



Universitetet  
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

## MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

**Offshore Systemer -  
konstruksjonsteknologi**

Vår-semesteret, 2010

Åpen / Konfidensiell

Forfatter:

**Knut P Krøvel**

*Knut P Krøvel*  
(signatur forfatter)

Fagansvarlig:

**Professor Ivar Langen**

Veileder(e):

**Morten Nilssen og Harald Straume hos Bergen Group Rosenberg**

Tittel på masteroppgaven:

**Bruk av støpte knutepunkt i hovedkonstruksjonen til substasjoner for offshore vindmølleparker.**

Engelsk tittel:

**The use of casted joints in main structure of substations for offshore windmill parks.**

Studiepoeng:

**30 Studiepoeng**

Emneord:

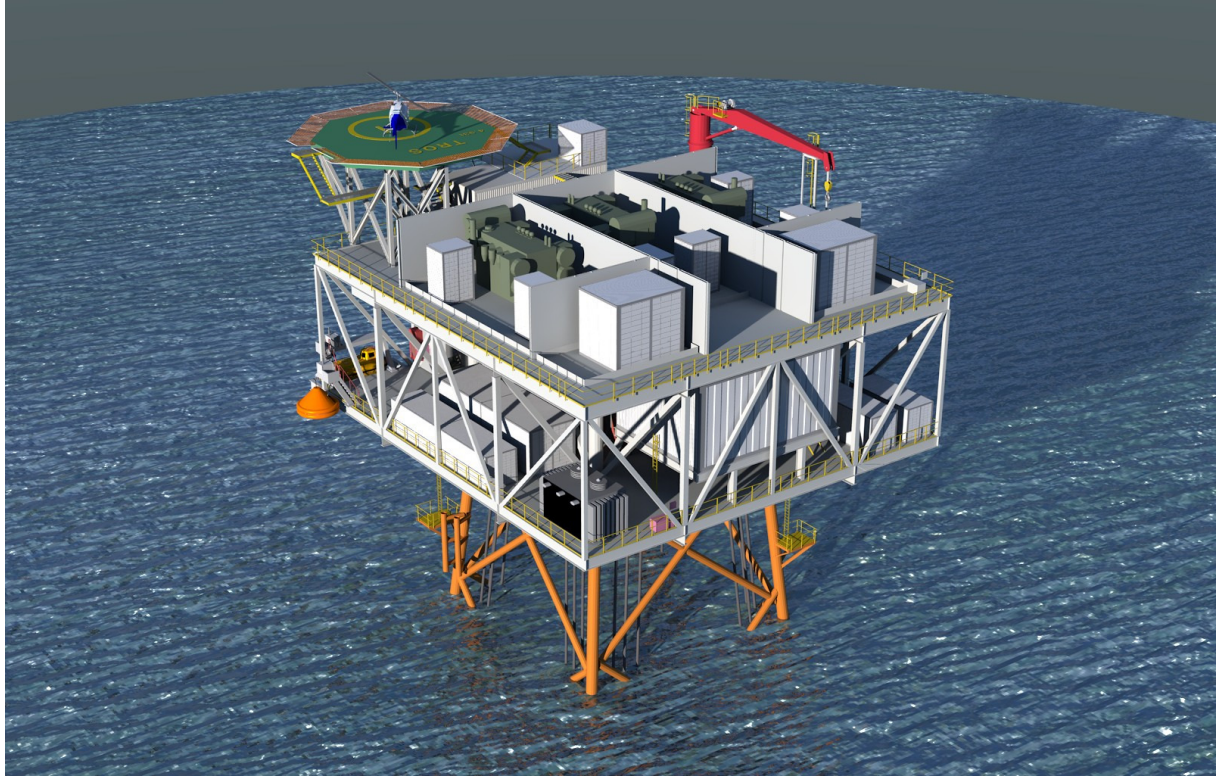
**Knutepunkt  
Støpt, sveist,  
stål, kostnad,  
enkel-/serie-  
produksjon**

Sidetall: Fremside: 2, Rapport: 43, Vedlegg: 118.  
Totalt 163 sider.

Stavanger, 14 Juni 2010

dato/år





# **BRUK AV STØPTE KNUTEPUNKT TIL SUBSTASJONER FOR OFFSHORE VINDMØLLEPARKER**

En Masteroppgave av Knut P Krøvel

Master i Offshoreteknologi – Offshore Systemer, spesialisering konstruksjonteknikk

## FORORD

Denne oppgaven er en avsluttende oppgave for min utdanning innenfor Offshore Systemer – Konstruksjonsteknologi. Den er utført i samarbeid med Bergen Group Rosenberg som har stilt oppgaven til rådighet for meg, oppgaven er en del av et pågående prosjekt hos dem.

Det er lagt mye vekt på å lære seg det avanserte dataprogrammet ASNYS, da dette programmet er et av de mest brukte i norsk næringsliv innenfor element metode analyser. Det at programmet er meget avansert har gjort at jeg har brukt mye av tiden på å lære meg å forstå og bruke programmet. Det at jeg har brukt mye av tiden på opplæring av programmet har gått ut over detalj nivået i analyseprosessen.

Det oppsto en del problemer med datamaskinen tidlig i prosessen noe som førte til at det måtte byttes ut datamaskin. Dette gikk ut over både opplæringen av programmet og kjøringen av de forskjellige analysene da deler av opplæringen ble tatt underveis i selve analyse prosessen.

Det rettes stor takk til følgende personer som har bistått meg med oppgaven:

**Professor Ivar Langen**, som har vært min veileder fra Universitet i Stavanger og som har veiledet meg inn på rett spor underveis i arbeidet. Han har stilt opp for meg når jeg har hatt behov for det og kommet med innspill til de forskjellige problemstillingene underveis.

**Morten Nilssen og Harald Straume**. Mine veiledere hos Bergen Group Rosenberg som har fulgt meg opp og bistått meg i å finne gode løsninger på problemene underveis. De har stilt opp underveis i hele prosessen og hatt jevnlig møter med meg for å kunne hjelpe meg i diverse problemstillinger som dukket opp.

**Bjørn Roar Pettersen** hos Bergen Group Rosenberg AS for hjelp med materialvurderinger og oppstart av kontakt med Scana Steel Stavanger.

**Dr.ing Bärbel Nielsen**, hos Bergen Group Rosenberg AS for hjelp til å ta ut krefter fra den globale analysen til bruk i oppgaven.

**Stig Skjønnehaug** for hjelp med noen geometriske forandringer av det støpte knutepunktet.

**Liv Kirsten Rannestad** hos Bergen Group Rosenberg AS og **Bjarte Oftedal** hos Ergogroup AS for rask installasjon og bytting av datamaskiner da det oppsto problemer med programvaren.

**Nils Terje Watland** og **Erik Ødegård** hos Scana Steel Stavanger AS for hjelp med forståelsen av støpeteknikk og utforminger av de støpte knutepunktet.

**Terje Kinn** hos Seagear AS for hjelp med opplæring og bruk av analyseprogrammet ANSYS.

## SAMMENDRAG

Denne oppgaven omhandler en analyse av et knutepunkt til den bærende konstruksjonen for en offshore transformator stasjon. Bakgrunnen for dette var å finne ut om det var lønnsomt å bruke serieproduserte støpte eller sveiste knutepunkt, da konstruksjoner opp mot vindkraft bransjen må være mye mer kostnads optimalisert enn dagens olje og gass næring. Kostnaden er den overordnede styrende parameteren i oppgaven.

Det er i oppgaven gjort en del arbeid rundt bruken av analysemetoden elementmetoden. Det er vurdert hvilke metoder som er best å bruke da med tanke på kvalitet og tidsbruk. Det er i hovedsak brukt 8 forskjellige elementinndelingsmetoder på de 8 forskjellige geometriske løsningene som er vurdert. Hver geometrisk løsning er et resultat fra analysene av de foregående modellene, dette for å forsøke å optimalisere modellene med tanke på høy styrke og lave kostnader.

Det er kjørt både lineære og ikke-lineære analyser av de valgte modellene, dette for å finne restkapasiteten i materialet etter at flytgrensen er nådd.

Det ble komt frem til at det støpte knutepunktet var det som tålte de største lastpåkjenningene, mens det sveiste knutepunktet var det billigste.

Den løsningen som ble valgt var derfor det ene sveiste knutepunktet som tilfredstilte kravene til standardene og samtidig ble billigst.

## INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Innledning.....	6
1.1	Bakgrunn for oppgaven .....	6
1.2	Formålet med oppgaven .....	6
2	Teori .....	7
2.1	Eksisterende kunnskap .....	7
2.2	Materialvalg .....	7
2.2.1	materialvalg for sveist konstruksjon .....	7
2.2.2	Materialvalg for støpt konstruksjon .....	8
2.2.3	Materialegenskaper .....	8
2.3	Strukturen .....	9
2.3.1	Utgangspunkt .....	10
2.3.2	Geometrier.....	11
2.3.3	Laster.....	16
2.4	Metodevalg .....	18
2.5	Eksperimentelle simuleringer .....	20
2.5.1	Om ANSYS.....	20
2.5.2	Skjevhet.....	20
2.5.3	Vridnings faktor for 3D elementer .....	23
2.5.4	Gjennomsnittlig og ikke gjennomsnittlig konturplott resultat .....	24
2.6	Element teori.....	25
2.6.1	Solid186 .....	25
2.6.2	Solid187 .....	26
3	Resultater.....	27
3.1	Analyser.....	27
3.1.1	Lineære analyser av sveiste knutepunkter.....	27
3.1.2	Lineære analyser av støpte knutepunkter .....	30
3.1.3	Ikke-lineære analyser av sveist knutepunkt .....	32
3.1.4	Ikke-lineære analyser av støpte knutepunkter .....	34
3.2	Kostnadsestimeringer .....	37
3.2.1	Kostnad Sveist knutepunkt.....	37
3.2.2	Kostnad Støpt knutepunkt .....	39
4	Diskusjon.....	40
5	Konklusjon .....	42

6	Referanser.....	43
7	Vedlegg .....	43

## BILDELISTE

Bilde 2-1	Komplett substasjon .....	9
Bilde 2-2	Utgangspunkt .....	10
Bilde 2-3	Modell W1, Sveist knutepunkt med RHS rett på I-bjelker .....	11
Bilde 2-4	Modell W2, sveist knutepunkt med RHS rett på hovedrøret .....	12
Bilde 2-5	Modell W3, Sveist knutepunkt med rør rett på hovedrøret.....	12
Bilde 2-6	Modell W4, sveist knutepunkt med rør rett på I-bjolkene.....	13
Bilde 2-7	Modell W6, Sveist knutepunkt med gusset plater og rør. ....	13
Bilde 2-8	Modell W5, sveist knutepunkt med gusset plater og RHS profil.....	14
Bilde 2-9	Modell C1, støpt knutepunkt.....	14
Bilde 2-10	Modell C2, Forsterket støpt modell.....	15
Bilde 2-11	Oversikt over krefter 1 .....	16
Bilde 2-12	Oversikt over krefter 2 .....	17
Bilde 3-1	Eksempel, Spenningsfordeling lineær analyse, MM2, modell W5.....	29
Bilde 3-2	Eksempel: Spenningsbilde modell C1, MM4 .....	30
Bilde 3-3	Spenningsbilde modell C2 lineær analyse, MM2 .....	31
Bilde 3-4	Spenningsbilde, ikke-lineær analyse, modell W5, MM2.....	32
Bilde 3-5	Spenningsbilde støpt modell C1, ikke lineær analyse, MM2C .....	35
Bilde 3-6	Spenningsbilde 4x lasttilfelle, ikke-lineær analyse, modell C1, MM1C .....	36

## FIGURLISTE

Figur 1 Anbefalt fremgangsmetode, R.D. Cook m.fl. 2001 .....	18
Figur 2 Fremgangsmetode for element inndelings valg .....	18
Figur 3 Vridningsfaktorer .....	23
Figur 4: Solid186 Geometri .....	25
Figur 5: SOLID187 Geometri .....	26

## TABELL LISTE

Tabell 1 Geometri liste .....	11
Tabell 2 Element inndeling oversikt .....	19
Tabell 3 Lineære analyser av sveiste knutepunkter .....	27
Tabell 4 Lineære analyser av støpte knutepunkter .....	30
Tabell 5 Resultat fra ikke-lineære analyser av modell W5 .....	32
Tabell 6 Resultat av ikke-lineære analyser av støpte knutepunkt .....	34
Tabell 7 Kostnadsdel 1 av sveist knutepunkt .....	37
Tabell 8 Kostnadsdel 2 av sveist knutepunkt .....	38
Tabell 9 Kostnad støpt knutepunkt .....	39



# 1 INNLEDNING

## 1.1 BAKGRUNN FOR OPPGAVEN

Bergen Group Rosenberg (BGR) arbeider øyeblikket med flere nye konsepter knyttet til fornybar energi og da spesielt rettet mot vindkraft. Et av disse konseptene er et komplett transformatorstasjon for vindmølleparker offshore, også kalt en substasjon. Dette konseptet, plattformen, bør være mye mer optimalisert enn hva offshore bransjen i dag er vant med. I dag er prosjektene knyttet til olje og gass næringen offshore ofte produkter som er bygde en gang for et enkelt spesielt formål.

Opp mot vindindustrien og de utbygginger som planlegges der, vil produktene i langt større grad bære preg av serieproduksjon, og da må optimalisering av konstruksjonen få stor fokus.

## 1.2 FORMÅLET MED OPPGAVEN

Oppgaven skal representere studentens avsluttende arbeid for Master i Offshore Teknologi – Offshore Systemer ved Universitet i Stavanger.

Masteroppgaven har som utgangspunkt å gjøre en vurdering rundt bruk av støpte knutepunkt opp imot sveiste knutepunkt i hovedkonstruksjonen i dette transformator stasjon konseptet. Det sees da på både styrkemessige og kostnadmessige forhold for å finne ut hva som er den beste løsningen på problemstillingen.

Transformatorstasjonen også kalt substasjonen er en forholdsvis liten dekkstruktur plassert oppå et jacket understell. Det er da knutepunktene mellom jacketen og dekkstrukturen som her skal sees nærmere på med tanke på optimalisering, både kostnadsvurdering og styrkevurdering.

Det er brukt lineære og ikke-lineære elementmetode analyser for å kjøre kapasitetskontroll på flere forskjellige geometriske løsninger. Det er brukt lineære analyser for komme frem til en geometri som tilfredsstillende de kravene som ligger til grunn for offshore transformatorstasjoner.

Ikke lineære analyser er brukte for å finne ut hvor mye ekstra kapasitet som egentlig ligger i knutepunktene ut over de påsatte kreftene. Stål har mye ekstra kapasitet i det plastiske området, det å finne ut hvor mye mer kapasitet som ligger i knutepunktet er da en av vurderingene i oppgaven.

Resultatene fra element analysene er brukte for å kunne forandre på geometriene underveis i prosessen, dette for å kunne designe et knutepunkt som tilfredsstillende kravene ifra standardene og samtidig har et lavt kostnadsnivå.

## 2 TEORI

### 2.1 EKSISTERENDE KUNNSKAP

(DNV-OS-J201, October 2009) og (DNV-OS-J101, October 2007) er de standardene som er tatt som utgangspunkt for beregningene i oppgaven. Da med hovedvekt på (DNV-OS-J201, October 2009) som igjen referer mye til (DNV-OS-J101, October 2007).

Et av hovedpunktene som er lagt til grunn for i denne oppgaven er seksjon 4 punkt B201c) i (DNV-OS-J201, October 2009), der det står følgende (oversatt ifra engelsk tekst) ”Substasjon strukturer og deres fundamenter skal designes i høyeste sikkerhetsklasse.”

### 2.2 MATERIALVALG

Det er tatt utgangspunkt i at substasjonen skal være så enkelt tilpasselig på de fleste steder som mulig, dette medfører at det i visse tilfelle kan brukes høyere design kriterier enn det som er påkrevd det ene spesifikke tilfellet. Et av disse tilfellene er ved valg av design temperatur. Da det i denne oppgaven er tatt utgangspunkt i at substasjonen skal kunne enkelt tilpasses nye steder, er det valgt en temperatur på  $-20^{\circ}\text{C}$  som design basis. Dette medfører at en får en litt dyrere konstruksjon, men samtidig vil en kunne oppnå en økonomisk gevinst om en velger å serieprodusere dette produktet.

#### 2.2.1 MATERIALVALG FOR SVEIST KONSTRUKSJON

Som utgangspunkt for materialvalg, er standardene fra Det Norske Veritas lagt til grunn. Da (DNV-OS-J201, October 2009) er den eneste standarden som er laget for offshore substasjoner, har en valgt å følge denne og de standardene som denne refererer til. Denne standarden referer til (DNV-OS-J101, October 2007) for valg av stålmateriale (Seksjon 4, F201).

I (DNV-OS-J101, October 2007) seksjon 6 står det om valg av material klasser, følgende referanser er hentet derifra:

- Et punkt for valg av materiale er design temperaturen, i punkt A201 står følgende: *”The design temperature is a reference temperature used as a criterion for the selection of steel grades. The design temperature shall be based on **lowest daily mean temperature.**”* Dette vil da si at den midlere døgntemperaturen som må legges til grunn er midlere vinter-døgntemperatur.
- Et annet punkt er struktur kategorien som er basert på sikkerhets analyse og tilgangen for inspeksjon etter at strukturen er installert. Da knutepunktet som er analysert i denne rapporten vil ha forholdsvis enkel tilgangsmulighet for inspeksjon, og det er plassert så høyt over sjøen at det ikke vil ha kontakt med vann, er det vurdert plassert i Primær-kategorien. Dette står under punkt A303 Table A1, og er definert som: *”Primary: Structural part where failure have substantial consequences.”*
- Ved valg av konstruksjons kategori Primær, vil dette tilsi inspeksjonskategori II, der kravene er gitt i A304 Table A2: *”Work certificate: Test results of all specified tests from samples taken from the products supplied. Inspection and tests witnessed and signed by QA department.”*
- Det var ønskelig å bruke en stålkvalitet på henholdsvis 355Mpa i minimum strekkfasthet, dette er i DNV-standarden definert som NV-36 (Table A4), eller i ISO10025-2 definert som S355K2+N og S355J2+N.

- Graderingen av materialet må da tilfredsstillende en temperatur mindre enn minimumstemperaturen, noe som gir gradering D eller DW (økt sveisbarhet) i henhold til Table A7 i standarden.
- Da design temperaturen er ned mot  $-15^{\circ}\text{C}$ , som ligger innenfor grensen på design temperatur  $-20^{\circ}\text{C}$ , vil en ut ifra Table A8 få en tykkhetsbegrensning på 40mm.
- Da design temperaturen for dette tilfellet er så lav, vil en på grunn av tykkelsen få en reduksjon av strekkfastheten mellom 25mm og 50mm. Den prosjekterende strekkfastheten, i henhold til (DNV-OS-B101, April 2009) Seksjon 1 Table C2, blir 335MPa.
- Dersom en velger et materiale som har en test temperatur ned mot  $-60^{\circ}\text{C}$ , blir tykkelse begrensningen på 150mm med en design flytgrense på 355MPa.

Det er ønskelig med en flytgrense på 355MPa, og ifølge (DNV-OS-B101, April 2009) stiller det store krav til produksjon og testing. Det er valgt å gå videre med en flytgrense på 355MPa som designbasis.

