjuvmodul, [Pa]	0
Poisson’s tal, [-]	0.28
Max. principal spänning	0.0
Kohesion, a_0, [Pa]	0.0
Max tryckhårdnande koeff., a_1, [-]	0.7917
Max tryckhårdnande koeff., a_2, [-]	$2.40 \cdot 10^{-10}$
Initiell Kohesion, a_{0f}, [Pa]	0.0
Initiell tryckhårdnande koeff., a_{1f}, [-]	18.08
Initiell tryckhårdnande koeff., a_{2f}, [-]	=a_2 kan ej anges
Skadeparameter b_1	0
Max. principal spänning	0.0
Tabellerad skadefunktion, $\eta(\varepsilon_{eff,pl})$	Se Figur 4.3.3

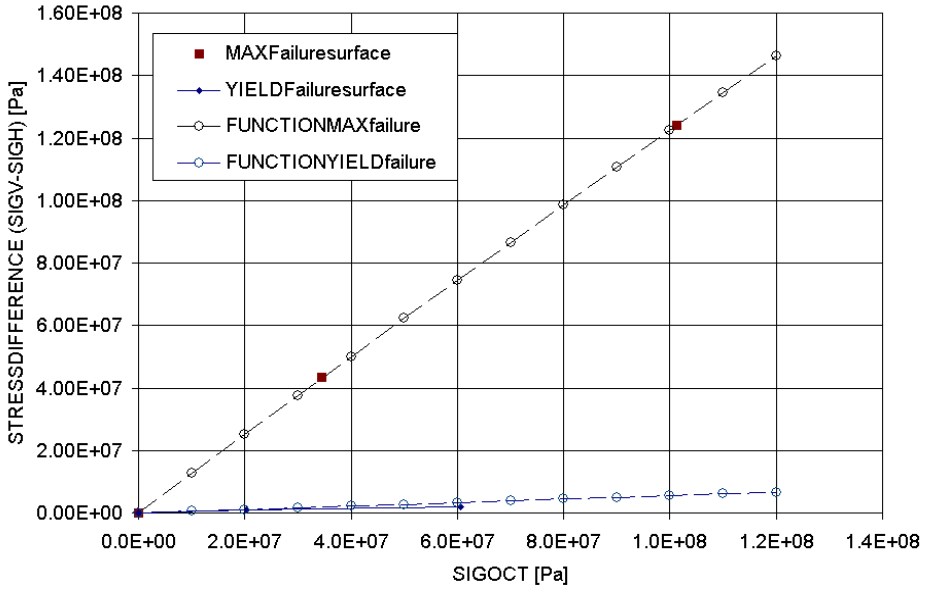
[1]: Hög densitet
[2]: In situ densitet

Ur materialprovningen framkom det att materialet har ett tidigt ’plastiskt’ beteende, detta utan att sandkornen krossas. Därför var det viktigt att använda sig av två flytytor , en initiell och en maximal, se ekv. 4.3.4-4.3.5

$$\sigma_{failed} = a_{0f} + \frac{p}{a_{1f} + a_2 \cdot p} \qquad \text{(initiell flytyta)} \qquad \text{ekv. 4.3.4}$$

$$\sigma_{\max} = a_{0m} + \frac{p}{a_{1m} + a_2 \cdot p} \qquad \text{(maximal flytyta)} \qquad \text{ekv. 4.3.5}$$

I figur 4.3.1 redovisas använda flytgränsytor för Sjöbo sanden.

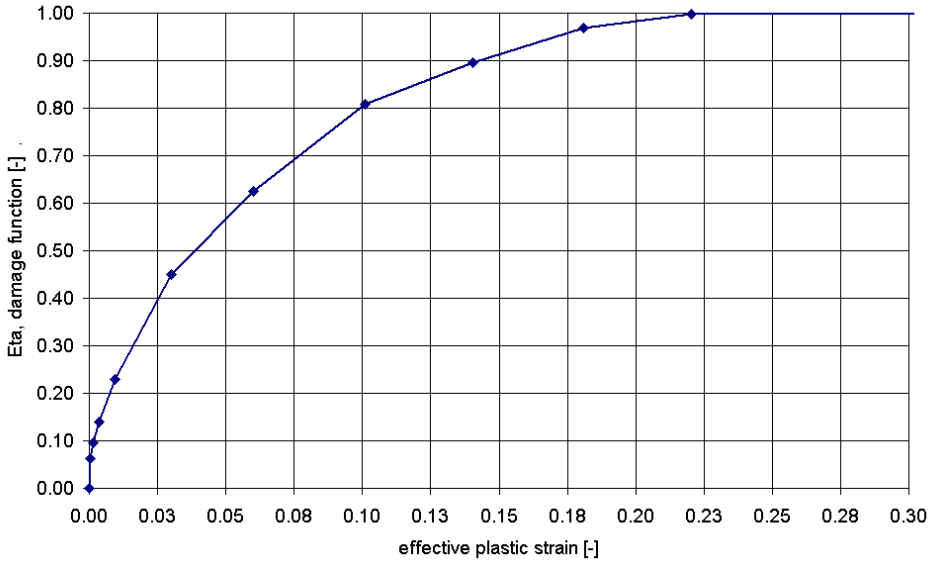


Figur 4.3.3 Använda flytgränsytor; initiell och maximal för Sjöbo sand.

Om skadeparametern b_1 ges lika med noll så kan en bitvis linjär funktion ges för skadeparametern η som funktion av plastisk töjning. Parametern η används för att skalera aktuell flytyta när initiell flytyta har uppnåtts, se ekvation 4.3.6:

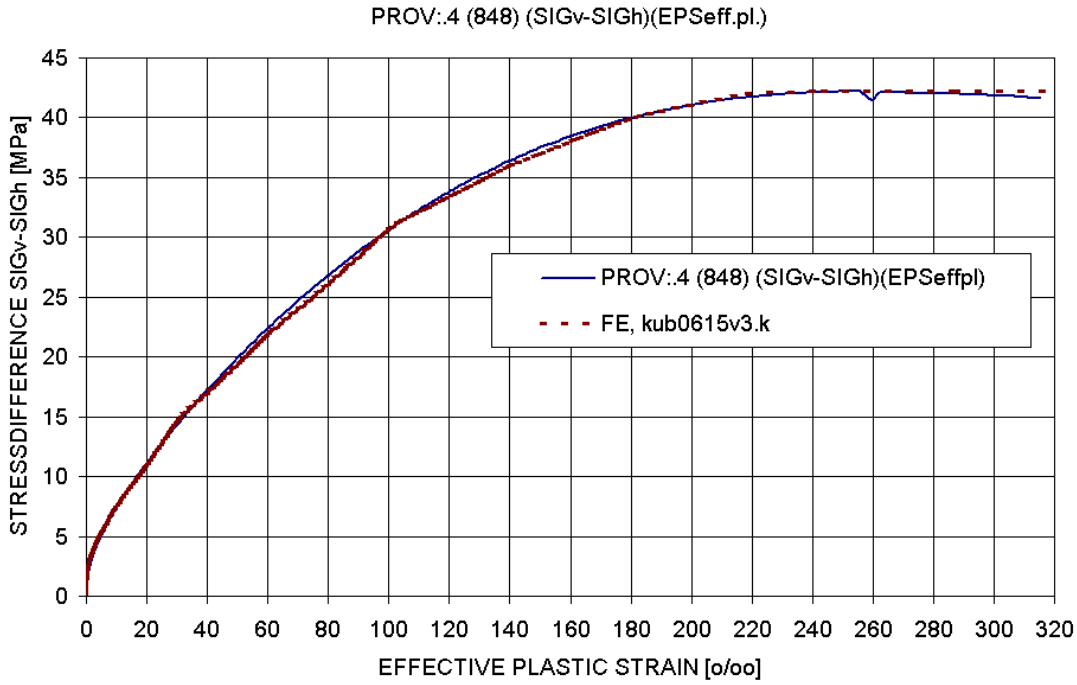
$$\sigma_{aktuell} = \eta\left(\sigma_{\max} - \sigma_{failed}\right) + \sigma_{failed} \qquad \text{ekv. 4.3.6}$$

Ur materialprovningen kom det fram att om karakteristisk flytspänning (σ_y/max(σ_y)) studeras som funktion av effektiv plastisk töjning så kan en skadefunktion tas fram som gäller för flera olika spänningstillstånd, dvs den kan beskriva den tryckhårdnande plasticeringen såväl för de triaxiella skjuvproven som utfördes för 2 [MPa] till 60 [MPa] i hydrostatiskt tryck. I figur 4.3.3 redovisas den generellas skadefunktion som används för alla spänningsnivåer.

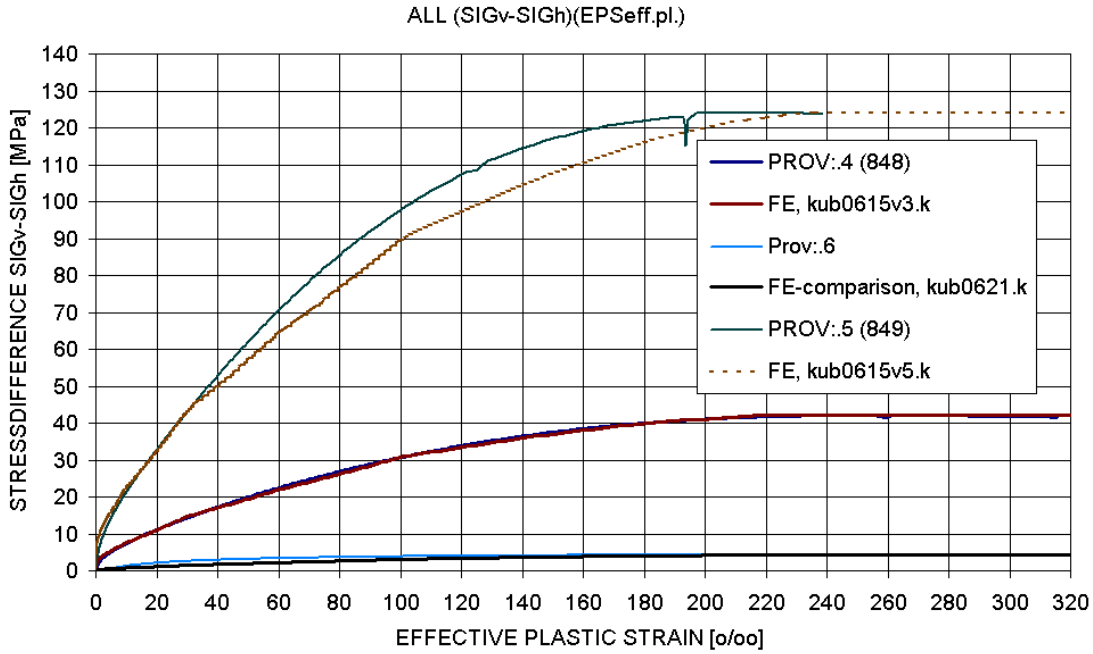


Figur 4.3.3 Använd skadeparameter η som funktion av effektiv plastisk töjning för Sjöbo sand.

Skadefunktionen kalibrerades emot det mest generella resultatet, detta ansågs vara triaxiella skjuvprovet 848, se figur 4.3.4. I figur 4.3.5 kan ses att den kan beskriva beteendet för ett vitt spektrum av spänningstillstånd där de initiella hydrostatiska trycken innan skjuvprovet startades var 2, 20 och 60 [MPa]. En mer utförlig diskussion redovisas i Bilaga 4.



Figur 4.3.4 Triaxiella 1-element simulering för prov 848. Detta prov användes som utgångskurva för att ta fram skadeparemetern η som funktion av effektiv plastisk töjning.



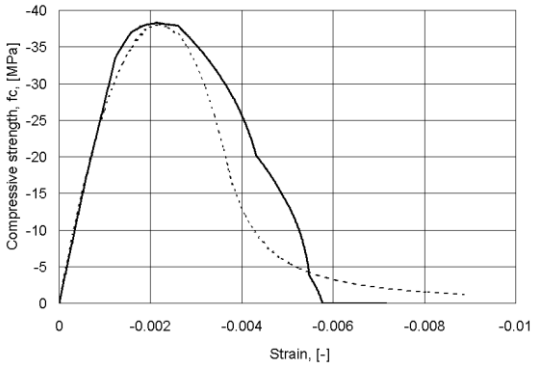
Figur 4.3.5 Triaxiella 1-element simuleringar för skjuvprov med initiellt hydrostatiskt tryck på 2, 20 och 60 [MPa].

Samma materialmodell, tillståndsekvation (in situ), och materialdata används för markfyllnaden på motsatt sida till angreppssida samt mark under byggnad.

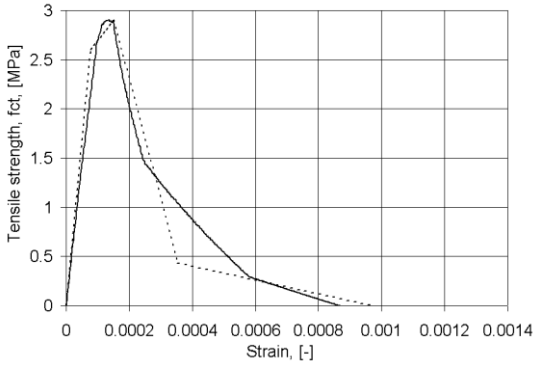
BYGGNADSSTOMME

Byggnadsstommen som består av slakarmerad betong med två lager korslagd armering av typen ks400, armeringsdiametern varierar mellan 12 till 16 mm. I modellen användes 14 mm som armeringsdiameter med centrumavstånd på 200 mm. Materialmodellen, *MAT_CONCRETE_DAMAGE användes för betongen och för lagren med utsmetad armering. Materialmodellen är en reviderad version av modell *MAT_PSEUDO_TENSOR, se [17]-[19]. *MAT_CONCRETE_DAMAGE är intressant av flera skäl; den är relativt nyutvecklad, samt att den har goda möjligheter att styra betongens icke- linjära beteende och den har använts till att studera betong under impulslast.

Materialvärden för en betong med en tryckhållfasthet < 50 [MPa] och en brottenergi på 100 [N/m] redovisas i [17]-[19]. Dessa har kalibrerats till betongkvalité K40 (C30) enligt de skallagar som anges i referenserna och sedan jämförts med CEB-FIP Model Code 1990, se [20]. I figur 4.3.6 och 4.3.7 redovisas enaxiellt tryck och drag prov på ett element. Närmare förklaring av hur 1- element testet utförts redovisas i [1].



Figur 4.3.6 Spänning som funktion av töjning för tryckt betong
——— : 1- element test,
- - - - - : CEB-FIP Modell



Figur 4.3.7 Spänning som funktion av töjning för dragen betong (sprickavstånd 200 [mm]), ——— : 1- element test,
- - - - - : CEB-FIP Modell

Kortfattat har modellen möjlighet att beskriva betongen med tre tryckberoende flytytor; initiell, maximal, och residual, se figur 4.3.8.

De tre tryckhårdnande flytytorna definieras:

$$\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y} \cdot p} \qquad \text{(initiell flytyta)} \qquad \text{ekv. 4.3.7}$$

$$\Delta\sigma_m = a_{0m} + \frac{p}{a_{1m} + a_{2m} \cdot p} \qquad \text{(maximal flytyta)} \qquad \text{ekv. 4.3.8}$$

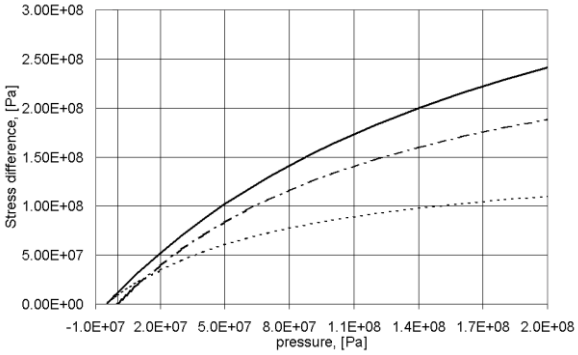
$$\Delta\sigma_r = 0 + \frac{p}{a_{1f} + a_{2f} \cdot p} \qquad \text{(residual flytyta)} \qquad \text{ekv. 4.3.9}$$

Dessutom ges möjligheten att styra övergången mellan dessa flytytor med hjälp av en tabellerad skadefunktion(η_i, λ_i). Detta utförs med hjälp av linjär interpolation mellan initiell och maximal flytyta efter det att initiell flytyta har uppnåtts, enligt ekvation 4.3.10. Där η är skalfaktorn som varierar mellan 0 och 1 [-]. Den beror på den ackumulerade effektiva plastiska töjningsparametern, λ, se figur 4.3.9. Efter det att maximal flytyta har nåtts så interpoleras aktuell flytyta på ett liknande sätt mellan maximal och residual flytyta, se ekvation 4.3.11.

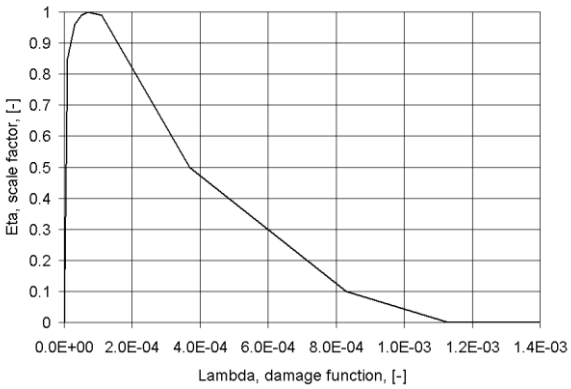
$$\Delta\sigma = \eta\left(\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_y\right) + \Delta\sigma_y \qquad \text{ekv. 4.3.10}$$

$$\Delta\sigma = \eta\left(\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_r\right) + \Delta\sigma_r \qquad \text{ekv. 4.3.11}$$

Skadefaktorer för att styra beteendet vid tryck, (b_1), enaxiell dragning, (b_2), samt triaxiell dragning, (b_3) ges som indata.

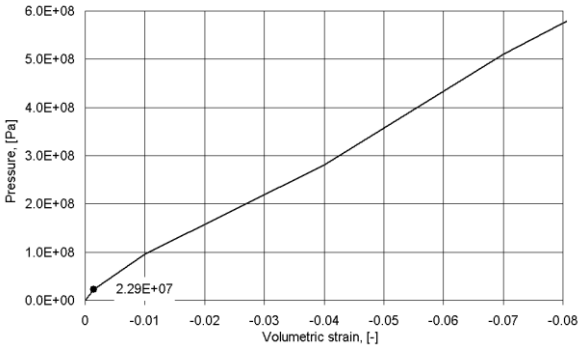


Figur 4.3.8 Använda flytytor
——— : maximum, - - - - - : initiell,
— · — · — : residual

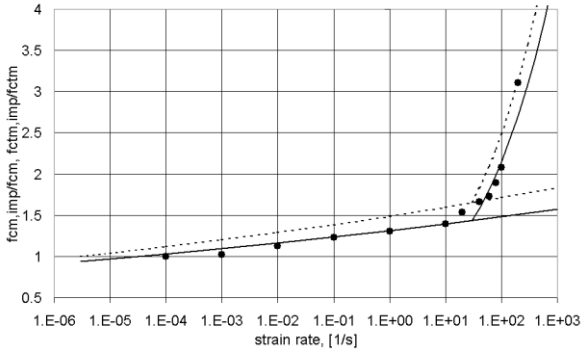


Figur 4.3.9 Använd skadefunktion, η som funktion av λ.

Tillståndsekvationen *EOS_TABULATED_COMPACTION användes. Här beskrivs hur hydrostatiska trycket ökar med avseende på volymetrisk töjning, se figur 4.3.10. Även bulkmodulsförändring med avseende på volymetrisk töjning anges.



Figur 4.3.10 Använd tillståndsekvation, bulkmodulen: K_u=15.6[GPa] för p≤22.9 [MPa], K_u=28.1 [GPa] för p>22.9 [MPa].



Figur 4.3.11 Töjningshastighetsberoendet enligt CEB-FIP modell, ,
——— : Tryckt C30, - - - - - : drag C30, och 1- elements test ● : tryck

Modellen har möjlighet att ta hänsyn till armeringens och betongens töjningshastighets-beroende. Töjningshastighetsberoende hos betongen och armeringen ges i tabellform. I analyserna har en konservativ inläggning av töjningshastighetsberoende för betongen använts. Eftersom bara ett töjningshastighetsberoende kan anges för betongen så har den som motsvarar CEB's rekommendationer för töjningshastigheter <30 [1/s] på tryck-hållfastheten antagits i beräkningarna, se figur 4.3.11. 1 –element test har visat att töjningshastigheter större än 30 [1/s] tas hänsyn till på trycksidan utan att den senare delen som CEB rekommenderar ges som indata. Konstant pålastningshastighet används i testerna vilket ger acceleration som är lika med noll i pålastningsriktningen. Förstärkningen vid dessa tester består i att fleraxiellt spänningstillstånd uppstår efter cirka 10 [1/s], se figur 4.3.11. Metoder för att producera dynamisk deformation diskuteras i [21].

Använda materialvärden redovisas i tabell 4.3.4 – 4.3.5.

Tabell 4.3.4 Använda materialvärden för betong K40 (C30) och utsmetade armeringslager.

*MAT_CONCRETE_DAMAGE	
Densitet, [kg/m^3]	2230
Poisson's tal, [-]	0.19
Maximal principalspänning för brott, [Pa]	$2.9 \cdot 10^6$
Kohesion, a_0, [Pa]	$11.3 \cdot 10^6$
Tryckhårdnande koefficient, a_{1m}, [-]	0.446
Tryckhårdnande koeff., a_{2m}, [-]	$2.12 \cdot 10^{-9}$
Initiell kohesion, a_{0y}, [Pa]	$8.513 \cdot 10^6$
Initiell tryckhårdnande koeff., a_{1y}, [-]	0.625
Initiell tryckhårdnande koeff., a_{2y}, [-]	$6.751 \cdot 10^{-9}$
Residual tryckhårdnande koeff., a_{1f}, [-]	0.442
Residual tryckhårdnande koeff., a_{2f}, [-]	$3.101 \cdot 10^{-9}$
Skadeparameter för tryck, b_1, [-]	1.5
Skadeparameter för enaxiellt drag, b_2, [-]	2.0 / -0.01**[1]**
Skadeparameter för triaxiellt drag, b_3, [-]	2.2
Armeringsprocent**[1]**, [%]	1.92
Elasticitetsmodul**[1]**, [Pa]	200e9
Poisson's tal**[1]**, [-]	0.3
Initiell flytspänning**[1]**, SIGY, [Pa]	$400 \cdot 10^6$
Plastisk hårdningsmodul**[1]**, ETAN, [Pa]	$500 \cdot 10^6$
Töjningshastghetsberoende för betong	Se Figur 4.3.4
Töjningshastghetsberoende för armering	-
Tabellerad skadefunktion, (η_i, λi), [-]	Se Figur 4.3.5
*EOS_TABULATED_COMPACTION	
GAMA, [-]	0.0
E_0, Initiell intern energi, [J]	0.0
V_0, Initiell relativ volym, [-]	1.0
Volymetrisk töjning, εv_i, ln(V/V_0), [-]	Se Tabell 4.3.5
Hydrostatiskt tryck, C_i, [Pa]	Se Tabell 4.3.5
Avlastningsbulkmodul, K_i, [Pa]	Se Tabell 4.3.5

[1]Har endast använts för de utsmetade armeringslagren.

Tabell 4.3.5 Använd tillståndsekvation i tabellform.

*EOS_TABULATED_COMPACTION		
ε_{vi}, $\ln(V/V_0)$, [-]	C_i, [Pa]	K_i, [Pa]
0.00	0.00	$15.63 \cdot 10^9$
$-1.47 \cdot 10^{-3}$	$22.92 \cdot 10^6$	$15.63 \cdot 10^9$
$-1.00 \cdot 10^{-2}$	$95.7 \cdot 10^6$	$28.05 \cdot 10^9$
$-4.00 \cdot 10^{-2}$	$280.5 \cdot 10^6$	$28.05 \cdot 10^9$
$-7.00 \cdot 10^{-2}$	$510.6 \cdot 10^6$	$28.05 \cdot 10^9$
-1.00[2]	$6525.0 \cdot 10^6$[2]	$28.05 \cdot 10^9$

[2] Detta värde par är ej rimligt men redovisas i referens [15]-[16].

Den utsmetade armeringen i materialmodellen, *MAT_CONCRETE_DAMAGE behandlas isotropiskt. Vilket kan vara en nackdel om det är stor skillnad i mängd på den korslagda armeringen. En brottöjning för armeringen kan inte anges. Dessa begränsningar bör observeras vid användning av algoritmen för utsmetad armering. Enaxligt 1 –element drag test har utförts, se [1].

5 Chock absorberande lager som fyllnadsmaterial

5.1 Inledning

Porösa material är kända för att absorbera och dämpa chockvågor som utbreder sig i materialet. De sänker tryckamplituden, samt att de förlänger våglängden för tryckvågen. Detta på grund av att de vid isotropisk komprimering får en irreversibel kompression, just denna absorption av volymetrisk energi ger den positiva effekten. Två material som har studerats närmare är LECA och EPS.

Detta kapitel är en förstudie för att utreda om främst LECA kan användas för att absorbera en del av den energi som uppstår vid detonation av en sprängladdning nergrävd i marken.

Både LS-DYNA och AUTODYN har använts för att studera effekten av chock absorberande lager.

5.2 Materialdata för LECA och EPS

Tillståndsekvationen för LECA 0-32 [mm] och EPS kunde fås ur [12] och [13]. Där utfördes passiva (ε_r=0) triaxiella prov vilket fungerar bra för dessa mycket porösa material. Framtagning av materialparametrar för LECA och EPS redovisas i Bilaga 6. 1-element simuleringar av framtagna materialparametrar redovisas i Bilaga 7. Framtagen tillståndsekvation för LS-DYNA redovisas i tabell 5.2.1.

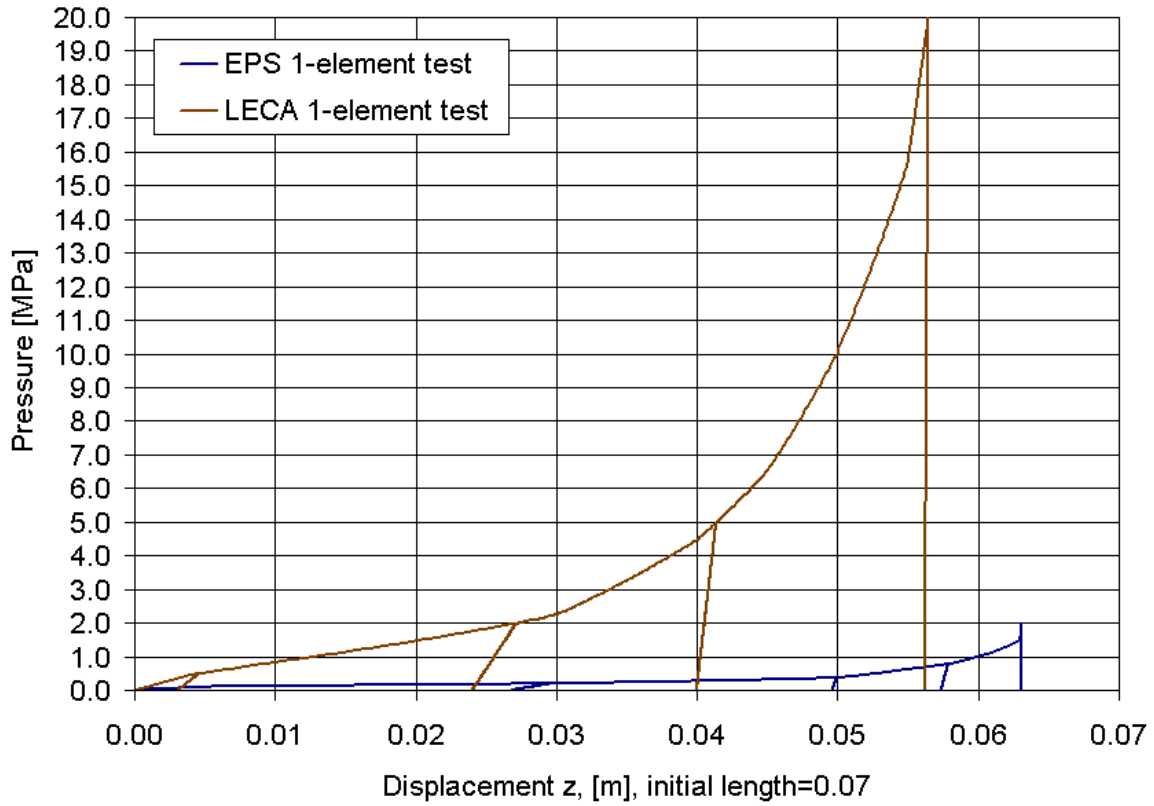
Tabell 5.2.1 Framtagen tillståndsekvation för LECA (LS-DYNA)

*EOS_TABULATED_COMPACTION		
ε_{vi}, $\ln(V/V_0)$, [-]	C_i, [Pa]	K_i, [Pa]
0.00	0.00	$2.177 \cdot 10^7$
$-5.884 \cdot 10^{-2}$	$4.664 \cdot 10^5$	$2.177 \cdot 10^7$
$-1.542 \cdot 10^{-1}$	$8.396 \cdot 10^5$	$2.177 \cdot 10^7$
$-5.596 \cdot 10^{-1}$	$2.239 \cdot 10^6$	$2.938 \cdot 10^7$
$-8.473 \cdot 10^{-1}$	$4.478 \cdot 10^6$	$9.142 \cdot 10^7$

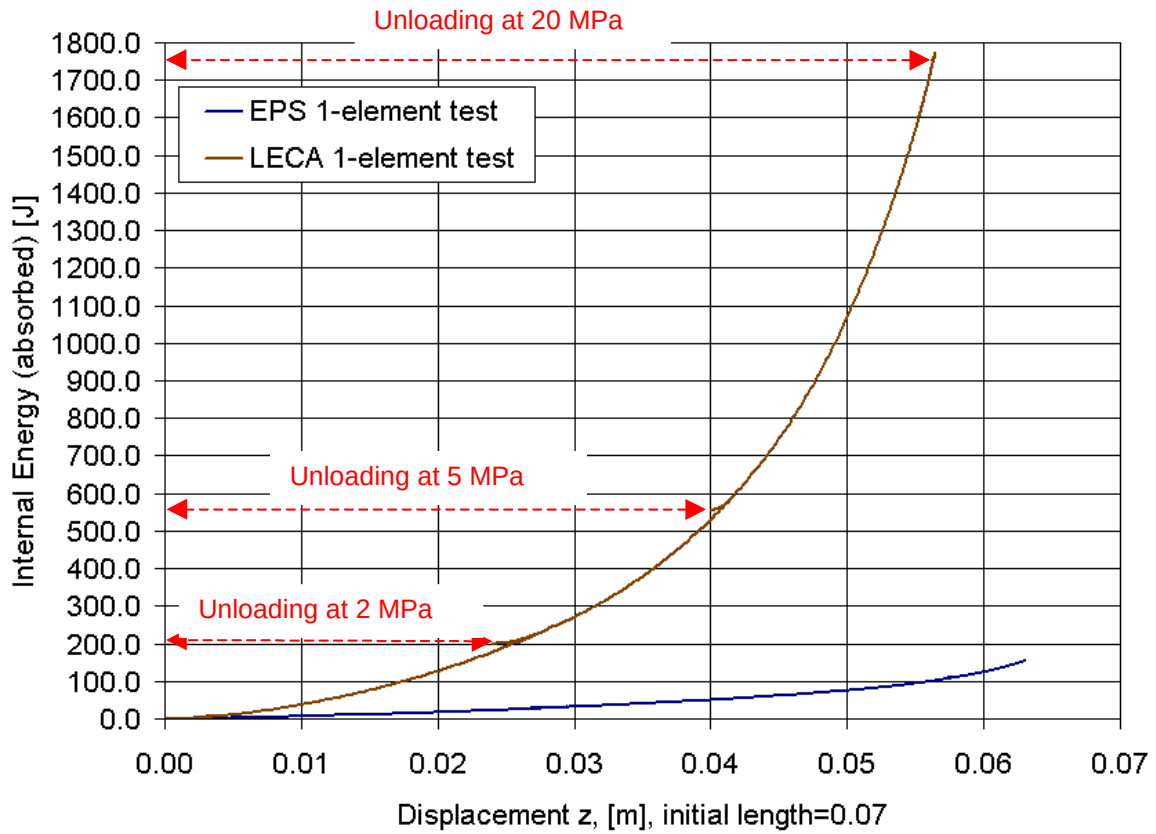
-1.030	$6.530 \cdot 10^{6}$	$1.437 \cdot 10^{8}$
-1.253	$1.007 \cdot 10^{7}$	$2.481 \cdot 10^{8}$
-1.540	$1.567 \cdot 10^{7}$	$3.918 \cdot 10^{8}$
-1.646	$2.015 \cdot 10^{7}$	$1.045 \cdot 10^{9}$
-2.996[1]	$1.694 \cdot 10^{8}$[1]	$5.224 \cdot 10^{9}$[1]

[1]Antagna värden

I figur 5.2.1 redovisas tryck som funktion deformationen från 1-element tester i LS-DYNA av LECA och EPS. 1-element testningen utfördes i huvudsak för att verifiera använda materialdata. Provets ursprungliga höjd är 70 [mm]. Som vi kan se komprimeras LECA’n kraftigt för spänningar upp till 20 [MPa]. Vad som gör LECA’n intressant är att LECA kulorna börjar krossas tidigt redan vid 0.2-0.4 [MPa]. Samtidigt som LECA’n arbetar bra upp till 20 [MPa]. Däremot trycks EPS’en ihop nästan helt för tryck som överstiger 1.5 [MPa]. Detta anses vara lågt med tanke på att vid det aktuella hotet på RC’n kan max trycket variera mellan 1-5 [MPa] och inom detta tryckintervall arbetar LECA’n bättre än EPS’en. Det är även önskvärt med en viss restverkan efteråt vilket torde vara fallet för LECAN.



Figur 5.2.1 1-element simuleringar i LS-DYNA av provning som utförts på LECA och EPS. I diagrammet redovisas tryck som funktion av deformationen i vertikalled hos provkroppen.



Figur 5.2.2 1-element simuleringar i LS-DYNA av provning som utförts på LECA och EPS I diagrammet redovisas intern energi som funktion av deformationen i vertikalled hos provkroppen.

I AUTODYN användes tillståndsekvationerna POROUS och COMPACTION för att beskriva LECAN’s kompaktering. I POROUS anges porös elastisk ljudvågshastighet samt den plastiska kompakteringskurvan(”virgin curve”) som funktion av densiteten. Samt den solida densiteten vid p=0 och den solida (fullt kompakterat material) ljudvågshastigheten . Den elastiska avlastningen mellan dessa värden interpoleras, se tabell 5.2.2.

Tabell 5.2.2 Tillståndsekvationen för LECA: POROUS i AUTODYN-2D.