Ifølge (DNV-OS-C101, October 2008) kan en bruke materialfaktorer ifra (NORSOK-N-004, October 2004). Da materialfaktoren i (NORSOK-N-004, October 2004) er på 1,15, får en en dimensjonerende fasthet på  $\frac{355\text{MPa}}{1,15} = 308,7\text{MPa}$ .

## 2.2.2 MATERIALVALG FOR STØPT KONSTRUKSJON

For støpt materiale er det stilt krav til forskjellige stålqualiteter, dette må i henhold til (DNV-OS-B101, April 2009) dokumenteres ifra leverandør. Scana Steel Stavanger operer med en stålqualitet som tilfredsstillende kravet ifra (NORSOK-M-120, November 2008) om en minimum flytgrense på 420MPa igjennom tverrsnitt opp imot 150mm, denne er kalt S6246 hos dem. (DNV-OS-B101, April 2009) refererer til NORSOK sine standarder når det kommer til materialtesting og godkjenning.

Det er i denne oppgaven valgt å gå frem med stålqualiteten på minimum 420MPa, dette gir en dimensjonerende fasthet på  $\frac{420\text{MPa}}{1,15} = 365,2$ .

## 2.2.3 MATERIALEGENSKAPER

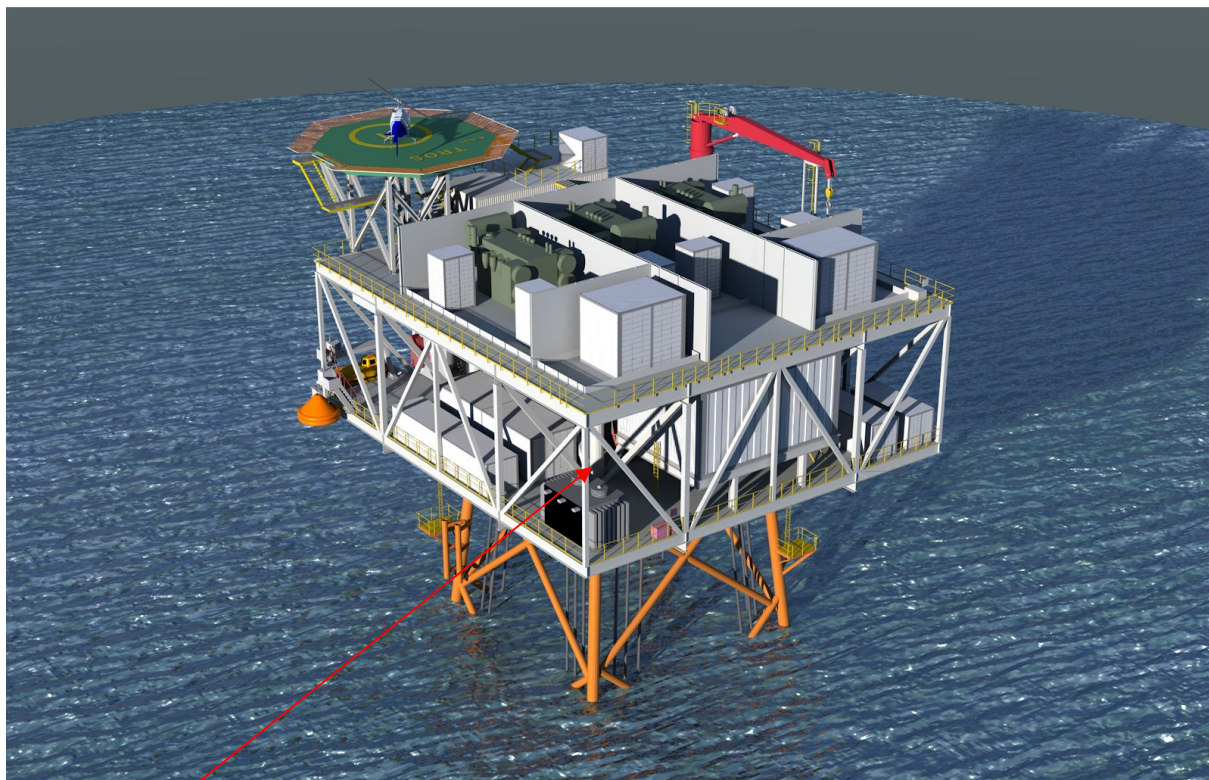
Det lineære materialet har for både sveiste og støpte konstruksjoner en elastisitetsmodul på 210 000MPa.

For de ikke-lineære materialegenskapene er det tatt utgangspunkt i (NORSOK-N-004, October 2004) der verdien for stigningstalet etter at flytgrensen er definert som følger:

$$H * E = 0,0034 * 210000 = 714\text{MPa}$$

Denne verdien gjelder for materialer med en flytgrense fra 355MPa til 460MPa.

## 2.3 STRUKTUREN

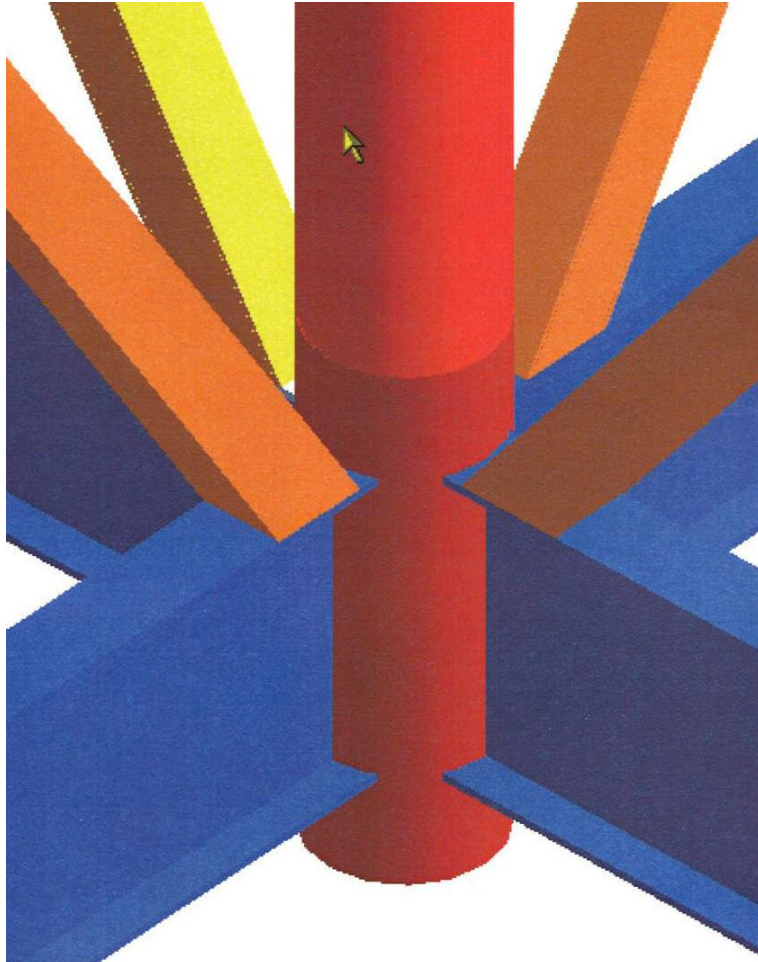


Bilde 2-1 Komplette substasjon

Pilen viser hvor et av de fire knutepunktene er lokalisert på substasjonen.

### 2.3.1 UTGANGSPUNKT

Ved starten av denne oppgaven ble det tatt utgangspunkt i ett av knutepunktene i substasjonen da alle fire er geometrisk like.



Bilde 2-2 Utgangspunkt

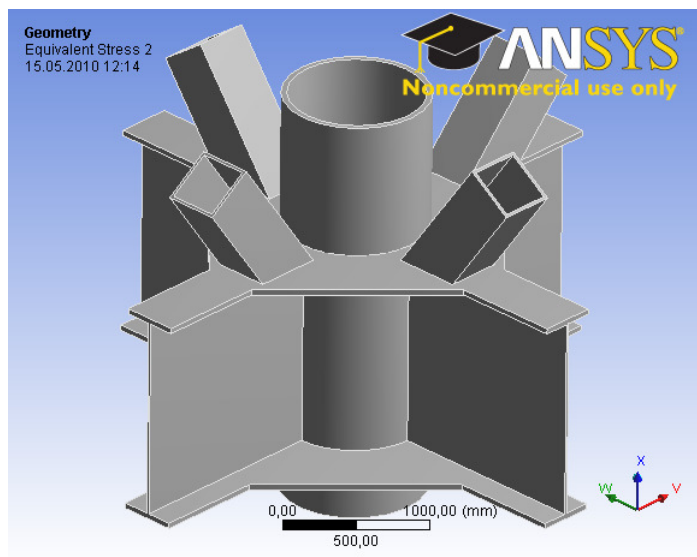
Den geometriske likheten gjør at en kan se konservativt på alle de resterende knutepunktene og bygge alle like etter dimensjonene til det ene som har størst lastpåkjenning.

### 2.3.2 GEOMETRIER

Det er bygget opp flere modeller i oppgaven som det er kjørt flere analyser på, en oversikt over disse følger under.

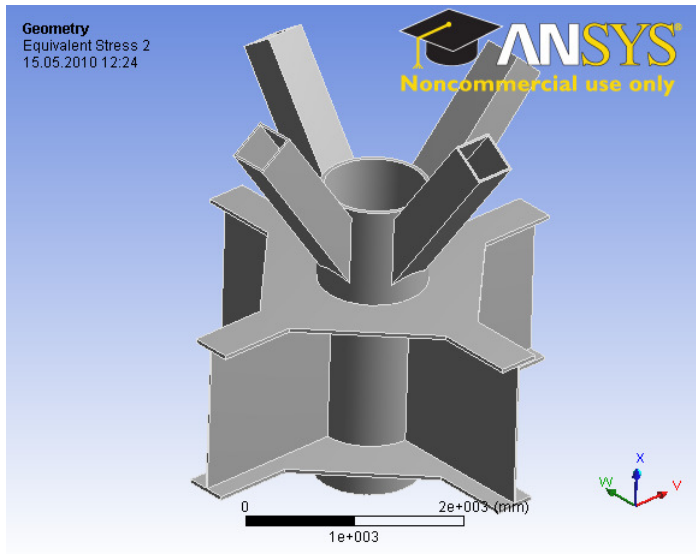
Modell	Forklaring
W1	Sveist, RHS på I-bjelke
W2	Sveist, RHS på hovedrør
W3	Sveist, rør rett på hovedrør
W4	Sveist, rør rett på I-bjelke
W6	Sveist, rør på gusset plater
W5	RHS med modifiserte gusset plater
C1	Enkel støpt modell
C2	Forsterket støpt modell

Tabell 1 Geometri liste



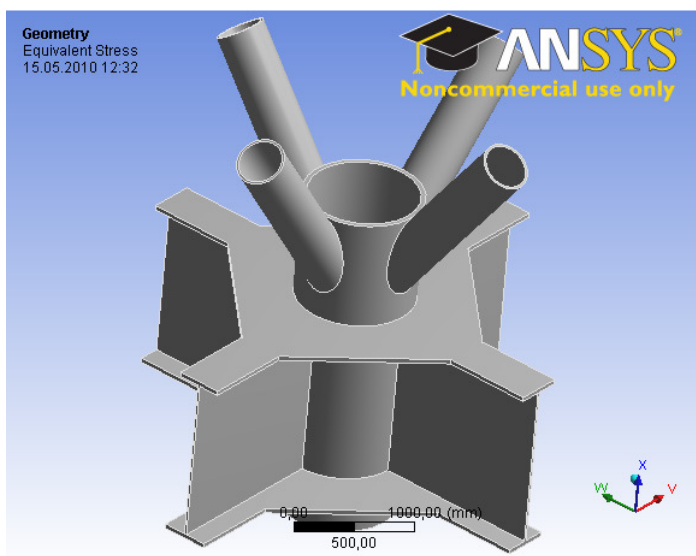
Bilde 2-3 Modell W1, Sveist knutepunkt med RHS rett på I-bjelker

Modell W1 er den modellen som er mest lik utgangspunktet, det er kun lagt inn noen ekstra plater rundt røret for overføring av krefter rundt hovedrøret.



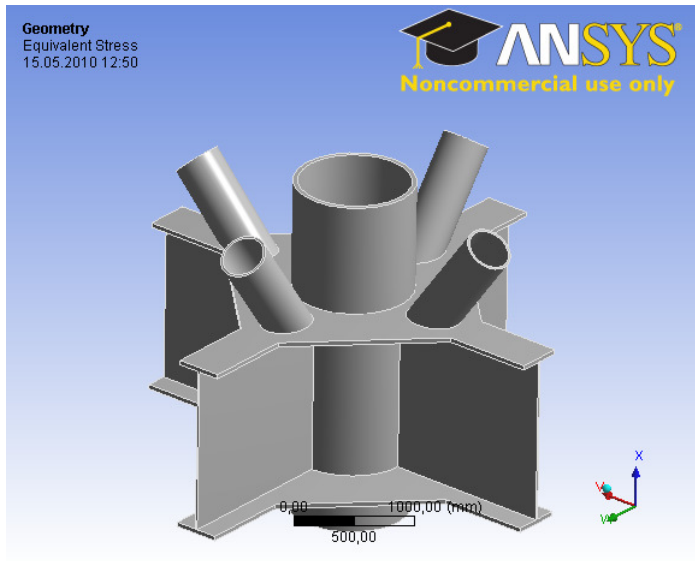
Bilde 2-4 Modell W2, sveist knutepunkt med RHS rett på hovedrøret

Modell W2 er noenlunde lik Modell W1, men har i stedet fått forskjøvet eksentrisitetspunktet for RHS'ene, dette da en slik løsning kan gi enklere produksjon.



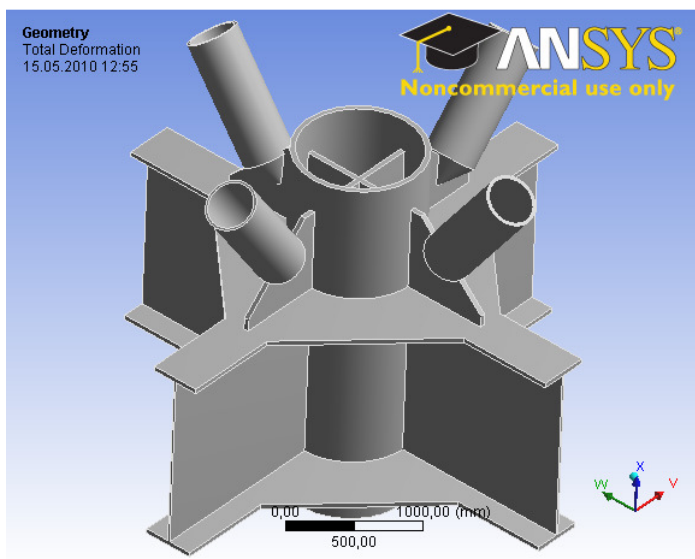
Bilde 2-5 Modell W3, Sveist knutepunkt med rør rett på hovedrøret

Modell W3 er en modell der en bytter ut RHS'ene med rør rett på hovedrøret, da en vil slippe få de skarpe overgangene fra skråstagnene inn mot hoveddelen av knutepunktet.



Bilde 2-6 Modell W4, sveist knutepunkt med rør rett på I-bjelkene

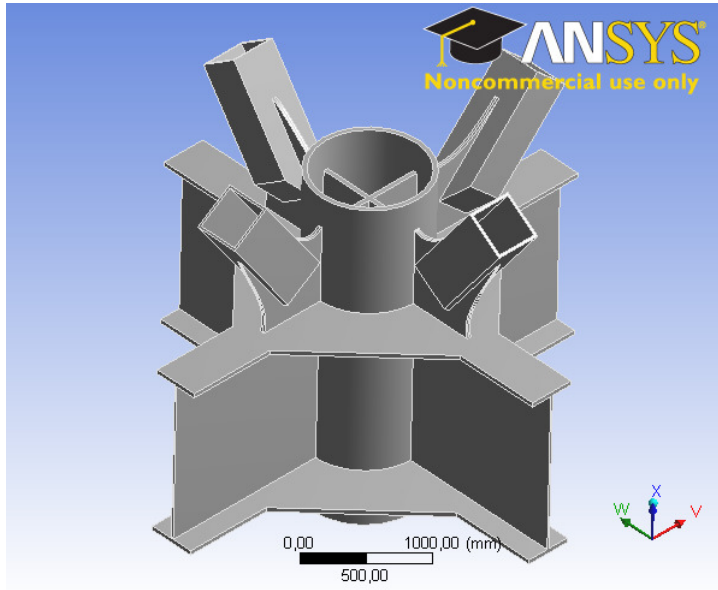
Modell W4 er lik modell W1, men RHS'ene er byttet ut med rør som skråstag.



Bilde 2-7 Modell W6, Sveist knutepunkt med gusset plater og rør.

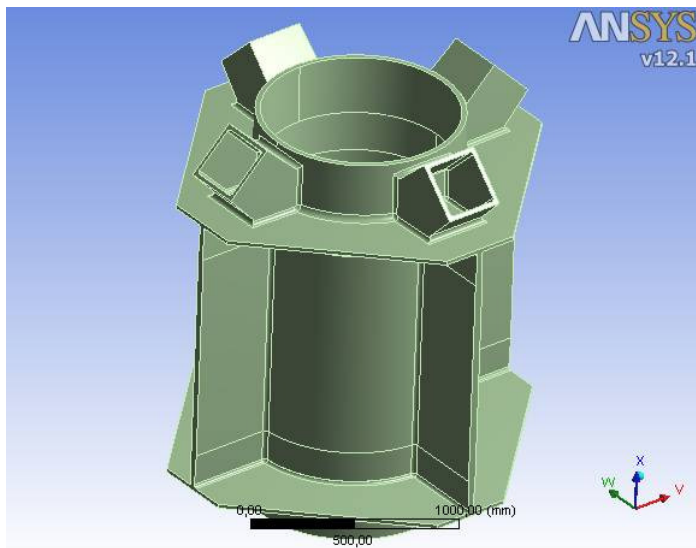
Modell W6 har gusset plater for å bedre kunne ta opp og fordele de kreftene som kommer inn mot knutepunktet. Det er i denne modellen brukt rør som skråstag.





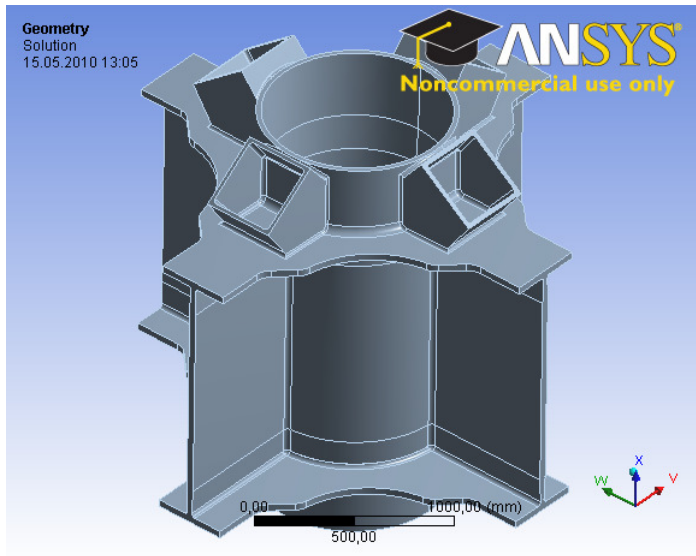
Bilde 2-8 Modell W5, sveist knutepunkt med gusset plater og RHS profil

Modell W5 er den modellen som er mest modifisert ut ifra utgangspunktet, dette som resultat av de analysene som er kjørt på de foregående sveiste modellene. Eksentrisiteten fra alle de innkommende bjelkene er i denne modellen samlet i samme punkt, trass forskjellig vinkler på de innkommende skråstagene, da alle gusset platene er ulike. Lik eksentrisitet samsvarer med de globale analysene som er kjørt på hovedstrukturen samt gir det en bedre spenningsfordeling i knutepunktet.