EOS AUTODYN-2D: POROUS	
Solid referens densitet [kg/m^3]	1961.6
Solid ljudhastighet [m/s]	321.16
Porös ljudhastighet [m/s]	136.34
Densitet #1 [kg/m^3]	427.5
Densitet #2 [kg/m^3]	483
Densitet #3 [kg/m^3]	579.6
Densitet #4 [kg/m^3]	724.5
Densitet #5 [kg/m^3]	828
Densitet #6 [kg/m^3]	966
Densitet #7 [kg/m^3]	1159.2
Densitet #8 [kg/m^3]	1449.0
Densitet #9 [kg/m^3]	1932.0
Densitet #10 [kg/m^3]	2146.7
Pressure #1 [Pa]	$2.5 \cdot 10^5$

Pressure #2 [Pa]	$8.3955 \cdot 10^5$
Pressure #3 [Pa]	$1.3993 \cdot 10^6$
Pressure #4 [Pa]	$2.2388 \cdot 10^6$
Pressure #5 [Pa]	$3.1716 \cdot 10^6$
Pressure #6 [Pa]	$4.4776 \cdot 10^6$
Pressure #7 [Pa]	$6.5299 \cdot 10^6$
Pressure #8 [Pa]	$1.0075 \cdot 10^7$
Pressure #9 [Pa]	$1.5672 \cdot 10^7$
Pressure #10 [Pa]	$2.0149 \cdot 10^7$

För både LS-DYNA och AUTODYN har en bitvis linjär MOHR-COULOMB definierats för LECA’n, NGI har utfört aktiva triaxiella skjuvprov för LECA 0-32 [mm], se [22]. Dessa prover utfördes inte för tillräckligt höga medelspänningsnivåer. I tabell 5.2.3 redovisas den som har definierats för LECA’n.

Tabell 5.2.3 Materialmodell för LECA: MOHR-COULOMB i AUTODYN-2D.

Material modell, AUTODYN-2D: MOHR-COULOMB	
Skjuvmodul [Pa]	$2.1 \cdot 10^6$ **[1]**
Pressure #1 [Pa]	0.0
Pressure #2 [Pa]	$6.83 \cdot 10^4$
Pressure #3 [Pa]	$1.393 \cdot 10^5$
Pressure #4 [Pa]	$1.92 \cdot 10^5$
Pressure #5 [Pa]	$3.09 \cdot 10^5$
Pressure #6 [Pa]	$1 \cdot 10^6$ **[1]**
Pressure #7 [Pa]	$100 \cdot 10^6$ **[1]**
Yield stress #1 [Pa]	0.0
Yield stress #2 [Pa]	$1.3 \cdot 10^5$
Yield stress #3 [Pa]	$2.65 \cdot 10^5$
Yield stress #4 [Pa]	$3.52 \cdot 10^5$
Yield stress #5 [Pa]	$4.78 \cdot 10^5$
Yield stress #6 [Pa]	$0.6 \cdot 10^6$ **[1]**
Yield stress #7 [Pa]	$5.0 \cdot 10^6$ **[1]**

[1]Antagna värden

Framtagna materialvärden för Sjöbo sanden med hög initiell densitet redovisas i tabell 5.2.4 och 5.2.5.

Tabell 5.2.4 Tillståndsekvationen för Sjöbo sand, hög densitet: POROUS i AUTODYN-2D.

EOS AUTODYN-2D: POROUS	
Solid referens densitet [kg/m^3]	2134.7
Solid ljudhastighet [m/s]	1456.1
Porös ljudhastighet [m/s]	285.2
Densitet #1 [kg/m^3]	1786.9
Densitet #2 [kg/m^3]	1803.7
Densitet #3 [kg/m^3]	1825.2
Densitet #4 [kg/m^3]	1845.5
Densitet #5 [kg/m^3]	1890.7

Densitet #6 [kg/m^3]	1944.2
Densitet #7 [kg/m^3]	2021.3
Densitet #8 [kg/m^3]	2065.4
Densitet #9 [kg/m^3]	2153.6
Pressure #1 [Pa]	$2.44 \cdot 10^5$
Pressure #2 [Pa]	$1.95 \cdot 10^6$
Pressure #3 [Pa]	$4.84 \cdot 10^6$
Pressure #4 [Pa]	$7.50 \cdot 10^6$
Pressure #5 [Pa]	$12.89 \cdot 10^6$
Pressure #6 [Pa]	$19.02 \cdot 10^6$
Pressure #7 [Pa]	$29.33 \cdot 10^6$
Pressure #8 [Pa]	$37.74 \cdot 10^6$
Pressure #9 [Pa]	$58.83 \cdot 10^6$

Tabell 5.2.5 Materialmodell för Sand hög densitet: MOHR-COULOMB i AUTODYN-2D.

Material modell, AUTODYN-2D: MOHR-COULOMB	
Skjuvmodul [Pa]	$127.8 \cdot 10^6$
Pressure #1 [Pa]	0.0
Pressure #2 [Pa]	$3.50 \cdot 10^6$
Pressure #3 [Pa]	$34.51 \cdot 10^6$
Pressure #4 [Pa]	$101.30 \cdot 10^6$
Pressure #5 [Pa]	$200.00 \cdot 10^6$ **[1]**
Pressure #6 [Pa]	$500.00 \cdot 10^6$ **[1]**
Yield stress #1 [Pa]	0.0
Yield stress #2 [Pa]	$4.52 \cdot 10^6$
Yield stress #3 [Pa]	$43.59 \cdot 10^6$
Yield stress #4 [Pa]	$124.14 \cdot 10^6$
Yield stress #5 [Pa]	$238.19 \cdot 10^6$ **[1]**
Yield stress #6 [Pa]	$240.00 \cdot 10^6$ **[1]**

[1]Antagna värden

En nackdel med materialmodellen MOHR-COULOMB i AUTODYN är att den inte tar hänsyn till hur skjuvmodulen, G ökar med ökad densitet och / eller hydrostatiskt tryck. Detta är möjligt att ta hänsyn till i den nya materialmodellen GRANULAR i AUTODYN som kan användas med tillståndsekvationen COMPACTION, se [27] för detaljerad beskrivning av materialmodellen. Denna materialmodell kommer att studeras närmare vid ett senare tillfälle.

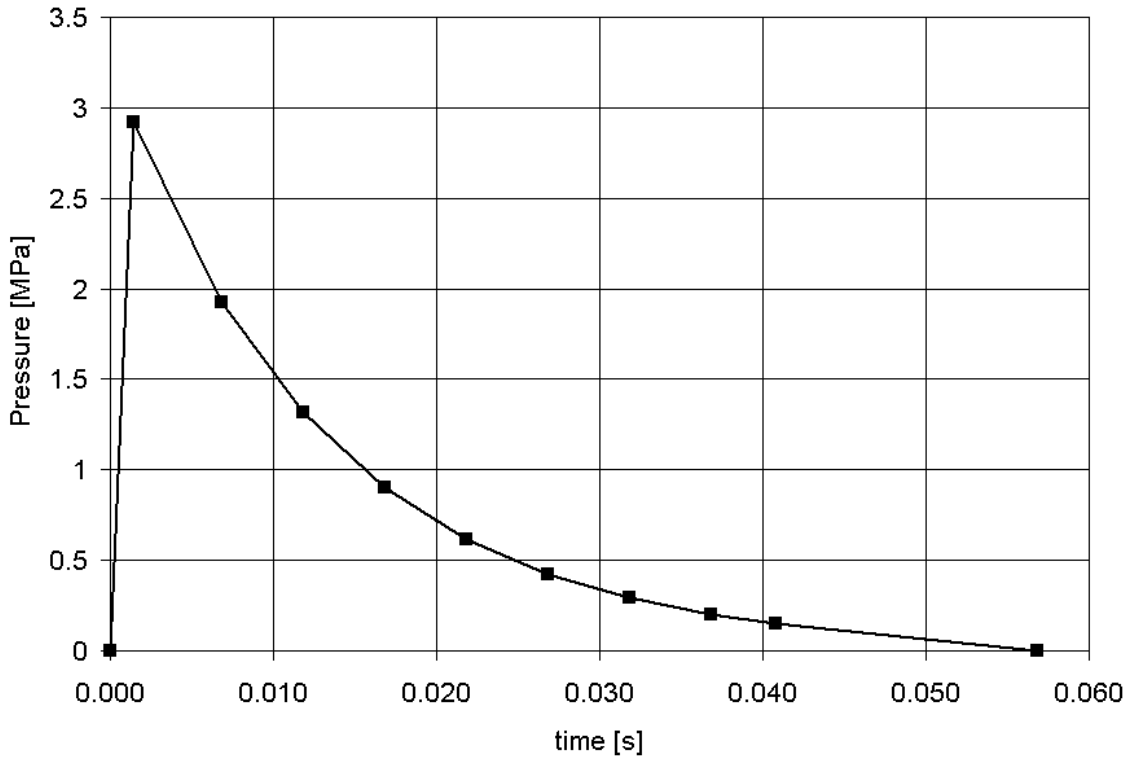
Brottmodellen HYDRO användes både för SAND och LECA. Denna brottmodell tillåter en minimal medelspänning, p_{min}, som inte kan underskridas. Materialet ”läker” och kan efter en ny pålastning återigen uppnå samma p_{min} värde. Detta borde inte vara en dålig brottmodell vid den här typen av applikation, i tabell 5.2.4 redovias värdet som har använts.

Tabell 5.2.4 Brott modell för SAND och LECA i AUTODYN-2D.

Brott modell, AUTODYN-2D: HYDRO	
Pmin [Pa]	$-1.0 \cdot 10^{-8}$

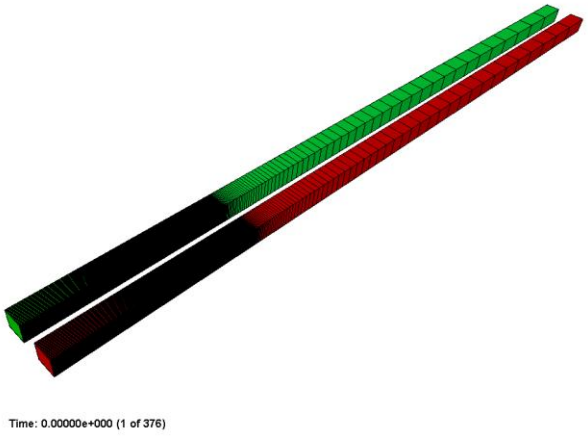
5.3 Studie av LECA’s absorptionsförmåga (1D) enaxlig töjningstillstånd

Två 45 meter långa stavar modellerades i LS-DYNA med hjälp av Lagrange element. Tvärsektionen för stavarna sattes till 1 [m^2]. Den ena staven fylldes med sand och den andra med LECA. I dessa simuleringar har endast tillståndsekvationen för de båda materialen använts. Materialmodell *MAT_NULL användes, vilket betyder att endast bidraget från volymförändringar studeras. Staven med sand fungerar som ett referensvärde. En lastpuls p(t) som stämmer överens för aktuell sand och hotet: MK-82 med avståndet 3.5 och fullt nergrävd med tyngdpunkten på 1.5 [m] togs fram ur CONWEP [15], se figur 5.3.1 . Denna skickades in i stavarna. Stavarnas yttre noder är låsta så att ett enaxligt töjningstillstånd uppstår. Mätpunkter placerades med inbördes avstånd på 0.3 [m]. Max tryck och max impuls jämfördes mellan de olika stavarna.

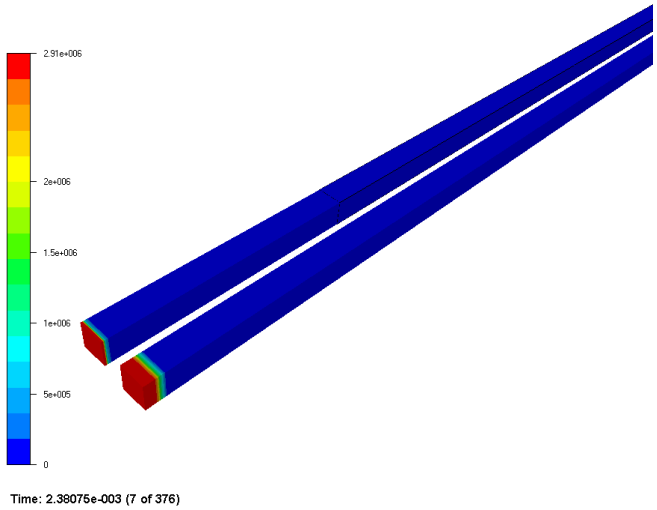


Figur 5.3.1. Tabellerad tryck som funktion av tid, p(t) för aktuell Sjöbo sand och hot (MK-82 avstånd till laddning 3.5 [m] med tyngdpunkten nergrävd till 1.5 [m], CONWEP [15].

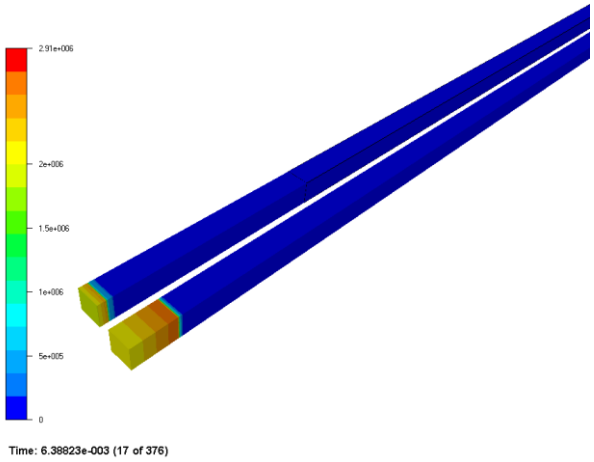
I figur 5.3.2 redovisas elementnätet för stavarna. Elementlängden i töjningsriktningen är 2 [cm] för de första 10 metrarna, därefter ökas stegvis elementlängden hos stavarna. Figur 5.3.3-5.3.5 redovisar medelspänning vid olika tidpunkter.



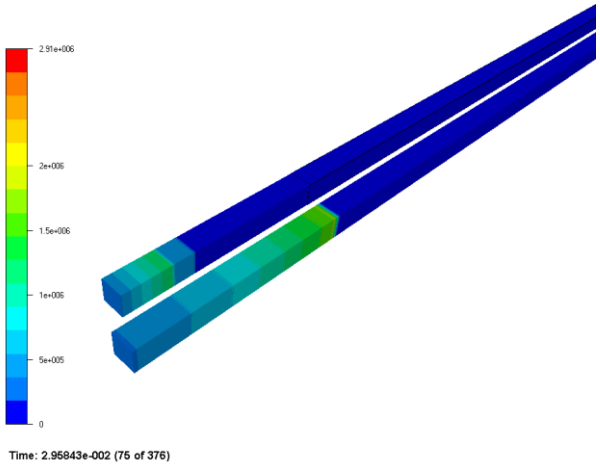
Figur 5.3.2 Elementnät hos de två stavarna, den som är närmast har fyllts med sand (röd stav), den bakre har fyllts med LECA (grön stav). Elementlängd = 0.02 [m] de första 10 metrarna.



Figur 5.3.3 Hydrostatiskt tryck, p vid tiden 2.4 [ms]. Observera att LECA staven redan har börjat komprimeras ihop.

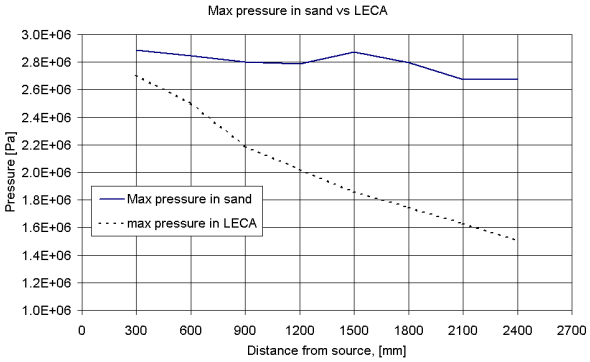


Figur 5.3.4 Hydrostatiskt tryck, p vid tiden 6.4 [ms]. Observera att maxtrycket är lägre och har mindre utbredning i LECA’n än vad referensen sand visar.

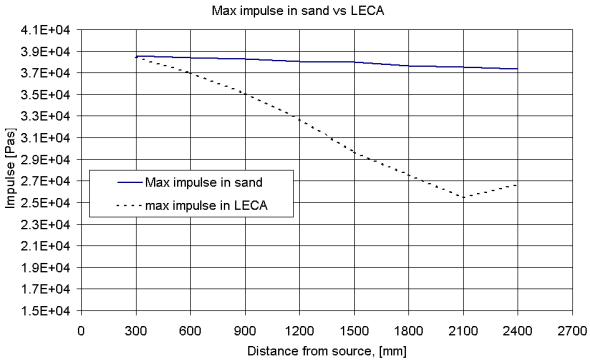


Figur 5.3.5 Hydrostatiskt tryck, p vid tiden 29.6 [ms]. Lastpulsen vid denna tid har mycket större utbredning och magnitud än vad LECA’n visar.

Om nu mätpunkterna jämförs för de olika stavarna kan man tydligt se att LECA sänker maxtrycket nästan direkt, och impulsen sänks också relativt fort i LECAN om man jämför med referensstaven sand, se Figur 5.3.6-5.3.7.



Figur 5.3.6 Hydrostatiskt tryck, p som funktion av avståndet till stavens ände där lastpulsen applicerades.



Figur 5.3.7 Impuls, I som funktion av avståndet till stavens ände där lastpulsen applicerades.

I Tabell 5.3.1 redovisar procentuell sänkning av max tryck och impuls när staven med LECA jämförs med referensstaven med sand.

Tabell 5.3.1. Procentuell sänkning av max tryck och impuls när LECA jämförs med sand staven i LS-DYNA.

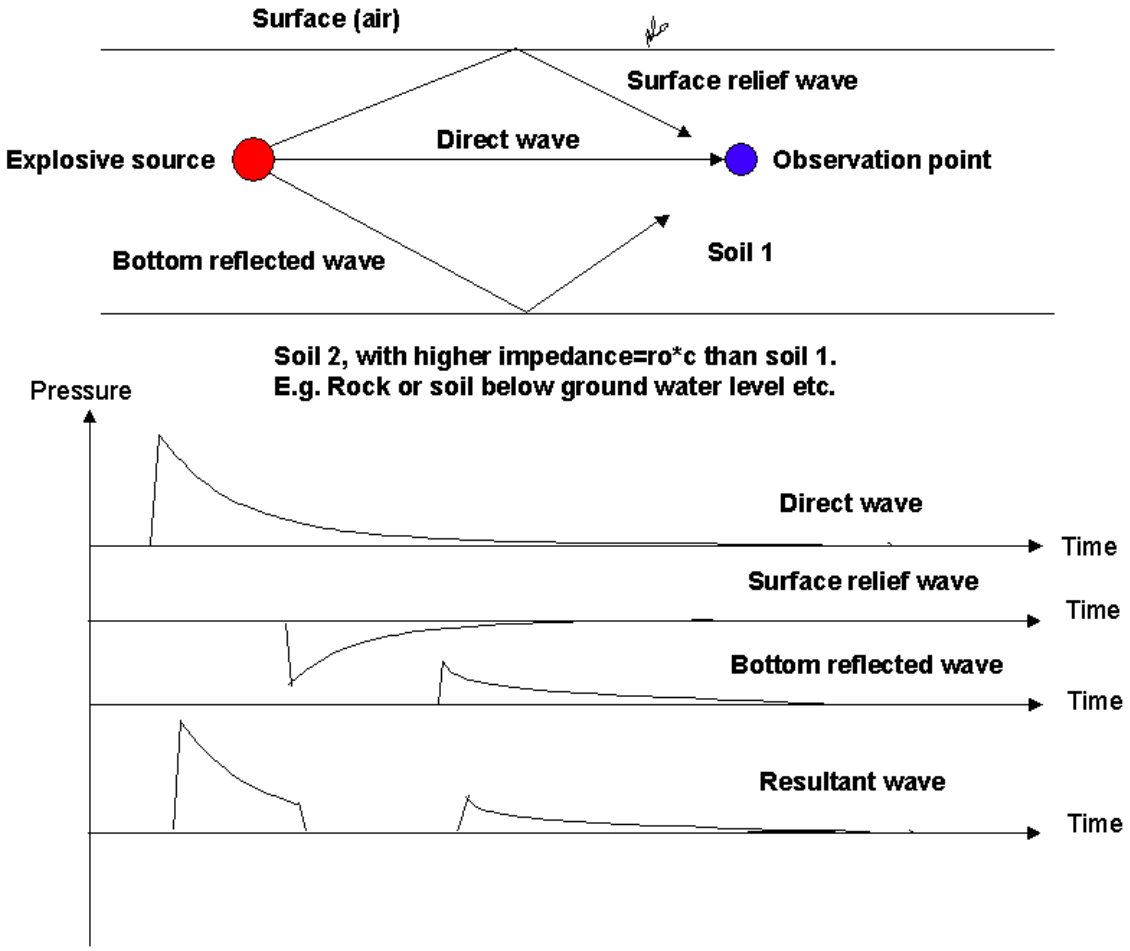
Avstånd från källa, [mm]	$\Delta P_{max} / P_{max,sand}$, [%]	$\Delta I_{max} / I_{max,sand}$, [%]
300	6.24	0.38
600	12.15	3.67
900	21.88	8.21
1200	27.42	13.93
1500	35.30	21.81
1800	37.60	26.70
2100	39.11	32.27
2400	43.58	28.63

Beräkningarna visar att en ordentlig sänkning av max trycket, cirka 22 [%] fås redan för avståndet 900 [mm] i LECA’n, och impulsen sjunker med cirka 8 [%]. Vid 1500 [mm] har maxtrycket sjunkit med cirka 35 [%] och impulsen med cirka 22 [%].

Vad som kan sägas är att LECA’n är ett mycket intressant material att studera vidare för sin energiupptagande förmåga när bara den volymetriska energi absorptionen studeras för de lastnivåer som är aktuella vid aktuellt hot för RC.

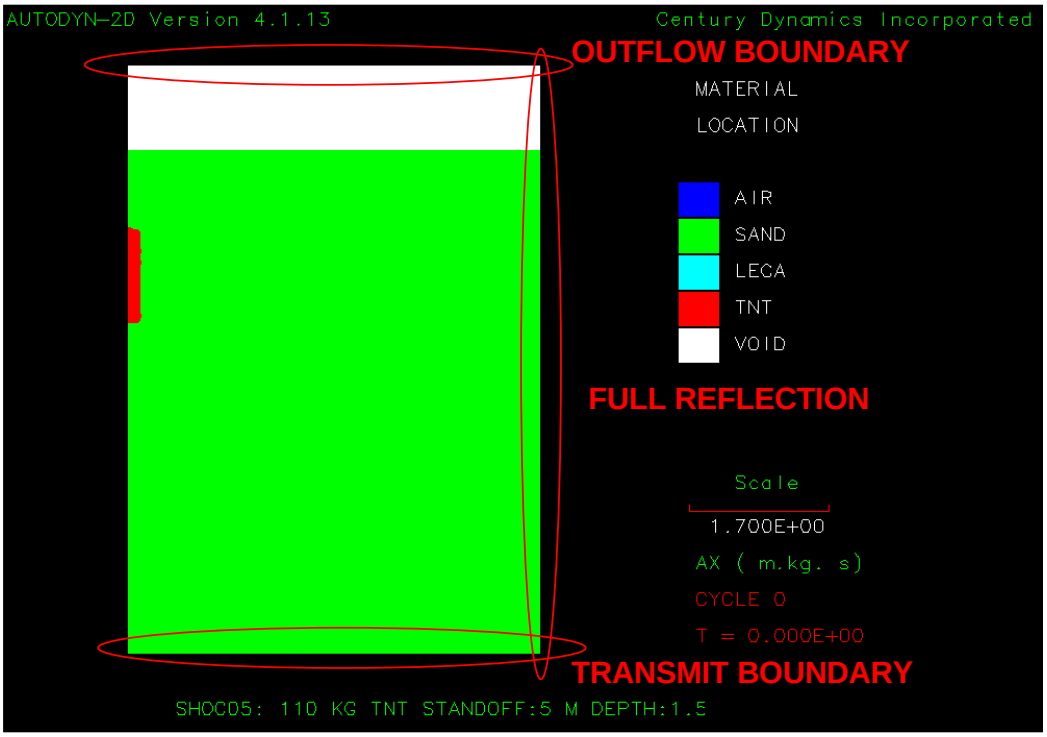
5.4 Studie av LECA’s absorptionsförmåga (2D) axi-symmetri

I kapitel 5.3 studerades bara den volymetriska energiabsorptionsförmågan hos LECA’n. Vid markstötvåg är det flera faktorer som påverkar den slutliga skyddsverkan som ett absorptionslager skulle ha framför en RC. Först bör vågutbredningen i marken och dess reflektioner med material med olika impedans (ro*c) belysas. I figur 5.4.1 redovisas schematiskt hur en observerad lastpuls är egentligen en överlagrad resulterande lastpuls. Först har vi en ”direkt våg” som anländer först till observationpunkten från detonationspunkten. Vid nergrävd laddning nära markytan uppstår en ”avlastningsvåg” när markstötvågen når luften som har en mycket lägre impedans än marken. En tredje våg som kan komma i fråga är en ”reflektionsvåg” från ett jordlager med högre impedans. Exempel på sådana jordlager är berg eller där grundvattennivån befinner sig. Alla dessa tre möjliga reflektioner bidrar till den observerade ”resulterande” vågens utseende.



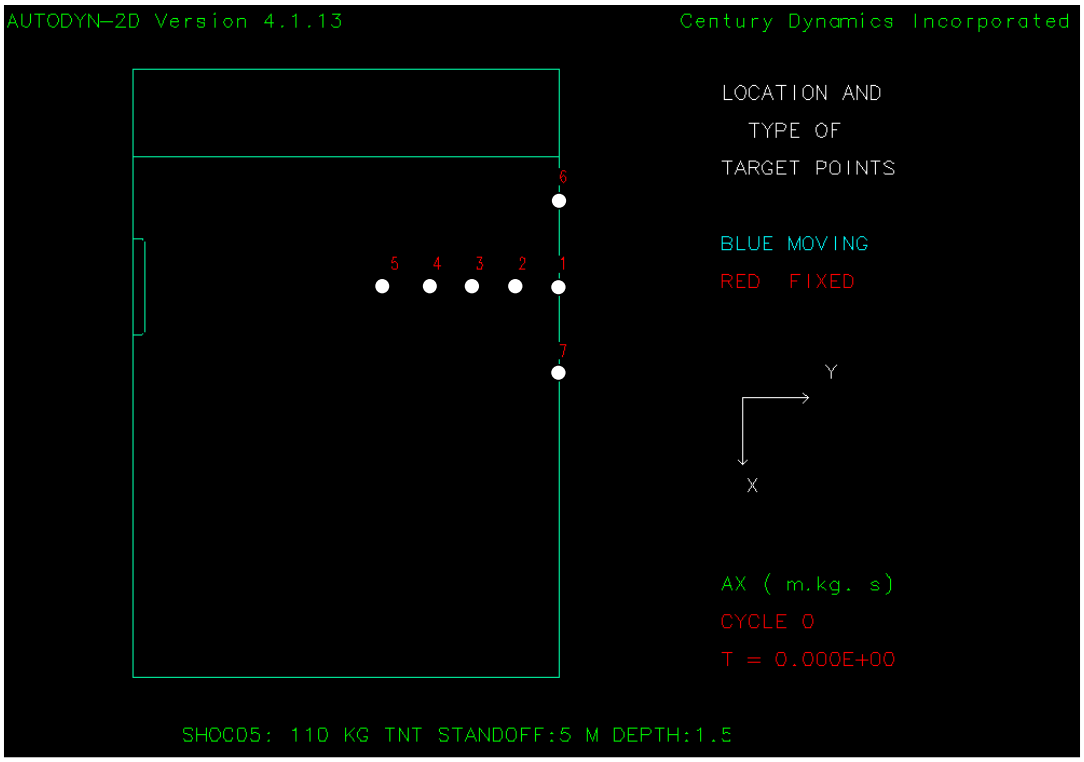
Figur 5.4.1 Schematisk bild som redovisar vad som bidrar till den resulterande vågen som observeras.

I figur 5.4.2 redovisas den axisymmetriska modell som har använts i AUTODYN-2D. För att klara de stora deformationerna har EULER processorn i AUTODYN-2D använts. Antalet noder i modellen var 201*151 (IMAX=201 och JMAX=151). I modellen modelleras bomben MK-82 med ekvivalent laddningsmängd TNT. Tillståndsekvation POROUS med materialmodell MOHR-COULOMB har använts för sanden, använda materialparametrar redovisas i tabell 5.2.2 och 5.2.3.



Figur 5.4.2 Axi-symmetrisk modell i AUTODYN-2D. Med laddningen placerad med avståndet 5 [m] till vägg med full reflektion. Laddningens tyngdpunkt är placerad på djupet 1.5 [m]. Randvillkoren visas för EULER elementen.
Identitet: SHOC05.000

I figur 5.4.3 redovisas de mätpunkter som har studerats för de båda fallen. I det första fallet har bara sand studerats, och i den andra har 1.5 [m] LECA lager placerats framför den reflekterande väggen.



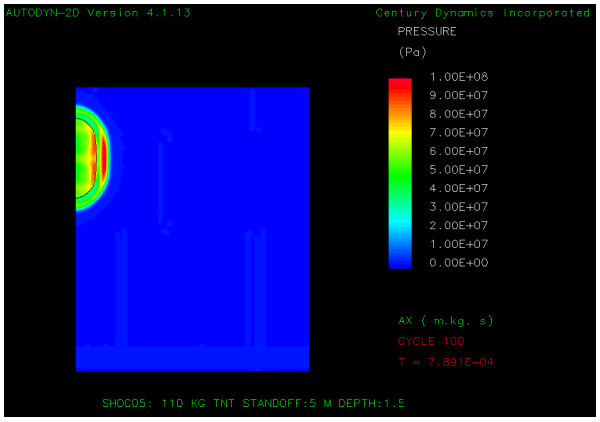
Figur 5.4.3 Mätpunkter som har studerats i AUTODYN-2D modellerna.

I Tabell 5.4.1 redovisas placering av de sju mätpunkter med hänsyn till djup under markytan och avstånd från laddning.

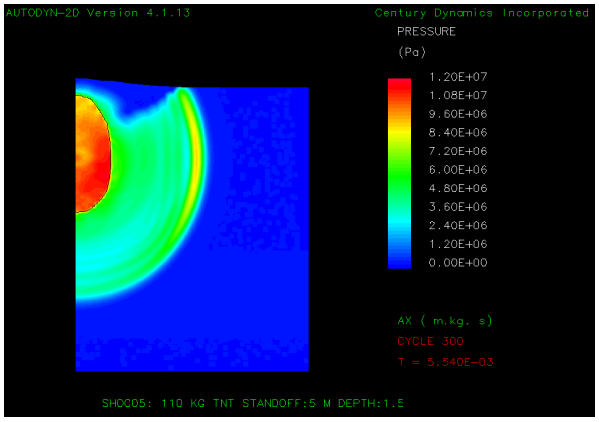
Tabell 5.4.1. Studerade mätpunkter i AUTODYN-2D simuleringarna.

Mätpunkt	Avstånd från laddning [m]	Djup under markytan [m]
1	5	1.5
2	4.5	1.5
3	4.0	1.5
4	3.5	1.5
5	3.0	1.5
6	5	0.5
7	5	2.5

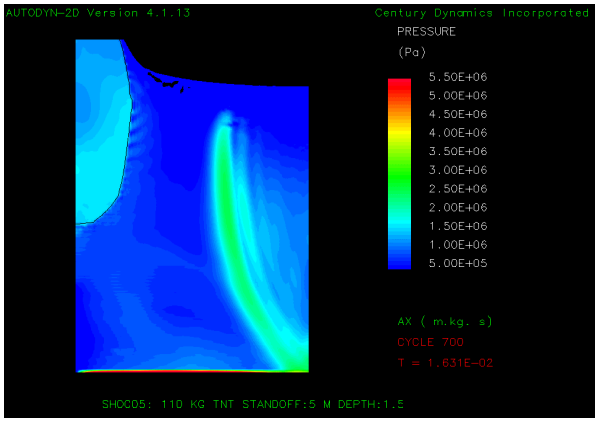
I Figur 5.4.4-5.4.6 redovisar vågutbredningen hos markstötvågen. Observera hur avlastningsvågen förstör tryckuppbyggnaden i marken när vågen träffar markytan.



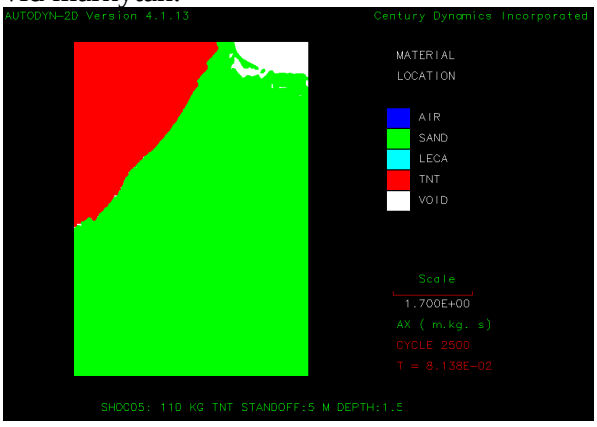
Figur 5.4.4 Medelspänning, p vid tiden 0.8 [ms].



Figur 5.4.5 Medelspänning, p vid tiden 5.5 [ms]. Observera avlastningsvågen som bildas vid markytan.



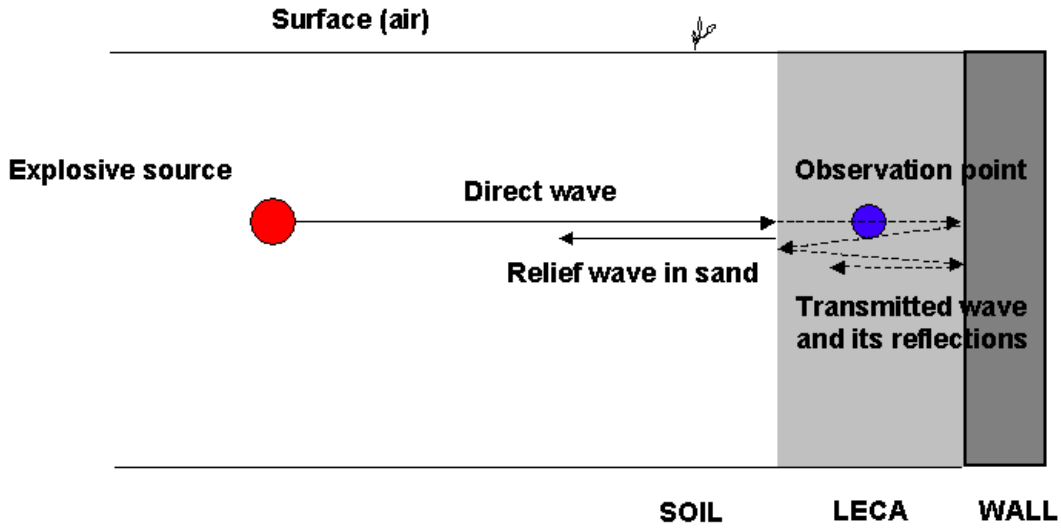
Figur 5.4.6 Medelspänning, p vid tiden 16.3 [ms]. Vågen har reflekterat mot den stela väggen och är på väg tillbaka.



Figur 5.4.7 Kraterstorlek vid tiden 81.4 [ms].