Bilde 2-9 Modell C1, støpt knutepunkt

Den støpte modellen C1 er den som ligner mest på det sveiste knutepunktet, dette da den sveiste er tatt som utgangspunkt for det støpte. Veggtykkelsene i det støpte er grunnet støpetekniske årsaker mye tykkere enn for det sveiste.



Bilde 2-10 Modell C2, Forsterket støpt modell

Det er modell C2 som er den mest forandrede modellen i forhold til utgangsmodellen da det er lagt inn forandringer ut ifra erfaringene med de sveiste modellene samt fra den første støpte modellen.

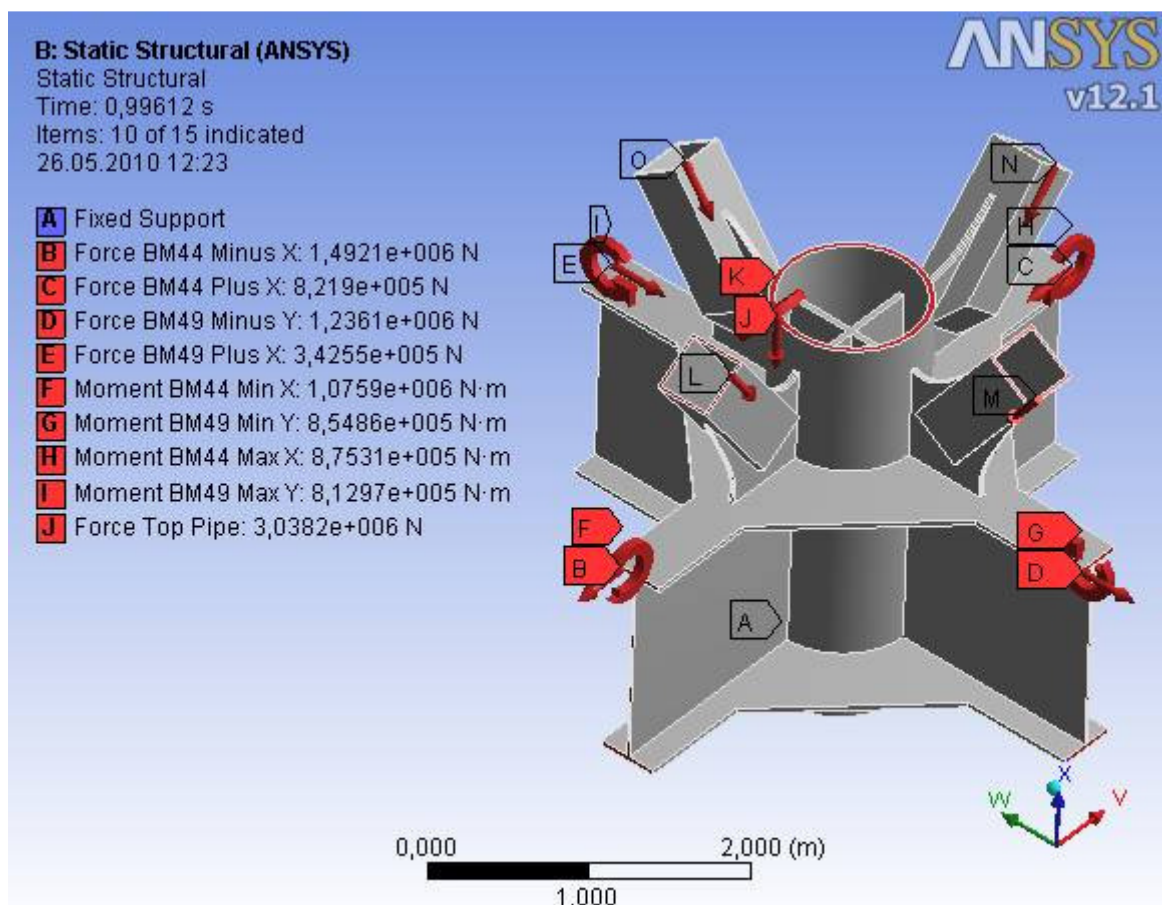
### 2.3.3 LASTER

For lastene som er brukt er de tatt utgangspunkt i bruddgrense tilstanden fra den ene globale analysen. Det lasttilfellet er valgt da det gav de største lastene i knutepunktet. Det er konservativt tatt ut som de verdiene som gir høyeste krefter og momenter i knutepunktet, dette som følger av de mest ugunstige forholdene av lasttilfellene med sikkerhetsfaktorer. Det er da den kombinasjonen som gir den høyeste mulig valgte utnyttelsen av knutepunktet.

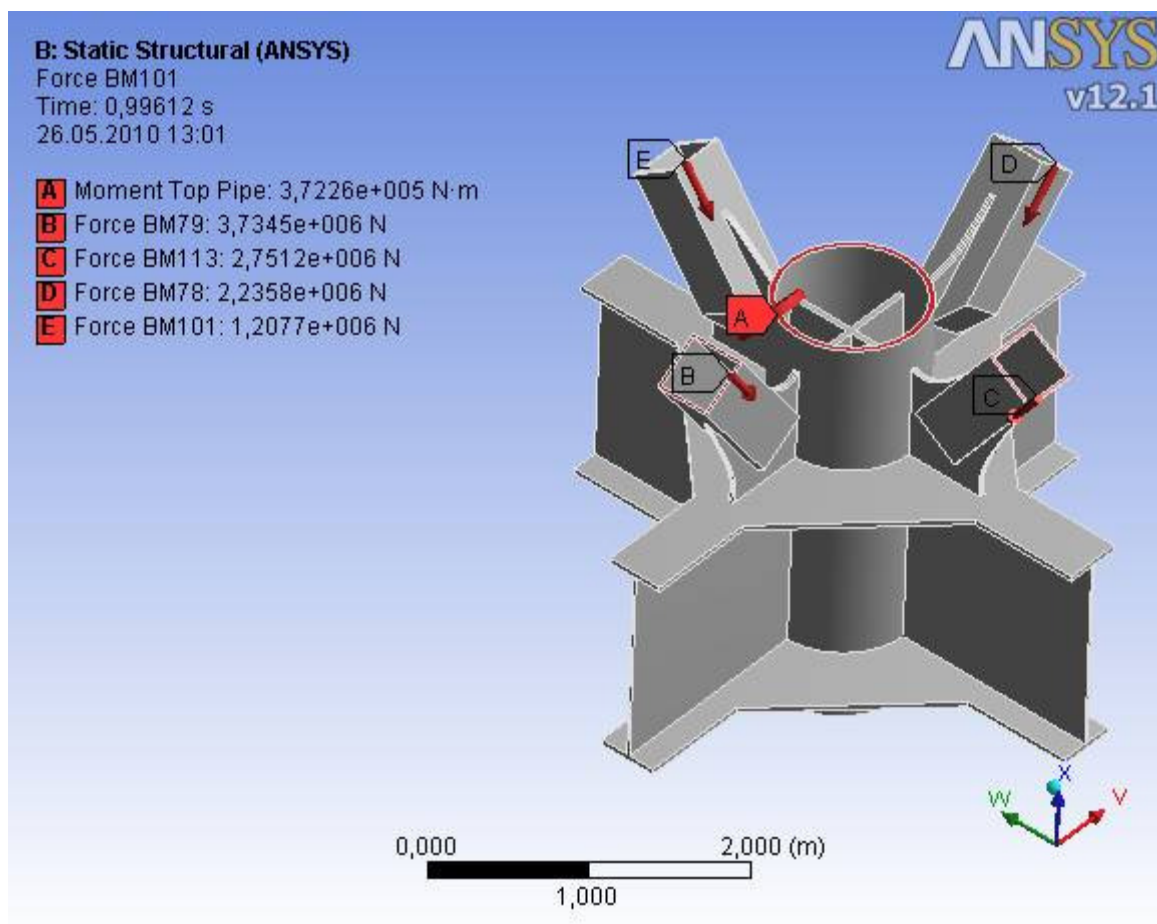
Det er tatt ut momenter om alle de tre lokale aksene i hvert av sine respektive områder med en avstand fra eksentrisitetspunktet i den globale analysen som er lik bjelkelengden i den oppbygde analyse modellen. Disse enkelte momentene er sett på i modellen om sine egne lokale akser og gir samlet et enkelt moment om sin egen hovedakse.

Det er også for kreftene hentet ut de gitte verdiene i den gitte avstanden ifra eksentrisitetspunktet i den globale analysen. Disse kraftverdiene er i analysemodellen låst til den respektive vinkelen de kommer inn fra (sett opp imot de globale aksene), så uavhengig av om en endrer vinklene på skråstagene i geometrien så vil kreftene komme fra samme vinkel som i den globale analysen.

Bildene under viser hvor store krefter som er sett på modellen, bokstavene som vises i bildet refererer til kreftene i det aktuelle bildet. Det første bildet viser hvor alle kreftene samlet kommer inn mot knutepunktet. Grunnet det store antallet av krefter og momenter er det ikke mulig å få med alle tallene i samme bildet, det er derfor valgt å bruke to bilder for å vise alle kreftene med deres aktuelle verdi.



Bilde 2-11 Oversikt over krefter 1



Bilde 2-12 Oversikt over krefter 2

Bilde 2-11 og Bilde 2-12 viser hvordan kreften er fordelt inn på strukturen i analyse modellen. Det skal merkes at kreftene er jevnt fordelt over flatene og ikke direkte på det enkelte punktet som det kan se ut som på bildet, det samme gjelder momentene. I element modellen vil derfor kreftene fordele seg over nodene i flatene som trykk, for krefter vil det si konstant trykk, for moment vil det si fra negativt til positivt trykk om momentets egen nøytralakse.

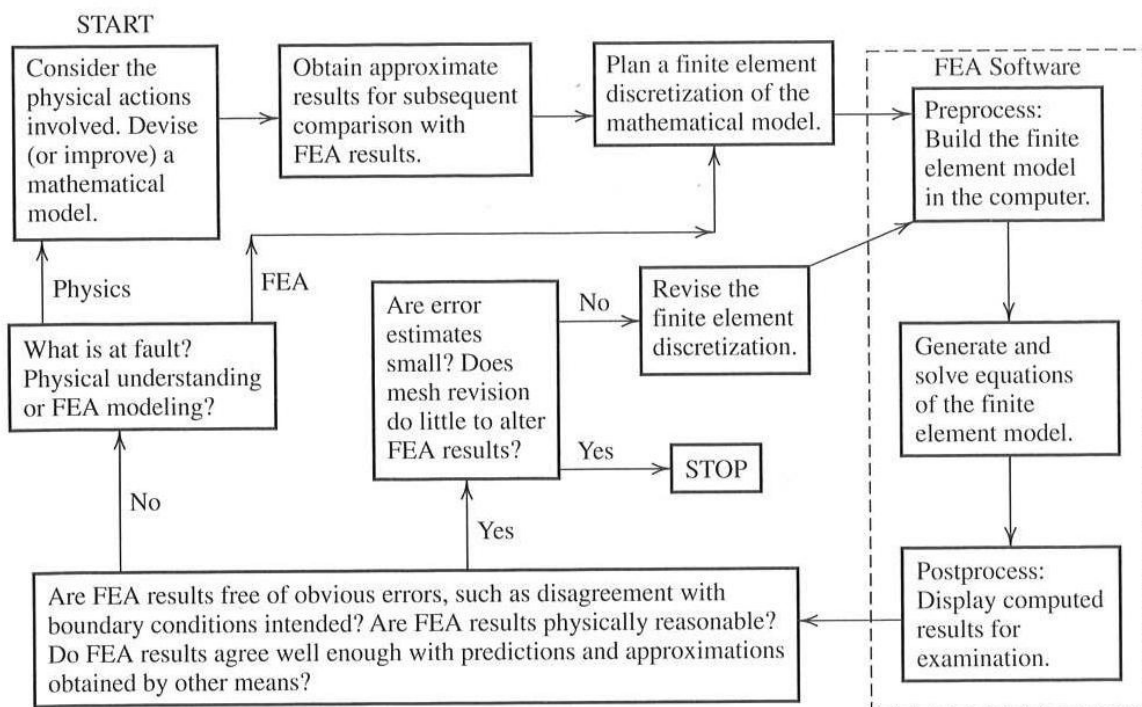
Det er viktig å påse at kreftene som settes på i modellen vil være representative vireligheten. Lengden på de forskjellige innkommende bjelkene og stagene er lange i på den sveiste modellen da det gir en bedre fordeling av kreftene over alle elementene før de "ankommer" de kritiske områdene.

Det er på de støpte modellene blitt brukt en avstandspåsetting av krefter og moment, en hendig liten detalj som ble oppdaget sent i analyseprosessen. Denne metoden gjør at en kan sette på kreftene og momentene på en gitt avstand for så å la programmet fordele disse inn mot de aktuelle områdene. En får med andre ord en virtuell forlenging av tverrsnittene uten at disse virtuelle tverrsnittene påvirker antallet med noder og elementer. En får da en mye mindre modell å analysere og en får mindre feil i element inndelingen da antallet elementer blir betydelig redusert. Tiden analysen tar blir betydelig mindre noe som er en stor fordel på de ikke-lineære analysene.

## 2.4 METODEVALG

Da dette problemet er særdeles vanskelig å kunne regne ut på vanlige manuelle metoder er det kun tatt utgangspunkt i elementmetoden med sammenligninger av forskjellige fremgangsmetoder for å kunne beskrive resultatet på best mulig måte.

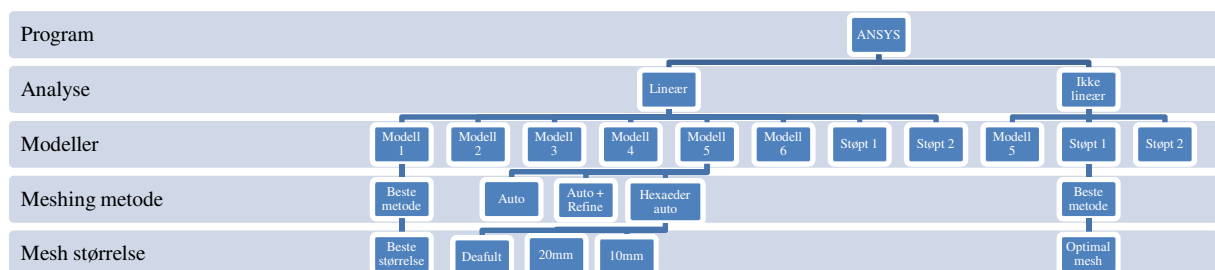
Fremgangsmetoden som er brukt som utgangspunkt for analysen er den som er beskrevet i (R.D. Cook, 2001).



Figur 1 Anbefalt fremgangsmetode, R.D. Cook m.fl. 2001

Det er Figur 1 (hentet fra (R.D. Cook, 2001)) som er utgangspunktet for fremgangsmetoden for å finne den beste strukturelle løsningen av problemstillingen.

Figur 2 er en oversikt over hvor mange geometriske modeller som er brukte i oppgaven, Den viser også hvordan det er gått frem i oppgaven for å finne den element inndelingen som gir mest korrekte resultat.



Figur 2 Fremgangsmetode for element inndelings valg

For modellene 1 til 4 og modell 6 er det kun kjørt lineære analyser med den mest hensiktsmessig brukbare element inndelingen som en kom frem til ved forskjellige analyser av modell 5. Den samme fremgangsmåten er brukt på de støpte knutepunktene med utgangspunkt i støpt knutepunkt 1.

Det er i oppgaven lagt vekt på de forskjellige resultatverdiene og elementkontrollene for diskutere hva som er den mest optimale løsningen på den matematiske modellen. Det henvises da til vedleggene og resultatdelen av oppgaven for en mer detaljert beskrivelse av fremgangsmetodene og valgene.

Det er brukt flere forskjellige elementinndelinger for å komme frem til resultatene på. For å begrense antall analyser så er det følgende element inndelinger som det tatt utgangspunkt i:

Navn	Metode	Maksimal størrelse
MM1	Automatic	Default
MM2	Automatic	20mm
MM3	Automatic	10mm
MM4	Aut + Ref	Default
MM5	Aut + Ref	20mm
MM6	Aut Hex	Default
MM7	Aut Hex	20mm
MM1C	Automatic	Default, relevance 100
MM2C	Automatic	20mm, relevance 100

Tabell 2 Element inndeling oversikt

Det skal merkes at etter hvert som det ble brukt mer tid på programmet og analysene ble det oppdaget en ekstra funksjon i programmet som gav bedre element inndeling, relevance 100. Denne metoden ble derfor brukt på de siste analysene og da spesielt på de ikke-lineære analysene som ble kjørt, dette fordi en oppnådde gode resultater med et lavere antall elementer og noder sammenlignet med de andre tilsvarende analysene.

## 2.5 EKSPERIMENTELLE SIMULERINGER

For å løse denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i bruk av det avanserte elementmetode programmet ANSYS. Grunnen til at akkurat dette programmet ble valgt var at programmet dekker både lineære og ikke-lineære analyser av avanserte strukturer, og det var mulig å få hjelp hos BGR dersom jeg skulle støte på større problemer.

### 2.5.1 OM ANSYS

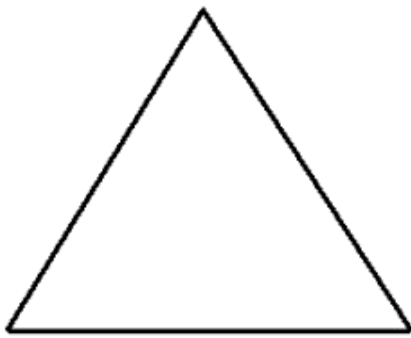
Programmet ANSYS er bygd opp med elementmetoden som beregningsmetode, det finnes da flere metoder å løse problemer på og de som er brukt i oppgaven følger det forklaringer på under.

Programmet dekker alt ifra ikke lineære væskestrømninger via dynamiske utmattingsanalyser til enkle statiske analyser. Programmet har mange forskjellige elementer med spesialtilpassede egenskaper for den gitte analysen som skal vurderes. Programmet er meget godt til å kunne gjøre små forandringer i, da med tanke på geometriske utforminger. Det er lite brukervennlig når det kommer til forandringer og oppbygging av avanserte geometrier. Forandringer av krefter etter at en analyse er kjørt er også relativt enkelt, derimot store forandringer av element inndelingen er komplisert.

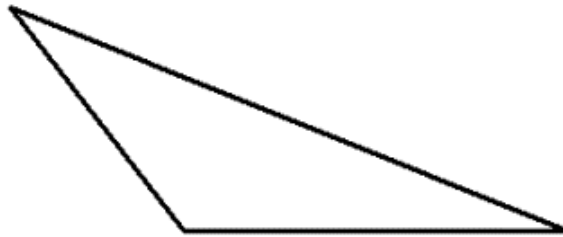
### 2.5.2 SKJEVHET

Skjevhetene er en av de primære kvalitets kontrollene for elementnettene. Skjevheten forklarer hvor nært formen på elementene er til det ideelle, det vil si hvor likesidet og likevinklet de er.