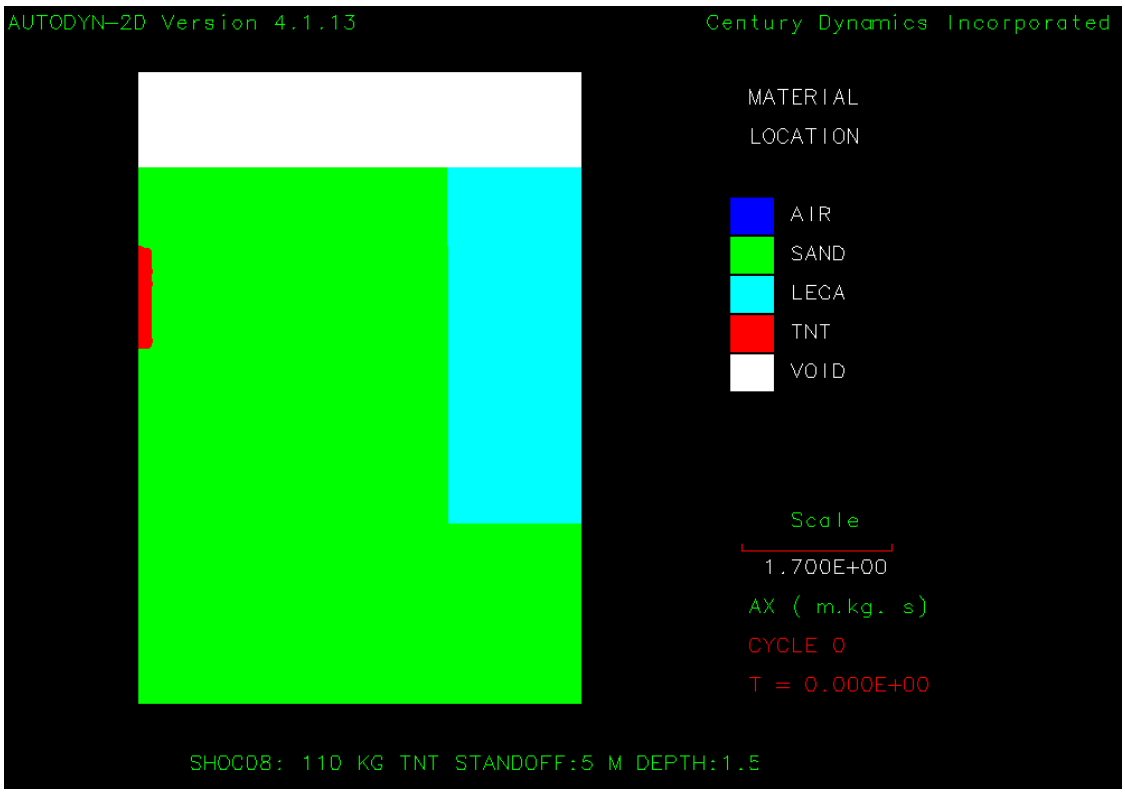
När vi inför ett lager med ett material såsom LECA framför byggnaden blir våg reflektionerna ännu mer komplicerade. LECA’n har lägre impedans än sanden vilket leder till att en ”avlastningsvåg” bildas när ”direktvågen” når fram till LECA lagret, detta är en positiv

effekt som alla material med lägre impedans bidrar till (även exempelvis EPS). Vad som inte är bara positivt är att den delen av tryckvågen som väl transmitteras in i LECA’n kommer att studsa / reflektera mellan byggnadens vägg som har högre impedans samt mellan sanden som också har högre impedans, se figur 5.4.8.



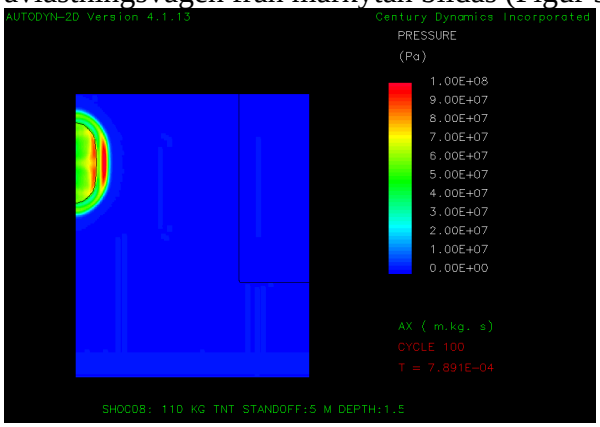
Figur 5.4.8 Schematisk beskrivning av hur ”direkt vågen” bildar en ”avlastningsvåg” i sanden och hur den del av vågen som överförs till LECA’n reflekteras mellan betongväggen och sanden.

I figur 5.4.9 redovisas det 1.5 [m] tjocka lagret av LECA framför den stela väggen i AUTODYN modellen.

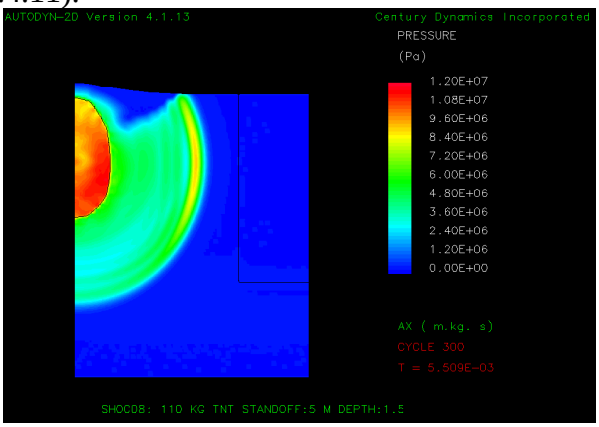


Figur 5.4.9 AUTODYN-2D modell med LECA lager med tjockleken 1.5 [m] inkluderad. Identitet: SHOC08.000

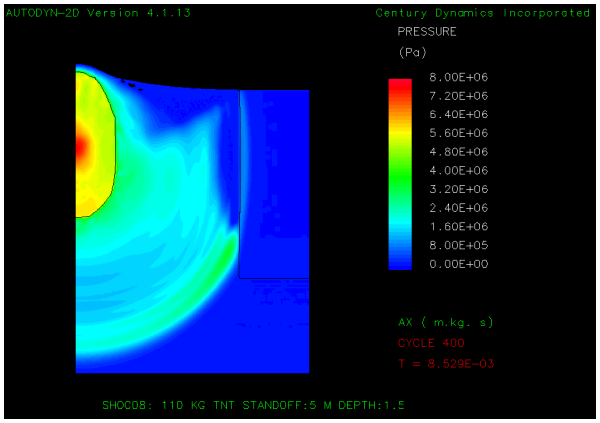
I figurerna 5.4.10-5.4.14 redovisas vågutbredningen hos markstötvågen. Observera hur avlastningsvågen från markytan bildas (Figur 5.4.11).



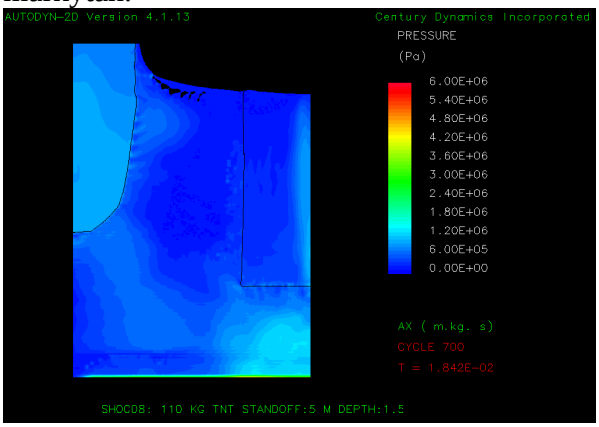
Figur 5.4.10 Medelspänning, p vid tiden 0.8 [ms].



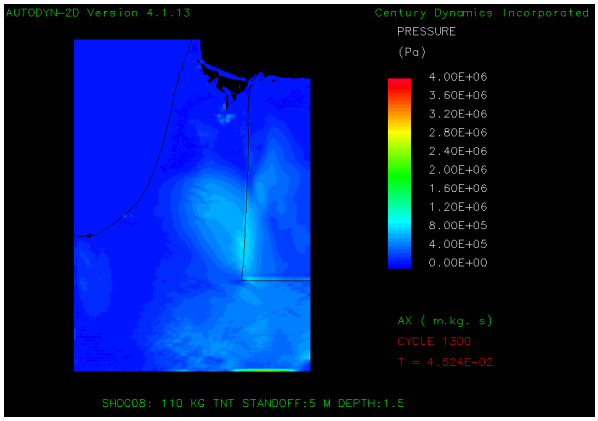
Figur 5.4.11 Medelspänning, p vid tiden 5.5 [ms]. Observera ”avlastningsvågen” från markytan.



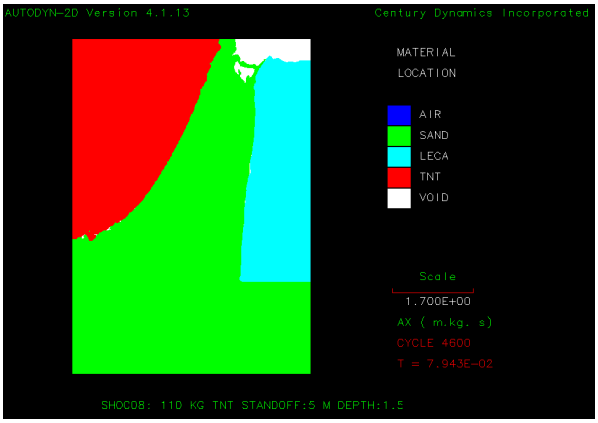
Figur 5.4.12 Medelspänning, p vid tiden 8.5 [ms]. Observera hur direktvågen bildar en avlastningsvåg när den når fram till LECA lagret. Detta är en mycket positiv effekt, den förstör ännu mer den tryckfördämning som annars bildas.



Figur 5.4.13 Medelspänning, p vid tiden 18 [ms].



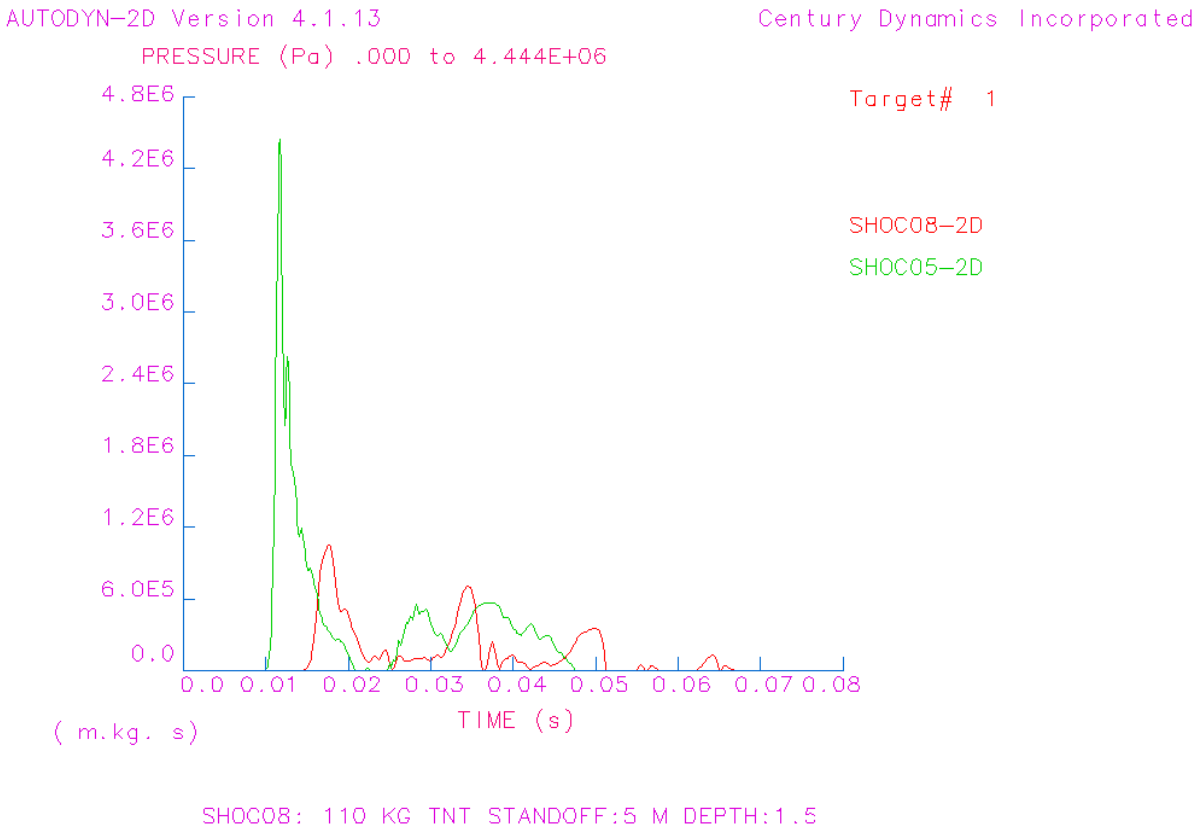
Figur 5.4.14 Medelspänning, p vid tiden 45.2 [ms].



Figur 5.4.15 Kraterstorlek vid tiden 79 [ms], Observera hur LECA’n kan röra sig vertikalt uppåt när jordmassorna från kratern ”trycker på”.

I figur 5.4.12 visar tydligt hur en ”avlastningsvåg” bildas i sanden när ”direktvågen” når fram till LECA skiktet. ”Avlastningsvågen” har en mycket positiv effekt för det fortsatta förloppet. Den förstör tryckfördämningen som bildas. I figur 5.4.15 redovisas kraterstorleken, här ses att LECA skiktet rör sig vertikalt uppåt när jordmassorna trycker på. Vilket tolkas som ännu en positiv effekt, dvs LECA’n kommer att lätt deformeras och därmed absorbera energi. Huvudorsaken till detta är LECA’n är ett mycket lättare material än sanden.

Den negativa effekten med LECA skiktet kan visualiseras genom att medelspänningen som funktion av tiden studeras för någon av mätpunkterna som befinner sig i LECA skiktet. Figur 5.4.16 redovisar medelspänningen för mätpunkt 1 för både med och utan LECA skikt. Lägg märke till hur tryckkurvan i LECA skiktet har tydliga tryckspikar, 4 stycken, med en bestämd period.



Figur 5.4.16 Medelspänning, p som funktion av tiden för mätpunkt 1 för körning med identitet: SHOC08.000 med LECA skikt / SHOC05.000 utan. Observera hur max trycket sänks rejält när LECA skiktet används men även hur tryckvågen i LECA skiktet reflekteras mellan betongvägg och sand.

I tabell 5.4.2 och 5.4.3 redovisas resultat med avseende på max tryck och impuls för AUTODYN beräkningarna samt vilken procentuell sänkning beräkningarna visar.

Tabell 5.4.2 Max tryck, p och impuls för körning utan LECA

Identitet: SHOC05.000 utan LECA		
Mätpunkt nr, [-]	P_{max}, [MPa]	I_{max}, [Pas]
1	4.44	18700.00
2	2.77	19700.00
3	3.53	20600.00
4	4.73	23300.00
5	6.56	27200.00
6	3.40	4910.00
7	4.20	25800.00

Tabell 5.4.3 Max tryck, p och impuls för körning med LECA

Identitet: SHOCK08.000 med LECA skikt		
Mätpunkt nr, [-]	P_{max}, [MPa]	I_{max}, [Pas]
1	1.05	9200.00
2	0.70	10100.00
3	0.80	11400.00
4	1.51	13000.00
5	6.59	16700.00
6	0.88	3900.00
7	1.01	14600.00

Tabell 5.4.4 redovisar procentuell sänkning om beräkning med och utan LECA studeras. Max trycket i mätpunkt 1 sänks med cirka 76 [%] och impulsen med 51 [%]. Vilket tydligt indikerar att LECA kan vara ett bra fyllnadsmaterial, vid den här typen av hot.

En viktig anmärkning är att dessa resultat bör inte ses som något mer än att de visar kvalitativt tendensen av hur ett skikt med lägre impedans och stor volymetrisk energi absorptionsförmåga såsom LECA skulle fungera vid den här typen av hot. För det föreligger stor osäkerhet i de materialdata som har varit tillgängliga för den här förstudien vid de aktuella spänningsnivåerna.

Tabell 5.4.4 Procentuell sänkning av max tryck och impuls om beräkning med och utan LECA skikt jämförs

Target nr	ΔP_{max} / $P_{max,sand}$, [%]	ΔI_{max} / $I_{max,sand}$, [%]
1	76.35	50.80
2	74.73	48.73
3	77.34	44.66
4	68.08	44.21
5	-0.46	38.60
6	74.12	20.57
7	75.95	43.41

5.5 Slutsatser kring förstudien av chock absorberande lager

De tre främsta orsakerna till att LECA är ett bra chock absorberande lager vid den här typen av hot:

1. LECA absorberar mycket volymetrisk energi när LECA kulorna börjar krossas vilket sker redan för så låga trycknivåer som 200-400 [kPa]. LECA materialet arbetar volymetriskt bra för spänningar ända upp till 20 [MPa]. Vilket gott och väl täcker in de tryckintervall som kan förväntas vid den här typen av hot.

2. När ”direktvågen” i sanden når fram till LECA skiktet bildas en ”avlastningsvåg” i sanden som förstör den bildade tryckfördämningen i sanden. Detta uppstår på grund av att LECA’n har mycket lägre impedans än vad sanden har.

3. När kratern håller på att byggas upp kan LECA skiktet röra sig vertikalt uppåt och deformeras och därmed lätta jordtrycket som bildas på grund av kratern. Detta sker främst på grund av LECA’n har en lägre densitet än sanden.

De tre största osäkerheterna kring att använda LECA:

1. LECA skiktet måste vara torrt, skulle skiktet vara vattenmättat kommer LECA’s positiva materialegenskaper att försvinna.

2. LECA skiktet måste vara intakt med avseende på tiden, den bör även kläs in i en duk som separerar omkringliggande jordmassor så att de inte blandas med LECA skiktet.

3. På grund av att LECA har lägre impedans kommer den del av tryckvågen som överförs till LECA skiktet studsa / reflektera mot betongvägg och omkringliggande jordmassor.

Slutligen skall det lyftas fram att materialprovning av LECA för aktuella spänningsnivåer bör utföras:

Framtagandet av tillståndsekvationen EOS med dess elastiska av- och på-lastningsbulkmoduler tas fram, det är speciellt viktigt att ta fram när börjar LECA kulorna krossas vid isotropisk belastning.

Samt att triaxiella skjuvprover utförs för att ta fram flytgränsytorna för materialet. Som visar hur länge beter sig LECA kulorna elastiskt samt vad är maximal flytgränsyta för olika medelspänningsnivåer.

6. Resultat från två lastfall från LS-DYNA modell

Resultat från två produktionskörningar **modell D** och **modell E**. De förklaras kortfattat i Kapitel 1.1.

Det finns ett antal valda mätpunkter för modell D som har studerats, se tabell 6.1. De studerade mätpunkterna för modell E redovisas i tabell 6.2. Dessa mätpunkter har lagrats i

ASCII-filen TRHIST. Dessa har lagrats med ett tidssteg på 10 microsekunder. Det globala koordinatsystemets origo redovisas i figur 6.1.

Tabell 6.1 Mätpunkter för modell D

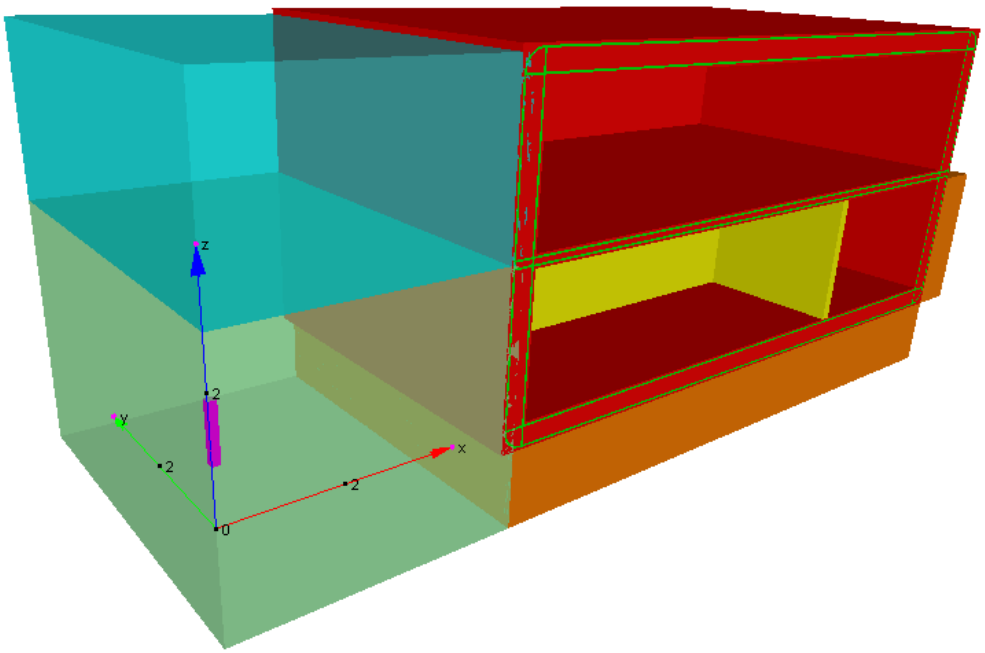
Mätpunkt, [-]	X, [m]	Y, [m]	Z, [m]
Mätpunkter i marken mellan laddning och RC			
1	0.5	0.0	1.5
2	1.0	0.0	1.5
3	1.5	0.0	1.5
4	2.0	0.0	1.5
5	2.5	0.0	1.5
6	3.0	0.0	1.5
7	3.5	0.0	1.5
8	4.0	0.0	1.5
9	4.5	0.0	1.5
10	4.95	0.0	1.5
11	4.95	0.0	2.5
12	4.95	0.0	0.5
Mätpunkter i mark under RC’n			
13	5.0	0.0	-1
14	6.0	0.0	-1
15	7.0	0.0	-1
Mätpunkter i källaryttervägg hos RC			
16	5.5	0.0	0.0
17	5.5	0.0	0.3
18	5.5	0.0	0.6
19	5.5	0.0	0.9
20	5.5	0.0	1.2
21(mitten av vägg)	5.5	0.0	1.35
22	5.5	0.0	1.5
23	5.5	0.0	1.8
24	5.5	0.0	2.1
25	5.5	0.0	2.4
26	5.5	0.0	2.7
Mätpunkter i källargolv hos RC			
27	6.0	0.0	0.0
28	6.5	0.0	0.0
29	7.0	0.0	0.0
30	7.5	0.0	0.0
31	8.0	0.0	0.0
32	8.5	0.0	0.0
33	9.0	0.0	0.0
34	9.5	0.0	0.0
35	10.0	0.0	0.0
Mätpunkter i mellanbjälklag (ovan sida) hos RC			
36	5.5	0.0	2.95
37	6.0	0.0	2.95
38	6.5	0.0	2.95

39	7.0	0.0	2.95
40	7.5	0.0	2.95
41	8.0	0.0	2.95
42	8.5	0.0	2.95
43	9.0	0.0	2.95
44	9.5	0.0	2.95
45	10.0	0.0	2.95

Tabell 6.2 Mätpunkter för modell E

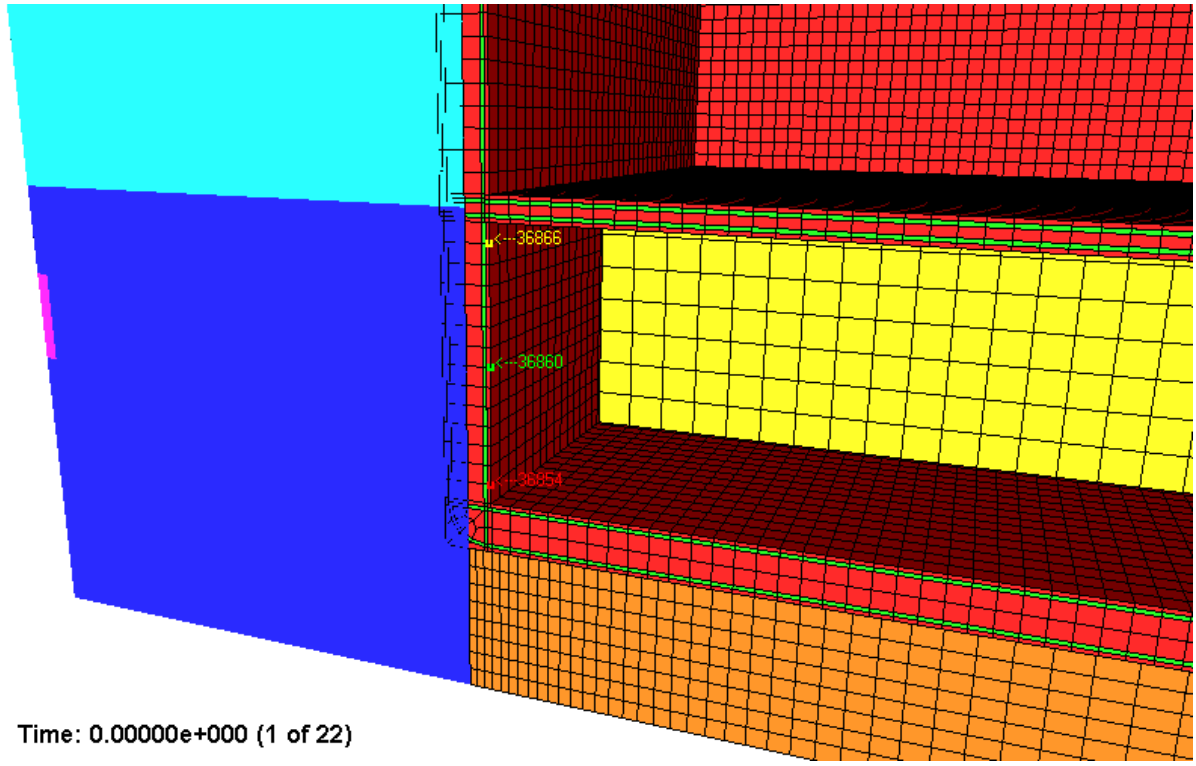
Mätpunkt, [-]	X, [m]	Y, [m]	Z, [m]
Mätpunkter i marken mellan laddning och RC			
1	0.5	0.0	1.5
2	1.0	0.0	1.5
3	1.5	0.0	1.5
4	2.0	0.0	1.5
5	2.5	0.0	1.5
6	3.0	0.0	1.5
7	3.45	0.0	1.5
8	3.45	0.0	2.5
9	3.45	0.0	0.5
Mätpunkter i mark under RC’n			
10	3.5	0.0	-1
11	4.0	0.0	-1
12	5.0	0.0	-1
Mätpunkter i källaryttervägg hos RC			
13	4.0	0.0	0.0
14	4.0	0.0	0.3
15	4.0	0.0	0.6
16	4.0	0.0	0.9
17	4.0	0.0	1.2
18(mitten av vägg)	4.0	0.0	1.35
19	4.0	0.0	1.5
20	4.0	0.0	1.8
21	4.0	0.0	2.1
22	4.0	0.0	2.4
23	4.0	0.0	2.7
Mätpunkter i källargolv hos RC			
24	4.5	0.0	0.0
25	5.0	0.0	0.0
26	5.5	0.0	0.0
27	6.0	0.0	0.0
28	6.5	0.0	0.0
29	7.0	0.0	0.0
30	7.5	0.0	0.0
31	8.0	0.0	0.0
32	8.5	0.0	0.0
Mätpunkter i mellanbjälklag (ovan sida) hos RC			
33	4.5	0.0	2.95

34	5.0	0.0	2.95
35	5.5	0.0	2.95
36	6.0	0.0	2.95
37	6.5	0.0	2.95
38	7.0	0.0	2.95
39	7.5	0.0	2.95
40	8.0	0.0	2.95
41	8.5	0.0	2.95
Mätpunkter i yttervägg (ovan markyta) hos RC			
42	4.0	0.0	3.45
43	4.0	0.0	4.3
44	4.0	0.0	5.15
Mätpunkter i innervägg hos RC			
45	4.0	3.05	1.35
46	5.0	3.05	1.35
47	6.0	3.05	1.35
48	7.0	3.05	1.35
49	8.0	3.05	1.35



Figur 6.1 Det globala koordinatsystemets origo i LS-DYNA modellen.

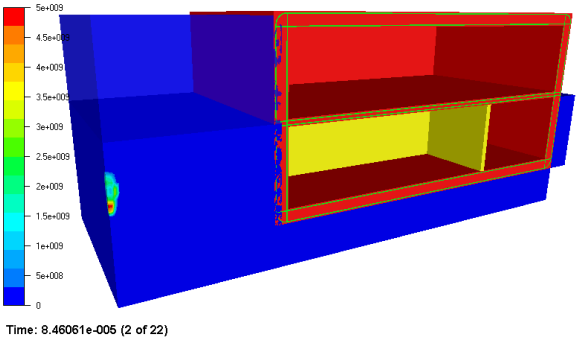
Även noder hos källaryttervägg har studerats. I modell D och E har noder hos källaryttervägg sparats till ASCII-filen NODOUT. Var på ytterväggen de befinner sig redovisas i figur 6.2.



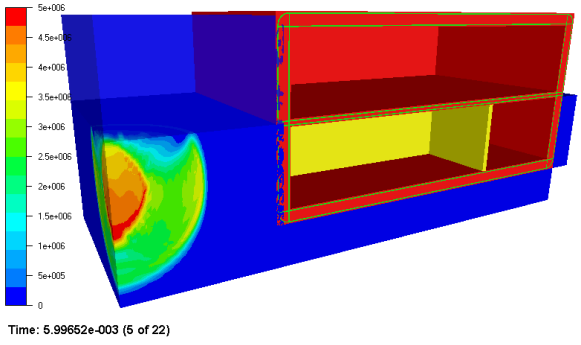
Figur 6.2 Noder som har sparats i yttervägg hos modell D.

6.1 Helhetsresultat

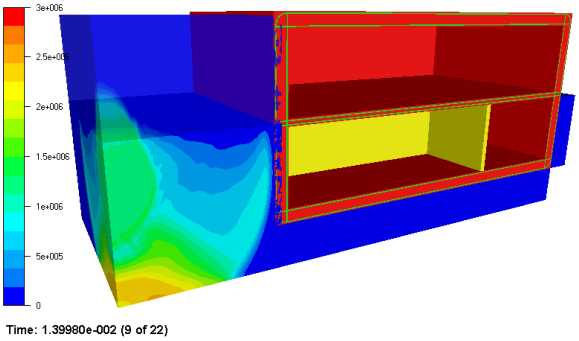
För modell D redovisas figur 6.1.1-6.1.6 hur markstötvågen propagerar i marken. Här är kortaste avståndet 5 [m] mellan laddning och RC. Vi har en avlastningsvåg som bildas när vågen når markytan, se figur 6.1.2.



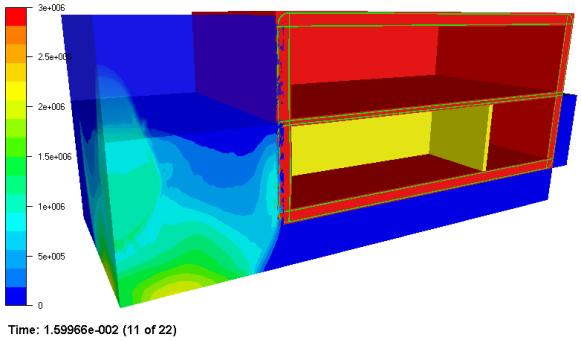
Figur 6.1.1 Medelspänning i marken vid tiden 85 microsekunder. Fortfarande flera GPa i tryck, detonationförloppet är ej helt avslutat.
Identitet: Modell D



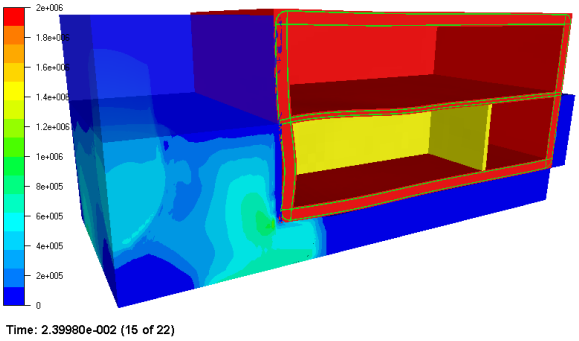
Figur 6.1.2 Medelspänning i marken vid tiden 6 millisekunder. Avlastningsvågen från markytan har bildats.
Identitet: Modell D



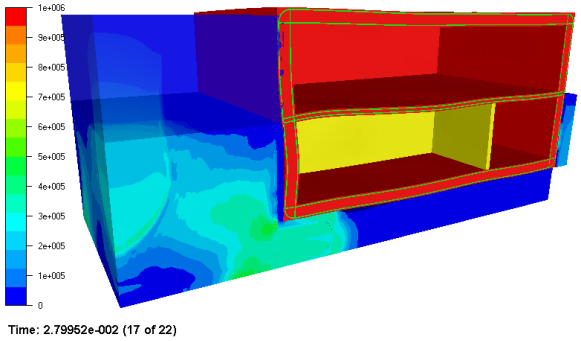
Figur 6.1.3 Medelspänning i marken vid tiden 14 millisekunder. Markstötvågen har precis nått fram till väggen.
Identitet: Modell D



Figur 6.1.4 Medelspänning i marken vid tiden 16 millisekunder. Markstötvågen reflekteras mot väggen.
Identitet: Modell D

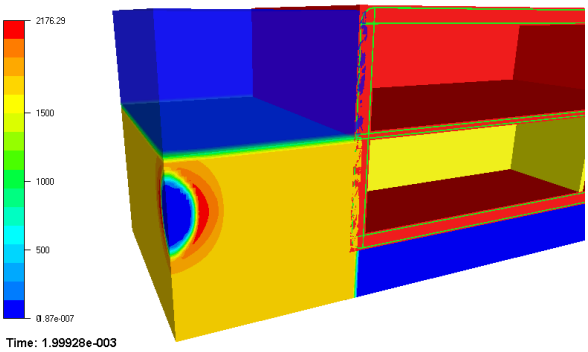


Figur 6.1.5 Medelspänning i marken vid tiden 24 millisekunder. Markstötvågen reflekteras mot väggen samt att den har börjat vandra under byggnaden. Lokal max deformation (global rörelse minus lokal rörelse) i källarvägg uppnås nu.
Identitet: Modell D

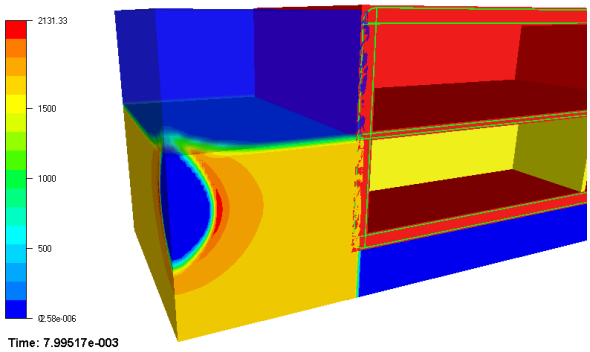


Figur 6.1.6 Medelspänning i marken vid tiden 28 millisekunder. Nu börjar marken under byggnaden påverka golvbjälklaget i källaren.
Identitet: Modell D

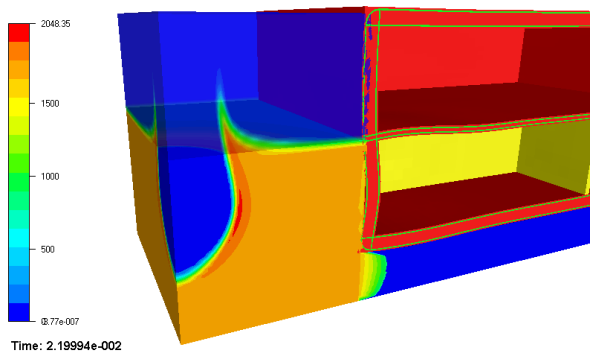
Kraterbildningen redovisas i figurerna 6.1.7-6.1.10. Det lättaste sättet att studera kratern är genom att studera densiteten hos fluiden. Luften har en intiell densitet på cirka 1.3 [kg/m^3] och sanden 1674 [kg/m^3].



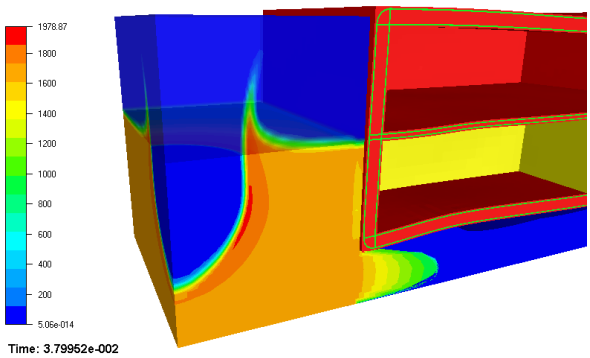
Figur 6.1.7 Densiteten vid tiden 2 millisekunder. Gasprodukterna från detonationen är inneslutna i marken under högt tryck.
Identitet: Modell D



Figur 6.1.8 Densiteten vid tiden 8 millisekunder. Nu börjar kratern att öppna sig samtidigt som gasprodukterna börjar sprida sig i luften.
Identitet: Modell D

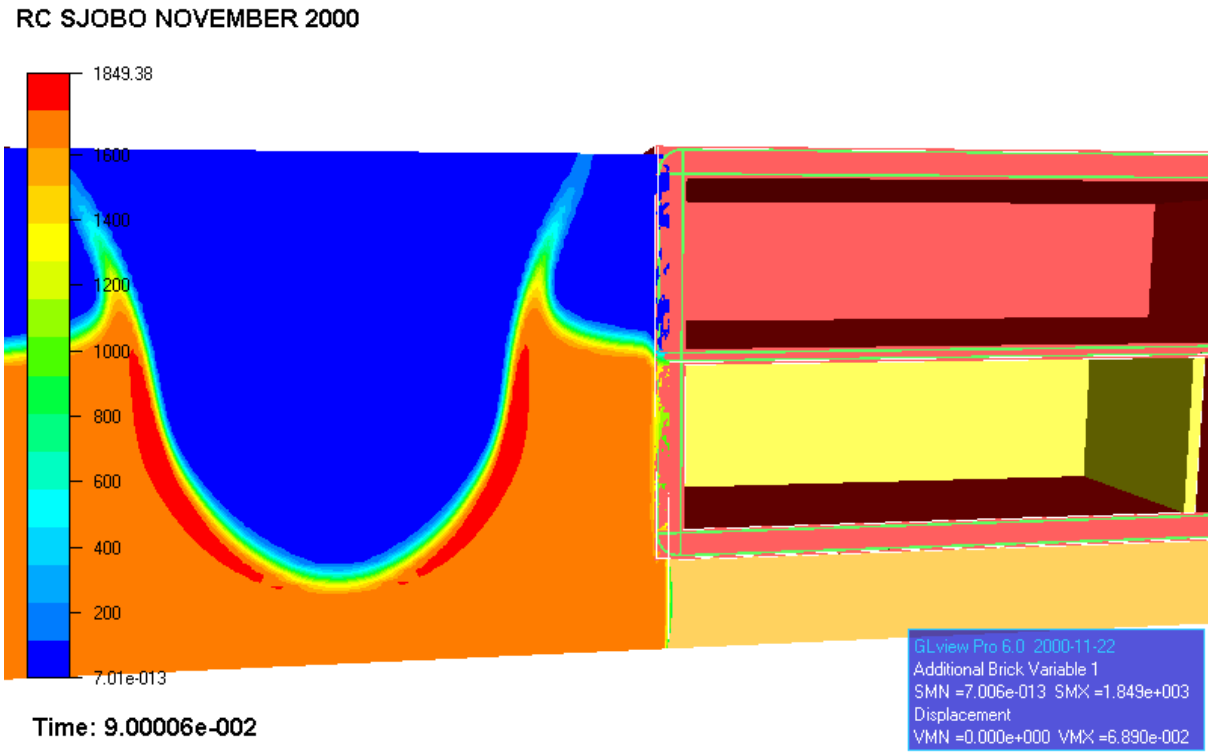


Figur 6.1.9 Densiteten vid tiden 22 millisekunder.
Identitet: Modell D



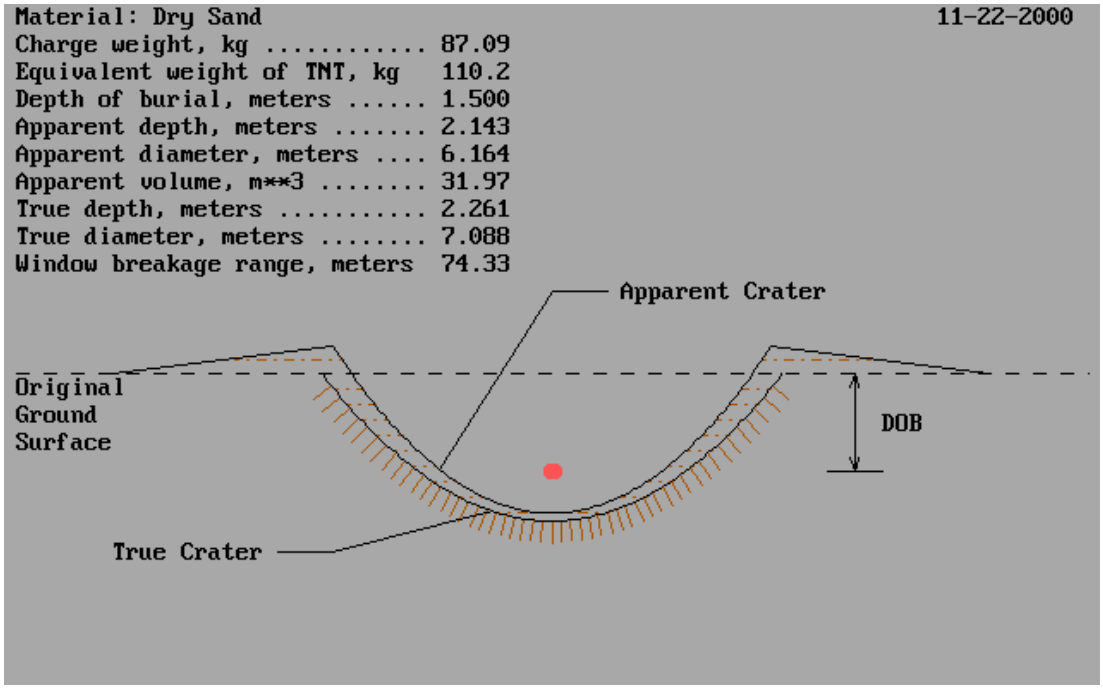
Figur 6.1.10 Densiteten vid tiden 38 millisekunder.
Identitet: Modell D

Kraterstorlek vid tiden 90 millisekunder för modell D redovisas i figur 6.1.11. Den synliga diametern hos kratern mättes till 5.8 [m], och det synliga djupet hos kratern mättes till 3.5 [m].



Figur 6.1.11 Kraterstorlek vid tiden 90 millisekunder. Densiteten hos fluiden studeras.
Identitet: Modell D.

Om en jämförelse görs med de empiriska formler som finns i till exempel CONWEP, [15], så fås följande kraterstorlek för samma laddning, se figur 6.1.12.

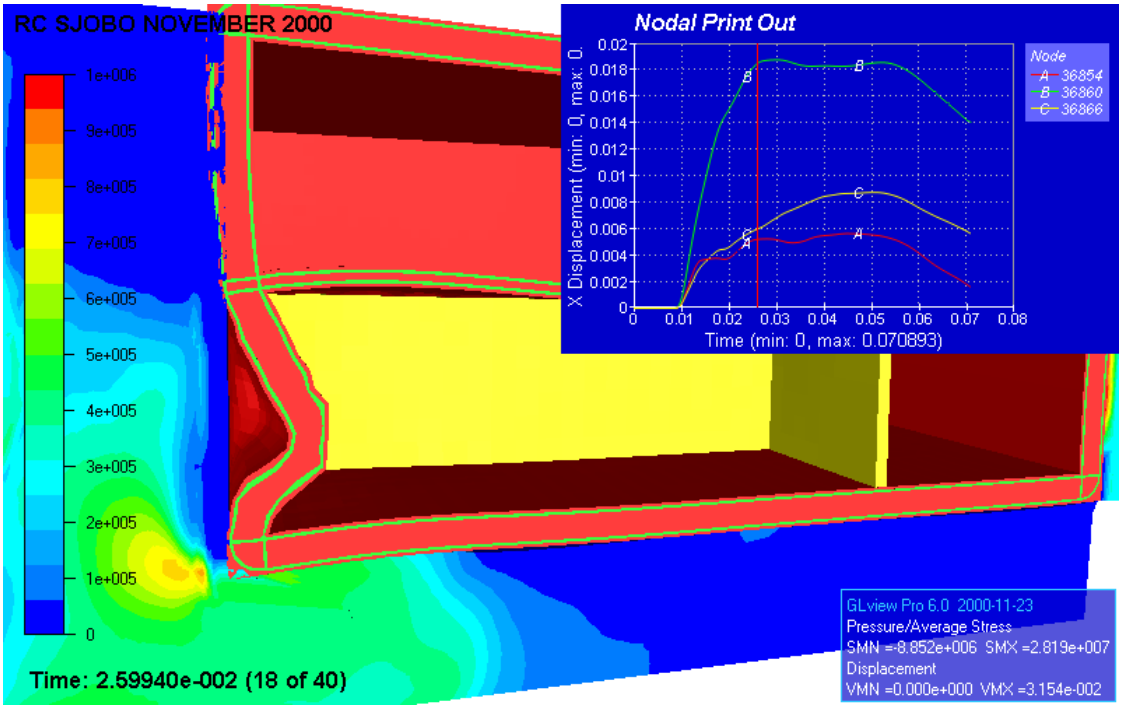


Figur 6.1.12 Kraterstorlek beräknad med hjälp av CONWEP, Laddning MK 82 med TNT ekvivalent laddning på 110 kg, begravd i torr sand på djupet 1.5 [m].

Synlig diameter hos krater överensstämmer väl mellan modell D och CONWEP båda ligger runt 6 [m]. Däremot synligt djup hos krater skiljer sig en del, den är enligt modell D cirka 1.4 [m] djupare. Detta kan motiveras med att CONWEP’s formler gör ingen skillnad på laddningsform, dvs om laddningen är sfärisk eller en lång cylinder. I modell D har laddningen givits en form som motsvarar formen hos MK-82, dvs en långsmal laddning, vilket torde vara orsaken till att det synliga kraterdjupet är större i modell D.

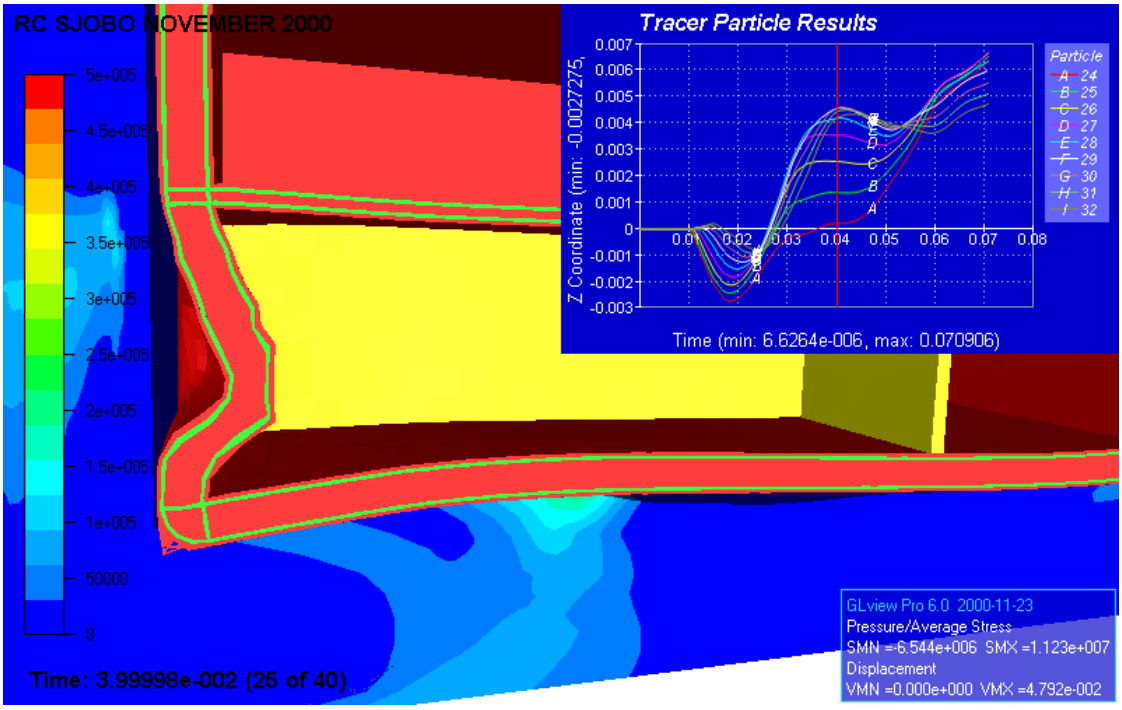
6.2 Strukturrespons hos RC 90

Källarväggen hos RC för modell E får lokal max deformation vid tiden 25-26 millisekunder, detta är under den tiden då marktstötvågen fortfarande reflekteras mot källarväggen, se figur 6.2.1. Den globala max rörelsen har ej uppnåtts vid 50 [ms].



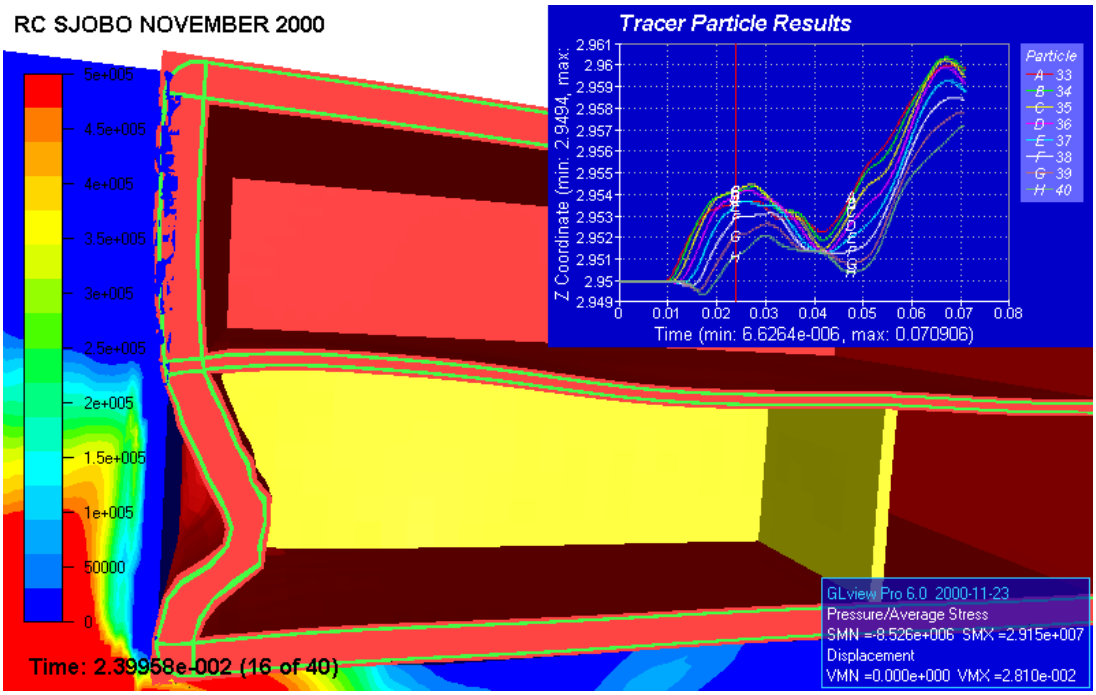
Figur 6.2.1 Lokal max deformation i x-riktning hos källarytterväg har uppnåtts vid tiden 26 millisekunder. Deformationerna är skalade.
Identitet: Modell E

Marken under RC skjuter på golvbjälklaget när stötvågen går förbi. Detta leder till att golvbjälklaget rör sig uppåt, se figur 6.2.2. Max lokal deformation i z-riktning uppnås vid 40 millisekunder. Modellen stegrar sig mot slutet vilket leder till att global max uppnås ej vid 70 millisekunder.



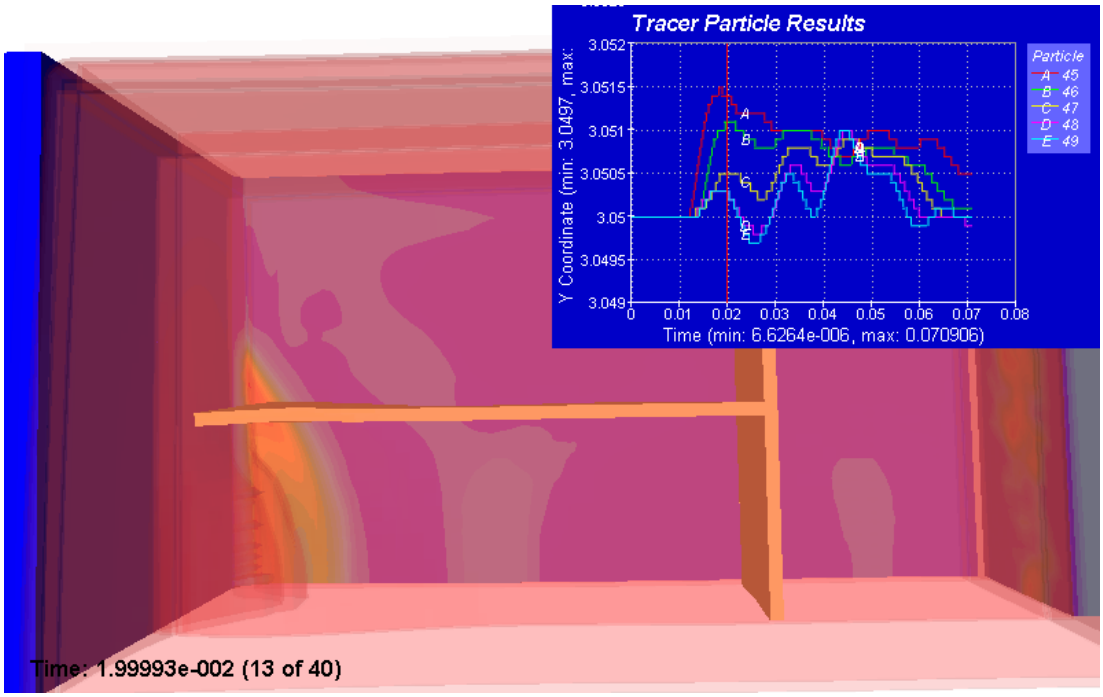
Figur 6.2.2 Markstötvågen fortplantar sig under RC vid tiden 40 millisekunder. Detta leder till att golvbjälklaget rör sig vertikalt uppåt. Skalade deformationer.
Identitet: Modell E

I figur 5.2.3 redovisas mellanbjälkagets rörelse i z-riktning vid tiden 24 millisekunder. Max lokal deformation uppnås vid denna tidpunkt.

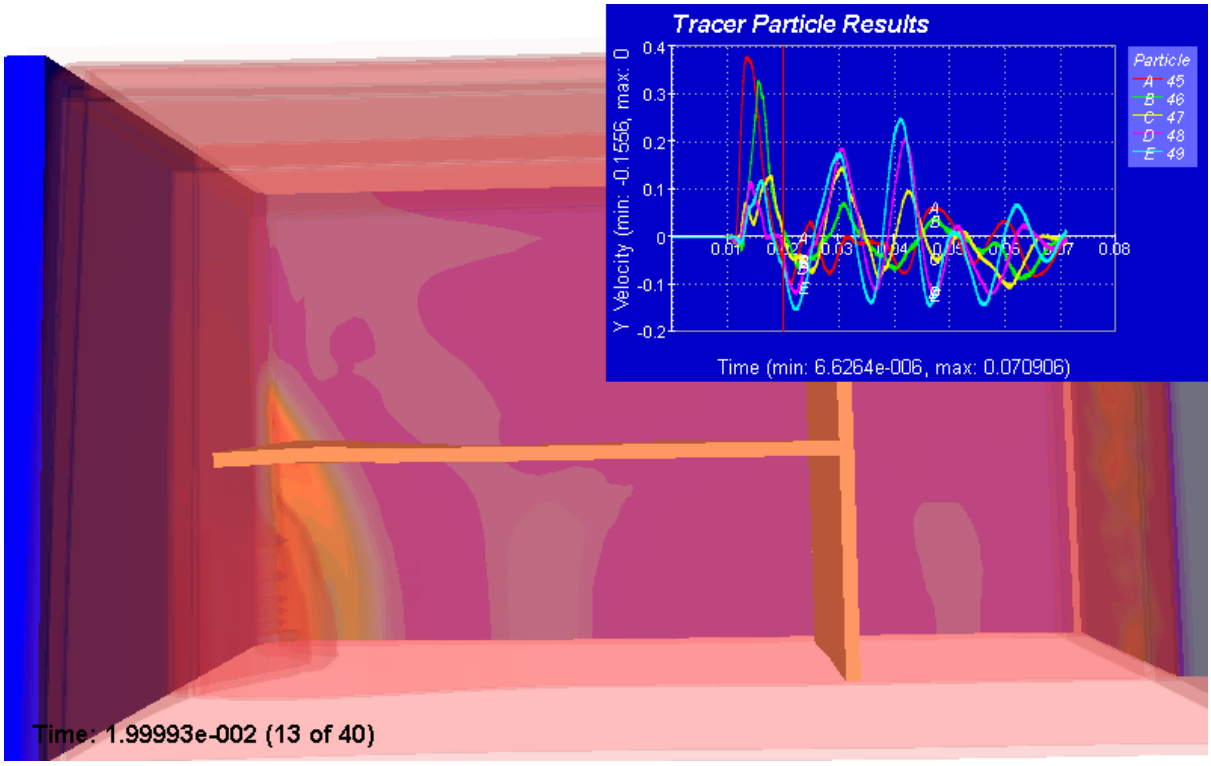


Figur 6.2.3 Mellanbjälklagets deformation vid tiden 24 millisekunder. Skalade deformationer.
Identitet: Modell E

Rörelse och hastighet i y-riktning hos innerväggen redovisas i figur 6.2.4 och 6.2.5.

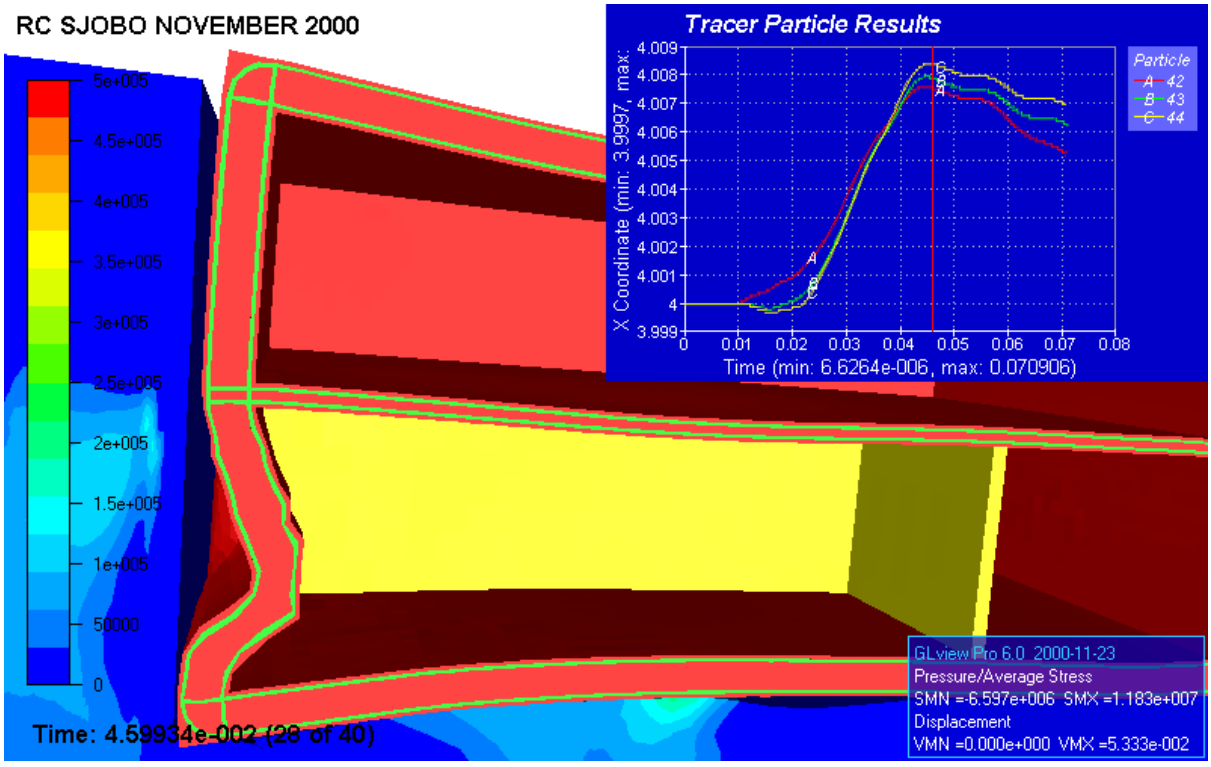


Figur 6.2.4 Rörelse i y-riktning hos innervägg vid tiden 20 [ms]
Identitet: Modell E



Figur 6.2.5. Hastighet i y-riktning hos innervägg vid tiden 20 [ms].
Identitet: Modell E

Rörelse i x-riktning för yttervägg ovan mark redovisas i figur 6.2.6.



Figur 6.2.5. Rörelse i x-riktning hos yttervägg vid tiden 46 [ms].

6 Slutsatser och diskussioner

Materialdata som har framtagits för Sjöbo sand fungerar tämligen bra för den här typen av last och avstånd. Begränsningen i de framtagna materialdata är när trycken vida överstiger 60 [MPa], vilket är fallet för jorden precis vid laddning med en radie på mindre än 1[m]. Så för aktuellt hot så är framtagna materialparamterar inom rätt spänningsintervall.

Extremt porösa material så som LECA och EPS är intressanta som chockabsorptionslager framför RC. Förstudien av LECA’n visar att den både absorberar mycket energi och att den har en positiv effekt på grund av dess låga impedans. Dessutom kan den deformera sig lätt vid kraterbildningen och därmed eventuellt ta upp mer last istället för att RC’n gör detta. För LECA’n saknas en hel del relevant materialdata som bör tas fram.

Den stora LS-DYNA modellen för framtagning av deformationer, hastigheter, och accelerationer har fungerat tämligen bra. En sak som var intressant mot tidigare beräkningar var att jorden under byggnad har stor betydelse för responsen hos RC. Källarbjälklaget acceleras upp av den förbipasserande markstötvågen i marken.

Modell D visade sig vara för vek i jordfyllnad bakom RC på grund av den nya last resultanten som bildades med jord under byggnad och därmed uppnåddes bara lokala max deformationer, den slutliga maximala globala deformationen kunde inte fås fram. I modell E rättades detta till och i detta fall uppnåddes både lokala och globala max deformationer. Jordfyllnad bakom och under RC kommer att modifieras vid nya körningar.

8. Referenser

[1] Laine L ”Räddningscentral (”RC 90”) utsatt för explosionslast vid markytan, White Sand”, januari 2000, Oslo

[2] Laine L. ”Räddningscentral (”RC 90”) utsatt för explosionslast vid markytan, etapp II, Fluid / struktur koppling med FE- programmet ANSYS/LS-DYNA”, Arbetsrapport, oktober 1999

[3] Laine L. ”Luft- och markstötvågsverkan på Räddningscentral, RC 90, Fluid / struktur koppling med FE- programmet ANSYS/LS-DYNA”, Arbetsrapport, juli 1999

[4] Laine L., Hedman O., ”FINITE ELEMENT CALCULATION OF SWEDISH RESCUE CENTRES (RC 90) AND SHELTERS” *3rd Int. Conf. On Shock and Impact Loads on Structures, 24-26 November 1999, Singapore,* CI-Premier, 205-212

[5] Heyerdahl H, et al. ”EOS-data for sand, Triaxial tests on sand from Sjöbo” Norges Geotekniske institutt 20001157-1, 2000

[6] "ANSYS/LS-DYNA, User's Guide, for Release 5.6", ANSYS Inc. 2000

[7] ”LS-DYNA THEORETICAL MANUAL” Livermore Software Technology Corporation (”LSTC”), 1999

[8] ”LS-DYNA USER’S MANUAL” v950, LSTC, 1999

[9] “LS-DYNA3D COURSE, Fluid / Structure Coupling”, Dynalis-ChE-26-06-98, DYNALIS, 1998

[10] “LLNL EXPLOSIVES HANDBOOK, Properties of Chemical Explosives and Explosives Simulants”, Lawrence Livermore National Laboratory, 1985

[11] “AUTODYN™, Theory Manual, Rev. 4.0”, Century Dynamics Inc., 1999

[12] Madshus C. et. al., ”Spalling caused by detonation of warheads in a burster slab”, Norges Geotekniske Institutt 923006-1, 1992

[13] Madshus C. et. al., ”High Rate tests on Backfill/Backpack materials” Norges Geotekniske Institutt 923022-1, 1994

[14] Desai C.S., Siriwardane H.J., (”CONSTITUTIVE LAWS FOR ENGINEERING MATERIALS WITH EMPHASIS ON GEOLOGIC MATERIALS”), Prentice-Hall, Inc., 1984

[15] “Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons”, TM 5-855-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1992

[16] Rollvik S., Sjol H., ”Sammenlikning av noen formler for grunnsjokk”, FFI/RAPPORT-90/4006, 1991

[17] Malvar L. J., et. al., "A NEW CONCRETE MATERIAL MODEL FOR DYNA3D", Karagozian & Case, Glendale CA, 1994

[18] Malvar L. J., et. al., "A NEW CONCRETE MATERIAL MODEL FOR DYNA3D, RELEASE II: SHEAR DILATION AND DIRECTIONAL RATE ENHANCEMENTS", Karagozian & Case, Glendale CA, 1996

[19] Malvar L. J., Crawford J. E., Wesevich J. W., Simons D., “A PLASTICITY CONCRETE MATERIAL MODEL FOR DYNA3D”, *International Journal of IMPACT ENGINEERING,* Elsevier Science Ltd, volume 19, 1997, 847-873

[20] CEB, *“CEB-FIP Model Code 1990, Design Code”,* Thomas Telford, 1993

[21] Meyers, M. A., "Dynamic behavior of materials", University of California, San Diego, 1994

[22] Hermann S., ”Skjærstyrkeegenskaper for LECA lettklinker”, Norges Geotekniske Institutt, NGI, 900025-1, 1990

[23] “GLview™, Version 6.1”, ViewTech ASA, 2000

[24] Balasz P., ”Beräkningsmetoder vid stötvågsbelastade konstruktioner” Kompendium i konstruktionslära Dynamik, FOA-R—97-00473-311

[25] ”TUFF, Nevada test site, ro=1.7 g/cm^3. Average ro=1.646 g/cm^3” Norges Geotekniske Institutt, FAX 9 Aug 1999.