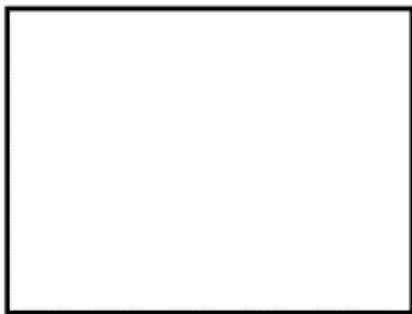
Ifølge programmet, vil en skjevhetsverdi på 0 tilsvare et likesidet og likevinklet element som er helt optimalt. Derimot vil en skjevhetsverdi på 1 indikere at elementet er helt deformert og resultatene som kommer ut ikke er brukendes.



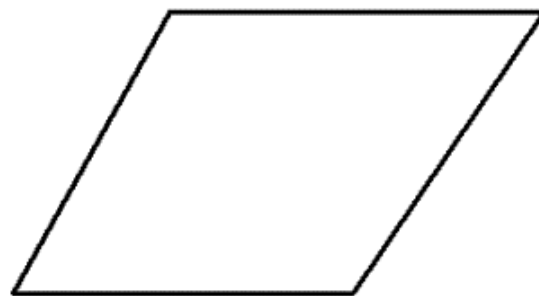
Equilateral Triangle



Highly Skewed Triangle



Equiangular Quad



Highly Skewed Quad

Bilde 001 fra ANSYS 12.1 Help

Dataprogrammet deler inn skjevheten i følgende områder:

Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 — <1	bad (sliver)
0.75 — 0.9	poor
0.5 — 0.75	fair
0.25 — 0.5	good
>0 — 0.25	excellent
0	equilateral

Table 001 fra ANSYS 12.1 Help



Der er to metoder for å måle skjevheten til elementene, den ene er basert på element sidestørrelsene og den andre på vinklene:

- Likesidet volumbasert skjevhet:

Her er skjevheten definert som:

$$\text{Skjevhet} = \frac{\text{Optimal element størrelse} - \text{Element størrelse}}{\text{Optimal element størrelse}}$$

der, optimal element størrelse er størrelsen av et likesidet element med lik sirkelradius.

Tabellen over forklarer en generell veiledning til hva som er god skjevhet, men det skal merkes at det er forskjell på 2D og 3D element skjevhet. For å oppnå et kvalitets elementnett i 2D er bør skjevheten være under 0.1, mens for 3D er det tilstrekkelig med en skjevhet under 0.4.

- Normalisert likesidet skjevhet:

I den normaliserte vinkel avvik metoden, skjevheten er definert som:

$$\text{Skjevhet} = \max \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right]$$

Der:

$\theta_{max}$  = største vinkelen i overflaten av elementet

$\theta_{min}$  = minste vinkel i overflaten av elementet

$\theta_e$  = vinkel for et likesidet element (60 grader for et triangel, 90 for firkant)

For et tetraeder vil element skjevheten være den maksimale skjevheten for den verste siden. Et ideelt tetraeder er slik at alle sidene på tetraederet er likesidet (og likevinklet) og grunnflaten er trekantet. De veiledende verdiene i tabellen over gjelder også for normalisert likesidet skjevhet også.

De områdene der den mest kritiske skjevheten oppstår kommer frem av feilvurderingsresultatene i analysen, det er derfor viktig å påse at en får så få feil som mulig. En kan da ved å sammenligne verdiene på feilene og størrelsen på skjevheten komme frem til om element modellen er god eller ikke.

### 2.5.3 VRIDNINGS FAKTOR FOR 3D ELEMENTER

Vridnings faktoren for 3D elementer er kalkulert ut ifra et firkantet skall element uten reell tykkelse. Enhver kube som har helt flate sider har en vridningsfaktor på 0. Mer detaljert beskrivelse av vridningsfaktoren finnes i ANSYS 12.1 Help.

Eksempel på vridningsfaktorer for et firkantelement



Figur 3 Vridningsfaktorer

Som en ser ifra figuren vil en vridning på 22,5 grader gi en vridningsfaktor på 0.2 og en vridning på 45 grader gi en faktor på 0.4.

## 2.5.4 GJENNOMSNISSLIG OG IKKE GJENNOMSNISSLIG KONTURPLOTT RESULTAT

(”Averaged vs Unaveraged Countur Results”)

Normalt er konturplott resultatene i ANSYS presentert som gjennomsnittet av noderesultatene fra alle elementene som virker på den enkelte noden. Det å lage en gjennomsnittlig konturplott vil si at verdien fra nodene i elementene blir utjevnet i hjørnenodene, slik at konturplotten er sammenhengende over elementgrensen. For høyere ordens elementer er midtsidenode resultatene gjennomsnittet av de rundtomliggende nodene som virker inn på den spesifikke noden.

Noen konturplott resultater kan også beskrives som ikke gjennomsnittlige resultater, det vil da si at konturplottene varierer diskontinuerlig over elementgrensene. Denne typen for konturplott er kalkulert ut ifra lineær interpolasjon innefor hvert element og er ikke påvirket av rundtomliggende elementer. Diskontinuiteten mellom hvert element er da en indikasjon på hvor stor gradienten i konturplotten er. Resultatene som inneholder ikke gjennomsnittlige konturplott kan brukes til å vurdere trykk og strekk, men er ikke gyldig for frihetsgradresultater som forskyving.

Der er flere valg i ANSYS for å kunne se på forskjellige løsningsmetoder og feilkilder, disse er som følger:

- Unaveraged: Viser ikke gjennomsnittlig resultat som forklart over.
- Averaged: Viser de gjennomsnittlige resultatene som forklart over.
- Nodal difference: Kalkulerer den totale forskjellen mellom de ikke gjennomsnittlige resultatene for alle noder som deler samme partikulære node.
- Nodal fracture: Kalkulerer forholdet mellom ”Nodal difference” og Nodal Average.
- Elemental difference: Kalkulerer den maksimale forskjellen mellom de ikke gjennomsnittlige (Unaveraged) resultatene for alle noder i elementet, inklusiv midtsidenoder.
- Elemental fraction: Kalkulerer forholdet mellom ”Elemental difference” og ”Elemental Mean” (se neste punkt).
- Elemental Mean: Kalkulerer gjennomsnittlig element resultat fra gjennomsnittlige resultat (Averaged).

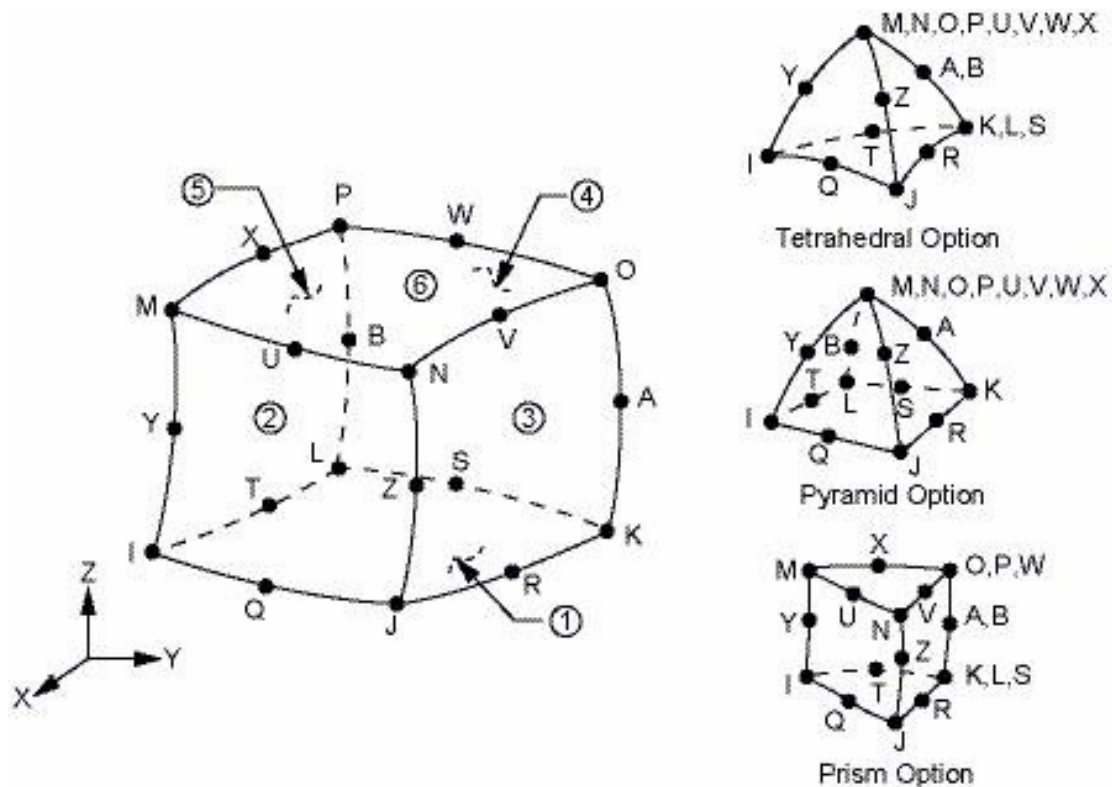
Da det i denne oppgaven er vurdert flere metoder for å komme frem til en mest korrekt løsning samt at det er vurdert både strekkspenninger, deformasjoner og skjærkrefter, er det i lagt vekt på den gjennomsnittlige konturplott verdien.

## 2.6 ELEMENT TEORI

Det er i oppgaven tatt utgangspunkt i to typer elementer for inndeling av strukturen. Det ene er et 10-noders tetraeder element, det andre et 20 noders heksaeder element. I ANSYS har disse henholdsvis navnene Solid186 for heksaeder elementet, og Solid187 for tetraederet.

### 2.6.1 SOLID186

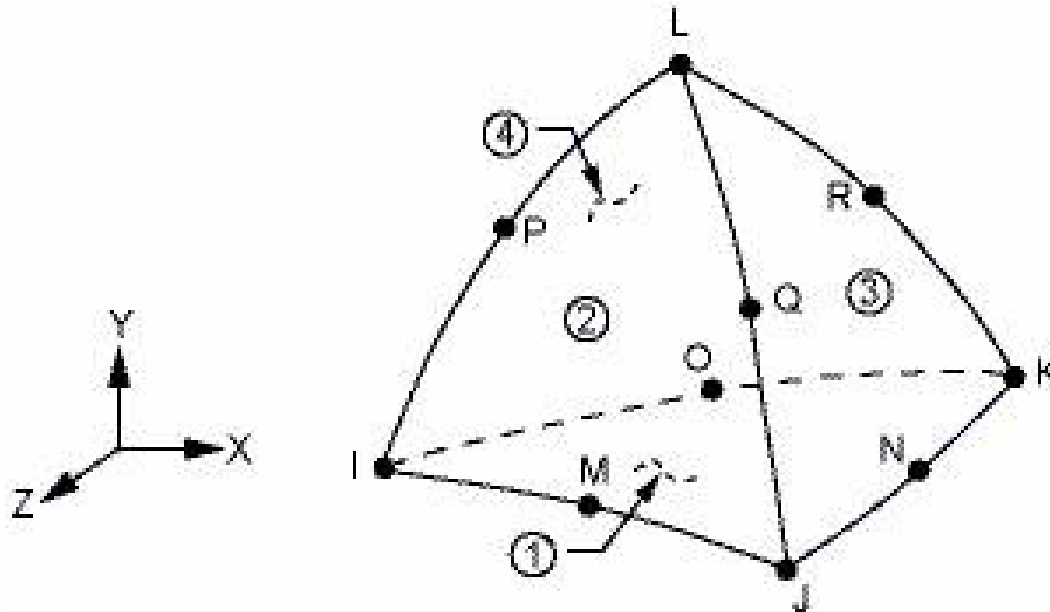
Solid186 er et høyere ordens 3D 20-Noders faststoff element som er utviklet for å få frem best mulig resultat i form av forskyvninger og store trykk og strekk spenninger. Elementet er godt egnet for bruk på både elastisk og plastisk analyse av statiske og dynamiske analyser i homogene materialer enten det er myke materialer eller stive materialer. Elementet kan forme andre elementer for bedre geometrisk tilpasning, som vist i Figur 4: Solid186 Geometri.



Figur 4: Solid186 Geometri

## 2.6.2 SOLID187

SOLID187 er et høyere ordens 3D 10 Noders element. Elementet er det beste elementet til å modellere irregulære strukturer med, da en ved mange nok elementer kan tilpasse enhver geometrisk form med stor nøyaktighet. Det er et meget godt element for lineær og ikke-lineær oppførsel, samt store forskyvinger.



Figur 5: SOLID187 Geometri

### 3 RESULTATER

Det er i oppgaven gått frem for å finne de forskjellige geometriske løsningene som tilfredsstill best utgangspunktet for problemet. Det er så gjort en kostnadsvurdering på de løsningene som det er valgt å gå videre med.

#### 3.1 ANALYSER

Denne delen av oppgaven er delt opp i flere underkategorier, dette for å skille mellom de forskjellige parametrene som er vurdert i oppgaven. Det gjelder seg da om det er sveist eller støpt knutepunkt, om det er kjørt lineær eller ikke-lineær analyser på de og hvilken elementinndeling er som er brukt.

I tabellene som er presenterte under er det brukt noen benevninger som her er forklart: Med Navn menes navnet på modellen. Med metode menes navnet på element inndelingsmetoden som er brukt. Skjevhet og +/- forklarer skjevheten til elementene og standardavviket. Noder viser antall noder i den gitte modellen. Elementer viser antall elementer i modellen. MPa viser høyeste strekkfasthet i den gitte modellen. Error beskriver feilverdien i modellen.

Deformasjon er den høyeste deformasjonsverdien i den aktuelle modellen. Tøyning forklarer hvor stor den plastiske tøyningen i modellen er. Kraftøkning beskriver multiplikasjonsfaktoren som er brukt for å multiplisere det gitte lasttilfellet med for å øke kraftpåkjenningene for å finne kapasiteten til det gitte knutepunktet.

##### 3.1.1 LINEÆRE ANALYSER AV SVEISTE KNUTEPUNKTER

Det henvises til vedlegg A for mer detaljert oversikt over resultatene for de lineære analysene av de sveiste knutepunktene.

Det er på de sveiste konstruksjonene kjørt flere analyser for å finne det mest korrekte resultatet, disse analysene og modellene er listet opp i tabellen under.

Navn	Metode	Skjevhet	+/-	Noder	Elemente	Mpa	Error	Deformasjon
W1	MM2	0,2948	0,138	878 900	490 965	503	x	5,54
W2	MM2	0,2932	0,1373	930 052	515 652	392	x	5,4
W3	MM2	0,4554	0,2098	288 517	145 020	205	x	5,44
W4	MM2	0,4667	0,2045	243 951	122 881	492	x	5,35
W6	MM2	0,4794	0,1986	298 986	151 965	1218	x	6,04
W5	MM1	0,6432	0,1777	68 308	34 313	229	1431	2,82
W5	MM2	0,3012	0,1416	957 736	534 305	247	73	2,82
W5	MM3	0,3741	0,1792	4 821 787	2 898 389	307	19	2,82
W5	MM4	0,4649	0,2078	685 496	451 588	290	244	2,82
W5	MM5	0,3098	0,1631	2 621 423	1 679 250	308	39	2,82
W5	MM6	0,8028	0,1613	74 748	27 493	422	7112	2,84
W5	MM7	0,4233	0,2977	1 133 593	279 978	251	133	2,82

Tabell 3 Lineære analyser av sveiste knutepunkter

Modell W1 har skråstag som kommer rett ned på I-bjelkene samt forsterkningsplater som går i topp og bunn av I-bjelkene hele veien rundt hovedrøret. Det at skråstagene kommer rett ned på I-bjelkene gjør at en får spenningskonsentrasjoner i kontaktområdene. Dette gir ut ifra analyse en spenning på 503MPa, noe som er langt over kravet på 308,7MPa og

konstruksjonen holder ikke det gitte lasttilfellet. Det henvises til Vedlegg A-1 for mer detaljert beskrivelse.

På modell W2 er det forsøkt å forskyve eksentrisitetpunktet for skråstagene. Det skal merkes at dette ikke er en korrekt analyse da kreftene som er brukte i modellen er de samme som for de andre analysene med lik eksentrisitetpunkt. En får uansett en spenning på 392MPa, noe som fortsatt er langt over kravet. Spenningene konsentrerte seg om hjørnene til firkant-rørene der de kom inn på hovedrøret. Det henvises til Vedlegg A-2 for mer detaljert beskrivelse.

Modell W3 er helt lik modell W2 bare at skråstagene er byttet ut med rør. Dette gav mindre spenningskonsentrasjoner i kontaktområdet mellom skråstagene og hovedrøret. Den høyeste spenningen i konstruksjonen ble bare 205MPa, noe som er godt under kravet. Det er også i denne modellen brukt samme krefter som for tidligere modeller. Feil inngangsverdier gir feil resultater som ikke kan brukes annet enn å si noe om hvordan en nye global analyse kan settes opp for å finne rette inngangsverdier på denne problemstillingen. Det henvises til Vedlegg A-3 for mer detaljert beskrivelse.

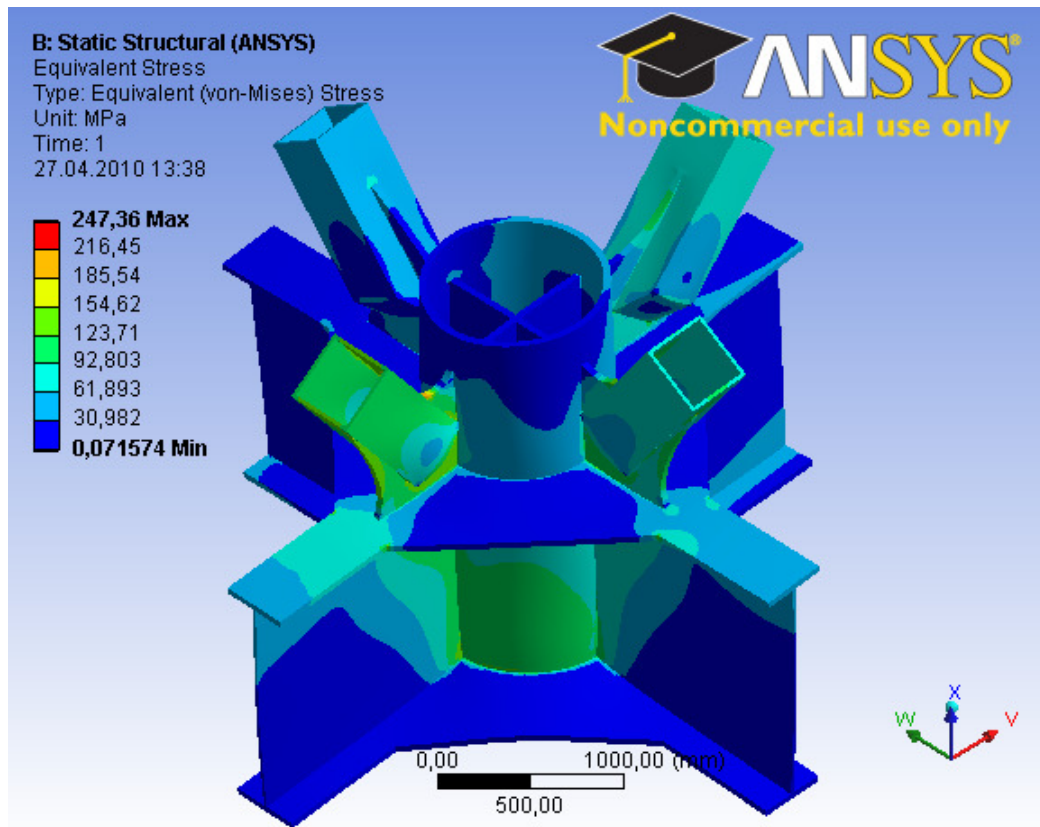
Modell W4 er den samme som modell W1 bare med rør i stedet for firkant-rør til skråstag. En fikk også her spenningskonsentrasjoner i kontaktområdet mellom skråstagene og I-bjelkene. Selv om spenningene i disse områdene kom opp i 492MPa er det vanskelig å si om resultatet er bedre eller dårligere enn for modell W1, da skjevheten i elementene i modell W4 er mye høyere enn i modell W1 der spenningene er høyere. Modellen er uansett ikke god nok da resultatet er langt høyere enn kravet. Det henvises til Vedlegg A-4 for mer detaljert beskrivelse.