[26] Hansbo S., ”Jordmateriallära” Chalmers Tekn. Högskola, Almqvist & Wiksell, 1975

[27] Moxnes J., Ødegårdstuen G., et al ”Mechanical properties of porous material studied in high speed piston driven compaction experiment” 30th int. Conf. Of ICT june 1999, Germany

BILAGA 1: Indatafilen RC2000m.txt till Pre-processorn ANSYS/LS-DYNA™.

```
!
!       Last modified: 2000-11-13
!*****************************************************************
!
!       SWEDISH RESCUE CENTRE ("RC 2000")
!       THREAT: MK-82, STAND OFF DISTANCE 5.0 [m] (eq. TNT is used)
!
! units [M], [S], [Kg], [N], [Pa]
!*****************************************************************
!
!
FINI
/CLEAR
/TITLE, RC Sjobo November 2000
!
!_____________________________________________________________________
!
!                                DEFINE PARAMETERS
!_____________________________________________________________________
!
!
*AFUN,DEG

!
! FRONT WALL OF RESCUE CENTRE
!
DISTX=5.0         ! HORIZONTAL DISTANCE BETWEEN EXPLOSIVE AND PLATE
DISTY=7.15        ! HORIZONTAL LENGTH OF WALL: 6 USED VALUE FOR GENERAL RC
DISTZ=5.65        ! VERTICAL HEIGHT OF WALL: 6 USED VALUE FOR GENERAL RC
THICK=0.5         ! PLATE THICKNESS
COVER1=0.04       ! OUTSIDE COVER OF REINF.
COVER2=0.04       ! INSIDE COVER OF REINF.
REINF1=0.04       ! REINFORCEMENT SMEARED OUTSIDE
REINF2=0.04       ! REINFORCEMENT SMEARED INSIDE
CC=0.2            ! CENTRE DISTANCE BETWEEN REINF.
D=20E-3           ! REINFORCEMENT DIAMETER
! FRONT WALL IN X-DIRECTION
XWALL=12.8        ! 12 USED VALUE FOR GENERAL RC UNTIL 2000 MARCH
!
! MIDDLE FLOOR
MFTHICK=0.25
!
! INNER WALL
IWTHICK=0.2
LNOWALL=3.8
YINNER=3.15

! CONCRETE THROUGH THICKNESS
MX1=1
MX11=1
MXM=2                     ! 2 OR 4
MX22=1
MX2=1

!
! AIR N SOIL

AIRZ=1                    ! EXTRA AIR IN Z-DIRECTION
AIRY=1                    ! EXTRA AIR ---Y--------
DISTZEX=1.0               ! EXTRA SOIL IN Z-DIRECTION
SOILY=1                   ! EXTRA SOIL ---Y--------
ANSLX=1                   ! EXTRA SOIL N AIR IN X-DIRECTION
OVERLAPX=2*THICK/4        ! OVERLAP FLUID/STRUCTURE
EXSOIL=1.0                ! EXTRA SOIL / BACK FILL
SOILLZ=THICK+1E-6         ! THICK*3/4 ! SOIL IN NEGATIVE Z-DIRECTION FROM GLOBAL C.S.
DISTZEX=1.5               ! ADDED SOIL IN Z-DIRECTION IN NEGATIVE Z-DIR.


! MESHCONTROL AIR N SOIL
ELLENGTH=0.20    !0.2
MANSX=80 !60
MANSY=60 !60
MANSZ=21

! SOIL UNDER RC
CONTOL=1.00E-6            ! CONTACT TOLERANCE
EDIVZ=8                   ! ELEMENT DIVISIONS I Z-DIR.
EDIVX=50          ! ELEMENT DIVISIONS I X-DIR.
RATIOX=8          ! ELEMENT DIVISIONS RATIO IN X-DIR.
```

```
!
! TNT
A=0.1333 ! QUARTER OF 110 KG TNT WHEN H=0.95        [m]
L=0.550
COGEXPLZ=1.5      ! POSITION OF C.O.G. OF EXPLOSIVE Z-DIRECTION
AEX=4             ! NUMBER OF ELEMENTS IN EXPLOSIVE
AEY=4             ! - = -




!_____________________________________________________________________
!
!                                 DEFINE ATTRIBUTES
!_____________________________________________________________________
!
/PREP7

ET,1,164          ! SOLID ELEMENTS
!ET,2,163
!ET,1,45

! CONCRETE
MP,EX,1,30.0E9
MP,DENS,1,2.4E3
mp,nuxy,1,0.16
tb,bkin,1
tbdat,1,40E6
tbdat,2,5E6
! REINFORCEMENT
MP,EX,2,210.0E9
MP,DENS,2,7.85E3
mp,nuxy,2,0.3
tb,bkin,2
tbdat,1,400E6
tbdat,2,500E6
! CONCRETE INNER WALLS
MP,EX,3,30.0E9
MP,DENS,3,2.4E3
mp,nuxy,3,0.16
tb,bkin,3
tbdat,1,40E6
tbdat,2,5E6

! AIR
MP,EX,4,1.0
MP,DENS,4,1.3
mp,nuxy,4,0.0

! SOIL
MP,EX,5,1.0E9
MP,DENS,5,1.3E3
mp,nuxy,5,0.0

! TNT
MP,EX,6,2.0E9
MP,DENS,6,2.0E3
mp,nuxy,6,0.0

! BACKFILL SOIL
MP,EX,7,1.001E9
MP,DENS,7,1.301E3
mp,nuxy,7,0.0

!
!_____________________________________________________________________
!
!                                 DEFINE GEOMETRY OF RC 2000
!_____________________________________________________________________
!
CSYS,0
K,10000,0,0,0

!
! CONCRETE FRONT WALL IN X-DIRECTION (LOAD WALL)
!
BLOCK,DISTX,DISTX+COVER1,0,DISTY,0,DISTZ                    ! COVER1
BLOCK,DISTX+COVER1,DISTX+COVER1+REINF1,0,DISTY,0,DISTZ              ! REINF1
BLOCK,DISTX+COVER1+REINF1,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,0,DISTY,0,DISTZ! MIDDLE
BLOCK,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK-COVER2,0,DISTY,0,DISTZ !REINF2
BLOCK,DISTX+THICK-COVER2,DISTX+THICK,0,DISTY,0,DISTZ                ! COVER2

VSEL,ALL
VGLUE,ALL

!
! WALL CORNER
```

```
!

!WHOLE CORNER
BLOCK, DISTX, DISTX+THICK, DISTY, DISTY+THICK, 0,DISTZ
!INNER REINFORCEMENT IN Y-DIRECTION
BLOCK, DISTX+THICK-COVER2-REINF2, DISTX+THICK-COVER2, DISTY, DISTY+THICK, 0, DISTZ
!INNER REINFORCEMENT IN X-DIRECTION
BLOCK, DISTX,DISTX+THICK,DISTY+COVER2,DISTY+COVER2+REINF2,0, DISTZ
! OUTER REINFORCEMENT
BLOCK, DISTX+COVER1, DISTX+COVER1+REINF1,DISTY,DISTY+COVER2+REINF2,0, DISTZ
BLOCK,DISTX+THICK-COVER1-REINF1,DISTX+THICK,DISTY+THICK-COVER1-REINF1,DISTY+THICK-COVER1,0,DISTZ
! CYLINDER 90 DEGREES
WPAVE,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTY+COVER2+REINF2,0
wpro,90.000000,,
CYL4,0,0,THICK-COVER1-COVER2-REINF2,0,THICK-COVER1-COVER2-REINF2-REINF1,90,DISTZ
!DIVIDE VOLUME BY AREAS
VSEL,ALL
VOVL,ALL
VSEL,S,LOC,X,DISTX,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTY+COVER2+REINF2,DISTY+THICK
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2+REINF2,DISTY+THICK
VSEL,ALL,BELOW,VOLUME
! DIVIDE VOLUMES BY A SKINNED AREA
LSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK-COVER2-REINF2
LSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2+REINF2,DISTY+COVER2+REINF2
LSEL,R,LOC,Z,D,DISTZ-D
*GET,LINE1,LINE,0,NUM,MIN
LSEL,S,LOC,X,DISTX,DISTX
LSEL,R,LOC,Y,DISTY+THICK,DISTY+THICK
LSEL,R,LOC,Z,D,DISTZ-D
*GET,LINE2,LINE,0,NUM,MAX
LSEL,ALL,
ASKIN,LINE1,LINE2
VSEL,ALL
ASLV,S,ALL
ASEL,INVE
VSEL,S,LOC,X,DISTX,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTY+COVER2+REINF2,DISTY+THICK
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2+REINF2,DISTY+THICK
VSBA,ALL,ALL
VSEL,ALL
VGLUE,ALL
ALLSEL

!
! FRONT WALL IN X-DIRECTION
!
WPCSYS,-1,0
BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,DISTY,DISTY+COVER2,0,DISTZ
BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,DISTY+COVER2,DISTY+COVER2+REINF2,0,DISTZ
BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,DISTY+COVER2+REINF2,DISTY+THICK-COVER1-REINF1,0,DISTZ
BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,DISTY+THICK-COVER1-REINF1,DISTY+THICK-COVER1,0,DISTZ
BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,DISTY+THICK-COVER1,DISTY+THICK,0,DISTZ

!
! ROOF
!

BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,0,DISTY,DISTZ,DISTZ+COVER2
BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,0,DISTY,DISTZ+COVER2,DISTZ+COVER2+REINF2
BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,0,DISTY,DISTZ+COVER2+REINF2,DISTZ+THICK-COVER1-REINF1
BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,0,DISTY,DISTZ+THICK-COVER1-REINF1,DISTZ+THICK-COVER1
BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL,0,DISTY,DISTZ+THICK-COVER1,DISTZ+THICK


!
!       DEFINE ATTRIBUTES
!

!
! REINCORCEMENT

VSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,VOLUME
! FRONT WALL REINFORCEMENT
VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK-COVER2
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY
VSEL,U,LOC,X,DISTX+COVER1+REINF1,DISTX+THICK-COVER2-REINF2
VATT,2,2,1

!CORNER
ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK-COVER2
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+COVER2
VSEL,U,LOC,X,DISTX+COVER1+REINF1,DISTX+THICK-COVER2-REINF2
VATT,2,2,1

ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK
```

```
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2,DISTY+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ
VATT,2,2,1

ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK-COVER2
VSEL,U,LOC,Y,DISTY+THICK-COVER1,DISTY+THICK
VSEL,U,LOC,Y,0,DISTY+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ
VATT,2,2,1

ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2,DISTX+THICK
VSEL,U,LOC,X,0,DISTX+THICK-COVER2
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+THICK-COVER1-REINF1,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ
VATT,2,2,1

ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+REINF1*3   ! OBS THIS IS CYLINDRIC
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2+REINF2,DISTY+THICK/2
VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ
VATT,2,2,1

ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK/2,DISTX+THICK-COVER2-REINF2
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+THICK/2+REINF2*3,DISTY+THICK-COVER1

VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ
VATT,2,2,1

ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK,DIST+THICK+XWALL
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,U,LOC,Y,DISTY+COVER2+REINF2,DISTY+THICK-COVER1-REINF1
VATT,2,2,1

!
! ROOF
VSEL,S,LOC,Z,DISTZ+COVER2,DISTZ+THICK-COVER2
VSEL,U,LOC,Z,DISTZ+COVER2+REINF2,DISTZ+THICK-COVER1-REINF1
VSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL

VATT,2,2,1

!
! CORNER & CORNER OF ROOF
!

! REINFORCEMENT
SPHERE,THICK-REINF1-COVER1-COVER2-REINF2,THICK-COVER1-COVER2-REINF2,90,180,
VSEL,S,LOC,X,0,-1
VSBW,ALL
VSEL,S,LOC,Z,0,-1
VDEL,ALL,,,1
CYLIND,THICK-REINF1-COVER1-COVER2-REINF2,THICK-COVER1-COVER2-REINF2,0,-REINF2,90,180
CYLIND,THICK-REINF1-COVER1-COVER2-REINF2,THICK-COVER1-COVER2-REINF2,-REINF2,-REINF2-COVER2,90,180
CYLIND,0,THICK-COVER1-COVER2-REINF2-REINF1,0,-REINF2,90,180
WPRO,,90
CYLIND,THICK-REINF1-COVER1-COVER2-REINF2,THICK-COVER1-COVER2-REINF2,0,REINF2,90,180
CYLIND,THICK-REINF1-COVER1-COVER2-REINF2,THICK-COVER1-COVER2-REINF2,REINF2,REINF2+COVER2,90,180
CYLIND,0,THICK-COVER1-COVER2-REINF2-REINF1,0,COVER2,90,180
WPRO,,,90
CYLIND,THICK-REINF1-COVER1-COVER2-REINF2,THICK-COVER1-COVER2-REINF2,0,REINF2,0,90
CYLIND,THICK-REINF1-COVER1-COVER2-REINF2,THICK-COVER1-COVER2-REINF2,REINF2,REINF2+COVER2,0,90
CYLIND,0,THICK-COVER1-COVER2-REINF2-REINF1,0,COVER2,0,90
ALLSEL
WPCSYS,-1,0

! Z-DIRECTION BLOCKS
BLOCK,0,REINF2,0,-REINF2,THICK-COVER2-REINF2-REINF1-COVER1,THICK-REINF2-COVER1-COVER2
BLOCK,0,REINF2,0,-REINF2,-REINF2-COVER2,THICK-COVER1-REINF1-COVER2-REINF2
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,0,-REINF2,THICK-COVER2-REINF2-REINF1-COVER1,THICK-REINF2-COVER1-COVER2
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,0,-REINF2,-REINF2-COVER2,THICK-COVER1-REINF1-COVER2-REINF2
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,-REINF2,-REINF2-COVER2,THICK-COVER2-REINF2-REINF1-COVER1,THICK-REINF2-
COVER1-COVER2
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,-REINF2,-REINF2-COVER2,-REINF2-COVER2,THICK-COVER1-REINF1-COVER2-REINF2
BLOCK,0,REINF2,-REINF2,-REINF2-COVER2,THICK-COVER2-REINF2-REINF1-COVER1,THICK-REINF2-COVER1-COVER2
BLOCK,0,REINF2,-REINF2,-REINF2-COVER2,-REINF2-COVER2,THICK-COVER1-REINF1-COVER2-REINF2

! Y-DIRECTION BLOCKS
BLOCK,0,REINF2,THICK-COVER1-REINF2-COVER2-REINF1,THICK-COVER1-REINF2-COVER2,-REINF2,0
BLOCK,0,REINF2,0,THICK-COVER1-REINF2-COVER2-REINF1,-REINF2,0
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,THICK-COVER1-REINF2-COVER2-REINF1,THICK-COVER1-REINF2-COVER2,-REINF2,0
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,0,THICK-COVER1-REINF2-COVER2-REINF1,-REINF2,0
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,THICK-COVER1-REINF2-COVER2-REINF1,THICK-COVER1-REINF2-COVER2,-REINF2-
COVER2,-REINF2
```

```
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,0,THICK-COVER1-REINF2-COVER2-REINF1,-REINF2-COVER2,-REINF2
BLOCK,0,REINF2,THICK-COVER1-REINF2-COVER2-REINF1,THICK-COVER1-REINF2-COVER2,-REINF2-COVER2,-REINF2
BLOCK,0,REINF2,0,THICK-COVER1-REINF2-COVER2-REINF1,-REINF2-COVER2,-REINF2

! X-DIRECTION BLOCKS
BLOCK,-(THICK-COVER1-REINF1-REINF2-COVER2),-(THICK-COVER1-REINF2-COVER2),-REINF2,0,-REINF2,0
BLOCK,-(THICK-COVER1-REINF1-REINF2-COVER2),REINF2+COVER2,-REINF2,0,-REINF2,0
BLOCK,-(THICK-COVER1-REINF1-REINF2-COVER2),-(THICK-COVER1-REINF2-COVER2),-REINF2-COVER2,-REINF2,-
REINF2,0
BLOCK,-(THICK-COVER1-REINF1-REINF2-COVER2),REINF2+COVER2,-REINF2-COVER2,-REINF2,-REINF2,0
BLOCK,-(THICK-COVER1-REINF1-REINF2-COVER2),-(THICK-COVER1-REINF2-COVER2),-REINF2-COVER2,-REINF2,-
REINF2-COVER2,-REINF2
BLOCK,-(THICK-COVER1-REINF1-REINF2-COVER2),REINF2+COVER2,-REINF2-COVER2,-REINF2,-REINF2-COVER2,-
REINF2
BLOCK,-(THICK-COVER1-REINF1-REINF2-COVER2),-(THICK-COVER1-REINF2-COVER2),-REINF2,0,-REINF2-
COVER2,-REINF2
BLOCK,-(THICK-COVER1-REINF1-REINF2-COVER2),REINF2+COVER2,-REINF2,0,-REINF2-COVER2,-REINF2

VSEL,S,LOC,X,REINF2+COVER2,-10
VOVL,ALL
!NUMMRG,KP,0.001,0.001
VATT,2,2,1
CM,REINFCO,VOLU

BLOCK,-(THICK-COVER2-REINF2),REINF2+COVER2,-(REINF2+COVER2),(THICK-COVER2-REINF2),-
(REINF2+COVER2),(THICK-COVER2-REINF2)

! SMALL CUBES IN Z-DIRECTION
BLOCK,0,REINF2,0,-REINF2,THICK-COVER2-REINF2-COVER1,THICK-REINF2-COVER2
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,0,-REINF2,THICK-COVER2-REINF2-COVER1,THICK-REINF2-COVER2
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,-REINF2,-REINF2-COVER2,THICK-COVER2-REINF2-COVER1,THICK-REINF2-COVER2
BLOCK,0,REINF2,-REINF2,-REINF2-COVER2,THICK-COVER2-REINF2-COVER1,THICK-REINF2-COVER2

! SMALL CUBES IN Y-DIRECTION
BLOCK,0,REINF2,THICK-COVER1-REINF2-COVER2,THICK-REINF2-COVER2,-REINF2,0
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,THICK-COVER1-REINF2-COVER2,THICK-REINF2-COVER2,-REINF2,0
BLOCK,REINF2,REINF2+COVER2,THICK-COVER1-REINF2-COVER2,THICK-REINF2-COVER2,-REINF2-COVER2,-COVER2
BLOCK,0,REINF2,THICK-COVER1-REINF2-COVER2,THICK-REINF2-COVER2,-REINF2-COVER2,-COVER2

! SMALL CUBES IN X-DIRECTION
BLOCK,-(THICK-REINF2-COVER2),-(THICK-COVER1-REINF2-COVER2),-REINF2,0,-REINF2,0
BLOCK,-(THICK-REINF2-COVER2),-(THICK-COVER1-REINF2-COVER2),-REINF2-COVER2,-COVER2,-REINF2,0
BLOCK,-(THICK-REINF2-COVER2),-(THICK-COVER1-REINF2-COVER2),-REINF2-COVER2,-COVER2,-REINF2-COVER2,-
COVER2
BLOCK,-(THICK-REINF2-COVER2),-(THICK-COVER1-REINF2-COVER2),-REINF2,0,-REINF2-COVER2,-COVER2

!
! BLOCKS         99-05-18
BLOCK,-(THICK-COVER2-REINF2),REINF2+COVER2,0,-COVER2,-COVER2-REINF2,THICK-COVER2-REINF2
BLOCK,-(THICK-COVER2-REINF2),REINF2+COVER2,-COVER2,-COVER2-REINF2,-COVER2-REINF2,THICK-COVER2-
REINF2
BLOCK,0,COVER2,-COVER2-REINF2,THICK-COVER2-REINF2,-COVER2-REINF2,THICK-COVER2-REINF2
BLOCK,COVER2,COVER2+REINF2,-COVER2-REINF2,THICK-COVER2-REINF2,-COVER2-REINF2,THICK-COVER2-REINF2
BLOCK,-(THICK-COVER2-REINF2),REINF2+COVER2,-COVER2-REINF2,THICK-COVER2-REINF2,0,-REINF2
BLOCK,-(THICK-COVER2-REINF2),REINF2+COVER2,-COVER2-REINF2,THICK-COVER2-REINF2,-REINF2,-REINF2-
COVER2

VSEL,S,LOC,X,REINF2+COVER2,-1000
!VSEL,U,MAT,,2
ALLSEL,BELO,VOLU
VOVL,ALL

!
! DO IT ALL HEXMESHABLE 99-05-18 (QUARTER OF SPHERE AND BLOCK)

CSYS,0
VSEL,S,LOC,X,REINF2+COVER2,-1000
VSEL,U,LOC,X,0,COVER2+REINF2
VSEL,U,LOC,Z,0,-COVER2-REINF2
CM,PARTC1,VOLU
VSEL,S,LOC,X,REINF2+COVER2,-1000
VSEL,R,LOC,Y,0,THICK-COVER2-REINF2
VSEL,R,LOC,X,0,COVER2+REINF2
VSEL,U,LOC,Z,-COVER2-REINF2,0
CM,PARTC2,VOLU
VSEL,S,LOC,X,REINF2+COVER2,-1000
VSEL,R,LOC,Y,0,THICK-COVER2-REINF2
VSEL,R,LOC,X,-(THICK-COVER2-REINF2),0
VSEL,R,LOC,Z,0,-COVER2-REINF2
CM,PARTC3,VOLU
CMSEL,S,PARTC1
CMSEL,A,PARTC2
CMSEL,A,PARTC3
ALLSEL,BELO,VOLU

K,100001,0,0,THICK-COVER2-REINF2
K,100002,0,0,THICK-COVER2-REINF2-COVER1
```

```
K,100003,-(THICK-COVER2-REINF2),THICK-COVER2-REINF2,0
KWPLAN,-1,100001,100002,100003
VSBW,ALL
K,100004,0,THICK-COVER2-REINF2,0
K,100005,0,THICK-COVER2-REINF2-COVER1,0
K,100006,-(THICK-COVER2-REINF2),0,THICK-COVER2-REINF2
KWPLAN,-1,100004,100005,100006
VSBW,ALL
K,100007,-(THICK-COVER2-REINF2),0,0
K,100008,-(THICK-COVER2-REINF2-COVER1),0,0
K,100009,0,THICK-COVER2-REINF2,THICK-COVER2-REINF2
KWPLAN,-1,100007,100008,100009
VSBW,ALL
VSEL,S,LOC,X,REINF2+COVER2,-1000
VATT,1,1,1
CM,CONCR,VOLU
!VSEL,S,LOC,X,REINF2+COVER2,-1000
!VSBV,CONCR,REINFCO,,,KEEP
!VSEL,S,LOC,X,REINF2+COVER2,-1000

ALLSEL,BELO,VOLU
NUMMRG,KP,0.001,0.001

!
! ELEMENT SIZE CONTROL            !99-05-05
CM,CORNER,VOLU
CMSEL,S,CORNER
LSEL,S,LOC,X,-(THICK-COVER2-REINF2)
LSEL,U,LOC,Z,THICK-COVER2-REINF2
LSEL,U,LOC,Y,THICK-COVER2-REINF2,D
LSEL,U,LOC,Z,-COVER2-REINF2,0
LESIZE,ALL, , ,MXM

LSEL,S,LOC,X,-(THICK-COVER2-REINF2)
LSEL,U,LOC,Z,THICK-COVER2-REINF2,D
LSEL,U,LOC,Y,THICK-COVER2-REINF2
LSEL,U,LOC,Y,-COVER2-REINF2,0
LESIZE,ALL, , ,MXM

LSEL,S,LOC,Y,-COVER2-REINF2
LSEL,R,LOC,Z,THICK-COVER2-REINF2
LSEL,U,LOC,X,0,+COVER2+REINF2
LESIZE,ALL, , ,MXM

LSEL,S,LOC,X,+COVER2+REINF2
LSEL,U,LOC,Y,-COVER2-REINF2,0
LSEL,R,LOC,Z,THICK-COVER2-REINF2
LESIZE,ALL, , ,MXM

LSEL,S,LOC,X,+COVER2+REINF2
LSEL,U,LOC,Z,-COVER2-REINF2,0
LSEL,R,LOC,Y,THICK-COVER2-REINF2
LESIZE,ALL, , ,MXM

LSEL,S,LOC,Y,THICK-COVER2-REINF2
LSEL,R,LOC,Z,-COVER2-REINF2
LSEL,U,LOC,X,0,COVER2+REINF2
LESIZE,ALL, , ,MXM

CSYS,0
LOCAL,14,2,COVER2+REINF2,0,0
CSYS,14
LSEL,S,LOC,X,THICK-COVER2-REINF2-COVER1
CSYS,0
LSEL,U,LOC,X,D,COVER2+REINF2-D
LSEL,U,LOC,Y,0,-COVER2-REINF2
LSEL,U,LOC,Z,0,-COVER2-REINF2
LESIZE,ALL, , ,MXM

CSYS,0
LOCAL,14,2,0,-COVER2-REINF2,0
CSYS,14
LSEL,S,LOC,X,THICK-COVER2-REINF2-COVER1
CSYS,0
LSEL,U,LOC,Y,0,-(COVER2+REINF2-D)
LSEL,U,LOC,Z,0,-COVER2-REINF2
LSEL,U,LOC,X,0,REINF2+COVER2
LESIZE,ALL, , ,MXM

CSYS,0
LOCAL,14,2,0,0,-COVER2-REINF2
CSYS,14
LSEL,S,LOC,X,THICK-COVER2-REINF2-COVER1
CSYS,0
LSEL,U,LOC,Z,-COVER2-REINF2+D,0
LSEL,U,LOC,Y,0,-COVER2-REINF2
LSEL,U,LOC,X,0,REINF2+COVER2
```

```
LESIZE,ALL, , ,MXM


!
! MOVE THE CORNER TO THE RIGHT SPOT
VSEL,S,LOC,X,COVER2+REINF2,-1000
ALLSEL,BELO,VOLU
VGEN,,ALL,,,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTY+COVER2+REINF2,DISTZ+COVER2+REINF2,,,1


!
! CORNER OF ROOF IN Y-DIRECTION
!
ASEL,S,LOC,X,DISTX,DISTX+THICK
ASEL,R,LOC,Y,DISTY-D,DISTY
ASEL,R,LOC,Z,DISTZ+D,DISTZ+THICK-D

LSEL,S,LOC,X,DISTX,DISTX
LSEL,R,LOC,Y,D,DISTY-D
LSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ
*GET,DLINE,LINE,0,NUM,MIN
VDRAG,ALL,,,,,,DLINE


! DEFINE ATTRIBUTES
VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ+COVER2,DISTZ+COVER2+REINF2
VATT,2,2,1
VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+COVER2
VSEL,U,LOC,X,DISTX+COVER1+REINF1,DISTX+THICK-REINF2-COVER2
VSEL,U,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2,DISTX+THICK
VATT,2,2,1
VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK-COVER2

VATT,2,2,1

VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2,DISTX+THICK

VSEL,R,LOC,Z,DISTZ+THICK-COVER1,DISTZ+THICK-COVER1-REINF1

VATT,2,2,1

VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+REINF2+COVER2
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,X,DISTX+COVER1+D,DISTX+3*REINF1
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ+COVER2+REINF2,DISTZ+THICK-COVER1
VATT,2,2,1
! THIS IS NOT CHECKED
VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+REINF2+COVER2
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,X,DISTX+COVER1+REINF1+REINF1*3,DISTX+THICK-COVER2-REINF2
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ+THICK-REINF1*3,DISTZ+THICK-COVER1-D
VATT,2,2,1

ALLSEL
VSEL,S,MAT,,2
VPLOT

!
! CORNER OF ROOF IN X-DIRECTION
!

ASEL,S,LOC,X,DISTX+THICK,DISTX+THICK+D
ASEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK
ASEL,R,LOC,Z,DISTZ+D,DISTZ+THICK-D

LSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK+D,DISTX+THICK+XWALL-D
LSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY
LSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ
*GET,DDLINE,LINE,0,NUM,MIN
VDRAG,ALL,,,,,,DDLINE

! DEFINE ATTRIBUTES (REINFORCEMENT)
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL
```

```
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ+COVER2,DISTZ+REINF2+COVER2
VATT,2,2,1
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2,DISTY+COVER2+REINF2
VATT,2,2,1
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+COVER2
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ+THICK-COVER1-REINF1,DISTZ+THICK-COVER1-REINF1
VATT,2,2,1
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+THICK-COVER1-REINF1,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+COVER2
VATT,2,2,1
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+THICK-COVER1-REINF1*3,DISTY+THICK-COVER1-D
VATT,2,2,1
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ+THICK-COVER1-REINF1*3,DISTZ+THICK-COVER1-D
VATT,2,2,1

!
! MIDDLE FLOOR
!
WPCSYS,-1,0
BLOCK,-(THICK+XWALL),0,0,DISTY+THICK,0,COVER2
BLOCK,-(THICK+XWALL),0,0,DISTY+THICK,COVER2,COVER2+REINF2
BLOCK,-(THICK+XWALL),0,0,DISTY+THICK,COVER2+REINF2,MFTHICK-COVER1-REINF1
BLOCK,-(THICK+XWALL),0,0,DISTY+THICK,MFTHICK-COVER1-REINF1,MFTHICK-COVER1
BLOCK,-(THICK+XWALL),0,0,DISTY+THICK,MFTHICK-COVER1,MFTHICK
VSEL,S,LOC,X,0,-(THICK+XWALL)
CM,MIDDLEFL,VOLUME
! MOVE THE FLOOR TO THE RIGHT SPOT
CMSEL,S,MIDDLEFL
VGEN,,ALL,,,DISTX+THICK+XWALL,0,DISTZ/2-MFTHICK/2,,,1
!
! OVERLAP OUTER WALLS AND MIDDLE FLOOR
CMSEL,S,MIDDLEFL
VSEL,INVE
VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ
CM,OUTERW,VOLUME
CMSEL,S,MIDDLEFL
CMSEL,A,OUTERW
VOVL,ALL
CM,WALLIF,VOLU

VSEL,S,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK
VSEL,R,LOC,X,DISTX,DISTX+THICK
CMSEL,A,WALLIF
CM,WALLIF,VOLU

!
! DEFINE ATTRIBUTES REINFORCEMENT
CMSEL,S,WALLIF
VSEL,R,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+COVER1+REINF1
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+COVER2+REINF2
VATT,2,2,1
CMSEL,S,WALLIF
VSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK-COVER2
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+THICK-COVER1
VATT,2,2,1
CMSEL,S,WALLIF
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2,DISTY+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL
VATT,2,2,1
CMSEL,S,WALLIF
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+THICK-COVER1-REINF1,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL
VATT,2,2,1
CMSEL,S,WALLIF
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ/2-MFLTHICK/2+COVER2,DISTZ/2-MFLTHICK/2+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+2*THICK+XWALL-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+COVER2+REINF2
VATT,2,2,1
CMSEL,S,WALLIF
```

```
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ/2+MFLTHICK/2-COVER1-REINF1,DISTZ/2+MFLTHICK/2-COVER1
VSEL,R,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+2*THICK+XWALL-COVER1
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+COVER2+REINF2
VATT,2,2,1
CMSEL,S,WALLIF
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ/2-MFLTHICK/2+COVER2,DISTZ/2-MFLTHICK/2+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK-COVER1
VATT,2,2,1
CMSEL,S,WALLIF
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ/2+MFLTHICK/2-COVER1-REINF1,DISTZ/2+MFLTHICK/2-COVER1
VSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK+XWALL+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK-COVER1
VATT,2,2,1
CMSEL,S,WALLIF
VSEL,R,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+THICK
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2,DISTY+COVER2+REINF2
VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ+COVER2+REINF2
VATT,2,2,1
CMSEL,S,WALLIF
VSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK-COVER2
VSEL,R,LOC,Y,DISTY,DISTY+THICK-COVER1
VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ+COVER2+REINF2
ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+REINF1*3   ! OBS THIS IS CYLINDRIC
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+COVER2+REINF2,DISTY+THICK/2
VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ+COVER2+REINF2
VATT,2,2,1

ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK/2,DISTX+THICK-COVER2-REINF2
VSEL,R,LOC,Y,DISTY+THICK/2+REINF2*3,DISTY+THICK-COVER1

VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ+COVER2+REINF2
VATT,2,2,1

! DEFINE REINFORCEMENT IN CORNER & CORNER
LOCAL,20,2,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTY+COVER2+REINF2,DISTZ+COVER2+REINF2
CSYS,20
VSEL,S,LOC,X,THICK-COVER2-REINF2-COVER1-REINF1-D,THICK-COVER2-REINF2-COVER1+D
VATT,2,2,1

VSEL,S,MAT,,2
VPLOT

!
! SYMMETRY ON FRONT WALL (TO GET BACK WALL)
!
CSYS,0
ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX,DISTX+THICK
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+THICK
VSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ+THICK
CSYS,0
WPAVE,DISTX+THICK+XWALL/2,0,0
CSYS,WP
VSYMM,X,ALL

WPCSYS,-1,0



!
! SYMMETRY ON ROOF (TO GET FLOOR)
!

CSYS,0
ALLSEL
VSEL,S,LOC,X,DISTX,DISTX+THICK+XWALL+THICK
VSEL,R,LOC,Y,0,DISTY+THICK
VSEL,R,LOC,Z,DISTZ,DISTZ+THICK
WPAVE,DISTX+THICK+XWALL/2,0,DISTZ/2
CSYS,WP
VSYMM,Z,ALL

VSEL,S,MAT,,2
VSEL,INVE
VATT,1,1,1


WPCSYS,-1,0
!
!
! INNER WALLS GROUND FLOOR ACCORDING TO DRAWING RK101
! ENABLED MARCH 2000

BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL-IWTHICK,YINNER-IWTHICK/2,YINNER+IWTHICK/2,0,DISTZ/2-
```

```
MFTHICK/2
BLOCK,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL-IWTHICK,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL,YINNER-
IWTHICK/2,YINNER+IWTHICK/2,0,DISTZ/2-MFTHICK/2
BLOCK,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL-IWTHICK,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL,0,YINNER-IWTHICK/2,0,DISTZ/2-
MFTHICK/2
BLOCK,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL-IWTHICK,DISTX+THICK+XWALL-
LNOWALL,YINNER+IWTHICK/2,DISTY,0,DISTZ/2-MFTHICK/2

ALLSEL,ALL
VSEL,S,MAT,,1,2
VSEL,INVE
VATT,3,3,1
ALLSEL,BELO,VOLU
VGLUE,ALL
VATT,3,3,1

!
!  INNER WALLS USED IN THE GENERAL RC 90 MODEL: PAUSED MARCH 2000
! ----- FROM HERE
!  INNER WALLS GROUND FLOOR
!BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+(XWALL-4),DISTY/2,DISTY/2+IWTHICK/3,0,DISTZ/2-MFTHICK/2
!BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+(XWALL-4),DISTY/2+IWTHICK/3,DISTY/2+IWTHICK*2/3,0,DISTZ/2-MFTHICK/2
!BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+(XWALL-4),DISTY/2+IWTHICK*2/3,DISTY/2+IWTHICK,0,DISTZ/2-MFTHICK/2

!BLOCK,DISTX+THICK+(XWALL-2),DISTX+THICK+XWALL,DISTY/2,DISTY/2+IWTHICK*1/3,0,DISTZ/2-MFTHICK/2
!BLOCK,DISTX+THICK+(XWALL-2),DISTX+THICK+XWALL,DISTY/2+IWTHICK*1/3,DISTY/2+IWTHICK*2/3,0,DISTZ/2-
MFTHICK/2
!BLOCK,DISTX+THICK+(XWALL-2),DISTX+THICK+XWALL,DISTY/2+IWTHICK*2/3,DISTY/2+IWTHICK,0,DISTZ/2-
MFTHICK/2

!
!
! INNER WALLS UPPER FLOOR
!BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+(XWALL-6),DISTY/2,DISTY/2+IWTHICK/3,DISTZ/2+MFTHICK/2,DISTZ
!BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+(XWALL-
6),DISTY/2+IWTHICK/3,DISTY/2+IWTHICK*2/3,DISTZ/2+MFTHICK/2,DISTZ
!BLOCK,DISTX+THICK,DISTX+THICK+(XWALL-
6),DISTY/2+IWTHICK*2/3,DISTY/2+IWTHICK,DISTZ/2+MFTHICK/2,DISTZ

!BLOCK,DISTX+THICK+(XWALL-4),DISTX+THICK+XWALL,DISTY/2,DISTY/2+IWTHICK*1/3,DISTZ/2+MFTHICK/2,DISTZ
!BLOCK,DISTX+THICK+(XWALL-
4),DISTX+THICK+XWALL,DISTY/2+IWTHICK*1/3,DISTY/2+IWTHICK*2/3,DISTZ/2+MFTHICK/2,DISTZ
!BLOCK,DISTX+THICK+(XWALL-
4),DISTX+THICK+XWALL,DISTY/2+IWTHICK*2/3,DISTY/2+IWTHICK,DISTZ/2+MFTHICK/2,DISTZ
! ----- TO HERE

ALLSEL
VPLOT

!
!_____________________________________________________________________
!
!                                  MESH
!_____________________________________________________________________
!


!
! MESHCONTROL LINES IN X-DIRECTION
LSEL,S,LOC,X,DISTX,DISTX+COVER1
LSEL,R,LOC,Y,0,0
LSEL,R,LOC,Z,0,0
LESIZE,ALL, , ,MX1

LSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1,DISTX+COVER1+REINF1
LSEL,R,LOC,Y,0,0
LSEL,R,LOC,Z,0,0
LESIZE,ALL, , ,MX11

LSEL,S,LOC,X,DISTX+COVER1+REINF1,DISTX+THICK-COVER2-REINF2
LSEL,R,LOC,Y,0,0
LSEL,R,LOC,Z,0,0
LESIZE,ALL, , ,MXM

LSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2-REINF2,DISTX+THICK-COVER2
LSEL,R,LOC,Y,0,0
LSEL,R,LOC,Z,0,0
LESIZE,ALL, , ,MX22

LSEL,S,LOC,X,DISTX+THICK-COVER2,DISTX+THICK
LSEL,R,LOC,Y,0,0
LSEL,R,LOC,Z,0,0
LESIZE,ALL, , ,MX2


VSEL,ALL
ALLSEL,BELOW,VOLUME
```

```
CSYS,0

ALLSEL,ALL
VSEL,U,MAT,,3
ALLSEL,BELO,VOLU
NUMMRG,KP,0.001,0.001
ESIZE,CC
MSHAPE,0,3D                         ! MESH HEXMESHABLES REINF WALLS
VMESH,ALL                           ! P990907

!
! MESH CONTROL INNER WALLS
MEIN=3
VSEL,S,MAT,,3
ALLSEL,BELO,VOLU
LSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL-IWTHICK,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL
LSEL,R,LOC,Y,YINNER-IWTHICK/2,YINNER+IWTHICK/2
LSEL,R,LOC,Z,DISTZ/2-MFTHICK/2
LESIZE,ALL, , ,MEIN


!
! MESH INNER WALLS

VSEL,S,MAT,,3
ESIZE,2*CC                          ! 1*CC
MSHAPE,0,3D                         ! MESH HEXMESHABLES INNER WALLS
VMESH,ALL                           ! P990907

ALLSEL
! SAVE,RCsjobov3,db,
!
!_____________________________________________________________________
!
!                DEFINE GEOMETRY OF AIR N SOIL AND MESH
!_____________________________________________________________________
!

!
!        SOIL
!

! CHANGED 99-09-14
BLOCK,0,A,0,A,-SOILLZ,DISTZ/2
VATT,5,5,1
VSEL,S,MAT,,5
ALLSEL,BELO,VOLU

!
! MESH EXPLOSIVE
LSEL,S,LOC,X,-D,D
LSEL,R,LOC,Y,-D,D
LESIZE,ALL,,,MANSZ
LSEL,S,LOC,X,D,A-D
LESIZE,ALL,,,AEX
LSEL,S,LOC,Y,D,A-D
LESIZE,ALL,,,AEY
MSHAPE,0,3D
VMESH,ALL

!
! EXTRUDE IN X-DIRECTION
ASEL,S,LOC,X,A-D,A
AATT,5,5
EXTOPT,ON
!EXTOPT,ATTR,1,1
EXTOPT,ESIZE,MANSX
VEXT,ALL,,,DISTX+OVERLAPX-A         ! EXTRUDE

!
! EXTRUDE IN Y-DIRECTION
VSEL,S,MAT,,5
ASLV,S
ASEL,R,LOC,Y,A-D,A
AATT,5,5
EXTOPT,ON
!EXTOPT,ATTR,1,1
EXTOPT,ESIZE,MANSY,4
VEXT,ALL,,,,DISTY+THICK-A ! EXTRUDE


!
! EXTRUDE IN Z-DIRECTION (THE EXTRA SOIL)
VSEL,S,MAT,,5
ASLV,S
ASEL,R,LOC,Z,-SOILLZ-D,-SOILLZ
AATT,5,5
```

```
EXTOPT,ON
EXTOPT,ESIZE,EDIVZ
VEXT,ALL,,,,,-DISTZEX              ! EXTRUDE


!
!        AIR
!

VSEL,S,MAT,,5
ASLV,S
ASEL,R,LOC,Z,DISTZ/2-D,DISTZ/2
AATT,4,4
EXTOPT,ON
EXTOPT,ESIZE,MANSZ-6,2             ! SPECIAL CASE FULLY BURIED
VEXT,ALL,,,,,DISTZ/2+THICK*3/4


!
!_____________________________________________________________________
!
!                          DEFINE EXPLOSIVE CHARGE
!_____________________________________________________________________
!


! DEFINE ATTRIBUTES FOR TNT
ALLSEL
CSYS,0
NSEL,S,LOC,X,0,A          !RB 990817
NSEL,R,LOC,Y,0,A
NSEL,R,LOC,Z,DISTZ/2-L-COGEXPLZ,DISTZ/2+L-COGEXPLZ  ! LOCATED AT -COGEXPLZ [M]
ESLN,S,1
EMODIF,ALL,MAT,6
EMODIF,ALL,REAL,6

!
!_____________________________________________________________________
!
!                EXTRA SOIL - BACKFILL ON BACKSIDE
!_____________________________________________________________________
!
ALLSEL
ASEL,S,LOC,X,DISTX+XWALL+2*THICK,DISTX+XWALL+2*THICK+D
ASEL,R,LOC,Z,-THICK,DISTZ/2-MFTHICK/2
EXTOPT,OFF
EXTOPT,ESIZE,4
EXSOIL=1.0
VEXT,ALL,,,EXSOIL         ! EXTRUDE 1 [m] IN X-DIRECTION
VSEL,S,LOC,X,DISTX+XWALL+2*THICK,DISTX+XWALL+2*THICK+1
ESLV,S
EMODIF,ALL,MAT,7
EMODIF,ALL,REAL,7

!
!_____________________________________________________________________
!
!                EXTRA SOIL - UNDER THE STRUCTURE
!_____________________________________________________________________
!
!        NOT PAUSED MARCH 2000, TO TEST REAL FLUID STRUCTURE
! ------FROM HERE
ALLSEL
!VSEL,U,MAT,,1,7          PAUSED 24 MARCH 2000
!BLOCK,DISTX,DISTX+XWALL+2*THICK,0,DISTY+THICK,-THICK-CONTOL,-DISTZEX-SOILLZ
VSEL,S,MAT,,5
ASLV,S
ASEL,R,LOC,X,DISTX+OVERLAPX
ASEL,R,LOC,Z,-SOILLZ-DISTZEX,-SOILLZ
AATT,7,7,1
EXTOPT,ON
EXTOPT,ESIZE,EDIVX,RATIOX
VEXT,ALL,,,XWALL+2*THICK-OVERLAPX                  ! EXTRUDE

!VATT,7,7,1
!VSEL,S,MAT,,7
!ASLV,S
!LSLA,S
!LSEL,R,LOC,X,DISTX-D,DISTX+D
!LSEL,R,LOC,Y,-D,0
!LSEL,R,LOC,Z,-THICK-D,-DISTZEX-SOILLZ+D
!LESIZE,ALL,,,EDIVZ
!VSEL,S,MAT,,7
!ASLV,S
!LSLA,S
!LSEL,R,LOC,Z,0,-DISTZEX-SOILLZ
!LSEL,R,LOC,Y,0
```

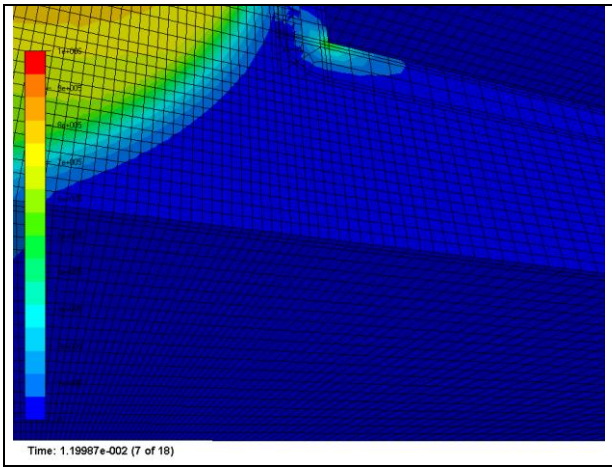
```
!LSEL,R,LOC,X,DISTX+D,DISTX+XWALL+2*THICK-D
!LESIZE,ALL,,,EDIVX,RATIOX
!ASLV,S
!LSLA,S
!LSEL,R,LOC,Z,0,-DISTZEX-SOILLZ
!LSEL,R,LOC,Y,DISTY+THICK
!LSEL,R,LOC,X,DISTX+D,DISTX+XWALL+2*THICK-D
!LESIZE,ALL,,,EDIVX,1/RATIOX
!VSEL,S,MAT,,7
!VSEL,R,LOC,X,DISTX,DISTX+2*THICK+XWALL
!MSHAPE,0,3D
!VMESH,ALL

!
! BOUNDARY
ESEL,S,MAT,,7
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Z,-DISTZEX-SOILLZ
D,ALL,UZ

!
! CONTACT BETWEEN RC AND SOIL BENEATH

ESEL,S,MAT,,7
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Z,-THICK
NSEL,R,LOC,X,DISTX,DISTX+XWALL+2*THICK-D
CM,TARSOI,NODE
ESEL,S,MAT,,1
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Z,-THICK-CONTOL
NSEL,R,LOC,X,DISTX,DISTX+XWALL+2*THICK-D
CM,CONRC,NODE
ALLSEL
EDCGEN,STS,CONRC,TARSOI,0.5,0.5,,,,,,,,5E-3



! -----TO HERE
!_____________________________________________________________________
!
!                          NON REFLECTING BOUNDARY
!_____________________________________________________________________
!
ALLSEL
ESEL,S,MAT,,5
ESEL,A,MAT,,7
NSLE,S,ALL
NSEL,R,LOC,Z,-SOILLZ-DISTZEX-D,-SOILLZ-DISTZEX
CM,NRB,NODE
EDNB,ADD,NRB
ALLSEL

!
!_____________________________________________________________________
!
!                                  SOLUTION
!_____________________________________________________________________
!

CSYS,0

!
! BOUNDARY
ALLSEL                                      !SOIL BACKFILL
ESEL,S,MAT,,7
NSLE,S
NSEL,R,LOC,X,DISTX+XWALL+2*THICK+1
D,ALL,ALL
ESEL,S,MAT,,7
NSLE,S
NSEL,R,LOC,Z,-THICK-D,-THICK
NSEL,U,LOC,X,0,DISTX+2*THICK+XWALL
D,ALL,UZ

!
! BOUNDARY                ! PAUSED MARCH 2000
!ALLSEL
!ESEL,S,MAT,,5
!NSLE,S,ALL
!NSEL,R,LOC,Z,-1-THICK*3/4+D,-THICK-D
!NSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK/4,DISTX+THICK/4+D
!D,ALL,UX

!
! SYMMETRY
```

```
ALLSEL
ASEL,S,LOC,X,0
DA,ALL,SYMM

ALLSEL
ASEL,S,LOC,Y,0
DA,ALL,SYMM

ALLSEL
!
! INNER WALLS NODES FOR CONTACT TIED        (UNIVERSAL SELECTOR)
!                                           (FOR INNER WALLS   )
ESEL,S,MAT,,3
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,Z,0
CM,GFBOTT,NODE
ESEL,S,MAT,,3
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK
CM,GFW1,NODE
ESEL,S,MAT,,3
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,Y,DISTY
CM,GFW2,NODE
ESEL,S,MAT,,3
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,X,DISTX+XWALL+THICK
CM,GFW3,NODE
ESEL,S,MAT,,3
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,Z,DISTZ/2-MFTHICK/2
CM,GFROOF,NODE

CMSEL,S,GFBOTT
CMSEL,A,GFW1
CMSEL,A,GFW2
CMSEL,A,GFW3
CMSEL,A,GFROOF
CM,GFNODIW,NODE

!
! OUTER WALL & NODES FOR CONTACT TIED (CHECK THIS IF WALLS ARE CHANGED)
ESEL,S,MAT,,1
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL-IWTHICK-CC/2,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL+CC/2
NSEL,R,LOC,Y,0,DISTY
CM,GFBO1,NODE
ESEL,S,MAT,,1
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,Z,0
NSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL
NSEL,R,LOC,Y,YINNER-CC,YINNER+IWTHICK+CC
CM,GFBO2,NODE
ESEL,S,MAT,,1
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK
NSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ/2-MFTHICK/2
NSEL,R,LOC,Y,YINNER-CC,YINNER+IWTHICK+CC
CM,GFWO1,NODE
ESEL,S,MAT,,1
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,Y,DISTY
NSEL,R,LOC,Z,0,DISTZ/2-MFTHICK/2
NSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL-IWTHICK-CC/2,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL+CC/2
CM,GFWO2,NODE
!
! DON'T FORGET TO ADD GFWO3 WHEN WALL 3 HAS A INNER WALL INTERACTION

ESEL,S,MAT,,1
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,Z,DISTZ/2-MFTHICK/2
NSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL-IWTHICK-CC/2,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL+CC/2
NSEL,R,LOC,Y,0,DISTY
CM,GFROOFO1,NODE
ESEL,S,MAT,,1
ALLSEL,BELO,ELEM
NSEL,R,LOC,Z,DISTZ/2-MFTHICK/2
NSEL,R,LOC,X,DISTX+THICK,DISTX+THICK+XWALL-LNOWALL
NSEL,R,LOC,Y,YINNER-CC,YINNER+IWTHICK+CC
CM,GFROOFO2,NODE

CMSEL,S,GFBO1
CMSEL,A,GFBO2
CMSEL,A,GFWO1
CMSEL,A,GFWO2
!CMSEL,A,GFWO3
```

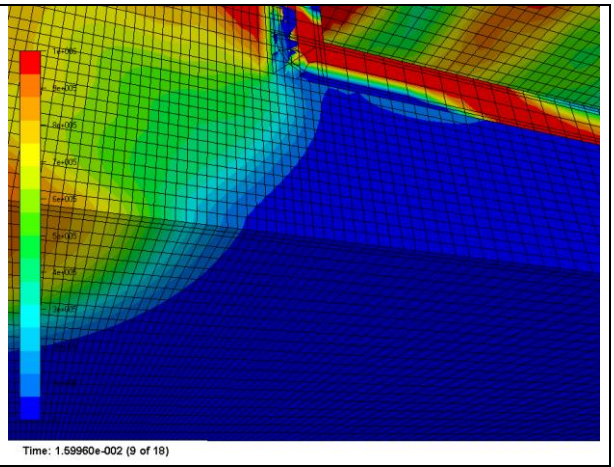
```
CMSEL,A,GFROOFO1
CMSEL,A,GFROOFO2
CM,GFNODOW,NODE

! CHECK CONTACT TIED NODES THAT GENERATES THE SEGMENTS...
CMSEL,S,GFNODIW
CMSEL,A,GFNODOW

ALLSEL
EDCGEN,TDSS,GFNODIW,GFNODOW,,,,,,,,,1E-3
! EDPC,2          !VIEW THE CONTACT TIED

ALLSEL

!
! TIME / OUTPUT
TIME, 50E-3               ! ANALYSIS TIME
EDRST, 200                ! OUTPUTS TO D3PLOT
EDHTIME, 1000
EDENERGY,1,1,1,1 ! ENERGY OUTPUT
EDMP,HGLS,1,3             ! EXACT VOLUME INT. HOURGLASS
EDMP,HGLS,2,3
EDOUT,GLSTAT
EDOUT,MATSUM
EDOUT,RCFORC
EDOPT,ADD,,BOTH
ALLSEL
EDWRITE,TAURUS,RC2000dist5,k,
SAVE,RC2000dist5,db,
/EOF
```

BILAGA 2: Fluid/struktur koppling mellan mark utanför byggnad (EULER) och marken under byggnad (LAGRANGE) i ANSYS/LS-DYNA.

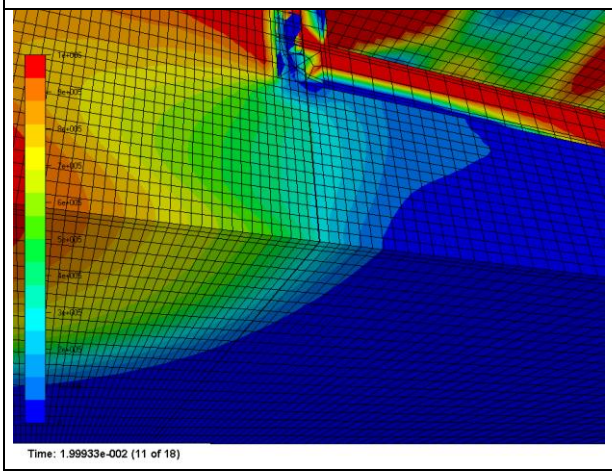
Den fluid/struktur koppling *CONSTRAINED_LAGRANGE_SOLID som tillåter EULER/LAGRANGE meshar att kopplas genom överlappning har visat sig vara dålig om materialen i EULER och LAGRANGE har samma impedans (ro*c), enkla enaxliga töjningssimuleringar påvisar att ofysikaliska reflektioner uppstår i dessa fall. Därför var det viktigt att använda en fluid/struktur koppling som tillåter material som har samma impedans i EULER och LAGRANGE överföra ’lasten' utan ofysikaliska reflektioner vid randen. Den som används åstadkoms helt enkelt med hjälp av att sammanfoga noder mellan EULER och LAGRANGE elementen. Randen av noder i EULER rör sig nu som LAGRANGE vilket överför lasten till marken under utan att ofysikaliska reflektioner vid randen uppstår, figur b2.1-b2.4 redovisas hydrostatiskt tryck vid olika tidpunkter vid randen i marken.



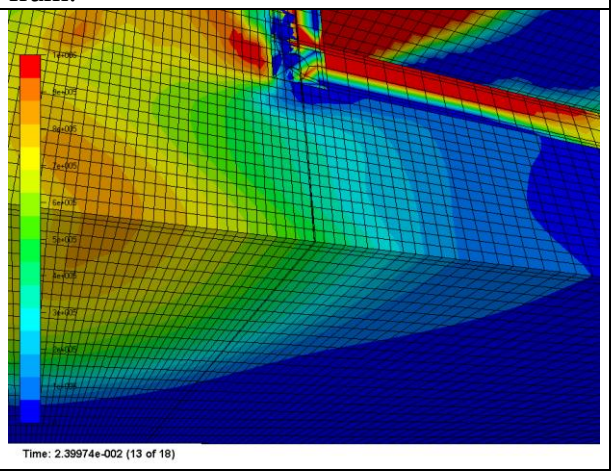
Figur b2.1: Hydrostatiskt tryck vid randen i marken innan spänningsvågen har nått fram.



Figur b2.2: Hydrostatiskt tryck vid randen i marken precis när spänningsvågen har nått fram.



Figur b2.2: Hydrostatiskt tryck vid randen i marken efter spänningsvågen har nått fram.



Figur b2.2: Hydrostatiskt tryck vid randen i marken efter spänningsvågen har nått fram

BILAGA 3: Keywordfilen RC2000dist5.k till LS-DYNA v950

```
*KEYWORD
*TITLE
 RC Sjobo November 2000
$
*DATABASE_FORMAT
         0
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                                CONTROL OPTIONS                               $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*CONTROL_ENERGY
         2         2         2         2
*CONTROL_SHELL
  20.0            1        -1         1         2         2         1
*CONTROL_TIMESTEP
0.0000, 0.8500, 0, 0.0
*CONTROL_TERMINATION
 0.900E-01         0   0.00000   0.00000   0.00000
*CONTROL_ALE
         2         1         4 -1.000000 0.0000000 0.0000000 0.0000000
 0.0000000 0.0000000 0.0000000
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
2.00E-03
*DATABASE_GLSTAT
0.5000E-04
*DATABASE_MATSUM
0.5000E-04
*DATABASE_RCFORC
0.5000E-04
*DATABASE_BINARY_D3THDT
5.0000E-05
*DATABASE_NODOUT
1.0000E-5
*DATABASE_ELOUT
1.0000E-5
*DATABASE_HISTORY_NODE
36854,36860,36866
*DATABASE_HISTORY_SOLID
$$ WALL
29629,29521,29413,29377,29341,29233,29161
*DATABASE_TRHIST
1.0000e-05
*DATABASE_TRACER
0.0, 1, 0.5, 0.0, 1.5
0.0, 1, 1.0, 0.0, 1.5
0.0, 1, 1.5, 0.0, 1.5
0.0, 1, 2.0, 0.0, 1.5
0.0, 1, 2.5, 0.0, 1.5
0.0, 1, 3.0, 0.0, 1.5
0.0, 1, 3.5, 0.0, 1.5
0.0, 1, 4.0, 0.0, 1.5
0.0, 1, 4.5, 0.0, 1.5
0.0, 1, 4.95, 0.0, 1.5
0.0, 1, 4.95, 0.0, 2.5
0.0, 1, 4.95, 0.0, 0.5
0.0, 1, 5.0, 0.0, -1
0.0, 1, 6.0, 0.0, -1
0.0, 1, 7.0, 0.0, -1
$OUTER WALL BASEMENT
0.0, 0, 5.5, 0.0, 0.0
0.0, 0, 5.5, 0.0, 0.3
0.0, 0, 5.5, 0.0, 0.6
0.0, 0, 5.5, 0.0, 0.9
0.0, 0, 5.5, 0.0, 1.2
0.0, 0, 5.5, 0.0, 1.35
0.0, 0, 5.5, 0.0, 1.5
0.0, 0, 5.5, 0.0, 1.8
0.0, 0, 5.5, 0.0, 2.1
0.0, 0, 5.5, 0.0, 2.4
0.0, 0, 5.5, 0.0, 2.7
$FLOOR BASEMENT
0.0, 0, 6.0, 0.0, 0.0
0.0, 0, 6.5, 0.0, 0.0
0.0, 0, 7.0, 0.0, 0.0
0.0, 0, 7.5, 0.0, 0.0
0.0, 0, 8.0, 0.0, 0.0
0.0, 0, 8.5, 0.0, 0.0
0.0, 0, 9.0, 0.0, 0.0
0.0, 0, 9.5, 0.0, 0.0
0.0, 0, 10.0, 0.0, 0.0
$ MIDDLE FLOOR UPPERSIDE
```

```
0.0, 0, 5.5, 0.0, 2.95
0.0, 0, 6.0, 0.0, 2.95
0.0, 0, 6.5, 0.0, 2.95
0.0, 0, 7.0, 0.0, 2.95
0.0, 0, 7.5, 0.0, 2.95
0.0, 0, 8.0, 0.0, 2.95
0.0, 0, 8.5, 0.0, 2.95
0.0, 0, 9.0, 0.0, 2.95
0.0, 0, 9.5, 0.0, 2.95
0.0, 0, 10.0, 0.0, 2.9
*SECTION_SOLID
1, 1
*SECTION_SOLID
2, 11, 3
*SET_PART
1
1, 2, 3
*SET_PART
2
4, 5, 6
*CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID
1, 2
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP_PART
4
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP_PART
5
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP_PART
6
$
$
$$$
```

```
1.13E-3,3.0E-1,4.0E-1,5.0E-1,6.0E-1
0.0,0.85,0.96,0.99,1.00,0.99,0.50,0.10
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
$
$ AIR N SOIL N EXPLOSIVE
$
$ AIR
*MAT_NULL
4, 1.3000000
$ SOIL SJOBO SAND WITH IN SITU DENSITY
*MAT_PSEUDO_TENSOR
5, 1674, 0, 0.28
0.0, 0.0, 0.7917, 2.40E-10, 0.0, 18.08
0,0,0,0,0,0,0,0
$ effective plastic strain effplstrn=2/3*(epsv-epsh)
$ eta scaled according to test kub0529.k
0.0, 5.197E-4, 1.504E-3, 3.524E-3, 9.523E-3, 3.008E-2, 6.014E-2,1.009E-1
1.405E-1, 1.809E-1, 2.202E-1, 2.0, 3.0
0.0, 6.242E-02, 9.566E-02, 0.1391, 0.2302, 0.4493, 0.6257, 0.8078
0.896, 0.96, 0.99, 1.00, 0.9875
$
$ IN SITU DENSITY EOS
*EOS_TABULATED_COMPACTION
5, 0.00, 0.00, 1.00
0.000E+00, -2.149E-02, -1.128E-01, -1.398E-01, -1.799E-01
-2.043E-01, -2.193E-01, -2.490E-01, -3.400E-01, -3.600E-01
0.000E+00, 2.050E+06, 1.498E+07, 1.999E+07, 2.994E+07
3.715E+07, 4.487E+07, 5.998E+07, 5.000E+08, 1.037E+10


2.406E+08, 2.406E+08, 7.085E+08, 7.085E+08, 1.554E+09
1.554E+09, 2.023E+09, 4.516E+09, 1.000E+10, 5.000E+11
*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN
6, 1630.0000, 6930.0000, 2.1000+10
$
*EOS_JWL
         1 3.7380+11 3.74700+9 4.1500001 0.9000000 0.3500000 6.00000+9 1.0000000
$*EOS_JWLB
$EOSID,A1,A2,A3,A4,A5
$1,490.07+11,56.868+11,0.82426+11,0.00093+11,
$R1,R2,R3,R4,R5
$40.713,9.6754,2.4350,0.15564
$AL1,AL2,AL3,AL4,AL5
$0.0,11.468
$BL1,BL2,BL3,BL4,BL5
$1098,-6.5011
$RL1,RL2,RL3,RL4,RL5
$15.614,2.1593
$C,OMEGA,E0,V0
$0.00710+11,0.30270,6.656+9,1
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL
         2 -1.0000+5 0.0000000 0.0000000 0.0000000 0.4000000 0.4000000 0.0000000
 2.50000+5 1.0000000
*HOURGLASS
         1         0  0.00             0  0.00      0.00      0.00      0.00
*HOURGLASS
2,1,0.1,1,1.5,0.06
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                                PARTS DEFINITIONS                             $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
$
*PART
Part          1 for Mat         1 and Elem Type         1
         1         1         1         3         1         0
$
*PART
Part          2 for Mat         2 and Elem Type         1
         2         1         2         3         1         0
$
*PART
Part          3 for Mat         3 and Elem Type         1
         3         1         3         3         1         0
$
*PART
Part          4 for Mat         5 and Elem Type         1
         4         2         5         5         2         0
$
*PART
Part          5 for Mat         6 and Elem Type         1
         5         2         6         1         2         0
$
*PART
Part          6 for Mat         4 and Elem Type         1
         6         2         4         2         2         0
```

```
$
*PART
Part          7 for Mat          7 and Elem Type          1
         7         1         5         5         1         0
*INITIAL_DETONATION
0,0,0,1.5,0
$
$
$
$$$
```

$$V_0 = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 \qquad \text{ekv. b.4.2}$$

Efter deformation är den minskade volymen, V lika med:

$$V = L_1(1-\varepsilon_1) \cdot L_2(1-\varepsilon_2) \cdot L_3(1-\varepsilon_3) \qquad \text{ekv. b.4.3}$$

I LS-DYNA ges verklig volymetrisk töjning vilken kan skrivas som (den naturliga logaritmen av den relativa volymen):

$$\varepsilon_v = LN\left(\frac{V}{V_0}\right) \qquad \text{ekv. b.4.4}$$

Sättes ekv. b.4.2 och b.4.3 in i ekv b.4.4 kan detta förenklas till

$$\varepsilon_v = LN\left(\frac{L_1(1-\varepsilon_1) \cdot L_2(1-\varepsilon_2) \cdot L_3(1-\varepsilon_3)}{L_1 \cdot L_2 \cdot L_3}\right) = LN\left((1-\varepsilon_1) \cdot (1-\varepsilon_2) \cdot (1-\varepsilon_3)\right) \qquad \text{ekv. b.4.5}$$

Vid cylindriskt töjningstillstånd med axielltöjning=ε_A och radiell töjning=ε_R kan ekv. b.4.5 skrivas som

$$\varepsilon_v = LN\left((1-\varepsilon_A) \cdot (1-\varepsilon_R)^2\right) \qquad \text{ekv. b.4.6}$$

Relationen mellan elastiska av- och pålastnings bulkmodulen K_u fås ur

$$K_u = \frac{dP}{d\varepsilon_v} \approx \frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon_v} \qquad \text{ekv b.4.7}$$

Vilket visar att en sekantmodul har tagits fram vi de olika av och pålastningsnivåerna.

Ekvationerna b.4.1, b.4.6 och ekv b.4.7 användes för framtagande av tillståndsekvationen *EOS_TABULATED_COMPACTION för LS-DYNA.

Poisson’s tal, ν

Ett sätt att ta fram poisson’s tal är att ta fram sista elastiska av- och pålastningsmodulen, K_u från den isotropiska konsolideringen. Därefter tas elasticitetsmodulen, E fram ur det avslutande triaxiella skjuvprovet, se även [14].

För att få fram ett poisson’s tal för de spänningsnivåer som kan väntas i närheten av RC vid aktuellt hot används de prover som konsolideras upp till 2 [MPa] innan skjuvprovet utförs.

Den elastiska bulkmodulen, K_u tas fram med hjälp av ekv b.4.7. Elasticietsmodulen tas fram med hjälp av:

$$E = \frac{d(\sigma_A - \sigma_R)}{d\varepsilon_A} \approx \frac{\Delta(\sigma_A - \sigma_R)}{\Delta\varepsilon_A} \qquad \text{ekv b.4.8}$$

Vilket visar att en sekantmodul togs även fram för Elasticitetsmodulen, E. När E, K_u har tagits fram räknas poisson’s tal ut med:

$$E = \frac{K}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \upsilon)} \Leftrightarrow \upsilon = \frac{1 - \frac{K}{3 \cdot E}}{2} \qquad \text{ekv b.4.9}$$

Prov 6 med in situ densitet gav ett poisson’s tal på 0.282.

Ett annat sätt att ta fram poisson’s tal vid denna typ av triaxialförsök där radiell spänning / cell trycket hålls konstant är:

$$\upsilon = \frac{\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_v}{2\Delta\varepsilon_1} = -\frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1} \qquad \text{ekv b.4.10}$$

Se vidare i [26].

Skjuvmodul, G

För att undvika ange en konstant skjuvmodul, G oavsett vilket hydrostatiskt tryck, p materialet upplever kan en variabel skjuvmodul utnyttjas vid användning av materialmodellen *MAT_PSEUDO_TENSOR i LS-DYNA.

Den variabla skjuvmodulen i materialmodellen beräknas från den elastiska av- och pålastningsbulkmodulen, K_i som fås från tillståndsekvationen för det aktuella hydrostatiska trycket, p:

$$G_i = \frac{3K_i \cdot (1 - 2\upsilon)}{2(1 + \upsilon)} \qquad \text{ekv. b.4.11}$$

Detta diskuteras även för materialmodell *MAT_CONCRETE_DAMAGE, se [17]-[19].

Flytgränsytor och plasticitet

Definitioner
För isotropiska material kan principalspänningarna delas upp i en del som ger volymförändringar (p) och en annan som ger formändringar (S):

$$\sigma_i = -p + S_i \qquad \text{i=1,2,3} \qquad \text{ekv. b.4.12}$$

Där p är medelspänningen och S är deviatorspänningar.

För att kunna ta fram materialdata som flytgränsytor som anges med hjälp av spänningsdifferensen $(3J_2)^{1/2}$ som funktion av medelspänningen behöver vi först definiera dessa för materialprovningens cylindriska (axisymmetriska, $\sigma_2=\sigma_3$ och $\varepsilon_2=\varepsilon_3$) spänningsfall:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_A + 2\sigma_R}{3} \qquad \text{ekv. b.4.13}$$

Spänningsdeviatorns andra invariant J_2 definieras som:

$$J_2 = \frac{1}{6}\left((\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right) = \frac{2}{6}\cdot(\sigma_A - \sigma_R)^2 \qquad \text{ekv. b.4.14}$$

Spänningsdifferensen blir då:

$$\sqrt{3J_2} = \sigma_A - \sigma_R \qquad \text{ekv. b.4.15}$$

Av ekvation b.4.15 inses lätt att inga deviatorspänningar uppstår när axiell spänning är lika med radiell spänning, $\sigma_A=\sigma_R$.

Dessutom kan volymetrisk töjning definieras som:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_A + 2\cdot\varepsilon_R \qquad \text{ekv. b.4.16}$$

Deviatorisk töjning definieras:

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_A - \varepsilon_R) \qquad \text{ekv. b.4.17}$$

Se vidare i [14].

En kort diskussion kring effektiv plastisk töjning i LS-DYNA defineras som:

$$\varepsilon_{eff}^{pl} = \int_0^t \left(\frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_{ij}^{p}\,\dot{\varepsilon}_{ij}^{p}\right)^{1/2} dt \qquad \text{ekv. b.4.18}$$

Den plastiska töjningshastigheten är skillnaden mellan den totala och elastiska töjningshastigheten:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} \qquad \text{ekv. b.4.19}$$

När vi studerar hela brott fenomenet hos sandproverna kommer det elastiska bidraget vara försumbart litet, därför försummas den elastiska töjningshastigheten vid en första approximation:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} \approx \dot{\varepsilon}_{ij} \qquad \text{ekv. b.4.20}$$

Om vi nu studerar den inkrementiella ökningen av plastisk töjning:

$$\Delta\varepsilon_{eff}^{pl} = \left(\frac{2}{3}\Delta\varepsilon_{ij}^{p}\Delta\varepsilon_{ij}^{p}\right)^{1/2} \qquad \text{ekv. b.4.21}$$

Vid ett cylindriskt töjningsfall blir töjningstensorn:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} \qquad \text{ekv. b.4.22}$$

Om matrismultiplikation utförs på ekv. b.4.21 med matris ekv. b4.22 fås:

$$\Delta\varepsilon_{eff}^{pl} = \left(\frac{2}{3}\Delta\varepsilon_{ij}^{p}\Delta\varepsilon_{ij}^{p}\right)^{1/2} = \left\{tr(\varepsilon)^2\right\} = \sqrt{\frac{2}{3}\cdot\left(\varepsilon_{11}^2+\varepsilon_{22}^2+\varepsilon_{33}^2\right)} = \sqrt{\frac{2}{3}\cdot\left(\varepsilon_{11}^2+2\cdot\varepsilon_{22}^2\right)} \qquad \text{ekv. b.4.23}$$

Töjningstensorn ε_{ij} kan såsom spänningstensorn kan beskrivas av två tensorer en som kan kallas deviator töjningstensorn, E_{ij} och en volymetrisk töjningstensor, ε_{ij}:

$$\varepsilon_{ij} = E_{ij} + \frac{1}{3}\varepsilon_{kk}\cdot\delta_{ij}$$

Då δ_{ij} är lika med 0 vid i≠j samt 1 vid i=j får volymetriska töjningstensorn bara bidrag från diagonalen från töjningsmatrisen.

I det cylindriska töjningstillståndet blir det volymetriska töjningsbidraget:

$$\frac{1}{3}\varepsilon_{kk}\cdot\delta_{ij} = -\frac{1}{3}\left(\varepsilon_v\right) = -\frac{1}{3}\cdot\left(\varepsilon_A+2\cdot\varepsilon_R\right) \qquad \text{ekv. b.4.24}$$

Om nu töjningstensorn i ekv. b.4.23 beskrivs med hjälp av två tensorer fås:

$$\Delta\varepsilon_{eff}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3}\cdot\left(\varepsilon_{11}^2+2\cdot\varepsilon_{22}^2\right)} = \sqrt{\frac{2}{3}\cdot\left(\left(\varepsilon_A-\frac{\varepsilon_A+2\cdot\varepsilon_R}{3}\right)^2+2\cdot\left(\varepsilon_R-\frac{\varepsilon_A+2\cdot\varepsilon_R}{3}\right)^2\right)}$$

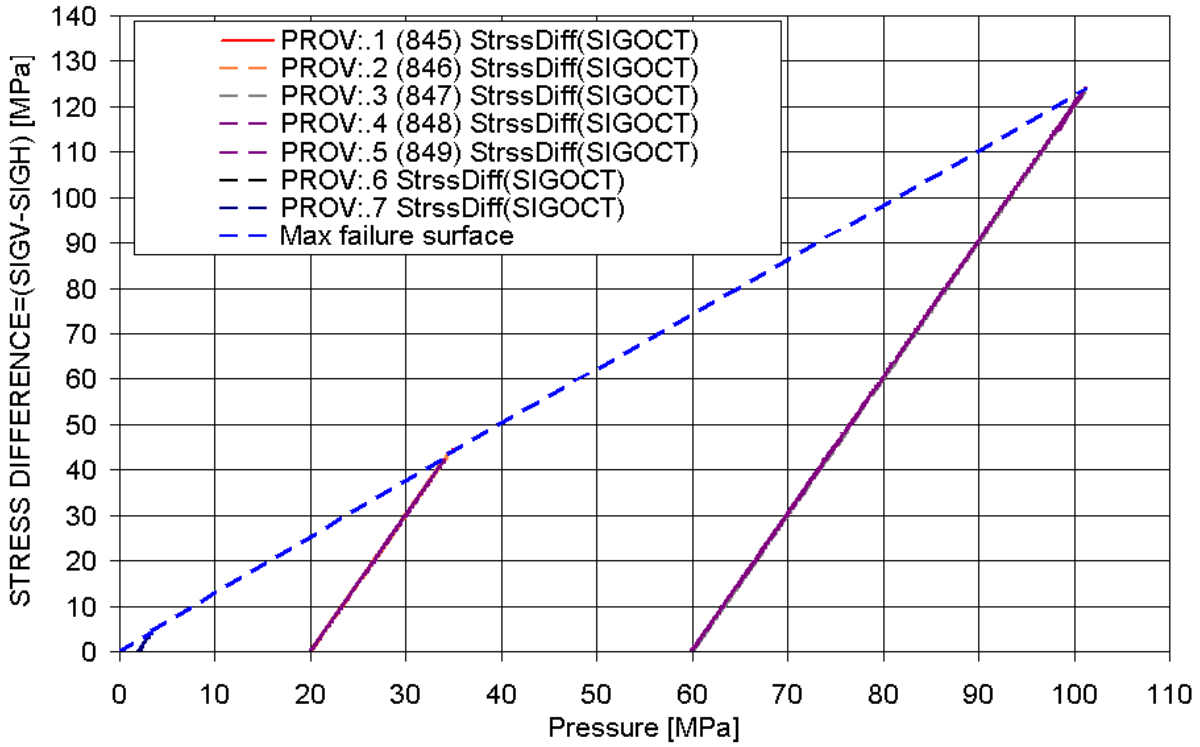
som kan förenklas till

$$\Delta\varepsilon_{eff}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3}\cdot\left(\frac{4}{9}\left(\varepsilon_A-\varepsilon_R\right)^2+\frac{2}{9}\left(\varepsilon_A-\varepsilon_R\right)^2\right)} = \frac{2}{3}\left(\varepsilon_A-\varepsilon_R\right) \qquad \text{ekv. b.4.25}$$

Den effektiva plastiska töjningen kan som god approximation beskrivas med deviatorisk töjning se ekv. b.4.17 och ekv. b.4.25.