I modell W6 er det brukt rør og gusset plater på skråstagene, samtidig er det lagt inn avstivere inne i hovedrøret. En får de høyeste spenningene i gussetplatene på 1218MPa, noe som er langt fra bra nok. Det henvises til Vedlegg A-5 for mer detaljert beskrivelse.

Modell W5 er resultatet ifra erfaringene med de foregående modellene, samtidig som ønsket ifra BGR var å bruke firkantrør til skråstag. Dette er derfor den mest modifiserte sveiste modellen sett i forhold til utgangspunktet. Denne modellen er også korrekt utformet med ulike vinkler på skråstagene (grunnet ulike gusset plater) samt en sammenfallende eksentrisitet for både I-bjelkene og skråstagene som er det som er kjørt i den globale analysen.

Som en ser av Tabell 3 over så fordeler spenningene i modell W5 seg alt etter kvaliteten til elementinndelingen mellom 229MPa og 308 MPa, det skal merkes at for Meshing Metode 6 (MM6) så er feilene i analysen så store at det er valgt å se vekk fra dette resultatet.

Resultatene havner innefor kravet på 308,7MPa og en kan dermed si at denne modellen holder i det gitte lasttilfellet. Deformasjonen er helt lik i alle analysene for denne modellen. De forskjellige elementinndelingsmetodene (MM1 – MM7) har store forskjeller i feilene, dette skyldes tettheten av elementene og hvor godt de klarer å etterligne den geometriske modellen uten å få store vridninger og skjevheter. En er fra Tabell 3 at MM2, MM3 og MM5 har lavest feil samt lavest skjevhet i seg, dette gjør at disse modellene er de tre med mest korrekte resultater.



Bilde 3-1 Eksempel, Spenningsfordeling lineær analyse, MM2, modell W5

Som en ser av spenningsbildet som er tatt med av modell W5 MM2 så får en de største spenningskonsentrasjonene i gusset platene og skråstagene.

For mer detaljert beskrivelse av valgene rund element inndeling i modell W5 vises det til Vedlegg A-6.



### 3.1.2 LINEÆRE ANALYSER AV STØPTE KNUTEPUNKTER

Det henvises til vedlegg B for mer detaljert oversikt over resultatene for de lineære analysene av de støpte knutepunktene.

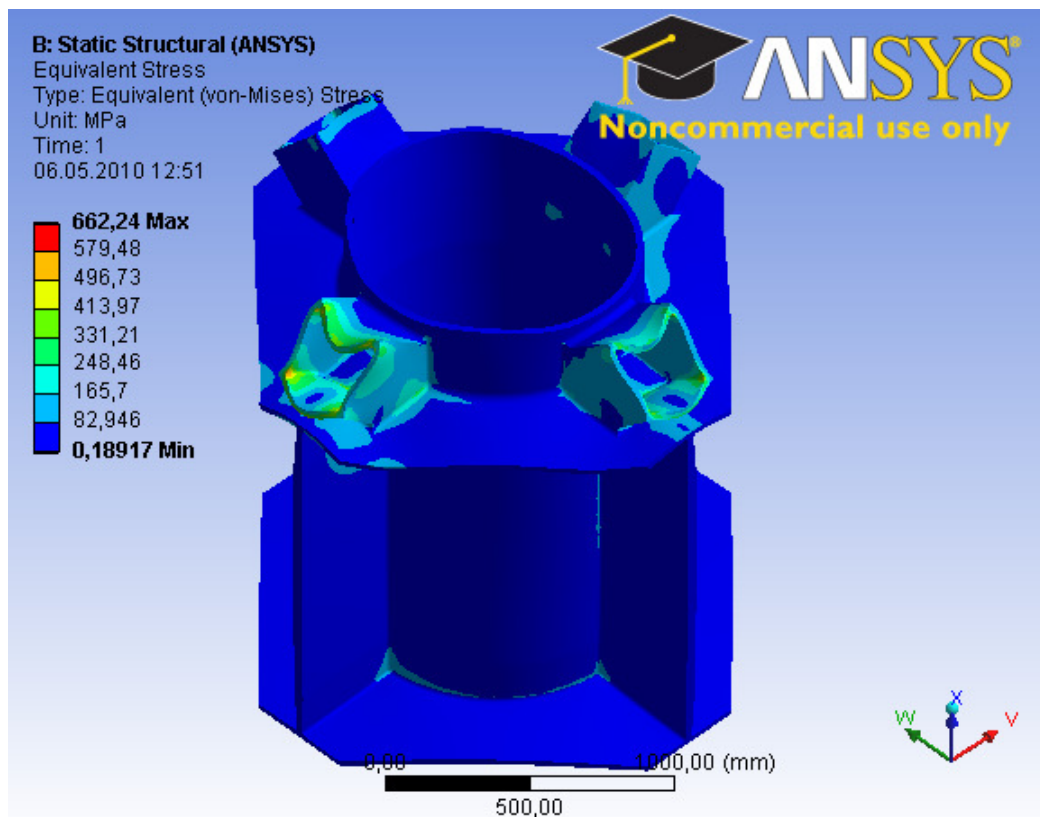
Navn	Metode	Skjevhet	+/-	Noder	Elemente	Mpa	Error	Deformasjon
C1	MM1	0,4947	0,2289	76 748	44 013	550	1150	2,37
C1	MM2	0,3114	0,1574	352 100	205 448	624	184	2,73
C1	MM4	0,2971	0,1539	859 514	545 555	662	16	2,77
C1	MM7	0,4174	0,2819	603 751	158 261	632	299	2,75
C2	MM2	0,311	0,1574	452 430	268 676	253	18	1,69

Tabell 4 Lineære analyser av støpte knutepunkter

For de støpte modellene ble det brukt kun noen av element inndelingsmetodene på de lineære analysene, dette på bakgrunn av erfaringene med de sveiste lineære analysene. Som en ser av Tabell 4 så er antallet noder og elementer langt lavere for de støpte modellene enn for de sveiste, dette skyldes at den geometriske modellen er langt mindre samt større tykkelser gjør at store elementer fordeler seg bedre i tverrsnittet.

Modell C har en spenning mellom 550MPa og 662MPa, noe som er langt over materialkravet for det støpte knutepunktet på 365,2MPa. Dette knutepunktet holder derfor ikke i den lineære analysen i det gitte lasttilfellet. For mer detaljert beskrivelse henvises det til Vedlegg B-1.

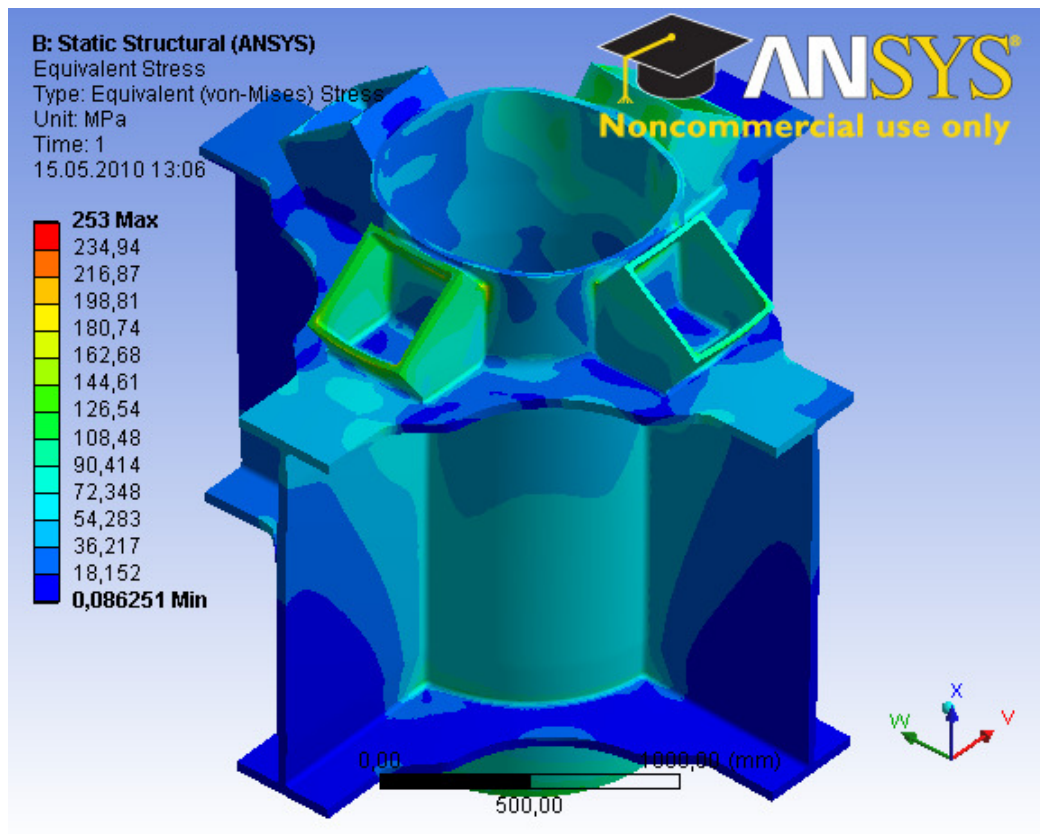
Det skal merkes at for modell C1 element inndeling MM1 så er skjevheten og feilene i modellen så store at det blir stor usikkerhet rundt resultatet. Det samme gjelder for MM7 der det er brukt heksaeder elementer. Heksaeder elementene er dårlige til å tilpasse seg de avrundede kurvaturene i modellen, og det blir derfor stor skjevhet i disse områdene.



Bilde 3-2 Eksempel: Spenningsbilde modell C1, MM4

Som en ser av spenningsbildet for modell C1 så er der store spenningskonsentrasjoner i områdene der skråstagene kommer inn på modellen.

For modell C2 ble det bare kjørt en lineær analyse på bakgrunn av erfaringene med de andre analysene, da av det første støpte og de sveiste knutepunktene. En fikk gode verdier på både skjevheten og feilvurderingen og resultatet var god innenfor kravet på 365,2MPa. For en mer detaljert beskrivelse av denne modellen henvises det til Vedlegg B-2.



Bilde 3-3 Spenningsbilde modell C2 lineær analyse, MM2

Som en ser ut fra spenningsbildet for modell C2 så fordeler spenningene seg over hele knutepunktet med en høyere konsentrasjon i områdene der skråstagene kommer inn.

### 3.1.3 IKKE-LINEÆRE ANALYSER AV SVEIST KNUTEPUNKT

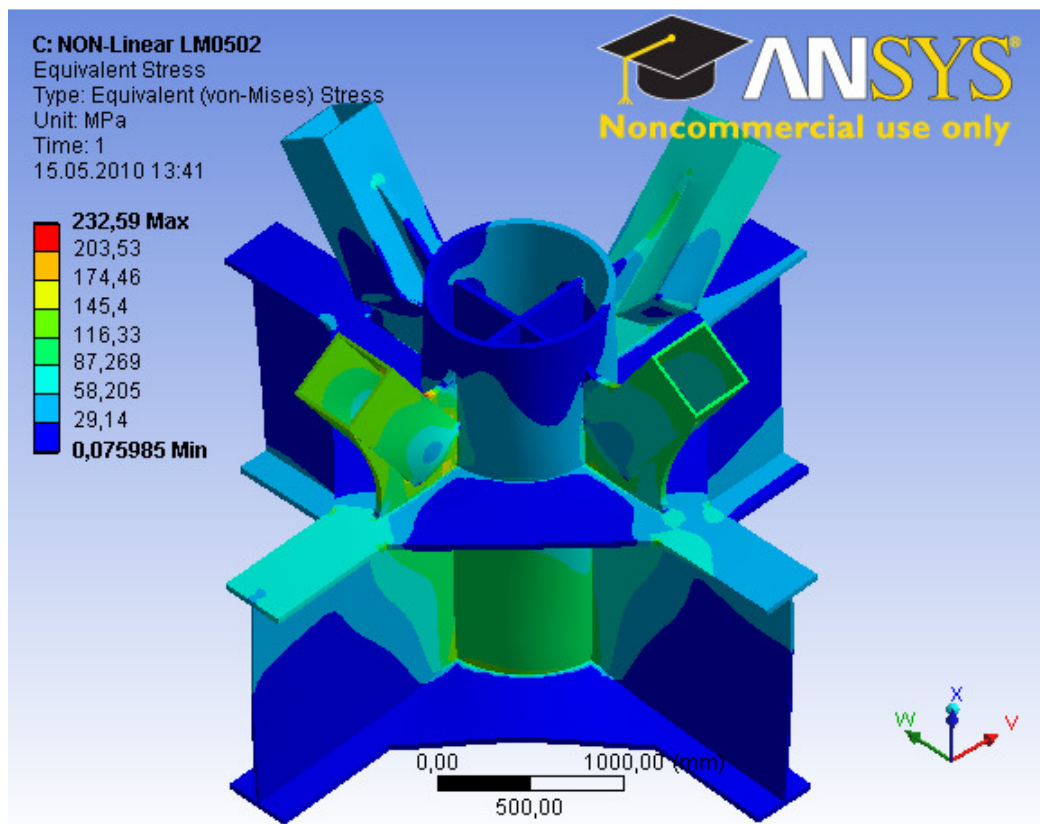
Det henvises til vedlegg C for mer detaljert oversikt over resultatene for de ikke-lineære analysene av det sveiste knutepunktet.

Navn	Metode	Skjevhet	+/-	Noder	Elementer	Mpa	Error	Deform	Tøyning	Kraftøkning
W5	MM2	0,3012	0,1416	957 736	534 305	232,6	65	2,82	0,0 %	1
W5	MM2	0,3012	0,1416	957 736	534 305	93032	x	x	x	2

Tabell 5 Resultat fra ikke-lineære analyser av modell W5

For kjøring av den ikke lineære analysen av et av de sveiste knutepunktene ble det tatt utgangspunkt i modell W5, og da med MM2 som utgangspunkt.

MM2 er valgt som utgangspunkt av flere grunner. Dette gjelder seg den lave skjevheten i elementene som gjør at en slipper en enorm økning i feilene i strukturen etter hvert som løsningene blir itererte. Det gjelder seg de lave verdiene i feilvurderingen for MM2, og at spennings verdien som har kommet frem i de lineære analysene har en akseptabel verdi. Sist men ikke minst er det antallet noder og elementer som har noe å si på tiden det tar å løse problemet, MM2 har mange noder og elementer men langt færre enn mange av de andre metodene. Samlet sett er derfor MM2 den mest anvendelige metoden for å løse det ikke-lineære problemet.



Bilde 3-4 Spenningsbilde, ikke-lineær analyse, modell W5, MM2

Som en ser fra spenningsbildet så oppnår en lavere spenning en ved den lineære analysen da resultatet i den ikke-lineære analysen er iterert flere ganger. En oppnår ingen plastisk tøyning da spenningene ikke overstiger flytgrensen på 355MPa.

Som en ser av Tabell 5 så får en ved påsetting av krefter tilsvarende det dobbelte av det gitte lasttilfellet så store spenninger at hele konstruksjonen kollapser.

### 3.1.4 IKKE-LINEÆRE ANALYSER AV STØPTE KNUTEPUNKTER

Det henvises til vedlegg D for mer detaljert oversikt over resultatene for de ikke-lineære analysene av de støpte knutepunktene.

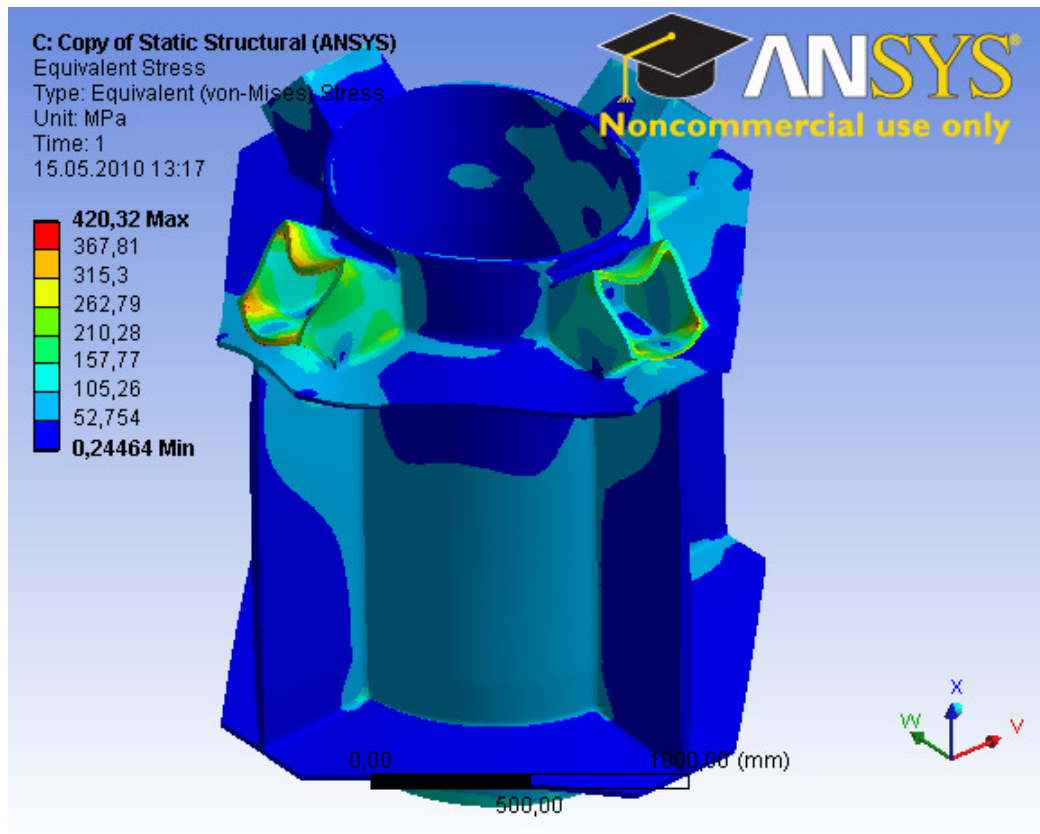
Navn	Metode	Skjevhet	+/-	Noder	Elementer	Mpa	Error	Deform	Tøyning	Kraftøkning
C1	MM1C	0,4947	0,2289	76 748	44 013	474	125	2,5	0,02 %	1
C1	MM2C	0,3114	0,1574	352 100	205 448	420	135	2,7	0,12 %	1
C2	MM1C	0,3872	0,19	127 029	73 148	215	97	1,7	0,00 %	1
C2	MM1C	0,3872	0,19	127 029	73 148	391	361	2,8	0,04 %	2
C2	MM1C	0,3872	0,19	127 029	73 148	476	783	4,2	0,09 %	3
C2	MM1C	0,3872	0,19	127 029	73 148	485	2685	15,16	9,14 %	4
C2	MM1C	0,3872	0,19	127 029	73 148	657	5659	91,5	33,72 %	5
C2	MM1C	0,3872	0,19	127 029	73 148	1397	30847	1057	137,7 %	10

**Tabell 6** Resultat av ikke-lineære analyser av støpte knutepunkt

Det ble på de ikke-lineære analysene her brukt mer nøyaktige elementinndelinger, da det ble oppdaget en ekstra funksjon som forklart i kapittel 2.4.