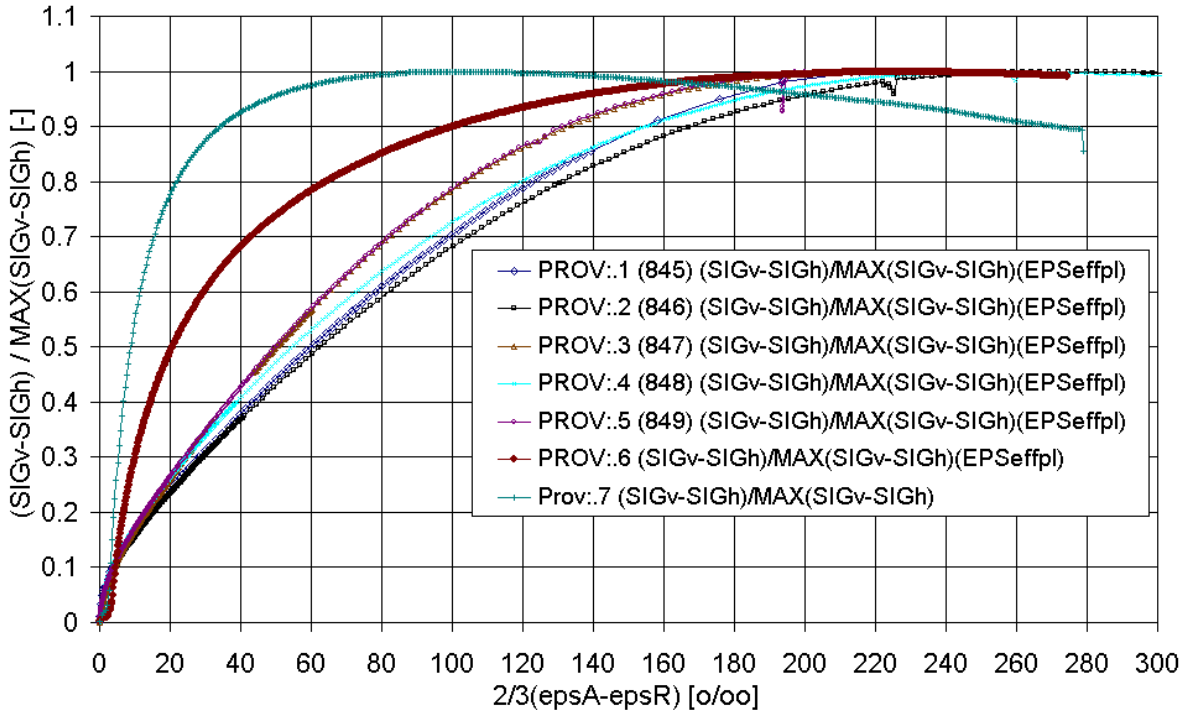
Flytgränsytor

Maximal flytgränsyta kan enkelt tas fram från den triaxiella provningen, nedan i figur b.4.1 ses spänningsdifferensen som funktion av hydrostatiskt tryck för de olika provningsserierna:



Figur b.4.1 Spänningsdifferens som funktion av hydrostatiskt tryck. Den streckade blåa linjen visar maximal flytgränsyta.

Om karakteristisk spänningsdifferens (dvs aktuell spänningsdifferens divideras med maximal spänningsdifferens) studeras som funktion av deviator töjning så kan en elastisk flytgränsyta urskiljas, se figur b.4.2. Denna är bara några procent av maximal flytgränsyta. Vad som också kan ses är att procentuellt är den elastiska flytgränsytan högre för lägre spänningsnivåer.



Figur b.4.2 Karakteristisk spänningsdifferens som funktion av deviator töjning.

I materialmodellen *MAT_PSEUDO_TENSOR finns möjligheten att ge en initiell flytgränsyta som funktion av hydrostatiskt tryck, samt en maximal flytgränsyta:

$$\sigma_{failed} = a_{0f} + \frac{p}{a_{1f} + a_2 \cdot p} \qquad \text{(initiell flytyta)} \qquad \text{ekv. b.4.26}$$

$$\sigma_{\max} = a_{0m} + \frac{p}{a_{1m} + a_2 \cdot p} \qquad \text{(maximal flytyta)} \qquad \text{ekv. b.4.27}$$

Dessutom är det möjligt att beskriva hur en aktuell flygränsyta varierar efter att initiell flytgränsyta har uppnåtts. En skaleringsparameter η kan ges i tabellerad form som funktion av effektiv plastisk töjning, se ekv. b.4.28.

$$\sigma_{aktuell} = \eta\left(\sigma_{\max} - \sigma_{failed}\right) + \sigma_{failed} \qquad \text{ekv. b.4.28}$$

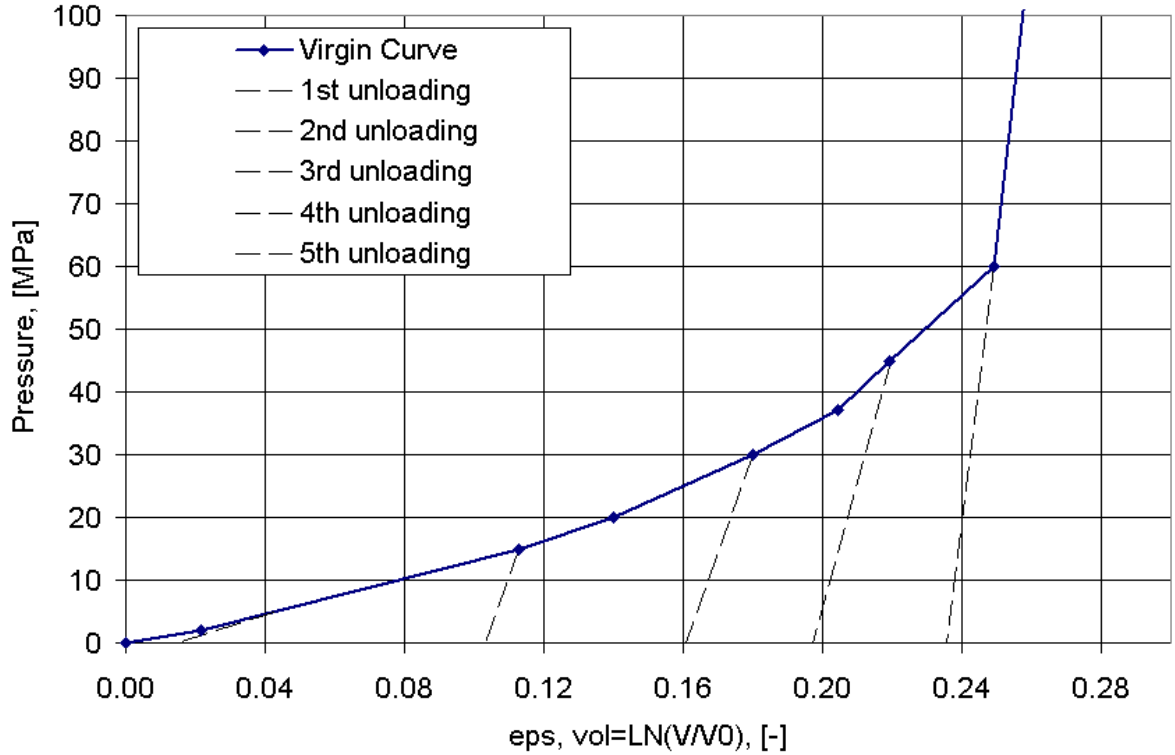
Om man studerar figur b.4.2 så har alla prover utom ett brott när töjningen överstiger 20 %. Prov nr 7 är den som avviker, den hade hög densitet och konsoliderades endast till ett hydrostatiskt tryck på 2 [MPa]. För denna spänningsnivå är initiell densitet av stor betydelse. När en generell skaleringsparamter togs fram valdes ett prov som ansågs kunna beskriva den plastiska hårdnandet mer generellt för ett flertal prov. I detta fall valdes prov 4, 848.

BILAGA 5: 1-Element test av framtagna materialparametrar för Sjöbo sand.

Simulering av den stegvisa isotropiska konsolideringen

Prov 848 och 849 användes för framtagande av tillståndsekvationen (”EOS”) för Sjöbo sanden med hög densitet. Cylinderproven, med dimensionerna H=90 [mm] och D=38 [mm] konsolideras stegvis isotropiskt $p=\sigma_A=\sigma_R$. Cylinderproverna av- och pålastas för att få fram den elastiska av- och pålastningsbulkmodulen vid olika nivåer av kompression.

Prov 845 och 847 användes för framtagande av EOS för Sjöbo sand med in situ densitet.



Figur b.4.3 Framtagen EOS för Sjöbo sand med in situ densitet. P(ε_v) redovisas för ’virgin curve’ samt de elastiska av- och pålastningskurvorna.

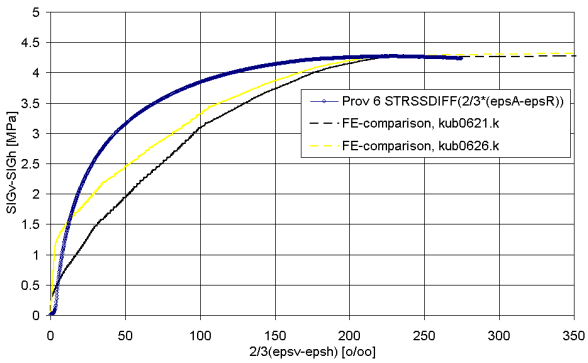
Verifiering av inmatade indata utfördes med hjälp av 1-element test på prov 847 (hög densitet) och 848 (in situ). 1-element testet utfördes på ett 8-nods element med 1-integrationspunkt. Tvärsnittsytan korrigerades för att motsvara cylinderprovets tvärsnittsyta. Elementet belastades isotropiskt i tre riktningar ,x, y, och z. Riktningen z-motsvarar axiell riktning och x, och y motsvarar radiell riktning.

Figur 4.3.5 och 4.3.6 i kapitel 4.3 redovisar resultat och jämförelse med experiment för dessa simuleringar.

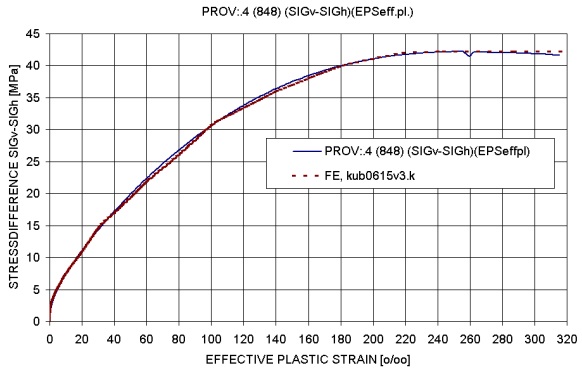
Simulering av de triaxiella skjuvproven

Efter att proverna har konsoliderats isotropiskt utfördes ett triaxiellt skjuvprov, där radiell spänning / celltryck hölls konstant samtidigt som axiell spänning ökades. Detta utfördes för olika nivåer av medelspänningar, p.

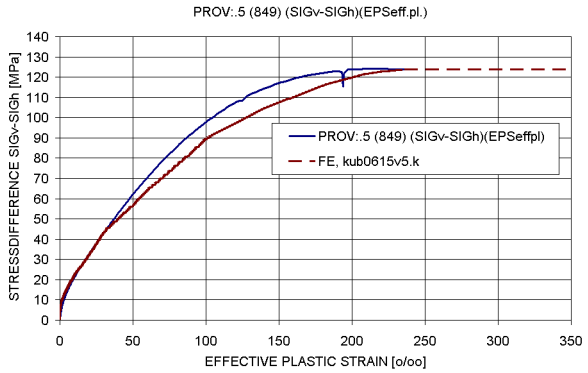
1-element testet utfördes på ett 8-nods element med 1-integrationspunkt. Tvärsnittsytan korrigerades för att motsvara cylinderprovets tvärsnittsyta. Elementet belastades först isotropiskt i tre riktningar, x, y, och z. Till och med den bestämda medelspänningsnivån, p=2, 20 samt 60 [MPa]. Därefter ökades spänningen i z-riktningen vilket motsvarar axiell riktning och i x-, och y-riktningen hölls spänningarna konstanta vilket motsvarar radiell riktning.



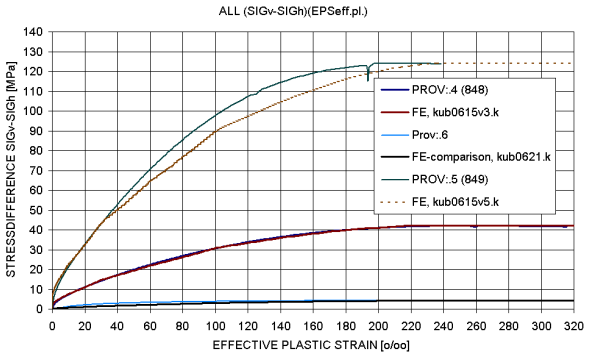
Figur b.4.4a Spänningsdifferens som funktion av deviatortöjning 2/3*(ε_A-ε_R) för prov 6 med p_0 = 2 MPa samt jämförelse med 1-element simuleringar.



Figur b.4.4b Spänningsdifferens som funktion av effektiv plastisk töjning för prov 848 med p_0 = 20 MPa samt jämförelse med 1-element simuleringar.



Figur b.4.4c Spänningsdifferens som funktion av effektiv plastisk töjning för prov 849 med p_0 = 60 MPa samt jämförelse med 1-element simuleringar.



Figur b.4.4d Sammanställning av de triaxiella skjuvproven med p_0=2, 20 , och 60 [MPa] och simuleringarna samt jämförelse med 1-element simuleringar.

Nedan visas en sammanställd LS-DYNA keyword fil: kub3010ny.k för de 1-element tester som har blivit utfört:

```
*KEYWORD
*TITLE
 Cube test Sjobo Sand
$
*DATABASE_FORMAT
         0
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                                NODE DEFINITIONS                               $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*NODE
       1 0.000000000E+00 3.370000000E-02 0.000000000E+00       0       0
       2 0.000000000E+00 0.000000000E+00 0.000000000E+00       0       0
       3 3.370000000E-02 3.370000000E-02 0.000000000E+00       0       0
       4 3.370000000E-02 0.000000000E+00 0.000000000E+00       0       0
       5 0.000000000E+00 0.000000000E+00 8.980000000E-02       0       0
       6 3.370000000E-02 0.000000000E+00 8.980000000E-02       0       0
       7 3.370000000E-02 3.370000000E-02 8.980000000E-02       0       0
       8 0.000000000E+00 3.370000000E-02 8.980000000E-02       0       0
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                             SECTION DEFINITIONS                               $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*SECTION_SOLID
         1         1
$
```

```
$
$$$
```

```
         1         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  0.100000000000E+00  5.000000000000E+06
  0.200000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.400000000000E+00  1.000000000000E+07
  0.600000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.900000000000E+00  1.500000000000E+07
  1.200000000000E+00  0.800000000000E+06
  1.600000000000E+00  2.000000000000E+07
  1.800000000000E+00  9.000000000000E+06
$*LOAD_SEGMENT
$         1     1.000     0.000         5         6         7         8
*DEFINE_CURVE
         2         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  0.100000000000E+00  5.000000000000E+06
  0.200000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.400000000000E+00  1.000000000000E+07
  0.600000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.900000000000E+00  1.500000000000E+07
  1.200000000000E+00  0.800000000000E+06
  1.600000000000E+00  2.000000000000E+07
  1.800000000000E+00  9.000000000000E+06
$*LOAD_SEGMENT
$         2     1.000     0.000         4         3         7         6
*DEFINE_CURVE
         3         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  0.100000000000E+00  5.000000000000E+06
  0.200000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.400000000000E+00  1.000000000000E+07
  0.600000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.900000000000E+00  1.500000000000E+07
  1.200000000000E+00  0.800000000000E+06
  1.600000000000E+00  2.000000000000E+07
  1.800000000000E+00  9.000000000000E+06
$*LOAD_SEGMENT
$         3     1.000     0.000         3         1         8         7
$
$        LOAD CURVE (4) - (6) is used to simulate test 847 isotropic
$
*DEFINE_CURVE
         4         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  0.100000000000E+00  1.500000000000E+07
  0.200000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.400000000000E+00  3.000000000000E+07
  0.600000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.900000000000E+00  4.500000000000E+07
  1.200000000000E+00  2.926000000000E+06
  1.600000000000E+00  6.000000000000E+07
  1.800000000000E+00  2.696000000000E+07
  2.000000000000E+00  6.000000000000E+07
*LOAD_SEGMENT
         4     1.000     0.000         5         6         7         8
*DEFINE_CURVE
         5         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  0.100000000000E+00  1.500000000000E+07
  0.200000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.400000000000E+00  3.000000000000E+07
  0.600000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.900000000000E+00  4.500000000000E+07
  1.200000000000E+00  2.926000000000E+06
  1.600000000000E+00  6.000000000000E+07
  1.800000000000E+00  2.696000000000E+07
  2.000000000000E+00  6.000000000000E+07
*LOAD_SEGMENT
         5     1.000     0.000         4         3         7         6
*DEFINE_CURVE
         6         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  0.100000000000E+00  1.500000000000E+07
  0.200000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.400000000000E+00  3.000000000000E+07
  0.600000000000E+00  1.000000000000E+05
  0.900000000000E+00  4.500000000000E+07
  1.200000000000E+00  2.926000000000E+06
  1.600000000000E+00  6.000000000000E+07
  1.800000000000E+00  2.696000000000E+07
  2.000000000000E+00  6.000000000000E+07
*LOAD_SEGMENT
         6     1.000     0.000         3         1         8         7
$
$        LOAD CURVE (101) - (103) is used to simulate test 848 shear
$
*DEFINE_CURVE
```

```
       101         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  2.000000000000E+00  2.000000000000E+07
  2.500000000000E+00  6.220000000000E+07
  3.000000000000E+00  6.230000000000E+07
$*LOAD_SEGMENT
$       101     1.000     0.000         5         6         7         8
*DEFINE_CURVE
       102         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  2.000000000000E+00  2.000000000000E+07
  2.500000000000E+00  2.000000000000E+07
  3.000000000000E+00  2.000000000000E+07
$*LOAD_SEGMENT
$       102     1.000     0.000         4         3         7         6
*DEFINE_CURVE
       103         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  2.000000000000E+00  2.000000000000E+07
  2.500000000000E+00  2.000000000000E+07
  3.000000000000E+00  2.000000000000E+07
$*LOAD_SEGMENT
$       103     1.000     0.000         3         1         8         7
$
$        LOAD CURVE (201) - (203) is used to simulate test 849 shear
$
*DEFINE_CURVE
       201         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  2.000000000000E+00  5.987000000000E+07
  2.500000000000E+00  1.840000000000E+08
  3.000000000000E+00  1.840000000000E+08
$*LOAD_SEGMENT
$       201     1.000     0.000         5         6         7         8
*DEFINE_CURVE
       202         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  2.000000000000E+00  5.987000000000E+07
  2.500000000000E+00  5.987000000000E+07
  3.000000000000E+00  5.987000000000E+07
$*LOAD_SEGMENT
$       202     1.000     0.000         4         3         7         6
*DEFINE_CURVE
       203         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  2.000000000000E+00  5.987000000000E+07
  2.500000000000E+00  5.987000000000E+07
  3.000000000000E+00  5.987000000000E+07
$*LOAD_SEGMENT
$       203     1.000     0.000         3         1         8         7
$
$        LOAD CURVE (301) - (303) is used to simulate test 6 shear
$
*DEFINE_CURVE
       301         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  2.000000000000E+00  1.990000000000E+06
  2.500000000000E+00  6.262000000000E+06
  3.000000000000E+00  6.262000000000E+06
$*LOAD_SEGMENT
$       301     1.000     0.000         5         6         7         8
*DEFINE_CURVE
       302         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  2.000000000000E+00  1.990000000000E+06
  2.500000000000E+00  1.990000000000E+06
  3.000000000000E+00  1.990000000000E+06
$*LOAD_SEGMENT
$       302     1.000     0.000         4         3         7         6
*DEFINE_CURVE
       303         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  2.000000000000E+00  1.990000000000E+06
  2.500000000000E+00  1.990000000000E+06
  3.000000000000E+00  1.990000000000E+06
$*LOAD_SEGMENT
$       303     1.000     0.000         3         1         8         7
$
$$$
```

```
$
*SET_NODE_LIST
         1     0.000     0.000     0.000     0.000
         1
*BOUNDARY_SPC_SET
         1         0         1         0         1         0         0         0
*SET_NODE_LIST
         2     0.000     0.000     0.000     0.000
         2
*BOUNDARY_SPC_SET
         2         0         1         1         1         0         0         0
*SET_NODE_LIST
         3     0.000     0.000     0.000     0.000
         3
*BOUNDARY_SPC_SET
         3         0         0         0         1         0         0         0
*SET_NODE_LIST
         4     0.000     0.000     0.000     0.000
         4
*BOUNDARY_SPC_SET
         4         0         0         1         1         0         0         0
*SET_NODE_LIST
         5     0.000     0.000     0.000     0.000
         5
*BOUNDARY_SPC_SET
         5         0         1         1         0         0         0         0
*SET_NODE_LIST
         6     0.000     0.000     0.000     0.000
         6
*BOUNDARY_SPC_SET
         6         0         0         1         0         0         0         0
*SET_NODE_LIST
         7     0.000     0.000     0.000     0.000
         8
*BOUNDARY_SPC_SET
         7         0         1         0         0         0         0         0
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                                TIME HISTORY                                   $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*DATABASE_GLSTAT
0.3000E-02
*DATABASE_MATSUM
0.3000E-02
*DATABASE_RCFORC
0.3000E-02
*DATABASE_HISTORY_NODE
         2
*DATABASE_BINARY_D3THDT
0.3000E-02
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                               CONTACT DEFINITIONS                             $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                        SINGLE SURFACE CONTACT DEFINITIONS                     $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                         INITIAL VELOCITY DEFINITIONS                          $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                               CONTROL OPTIONS                                 $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*CONTROL_ENERGY
         2         2         2         2
*CONTROL_SHELL
  20.0             1        -1         1         2         2         1
*CONTROL_TIMESTEP
    0.0000    0.9000         0  0.00      0.00
*CONTROL_TERMINATION
2.0,             0   0.00000   0.00000   0.00000
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                               DATABASE OPTIONS                                $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
0.1000E-01
```

```
*END
```

BILAGA 6: Framtagning av materialparametrar för LECA, EPS, samt sand för AUTODYN.

Tillståndsekvationen (”EOS”) för LS-DYNA

Den togs fram från passiva triaxial prov, där cylinderprovets radiella töjning ε_R=0, se [12]-[13]. Medelspänningen, p antogs vara lika med axiell spänning σ_A. Detta antagande är inte extremt krititskt för så porösa material som LECA. Antagandet är bara en rimlig approximation så länge deviatorspänningarna, S är små jämfört med medelspänningen, p.

$$p \approx \sigma_A \qquad \text{ekv. b.6.1}$$

Den logaritmiska volymetriska töjningen vid passiva triaxialförsök blir om ε_R=0 insättes i ekv. b.4.6:

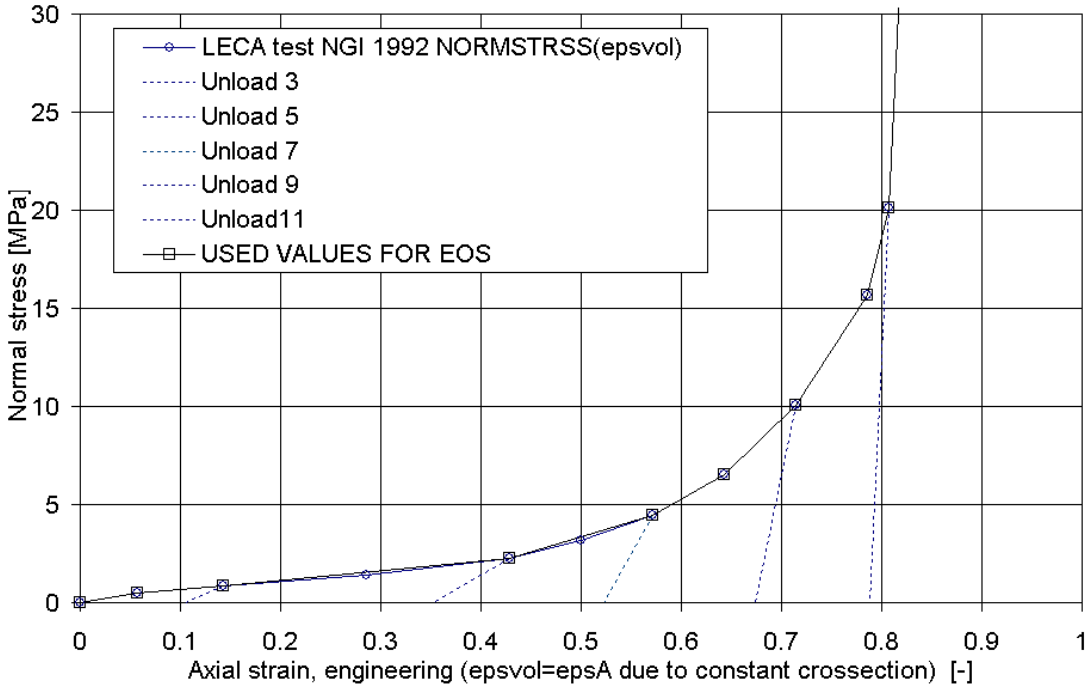
$$\varepsilon_v = LN\left((1-\varepsilon_A)\cdot(1-\varepsilon_R)^2\right) = LN(1-\varepsilon_A) \qquad \text{ekv. b.6.2}$$

Den elastiska av- och pålastningsbulkmodulen K_u är okänd för alla spänningsnivåer utom den sista vid 20 [MPa], vilket bidrar till stor osäkerhet hur avlastningen ser ut mellan 0 och 20 [MPa], därför antogs ett förhållande mellan ”virgin curve” och den elastiska av- och pålastningsbulkmodulen K_u:

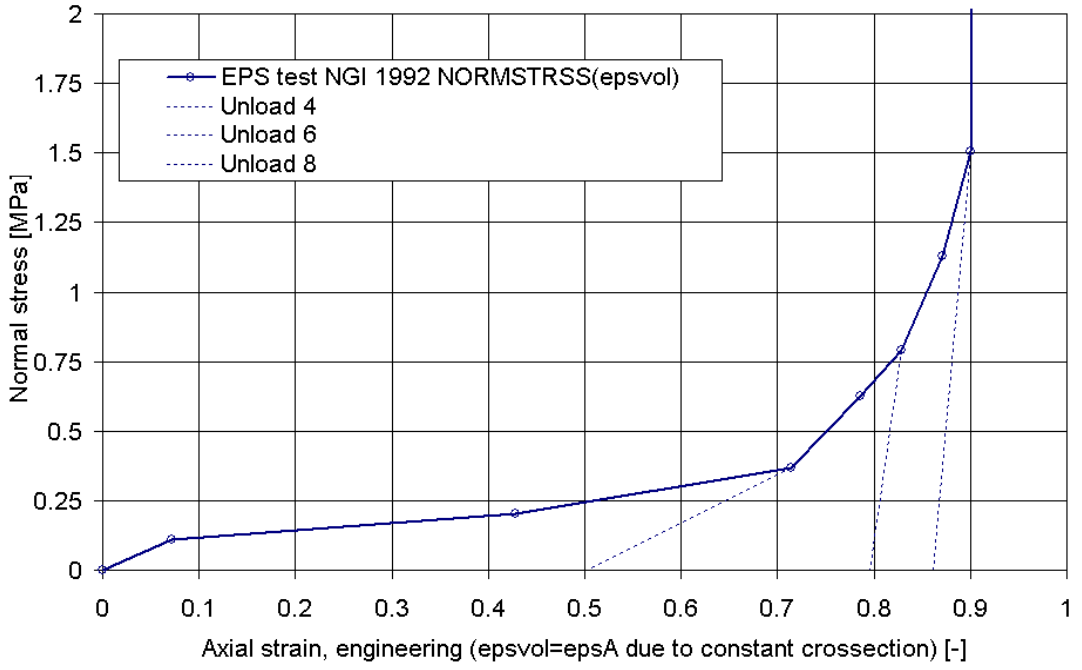
$$K_u \approx X \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon_v}\right)_{Virgin_curve} \qquad \text{ekv. b.6.3}$$

Där X sattes lika med 5.

Nedan i figur b.6.1 och b.6.2 visas normalspänningen, σ_A som funktion av axialtöjningen, ε_A för LECA och EPS.



Figur b.6.1 Normalspänning som funktion av axiell töjning (engineering) för LECA. ”Virgin Curve” och sista avlastningsbulkmodulen, K_u togs fram från [12].



Figur b.6.2 Normalspänning som funktion av axiell töjning (engineering) för EPS. ”Virgin Curve” och sista avlastningsbulkmodulen, K_u togs fram från [12].

Ekvationerna b.6.1-b.6.3. användes för framtagande av tillståndsekvation *EOS_TABULATED_COMPACTION i LS-DYNA för EPS och LECA.

Tillståndsekvationen (”EOS”) för AUTODYN

Tillståndsekvationen POROUS i AUTODYN anges medelspänningen, p som funktion av densiteten, densiteten beräknades med insikten att massan är konstant för provet:

$$\rho_0 \cdot V_0 = \rho \cdot V \qquad \text{ekv. b.6.4}$$

där relativa volymen för ett passivt triaxiellt prov kan beskrivas med axialtöjningen:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{A_0 \cdot L_0 \cdot (1-\varepsilon_A)}{A_0 \cdot L_0} = \frac{(1-\varepsilon_A)}{1} \qquad \text{ekv. b.6.5}$$

Detta ger slutligen att densiteten kan beskrivas som en funktion av axiell töjning:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1-\varepsilon_A} \qquad \text{ekv. b.6.6.}$$

Förutom detta ges även porös ljudvågshastighet, $C_{porös}$ och solid ljudvågshastighet, C_{solid} hos materialet, dessa kan beräknas fram ur:

$$C = \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta \rho}} \qquad \text{ekv. b.6.7.}$$

Ekvationerna b.6.1 och b.6.6-b.6.7. användes för att ta fram tillståndsekvationen POROUS för LECA.

För Sjöbo sanden utfördes aktiva triaxialförsök på cylinderproven, där axiell spänning, σ_A och radiell spänning, σ_R påfördes, medelspänningen, p beräknades med hjälp av ekv. b.4.1 (se bilaga 4). Däremot räknades densiteten ut med hänsyn till axiell och radiell töjning:

Relativa volymförändringen för cylinder proven blir (se ekv. b.4.2 och b.4.3):

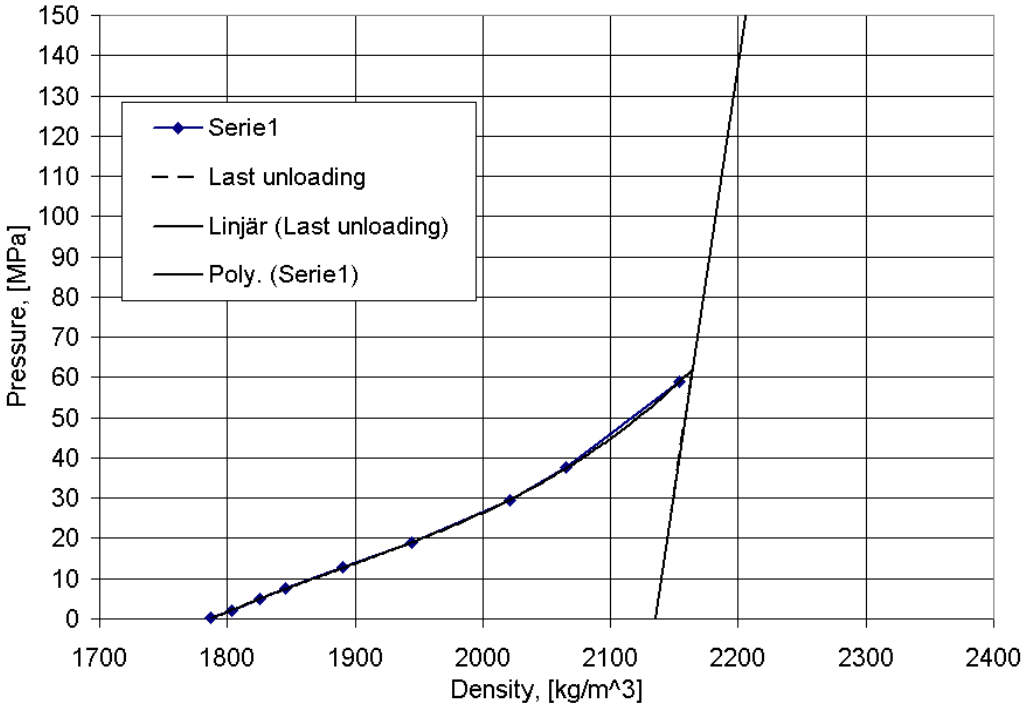
$$\frac{V}{V_0} = \frac{(1-\varepsilon_1)\cdot(1-\varepsilon_2)\cdot(1-\varepsilon_3)}{1} = \frac{(1-\varepsilon_A)\cdot(1-\varepsilon_R)^2}{1} \qquad \text{ekv. b.6.8.}$$

Densiteten som funktion av axiell och radiell töjning blir då:

$$\rho = \frac{\rho_0}{(1-\varepsilon_A)\cdot(1-\varepsilon_R)^2} \qquad \text{ekv. b.6.9}$$

Ekvationerna b.4.1, b.6.7, och b.6.9 användes för att ta fram tillståndsekvationen POROUS för Sjöbo sand

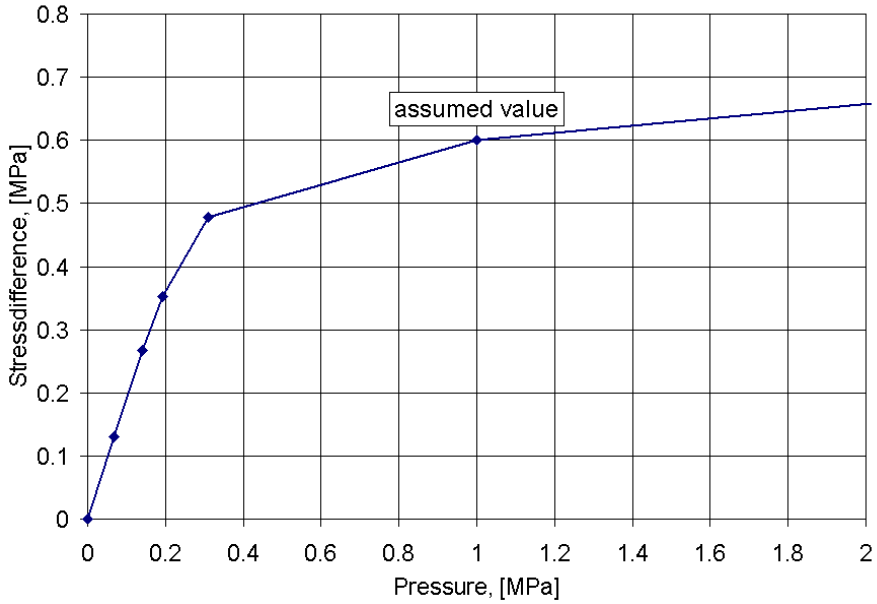
I figur b.6.3 redovisas medelspänningen, p som funktion av densiteten för Sjöbo sand med hög initiell densitet.