For det støpte knutepunktet C1 er det kjørt to analyser, dette fordi spenningene i de lineære analysene kom over flytgrensen. Siden det også var på modell C1 at de første ikke-lineære analysene ble kjørt viste en ikke hvor lang tid hver analyse ville ta, derfor to så ulike analyser av denne modellen. Det henvises til Vedlegg D-1 for mer detaljert beskrivelse av resultatene i denne modellen.

Resultatene ble som vist i Tabell 6, med tøyninger på henholdsvis 0,02% og 0,12%, noe som er innefor akseptabel verdi i henhold til (NORSOK-N-004, October 2004). Spenningene ble noe lavere for MM2C enn den andre da en fikk en bedre tilpassing av elementene til geometrien samtidig som skjevheten ble mye lavere. Det skal merkes at selv om feilvurderingene er temmelig like, så har skjevheten også stor innvirkning på modellen, noe som gjør at en får de store forskjellene i spenningsverdiene.

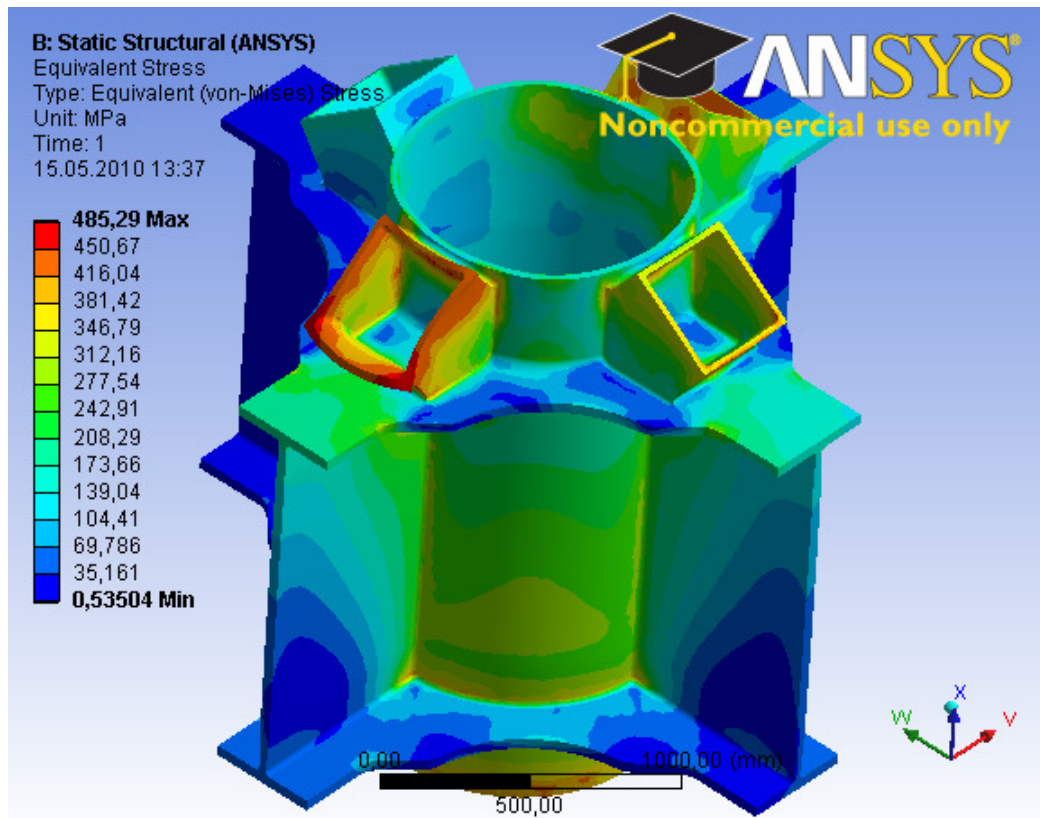


Bilde 3-5 Spenningsbilde støpt modell C1, ikke lineær analyse, MM2C

Som en ser av Bilde 3-5 så er spenningene konsentrert i området der skråstagsene kommer inn i knutepunktet.

For den støpte modellen C2 ble det kjørt flere forskjellige analyser for å finne den egentlige kapasiteten til dette knutepunktet. Som en ser ut ifra Tabell 6 så holder en seg innefor tøyingskravet til (NORSOK-N-004, October 2004) på 10%, selv om en bruker et lasttilfelle som er 4 ganger så stort som utgangspunktet. Det henvises til Vedlegg D-2 for mer detaljert beskrivelse av resultatene i denne modellen.

Analysene ble kjørt i følgende rekkefølge: 1x-, 2x-, 10x-, 5x-, 3x- og 4x-lasttilfellet for å finne ut hvor mye kapasitet som ligger i knutepunktet etter at det gikk over flytgrensen. Det skal merkes at resultatet i ifra analysen kan avvike ifra de realistiske resultatene da en får større feil i modellen etter hvert som kreftene øker. Det ble ikke kjørt noen finere inndeling av element nettet da disse ikke-lineære analysene tok lang tid å prosessere, da opp imot 3 dager på hver enkelt analyse.



Bilde 3-6 Spenningsbilde 4x lasttilfelle, ikke-lineær analyse, modell C1, MM1C

Som en ser fra spenningsbildet Bilde 3-6 så får en i dette knutepunktet de spenningskonsentrasjoner både i skråstagene, i overgangen mellom I-bjelkene og hovedrøre, og i opplageret i bunn av hovedrøret. Samtidig oppnår en god spenningsfordeling over resten av knutepunktet.

## 3.2 KOSTNADSESTIMERINGER

Det er kjørt noen kostnadsestimeringer på et sveist knutepunkt og et støpt knutepunkt. Det er da sett på både hvor mye materiale som går med, hvor mange timer som må brukes på arbeidet og hva disse kostnadene blir.

Det er her brukte mål i fra det sveiste knutepunktet som tilsvarer målene fra det støpte knutepunktet. Dette for å kunne modellene skal kunne være sammenlignbare med tanke på prisen.

### 3.2.1 KOSTNAD SVEIST KNUTEPUNKT

Det er valgt å gå videre på den sveiste modellen W5 for kostnadsestimering. For de delene som skal sveises er det lagt til grunn en materialpris på 11NOK/kg for plater og 25NOK/kg for hovedrøret, timeprisen og antall timer som legges til grunn er ikke tatt med i estimeringen grunnet konkurransemessige årsaker.

Det er to metoder å bygge opp det sveiste knutepunktet som er valgt på. Den ene metoden er å sveise inn flensene fra I-bjelkene rett inn på røret, den andre metoden er å sveise flensene inn på ferdige bunn og topp plater. Da disse platene må skjæres ut ifra et grunnmateriale, vil en få en forskjell i produksjonskostnaden i form av arbeidstimer.

Metode 1				
Delenamn	Antall	Vekt, kg	NOK/kg	Kostnad
Senter rør	1	1 860	25	kr 46 500,00
Kryssplate	1	114	11	kr 1 254,00
Kryssplate 2	2	110	11	kr 1 210,00
I-bjelke Flens	8	1 024	11	kr 11 264,00
I-bjelke Steg	4	908	11	kr 9 988,00
Trekantplate	8	1 280	11	kr 14 080,00
Gusset plate	4	528	11	kr 5 808,00
Firkantrør	4	752	11	kr 8 272,00
Tetteplater	4	48	11	kr 528,00
<b>Total Materialkost</b>		<b>6 624 kg</b>		<b>kr 98 904,00</b>
Metode 2				
Delenamn	Antall	Vekt, kg	NOK/kg	Kostnad
Senter rør	1	1 860	25	kr 46 500,00
Kryssplate	1	114	11	kr 1 254,00
Kryssplate 2	2	110	11	kr 1 210,00
I-bjelke Flens	8	512	11	kr 5 632,00
I-bjelke Steg	4	908	11	kr 9 988,00
Topp/bunnplate	2	2 000	11	kr 22 000,00
Gusset plate	4	528	11	kr 5 808,00
Firkantrør	4	752	11	kr 8 272,00
Tetteplater	4	48	11	kr 528,00
<b>Total Materialkost</b>		<b>6 832 kg</b>		<b>kr 101 192,00</b>

Tabell 7 Kostnadsdel 1 av sveist knutepunkt



Timekostnad per knutepunkt		
Metode 1	kr	227 250,00
Metode 2	kr	230 400,00

Total kostnad per knutepunkt		
Metode 1	kr	326 154,00
Metode 2	kr	331 592,00

**Kostnad ved bygging av 1 substasjon**

Metode 1	kr	1 304 616,00
Metode 2	kr	1 326 368,00

**Kostnad ved bygging av 10 substasjoner**

Metode 1	kr	13 046 160,00
Metode 2	kr	13 263 680,00

Tabell 8 Kostnadsdel 2 av sveist knutepunkt

Det viser seg at det ikke er store forskjellene i kostnadene på hvilke metode en bruker når en sveiser sammen knutepunktene om en lager få knutepunkt, men noen kroner er det.

### 3.2.2 KOSTNAD STØPT KNUTEPUNKT

Når det gjelder det støpte knutepunktet er det lagt til grunn en veiledende pris fra leverandøren angående kiloprisen for et ferdigstilt produkt. Denne verdien er bare veiledende da prisen vil variere i størrelse etter hvor mye som skal produseres, hvordan formen på støpen er, hva som er den gjeldende skrapstålprisen.

Et forslag til løsning av knutepunktet er å dele knutepunktet inn i tre deler, to deler støpt og en del bygd. En vil da kunne samordne styrken ifra det støpte knutepunktet i de kritiske områdene og den relativt lave kostnaden ifra en bygd konstruksjon.

<b>Helstøpt knutepunkt</b>			
	<b>Vekt i kg</b>	<b>NOK/kg</b>	<b>Kostnad</b>
	7081,5	kr 80,00	kr 566 520,00
<b>Delstøpt knutepunkt 25,4mm rør, 20mm plater</b>			
	<b>Vekt kg</b>	<b>NOK/kg</b>	<b>Kostnad</b>
<b>Nedre del</b>	1881,1	kr 80,00	kr 150 488,00
<b>Øvre del</b>	2130,9	kr 80,00	kr 170 472,00
<b>Plater</b>	480,0	kr 11,00	kr 5 279,72
<b>Hovedrør</b>	682,2	kr 25,00	kr 17 055,48
<b>Arbeidskostnad</b>			kr 108 000,00
<b>Totalt</b>			kr 451 295,20
<b>Kostnad ved bygging av 1 substasjon</b>			
Helstøpt	kr 2 266 080,00		
Delstøpt	kr 1 805 180,80		
<b>Kostnad ved bygging av 10 substasjoner</b>			
Helstøpt	kr 22 660 800,00		
Delstøpt	kr 18 051 807,96		

Tabell 9 Kostnad støpt knutepunkt

Det å dele knutepunktet inn i 3 deler gjør at kostnadene som vist i tabellen blir over 100 000,- NOK lavere per knutepunkt.

Ser en på den veiledende pris besparelsen mellom de to støpte løsningene så sparer en ved bygging av 10 substasjoner over 4,5 mill NOK ved å gå for det delstøpte knutepunktet sett i forhold til det helstøpte.

## 4 DISKUSJON

Det knutepunktet som er vurdert i denne oppgaven er en kritisk del av strukturen, det er derfor lagt inn sikkerhetsfaktorer både i de påsette kreftene og materialet. Når det gjelder kreftene så er disse tatt ut ifra et enkelt lasttilfelle i den globale analysen, da som verste mulige kombinasjon. Materialfaktoren er brukte kun i de lineære analysene da materialet ikke vil oppnå en tilstand der det begynner å flyte i de plastiske analysene før etter flytgrensen er nådd.

For modell W2 og W3 er eksentrisitets punktet for skråstagene og for I-bjelkene på forskjellige plasser i konstruksjonen i forhold til for de andre analysene. Sett ut ifra analysene kan det virke som om disse modellene er å foretrekke foran de modellene der skråstagene kommer inn mot I-bjelken, da disse gir laveste spenninger. Men da det ikke er kjørt andre globale lastpåkjenning analyser enn der en har full last på alle stagene samtidig, vil differansen i eksentrisiteten mellom skråstagene og I-bjelkene ved en analyse med ulik lastpåkjenning kunne gi store spenninger som kan føre til brudd. Dette kan eksempelvis ved et annet lasttilfelle gi et stort moment i knutepunktet som kan føre til større spenninger enn det som kommer frem av disse analysene, konsekvensen er at knutepunktet vil kunne kollapse og dermed hele plattformen. Det skal også merkes at kreftene som er brukte på disse modellene er de samme som for de andre modellen, men i en global analyse der en hever eksentrisitetspunktet for skråstagene så vil vinkelen på de utgående stagene bli noe lavere og en vil få en større trykk-kraft inn mot hovedrøret. Derfor er resultatene fra disse modellene ikke realistiske og er ikke med videre i prosessen for kostnadsvurdering. Dersom det velges fra utbyggers side å bruke denne geometriske utformingen bør det kjøres flere forskjellige globale og lokale analyser, inkludert utmattings analyse, med flere ulike last tilfeller. En bør da være observant på at ved en flatere vinkel vil en få en større trykk effekt inn på røret enn det som kommer frem i denne oppgaven.

Den store forskjellen i geometrien mellom det støpte og det sveiste knutepunktet skyldes at det ikke er støpeteknisk mulig å lage et så stort knutepunkt uten at det blir så massivt som det blir. Dette viser tydelig igjen på analysene som er kjørt da dette knutepunktet tåler flere ganger kraftpåkjenningene fra lasttilfellet.

En ting som leseren kanskje vil se på som litt rart er valget av tetraeder element fremfor heksaeder element på analysene. Dette sammenfaller med tidsbruken for element inndelingen samt at den komplekse geometrien gjør at ved valg av en enkel element type for hele strukturen så vil tetraeder elementene fylle bedre ut i avrundinger og kurvaturer enn heksaeder elementene. Heksaeder elementene er ikke like gode til å forme seg til de runde formene på både hovedrøret og gusset platene. Skjevheten i elementene ble mye større i de kritiske områdene ved bruk av heksaeder elementer, noe som gav større feil i modellene.

Elementinndelingen er valgt ut ifra hvilke resultater som gav mest nøyaktige verdier, samt en kontroll opp imot nøyaktigheten til de forskjellige elementene. At der er så mange elementer i de områdene med lave spenninger skyldes ganske enkelt at det tar mindre tid for programmet å velge en jevn størrelse på elementene over hele strukturen enn det tar å manuelt gå inn å forandre på størrelsen. Det å dele inn de forskjellige områdene i forskjellige elementstørrelser ville ta særdeles lang tid, samtidig som en ville kunne risikere å få områder i overgangen mellom store og små elementer som gav en meget dårlig spenningsfordeling. Da det ikke tar

noe særlig lang tid å prosessere de lineære analysene på den datamaskinen som ble brukt, ble det valgt en fremgang der det kunne kjøres flest mulig analyser på kortest mulig tid for sammenligning. Det skal bemerkes at studenten er klar over at det ville vert fortrinnsmessig om det i de store flatene hadde hatt færre elementer, da dette ville gitt en kortere prosesseringstid.

Det er også flere analysemetoder som burde vert kontrollert men grunnet tiden det har tatt å lære seg programmet har ikke dette blitt gjort. Eksempelvis er utgreiinger av flere metoder med heksaeder elementinndelinger noe som burde vert med. Dette ble nedprioritert da det å lære seg programmet og få kjørt flest forskjellige geometriske løsninger hadde førsteprioritet.

Det er i kostnadsestimeringen tatt utgangspunkt i mål fra den sveiste konstruksjonen som er like de som kommer fra den støpte konstruksjonen, dette for at det skal være reelt å sammenligne de forskjellige løsningene.

Det å løse en så avansert problemstilling som er gjort i oppgaven her har vert tidkrevende og resurskrevende. Det har tatt meget lang tid til å lære seg programmet og dette har gått noe ut over kvaliteten til analysene. Det burde vert sett på flere løsninger for støpte knutepunktet da dette ble overdimensjonert og dermed fikk en høyere kostnad enn ønskelig. Ideen med å bruke en delstøpt løsning ble ikke vurdert før etter at kostnadsestimeringen på de andre løsningene ble gjennomført, da det ble oppdaget store prisforskjeller i de forskjellige løsningene. På dette tidspunktet var lisensen for dataprogrammet utgått og kun enkle postprosesseringer var mulig å gjennomføre på modellene.

Ser en direkte på tallene som kommer frem ifra kostnadsestimeringen er det sveiste knutepunktet mye billigere enn det støpte, mens en på analysene så er det støpte knutepunktet mye kraftigere enn det sveiste. Store deler av vekten i det støpte knutepunktet kommer som følger av at det er støpeteknisk vanskelig å forme et så stort knutepunkt med så store flater uten å øke tykkelsen på tverrsnittet. Det ble derfor tatt med en enkel kostnadsvurdering på et annet alternativ til knutepunktsløsning der en deler knutepunktet inn i 3 deler, 2 støpte og en bygd (sveist).

Da det i kostnadsanalysen for det delstøpte knutepunktet er brukt de geometriske bitene fra det helstøpte knutepunktet, som ikke er tilpasset denne løsningen, vil den egentlige vekten på de to støpte delene bli en del mindre enn vist i kostnadsestimeringen. Denne vektreduksjonen vil komme som følge av at det blir støpeteknisk lettere å støpe de mindre delene enn hele det store knutepunktet, samt vil de tilrettelagte støpefugene også gi en vektreduksjon. Så den prisen som kommer frem i Tabell 9 vil ved en detaljert analyse bli mye lavere, samtidig som en vil få et knutepunkt med meget høy styrke.

## 5 KONKLUSJON

Det er på analysesiden tatt med i vedleggene hvordan det er gått frem for hver enkelt analyse for å finne resultatene, det er derimot ikke tatt med alle resultatene da det ble sett på flere resultater metoder enn de som er presenterte. Dette ble ikke tatt med for å begrense innholdet i rapporten og vedleggene da de neglisjerte resultatene ikke var dimensjonerende (eksempelvis skjær kreftene).

For det støpte knutepunktet som er valgt, modell C2, er det kjørt flere analyser for å finne kapasiteten som ble ca 4 ganger lasttilfellet. Det ble forsøkt å redusere vekten i knutepunktet i geometrimodellen, men dette var av de støpetekniske årsakene ikke så enkelt å få til. Dette gjør at dette knutepunktet er den sterkeste løsningen for den gitte problemstillingen, men samtidig den dyreste. Da kostnadene for et offshore transformatoranlegg er den drivende faktoren er det ikke kostnadmessig en god løsning å bruke et helstøpt knutepunkt som dette.

Den ikke-lineære analysen av det sveiste knutepunktet viser at ikke noen deler av den komplekse geometrien går over i plastisk flyt. Dette tyder på at knutepunktet har en kapasitet som tåler mer enn det gitte lasttilfellet i oppgaven. Grunnet begrenset tid for tilgang til dataprogrammet har det ikke vært kjørt flere analyser for å finne den eksakte begrensingen i det sveiste knutepunktet, men en kan si fra de analysene som er kjørt at kapasiteten ligger over lasttilfellet, men under 2 ganger lasttilfellet. Dette er dermed en løsning som tilfredsstillende de kravene standardene stiller samtidig som knutepunktet ikke er overdimensjonert. Dette er den billigste løsningen som tilfredsstillende det aktuelle lasttilfellet.

Det som kanskje er den beste løsningen er det delstøpte knutepunktet da en tar det relativt lave kostnadsnivået fra er bygd konstruksjonsdel og setter dette sammen med to andre, noe dyrere men mye sterkere, støpte deler. Et slikt knutepunkt kan derfor serieproduseres med støpte deler som er støptekniske relativt enkle å produsere, dette gjør at en får ned kostnadene for produksjon av støpte deler og knutepunktet blir billigere i sin helhet. Dette vil gi et knutepunkt som holder lastpåkjenningene med god margin samtidig som det kan brukes på flere design da vinkelen på de innkommende skråtagene kan forandres uten at det får noen stor effekt på styrken i knutepunktet. Denne løsningen ble ikke analysert i analyse delen av oppgaven og en kan dermed ikke si noe håndfast om hvor sterk denne løsningen egentlig er.

Alternativt kan det kjøres nye analyser av det delstøpte knutepunktet for å finne en bedre løsning med et sterkere knutepunkt samt en ny mer korrekt kostnadsvurdering.

Det kan også vurderes å kjøre nye globale analyser der en ser på en løsning med ulike eksentrisitet i knutepunktet, dette gjør at en kan gå for en løsning med to knutepunkter oppå hverandre. Denne løsningen er vurdert i modell W2 og modell W3, men grunnet ikke reelle krefter ifra den globale analysen så er ikke disse resultatene brukbare.

Det anbefales derfor ut ifra de analysene som er kjørt i denne oppgaven at det brukes det sveiste knutepunktet modell W5 i en offshore transformatorstasjon som den som er vurdert i oppgaven, dette grunnet målet med å holde kostnadene så lave som mulig.

## 6 REFERANSER

**DNV-OS-B101. April 2009.** *Metallic Materials*. s.l. : Det Norske Veritas, April 2009.

**DNV-OS-C101. October 2008.** *Design Of Offshore Steel Structures*. s.l. : Det Norske Veritas, October 2008.

**DNV-OS-J101. October 2007.** *Design Of Offshore Wind Turbine Structures*. s.l. : Det Norske Veritas, October 2007.

**DNV-OS-J201. October 2009.** *Offshore Substations For Wind Farms*. s.l. : Det Norske Veritas, October 2009.

**NORSOK-M-120. November 2008.** *Material data sheets for structural steel*. s.l. : NORSOK Standard, November 2008.

**NORSOK-N-004. October 2004.** *Design of steel structures*. s.l. : NORSOK Standard, October 2004.

**R.D. Cook, D.S. Malkus, M.E. Plesha, R.J. Witt. 2001.** *Concept an applications of finite element analysis fourth edition*. s.l. : John Wiley & sons, INC., 2001.

## 7 VEDLEGG

- A. Resultater fra lineær analyser for sveiste knutepunkt
- B. Resultater fra lineær analyser for støpte knutepunkt
- C. Resultater fra ikke-lineær analyser for sveist knutepunkt
- D. Resultater fra ikke-lineær analyser for støpte knutepunkt

## VEDLEGG A

### Resultater fra lineære analyser for sveiste knutepunkt

#### Innhold

1	Resultat Model W1.....	4
2	Resultat modell W2.....	8
3	Resultat Modell W3 .....	12
4	Resultat modell W4.....	16
5	Resultat Modell W6 .....	20
6	Resultat Modell W5 .....	24
6.1	MESH METODE 1 .....	25
6.2	MESH METODE 2 .....	29
6.3	MESH METODE 3 .....	33
6.4	MESH METODE 4 .....	37
6.5	MESH METODE 5 .....	41
6.6	MESH METODE 6 .....	45
6.7	MESH METODE 7 .....	49

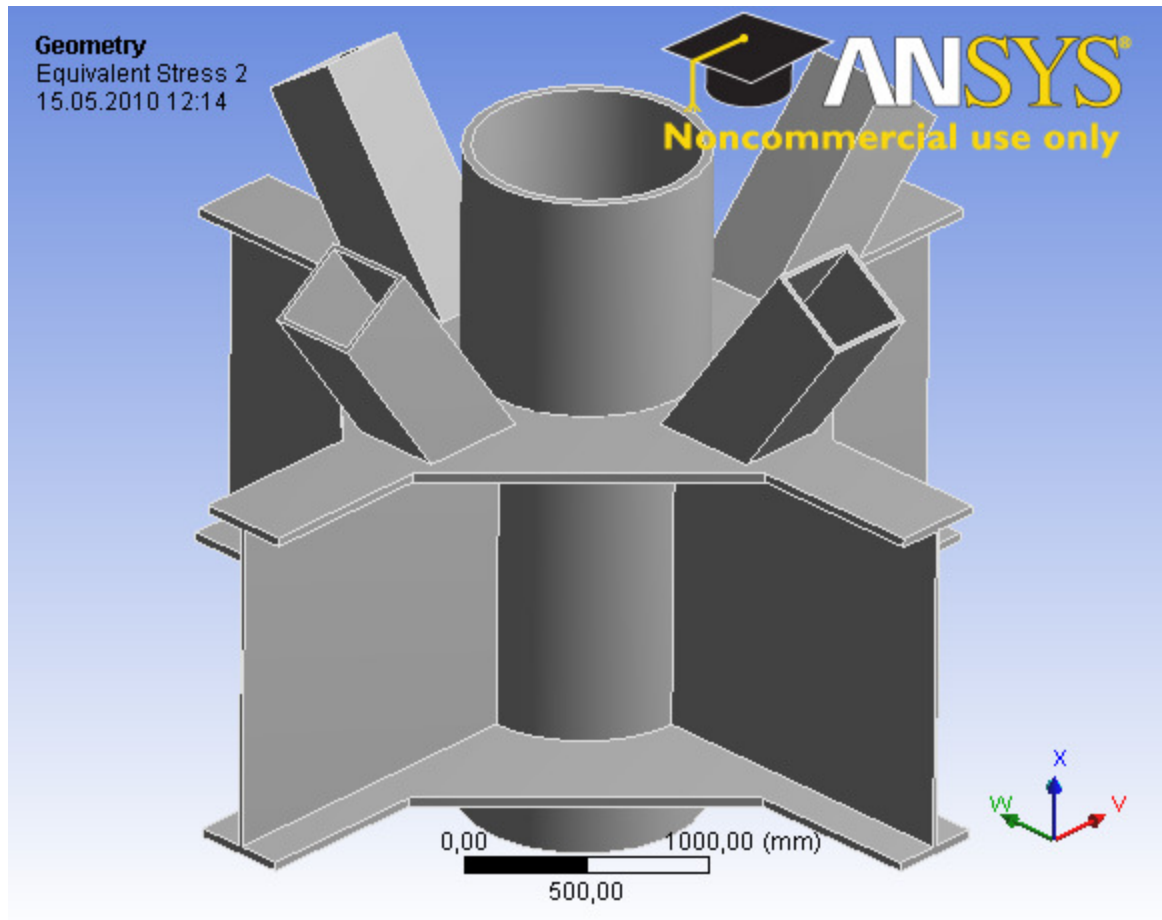
## Bilde liste

Bilde 2-1 Modell W1.....	4
Bilde 2-2 Spenningsbilde for model W1.....	5
Bilde 2-3 Deformasjon modell W1.....	6
Bilde 2-4 Skjær krefter Modell W1.....	7
Bilde 3-1 Modell W2.....	8
Bilde 3-2 Spenningsbilde Modell W2.....	9
Bilde 3-3 Deformasjon Modell W2.....	10
Bilde 3-4 Skjær krefter Modell W2.....	11
Bilde 4-1 Modell W3.....	12
Bilde 4-2 Spenningsbilde Modell W3.....	13
Bilde 4-3 Deformasjon Modell W3.....	14
Bilde 4-4 Skjær krefter Modell W3.....	15
Bilde 5-1 Modell W4.....	16
Bilde 5-2 Spennings bilde Modell W4.....	17
Bilde 5-3 Deformasjon Modell W4.....	18
Bilde 5-4 Skjær krefter Modell W4.....	19
Bilde 6-1 Modell W6.....	20
Bilde 6-2 Spennings bilde Modell W6.....	21
Bilde 6-3 Deformasjon Modell W6.....	22
Bilde 6-4 Skjær krefter.....	23
Bilde 7-1 Modell W5.....	24
Bilde 7-2 Default meshing Modell W5.....	25
Bilde 7-3 Spenningsplott meshing metode 1, Modell W5.....	26
Bilde 7-4 Feilvurdering av meshing metode 1, Modell W5.....	27
Bilde 7-5 Deformasjon mesh metode 1, modell W5.....	28
Bilde 7-6 Mesh metode 2, Modell W5.....	29
Bilde 7-7 Spenningsplott, mesh metode 2, modell W5.....	30
Bilde 7-8 Feilvurdering mesh metode 2, modell W5.....	31
Bilde 7-9 Deformasjon mesh metode 2, modell W5.....	32
Bilde 7-10 Meshing metode 3, modell W5.....	33
Bilde 7-11 Spenningsplott mesh metode 3, modell W5.....	34
Bilde 7-12 Feilvurdering mesh metode 3, modell W5.....	35
Bilde 7-13 Deformasjon mesh metode 3, modell W5.....	36



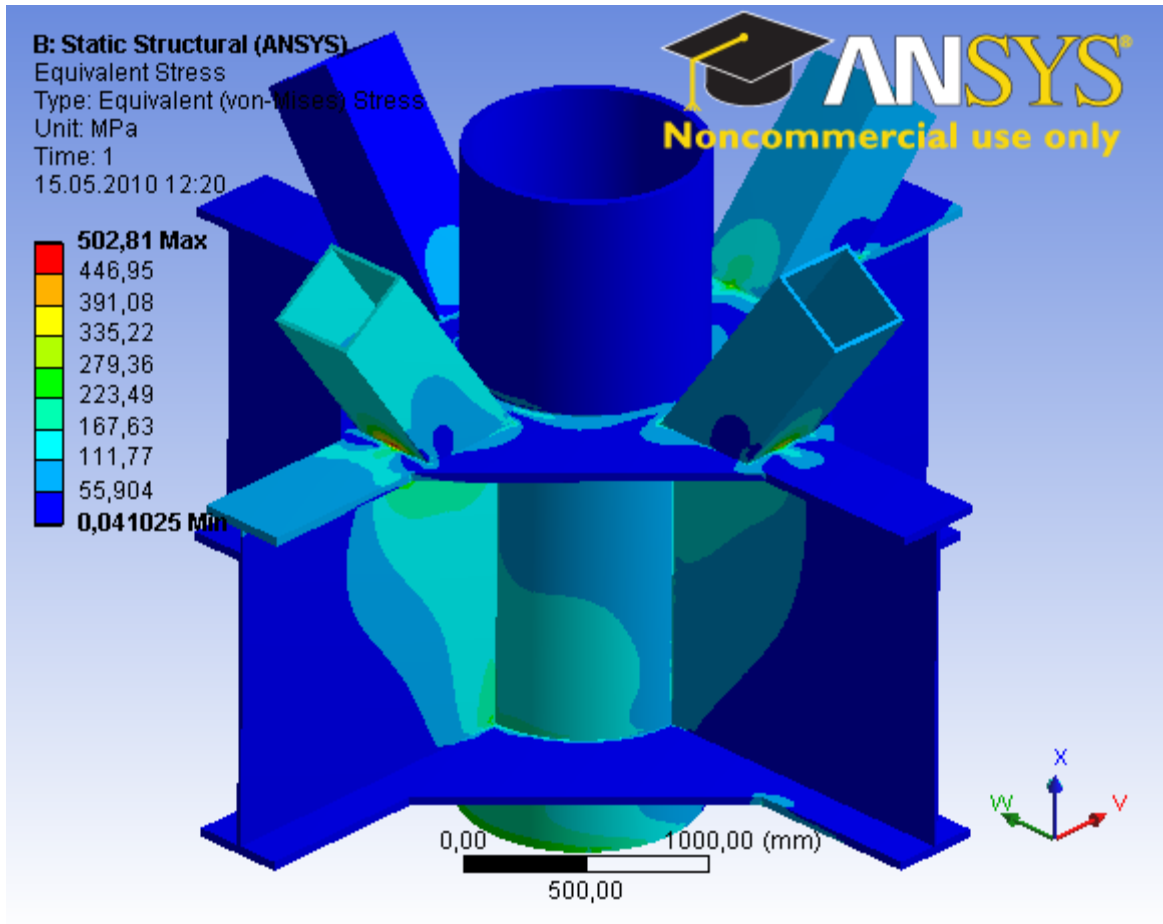
Bilde 7-14 Mesh metode 4, modell W5 .....	37
Bilde 7-15 Spenningsplott mesh metode 4, modell W5 .....	38
Bilde 7-16 Feilvurdering mesh metode 4, modell W5 .....	39
Bilde 7-17 Deformasjon mesh metode 4, modell W5 .....	40
Bilde 7-18 Mesh metode 5, modell W5 .....	41
Bilde 7-19 Spenningsplott mesh metode 5, modell W5 .....	42
Bilde 7-20 Feilvurdering av mesh metode 5, modell W5 .....	43
Bilde 7-21 Deformasjon mesh metode 5, modell W5 .....	44
Bilde 7-22 Mesh metode 6, modell W5 .....	45
Bilde 7-23 Spenningsplott mesh metode 6, modell W5 .....	46
Bilde 7-24 Feilvurdering mesh metode 6, modell W5 .....	47
Bilde 7-25 Deformasjon mesh metode 6, modell W5 .....	48
Bilde 7-26 Mesh metode 7, modell W5 .....	49
Bilde 7-27 Spenningsplott mesh metode 7, modell W5 .....	50
Bilde 7-28 Feilvurdering mesh metode 7, modell W5 .....	51
Bilde 7-29 Deformasjon mesh metode 7, modell W5 .....	52

# 1 Resultat Model W1



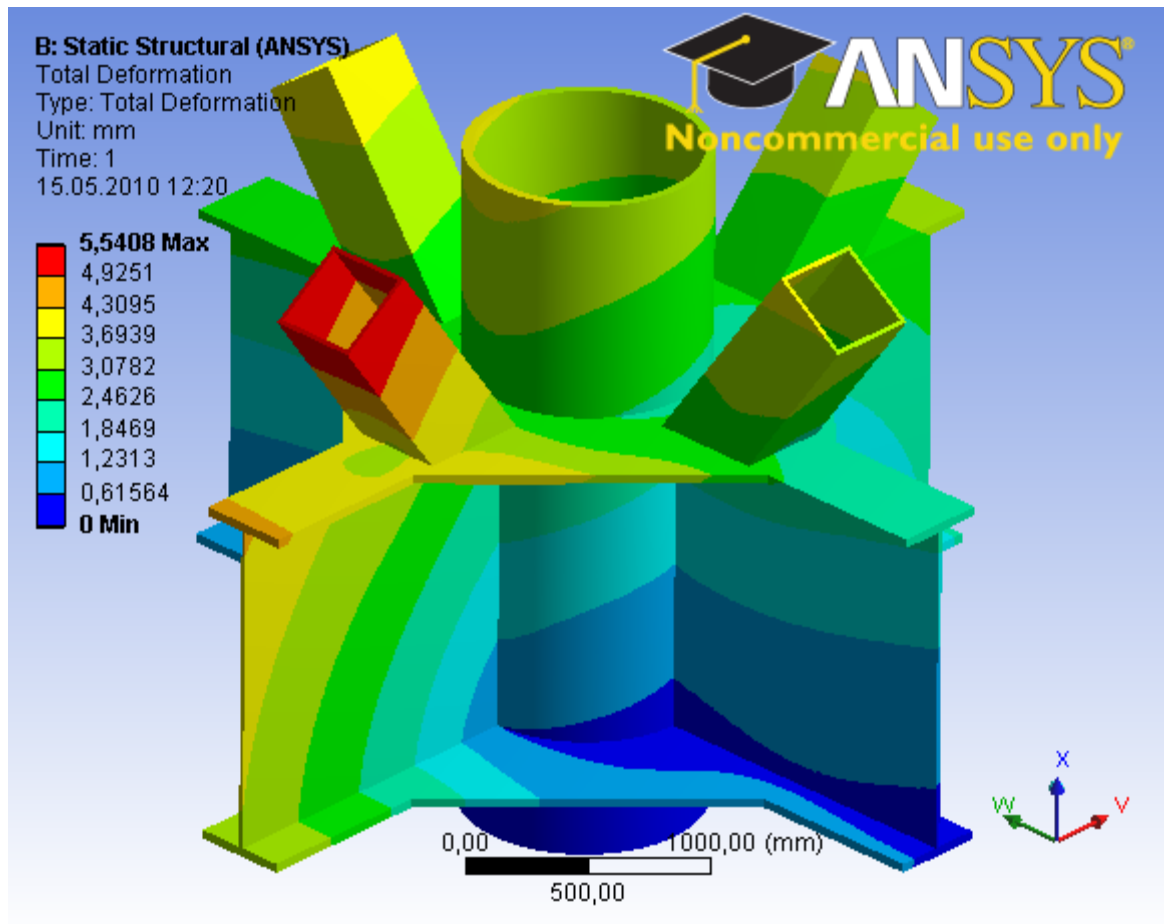
Bilde 1-1 Modell W1

Modell W1 (Bilde 1-1) er en sveist konstruksjon der skråstagene i form av firkantbokser går direkte ned på de bygde I-bjerkene. Den er forsterket i forhold til utgangsgemetrien (**Feil! Fant ikke referanseskilden.** i rapporten) da det er lagt inn plater som vil føre kreftene fra I-bjerkene rundt røret i stedet for rett igjennom.