Figur b.6.3 Medelspänningen som funktion av densiteten för Sjöbo sand med hög initiell densitet.

Materialmodell Mohr-Coloumb i AUTODYN

Aktiva triaxiella skjuvförsök på cylindrar har utförts för låga spänningar för LECA 0-32 [mm], se [22]. Framtagen maximal flytgränsyta för LECA 0-32 [mm] redovisas i figur b.6.4. För sanden redovisas maximal flytgränsyta i figur b.4.1, se vidare bilaga 4.



Figur b.6.4 Spänningsdifferens som funktion av medelspänning för LECA 0-32 [mm]

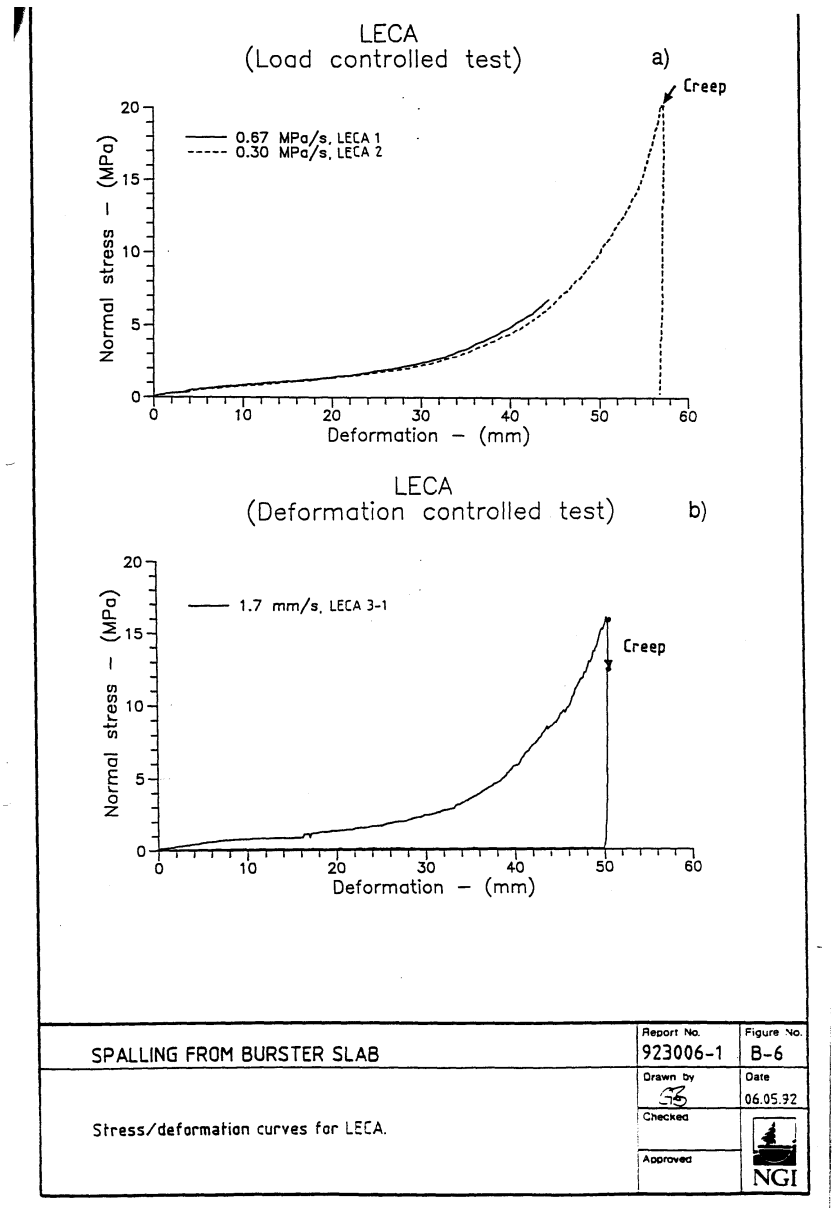
I AUTODYN måste en konstant skjuvmodul, G anges för materialmodell MOHR-COLOUMB vilket är en stor svaghet. För det är ett känt faktum att skjuvmodulen, G är både tryck och densitetsberoende, så någon utförligare diskussion utförs inte för denna

materialmodell, däremot kommer författaren att återkomma till diskussionen när den nyutvecklade materialmodellen GRANULAR i AUTODYN studeras närmare, vilket tillåter att beskriva skjuvmodulen, G som funktion av densiteten.

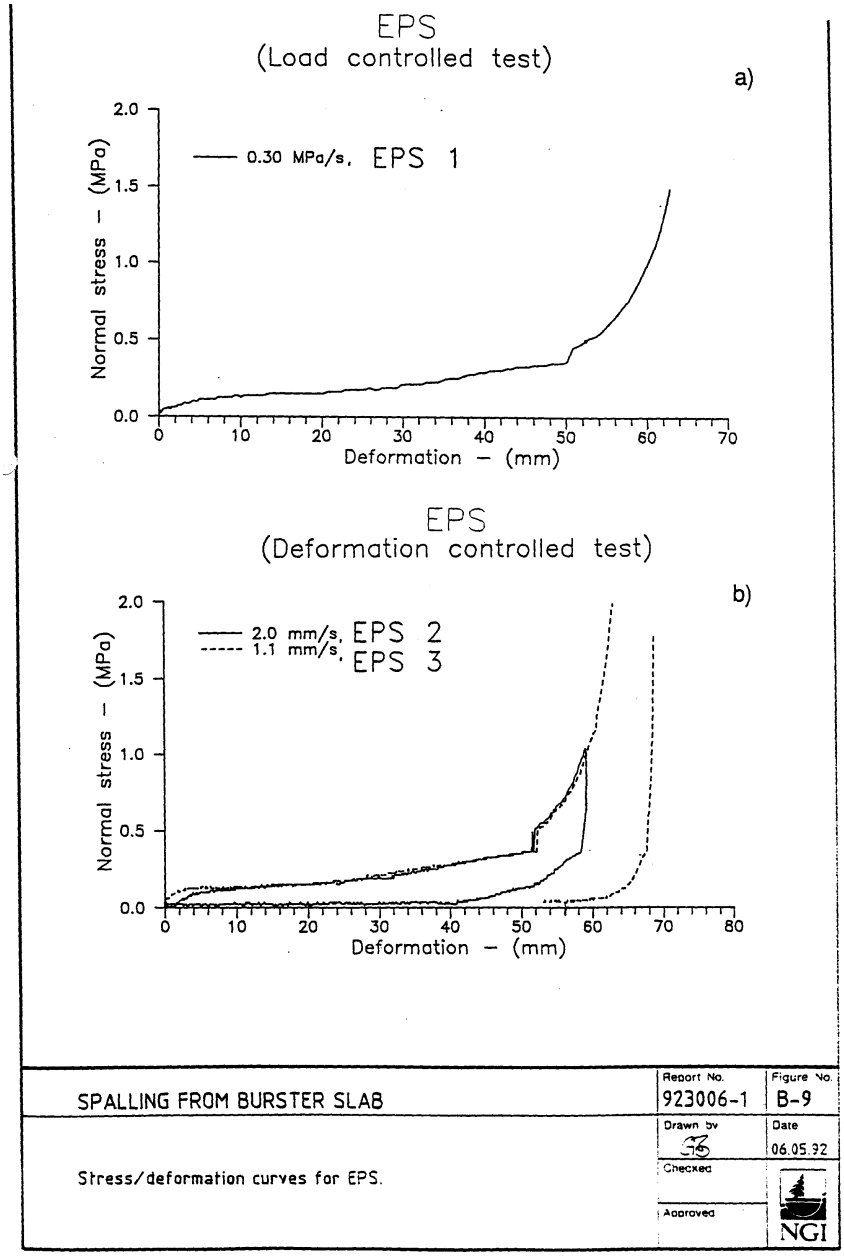
BILAGA 7: 1-Element test av framtagna materialparametrar för LECA och EPS.

1-element test av de passiva triaxialförsöken för LECA och EPS för LS-DYNA

Passiva triaxiella försök (ε_R=0) från [12] användes för framtagande av tillståndsekvationen för LECA och EPS, se figur b.7.1 och b.7.2. Cylinderproven har dimensionen H=70 [mm] och D=100 [mm].

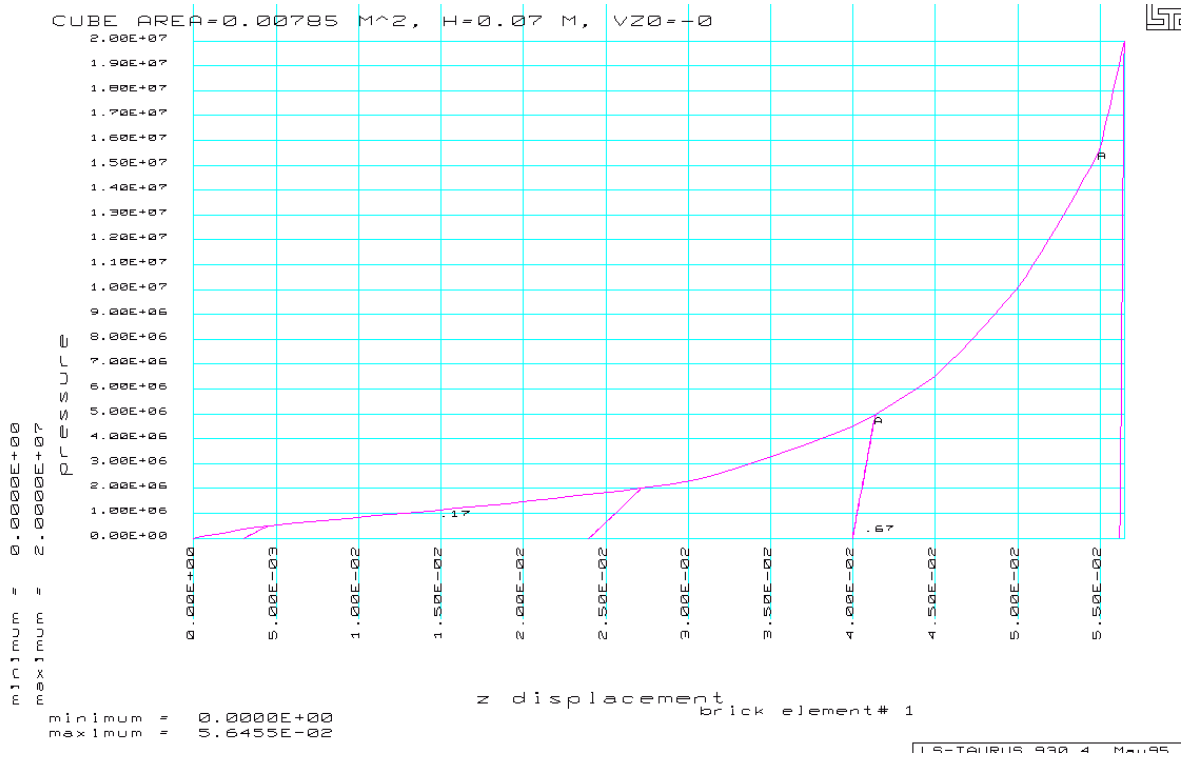


Figur b.7.1 Passiva triaxiella prover på LECA, normalspännning som funktion av deformation. Ur källa [12]

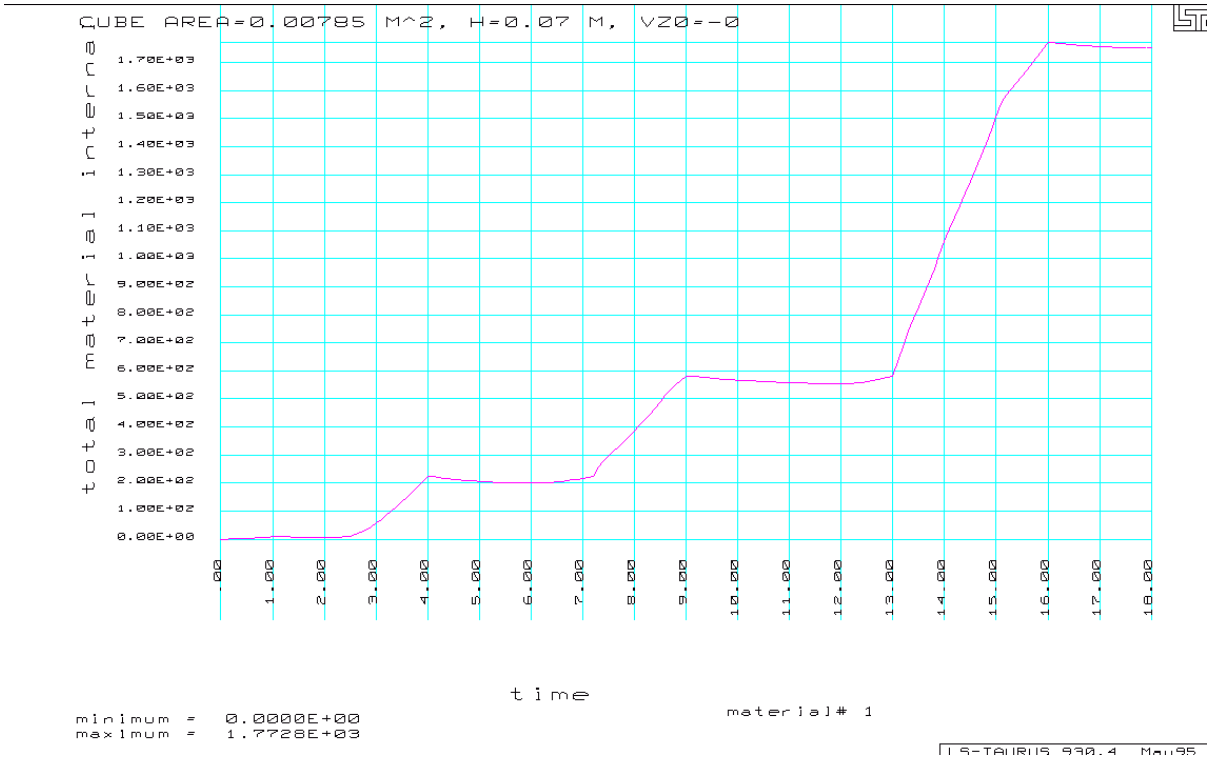


Figur b.7.2 Passiva triaxiella prover på EPS, normalspänning som funktion av deformation. Ur källa [12].

1-element testet utfördes på 8-noders Lagrange element med 1-integrationspunkt. Höjden hos elementet är 70 [mm]. Arean hos elementet är samma som vid provningen. Alla noder har låsts horisontellt vilket ger (ε_R=0). Resultat från LS-DYNA testet redovisas i figur b.7.3-b.7.4 för LECA.

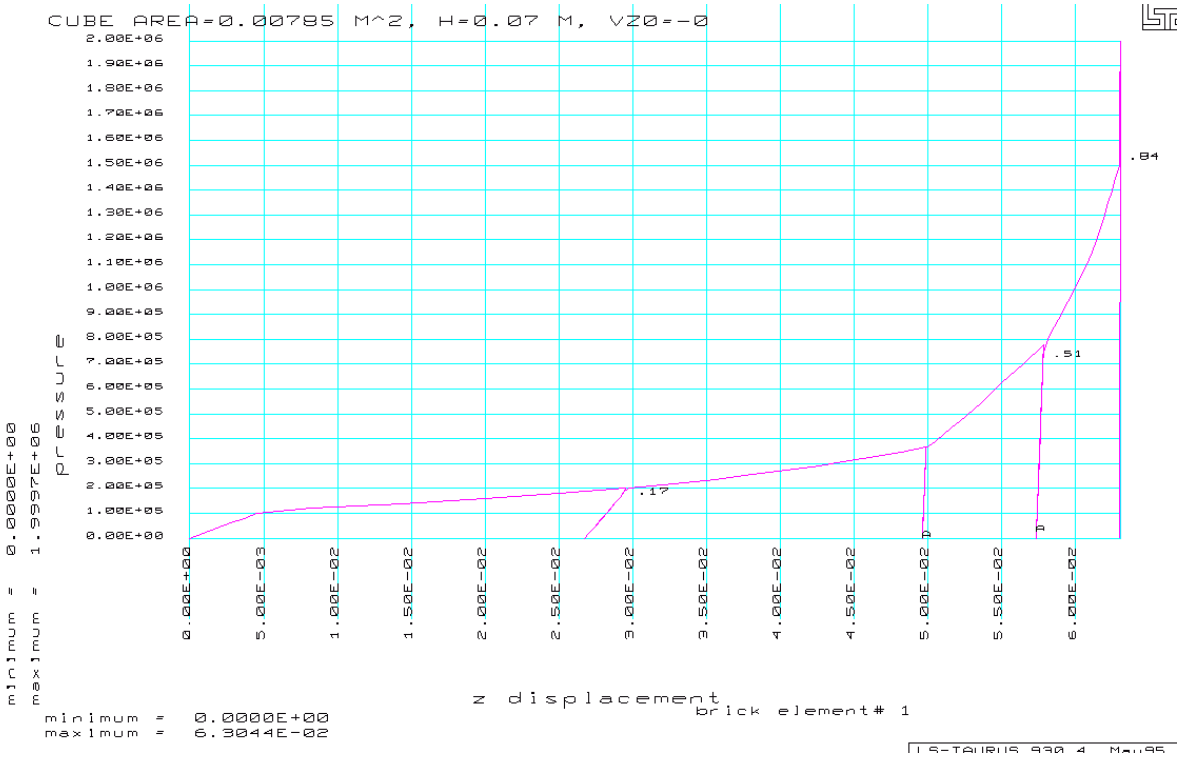


Figur b.7.3 1-element test i LS-DYNA av passiv triaxial försök för LECA. Medelspänning som funktion av total deformation.

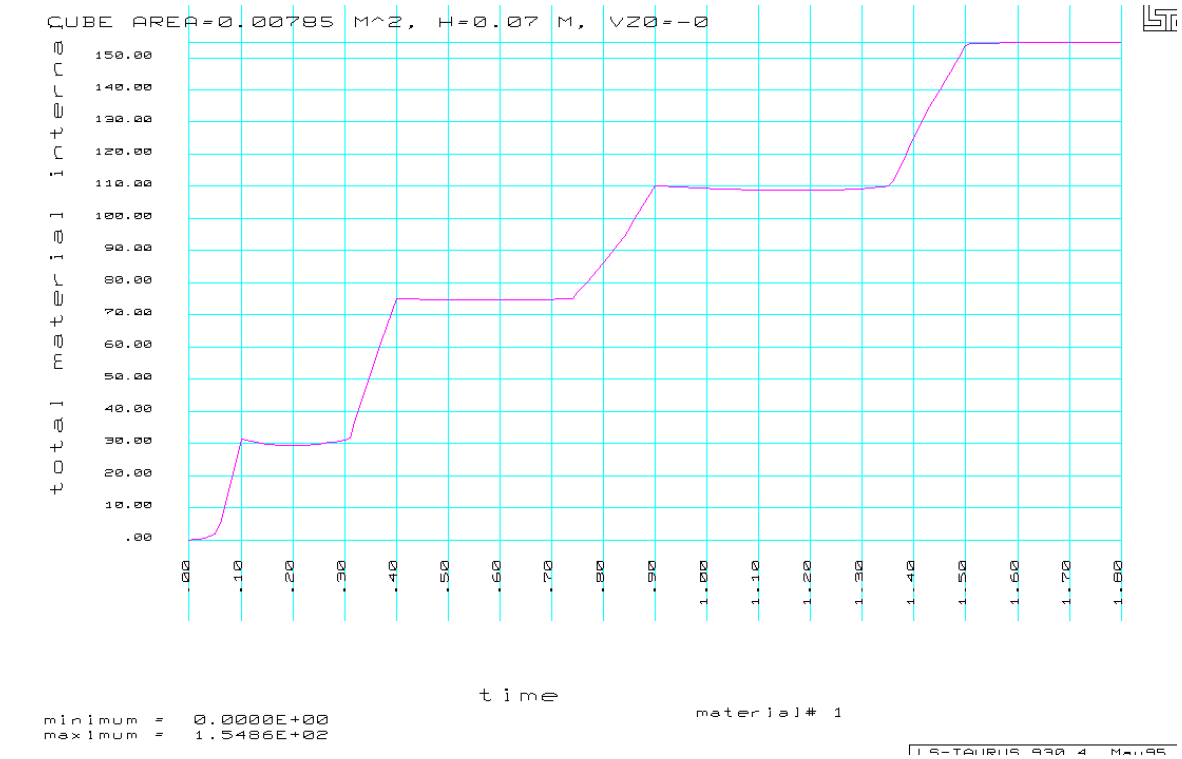


Figur b.7.4 1-element test i LS-DYNA av passiv triaxial försök för LECA. Intern energi som funktion av tid.

I figur b.7.5-b.7.6. redovisas 1-element testet för EPS.

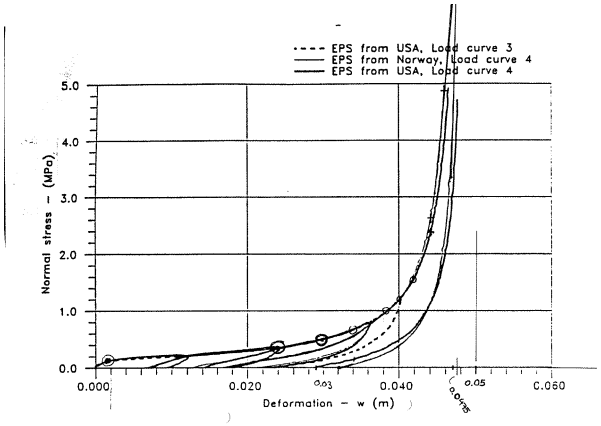


Figur b.7.5 1-element test i LS-DYNA av passiv triaxial försök för EPS. Medelspänning som funktion av total deformation.

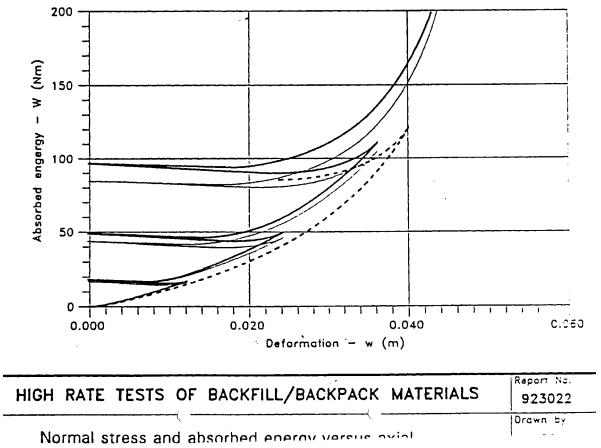


Figur b.7.6 1-element test i LS-DYNA av passiv triaxial försök för EPS. Intern energi som funktion av tid.

När EPS’en avlastas så kommer avlastningsbulkmodulen, K_u sjunka kraftigt när medelspänningen närmar sig värdet noll. Se figur b.7.7a och b.7.7.b. Initiell höjd hos proverna är 50 [mm].

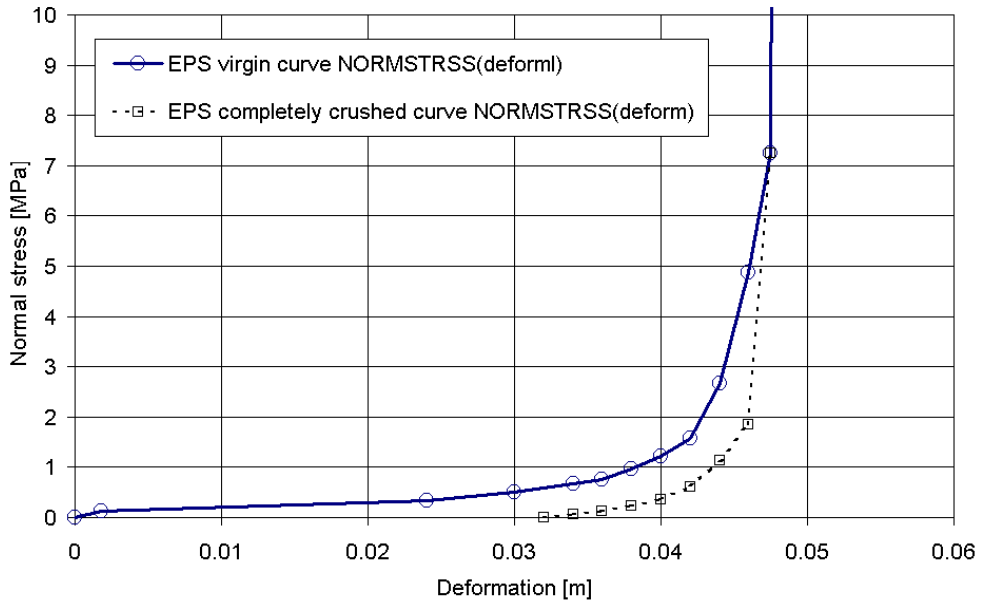


Figur b.7.7a Normalspänning som funktion av deformation för EPS, från provning [13] Ur källa [13]



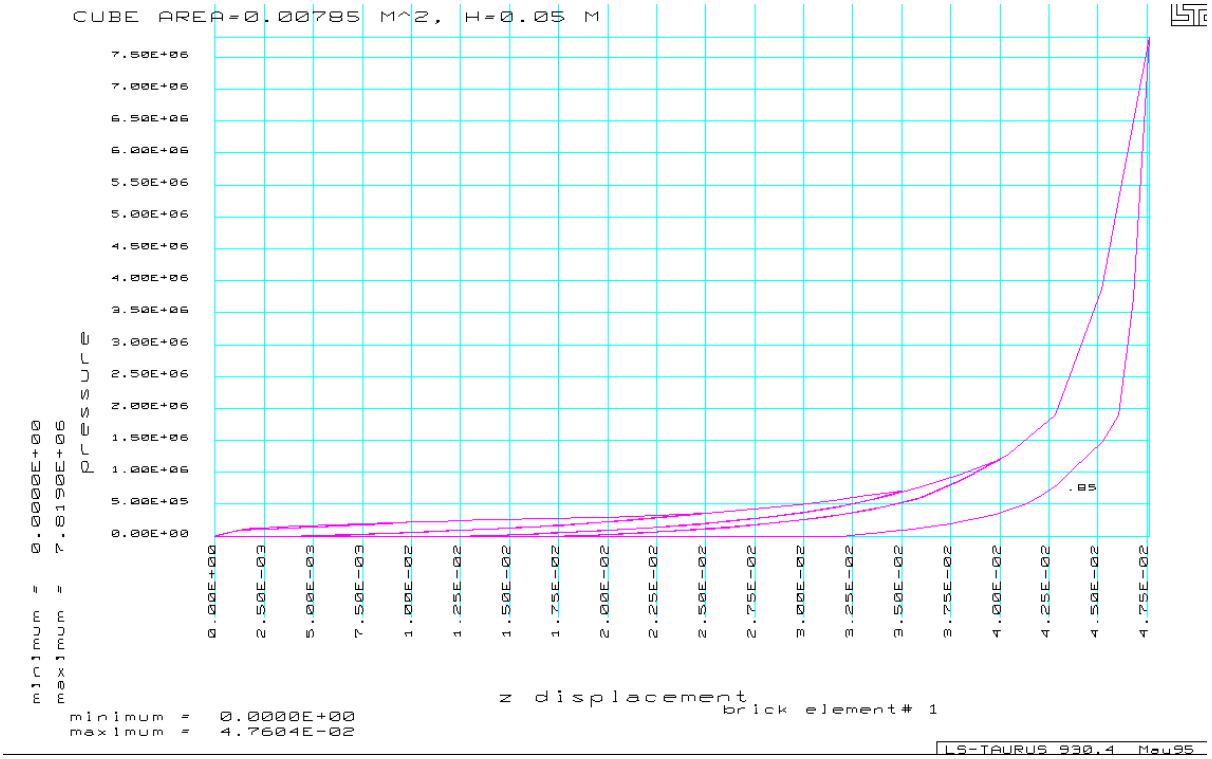
Figur b.7.7b Absorberad energi som funktion av deformation för EPS, från provning [13] Ur källa [13]

Denna effekt är inte möjlig att simulera med *EOS_TABULATED_COMPACTION men detta är möjligt att fånga *EOS_TENSOR_PORE_COLLAPSE, kortfattat så ges ”virgin curve” som indata samt ”completely crushed curve”. Dessa kurvor ges i LS-DYNA som medelspänning som funktion av kompression $\mu=\rho/\rho_0-1$. Om avlastning mellan dessa kurvor sker utförs en interpolation för att ta fram en rimlig avlastningskurva. I figur b.7.8 redovisas framtagen ”virgin curve” och ”completely crushed curve”

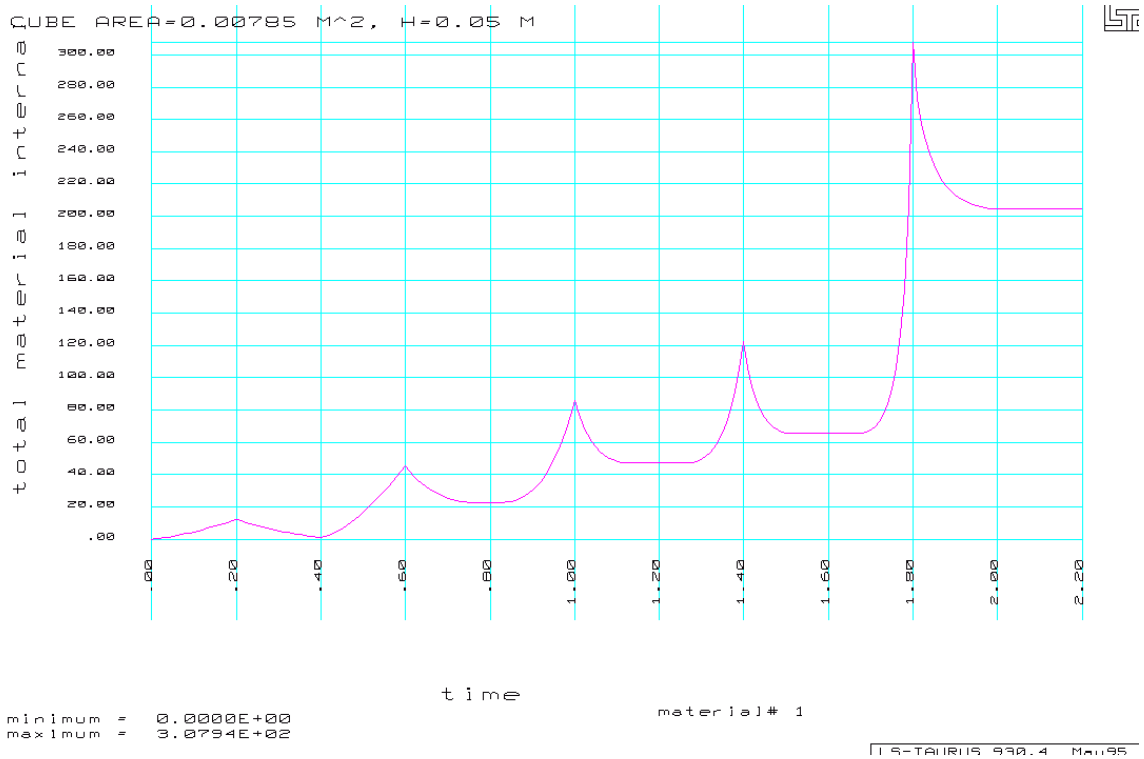


Figur b.7.8 Framtagen ”virgin curve” och ”completely crushed curve” för EPS. Normalspänning som funktion av deformation. Observera

1-element simuleringar visar att denna effekt kan beskrivas med hjälp av *EOS_PORE_COLLAPSE, se figur b.7.9 och b.7.10



Figur b.7.9 1-element simuleringar av EPS med tillståndsekvationen *EOS_TENSOR_PORE_COLLAPSE. Medelspänning som funktion av total deformation. Initiell höjd hos elementet är 50 [mm]



Figur b.7.9 1-element simuleringar av EPS med tillståndsekvationen *EOS_TENSOR_PORE_COLLAPSE. Intern energi som funktion av tid. Initiell höjd hos elementet är 50 [mm]

Nedan redovisas Keywordfilen LECA0616.K som användes för simulering av LECA proverna i [12].

```
*KEYWORD
*TITLE
 Cube area=0.00785 m^2, H=0.07 m
$
$ LAST UPDATED 2000-06-16
$
$ EOS for LECA test, Horisontal boundaries applied
$ So that V/V0=L/L0
*DATABASE_FORMAT
         0
$
$
$$$
```

```
$                              COORDINATE SYSTEMS                                $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                               LOAD DEFINITIONS                                 $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*DEFINE_CURVE
         1         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  0.100000000000E+01  5.000000000000E+05
  0.200000000000E+01  0.000000000000E+00
  0.400000000000E+01  2.000000000000E+06
  0.600000000000E+01  0.000000000000E+00
  0.900000000000E+01  5.000000000000E+06
  1.200000000000E+01  0.000000000000E+00
  1.600000000000E+01  2.000000000000E+07
  1.800000000000E+01  0.000000000000E+00
*LOAD_SEGMENT
         1     1.000     0.000         5         6         7         8
*DEFINE_CURVE
         2         0     1.000     1.000     0.000     0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  1.600000000000E+01  2.000000000000E+07
  1.800000000000E+01  0.000000000000E+00
$*LOAD_SEGMENT
$         2     1.000     0.000         5         6         7         8
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                                RIGID BOUNDRIES                                 $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                             BOUNDARY DEFINITIONS                               $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
$ Bottom of the element
*SET_NODE_LIST
         2     0.000     0.000     0.000     0.000
         1         3         4
*BOUNDARY_SPC_SET
         2         0         1         1         1         0         0         0
*SET_NODE_LIST
         3     0.000     0.000     0.000     0.000
         2
*BOUNDARY_SPC_SET
         3         0         1         1         1         0         0         0
$ Top of the element
*SET_NODE_LIST
4
5, 6, 7, 8
*BOUNDARY_SPC_SET
         4         0         1         1         0         0         0         0
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                               TIME HISTORY                                     $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*DATABASE_GLSTAT
0.3000E-02
*DATABASE_MATSUM
0.3000E-02
*DATABASE_RCFORC
0.3000E-02
*DATABASE_HISTORY_NODE
         2
*DATABASE_BINARY_D3THDT
2.908-5
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$                               CONTROL OPTIONS                                  $
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*CONTROL_ENERGY
         2         2         2         2
*CONTROL_SHELL
  20.0            1        -1         1         2         2         1
*CONTROL_TIMESTEP
0.0000, 0.9,         0  0.00      0.00
*CONTROL_TERMINATION
18,          0   0.00000   0.00000   0.00000
```

```
$
$$$
```