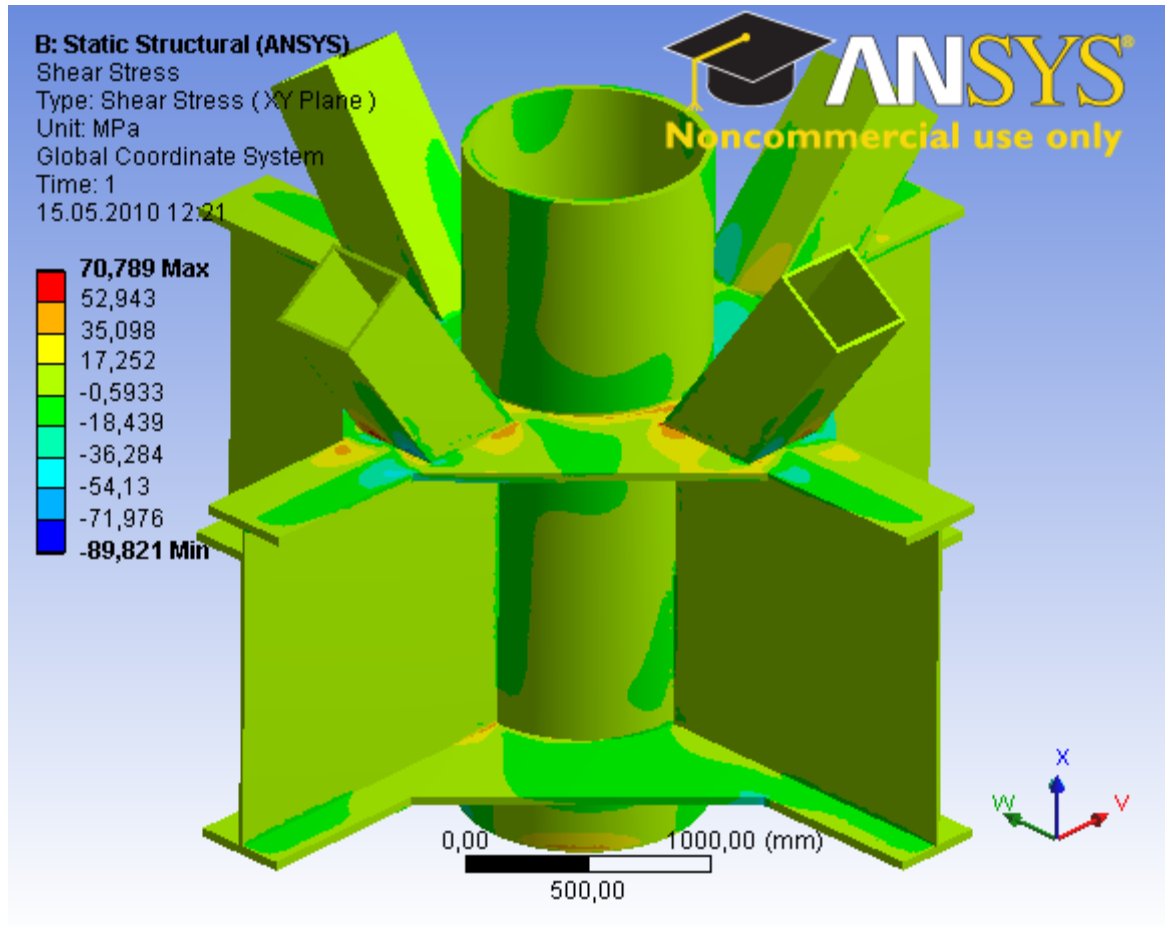
Bilde 1-2 Spenningsbilde for model W1

En ser ut ifra spenningsplott konturen i Bilde 1-2 at en får en stanse effekt fra RHS-ene ned på I-bjelkene. Dette skyldes at kantene på flensen i I-bjelkene er i stand til å bøye seg nedover mye, samtidig som steget gjør at senter av flensen ikke bøyer seg ned som følgende av de påførte kreftene. Dette kan også sees på neste plott, Bilde 1-3.



Bilde 1-3 Deformasjon modell W1

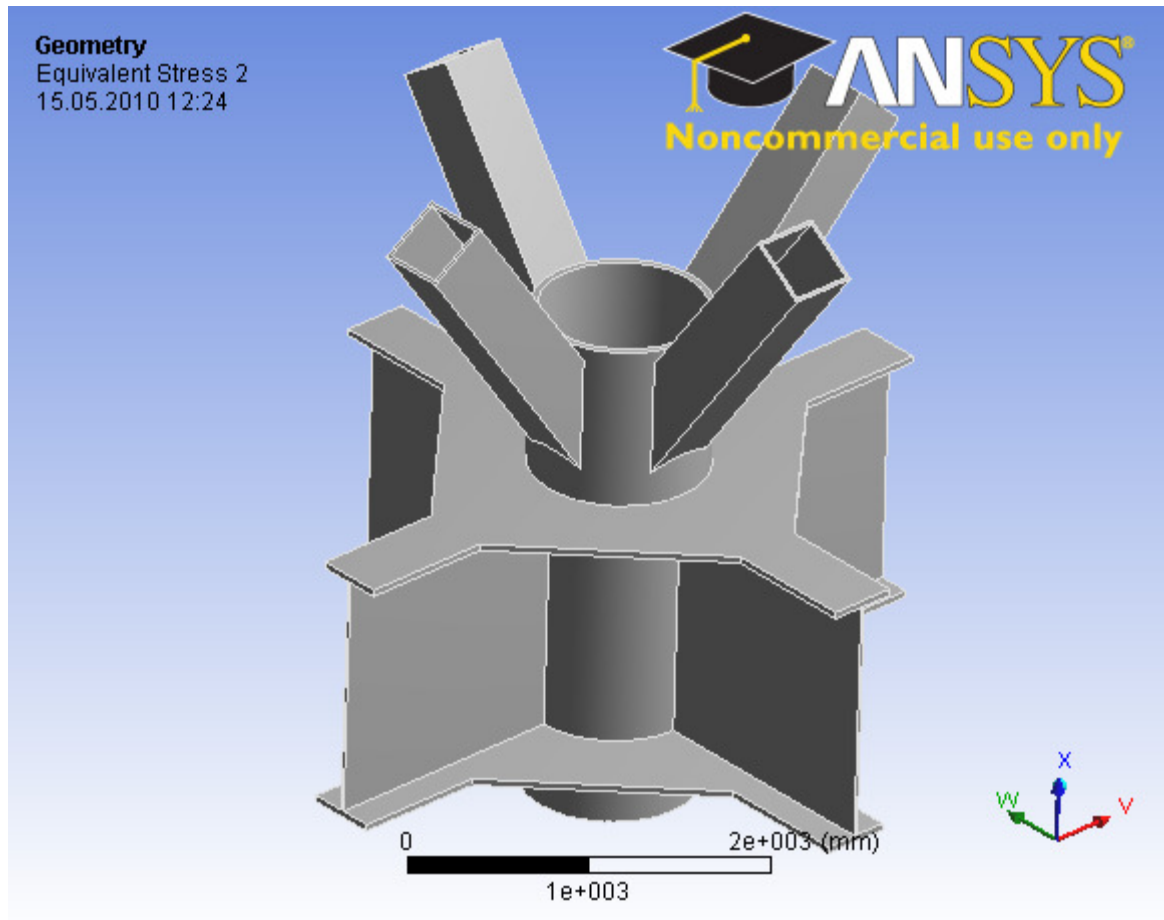
En ser ut fra deformasjons plotten i Bilde 1-3 at deformasjonen på sidene av stansepunktene er større enn midt på stansepunktet. Den største deformasjonen kommer i ene RHS'en da den har høyere kraft påkjenning enn de andre.



Bilde 1-4 Skjær krefter Modell W1

Det skal merkes at det ikke er så høye skjær krefter i denne modellen, dette skyldes store kontaktflater mellom de forskjellige delene, noe som gir store flater for skjær kreftene å fordele seg over.

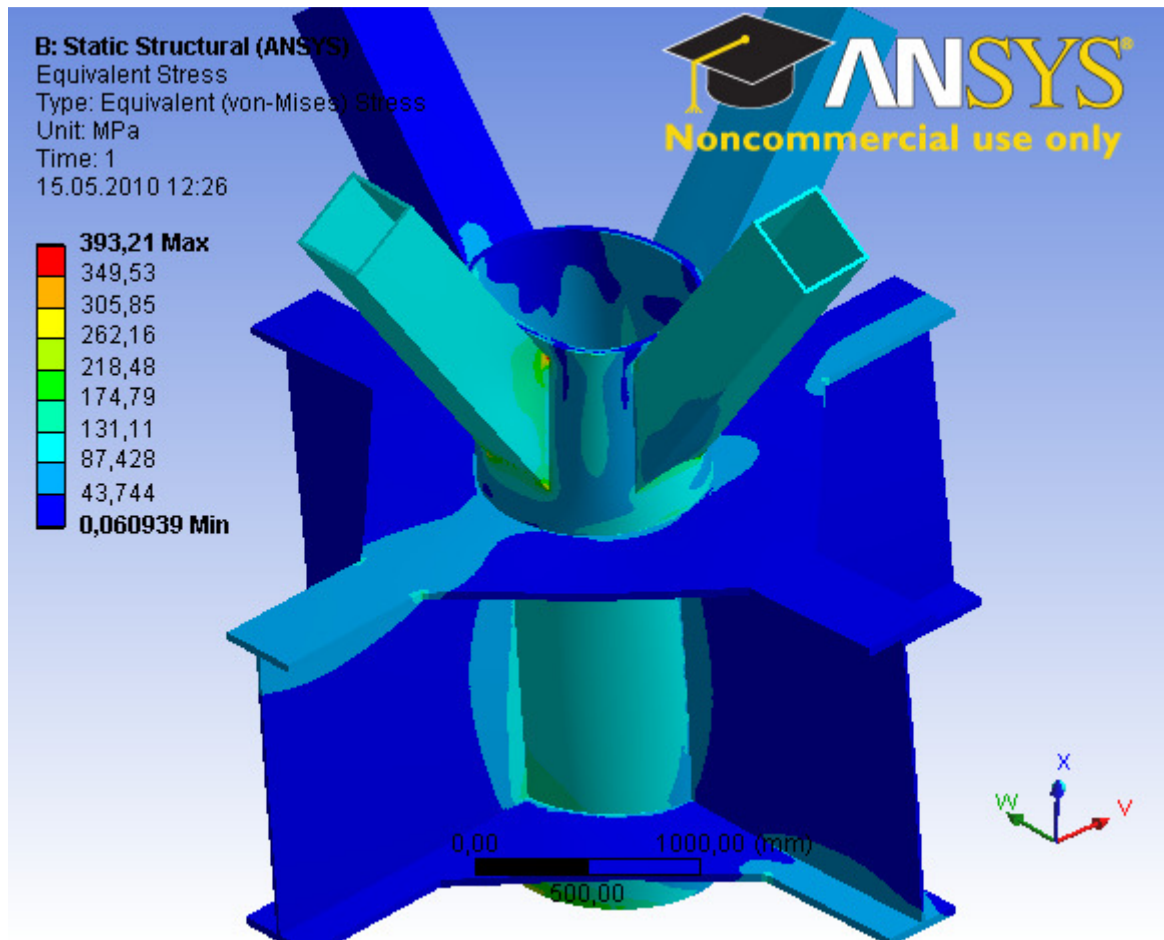
## 2 Resultat modell W2



Bilde 2-1 Modell W2

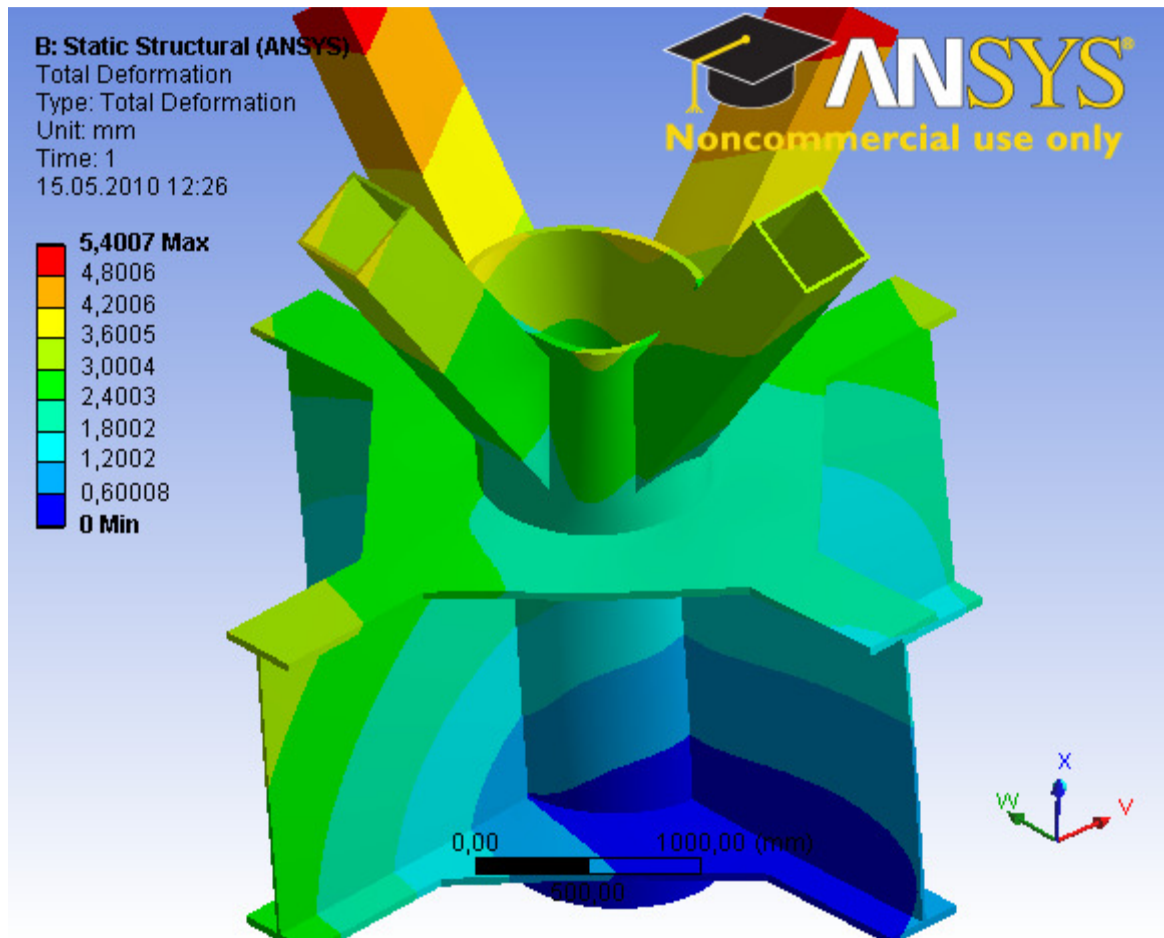
Modell W2 er noenlunde lik Modell W1, men har i stedet fått forskjøvet eksentrisitetspunktet for RHS'ene. Det kan sees på som om en egentlig får to knutepunkt oppå hverandre i stedet for et enkelt.

Da det ikke har blitt kjørt noen global analyse av denne typen knutepunkt ble det brukt samme krefter på denne analysen som på Modell W1. Det skal merkes at dette ikke gir korrekte resultat da vinklene på de innkommende RHS-bjelkene i denne modellen er lik de i Modell W1, dette gjør at mer av kreftene blir fordelt nedover i røret i stedet for vinkelrett på røret. Så selv om denne modellen ser ut til å ha bedre resultater i spennings plotten enn Modell W1, så er ikke resultatene korrekte.



Bilde 2-2 Spenningsbilde Modell W2

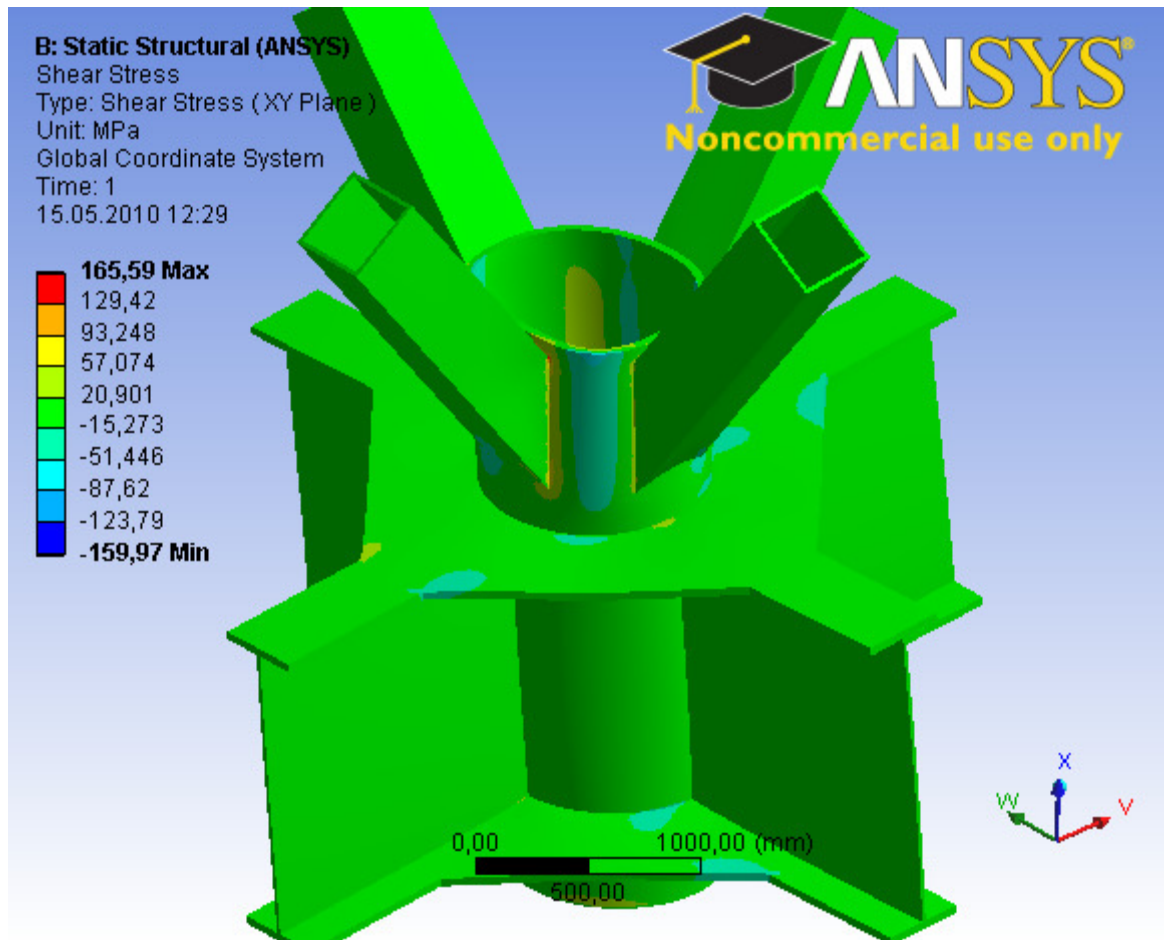
Ser en på spennings plotten (Bilde 2-2) så har en spennings konsentrasjon i hjørnene av der RHS'ene treffer hovedrøret, dette skyldes skarpe kanter i modellen. Mye av kreftene i fra RHS'ene blir tatt opp i røret i form av deformasjon.



Bilde 2-3 Deformasjon Modell W2

En ser av Bilde 2-3 at også denne modellen har høyest deformasjon i RHS'ene. Det skal merkes at dersom en hadde bygd om hele den globale modellen ville RHS'ene få en annen vinkel og komme flatere inn mot hovedrøret. Dette ville igjen ført til at hovedrøret ville deformert seg mye mer, og mest sannsynlig kollapset uten noen form for forsterkning.

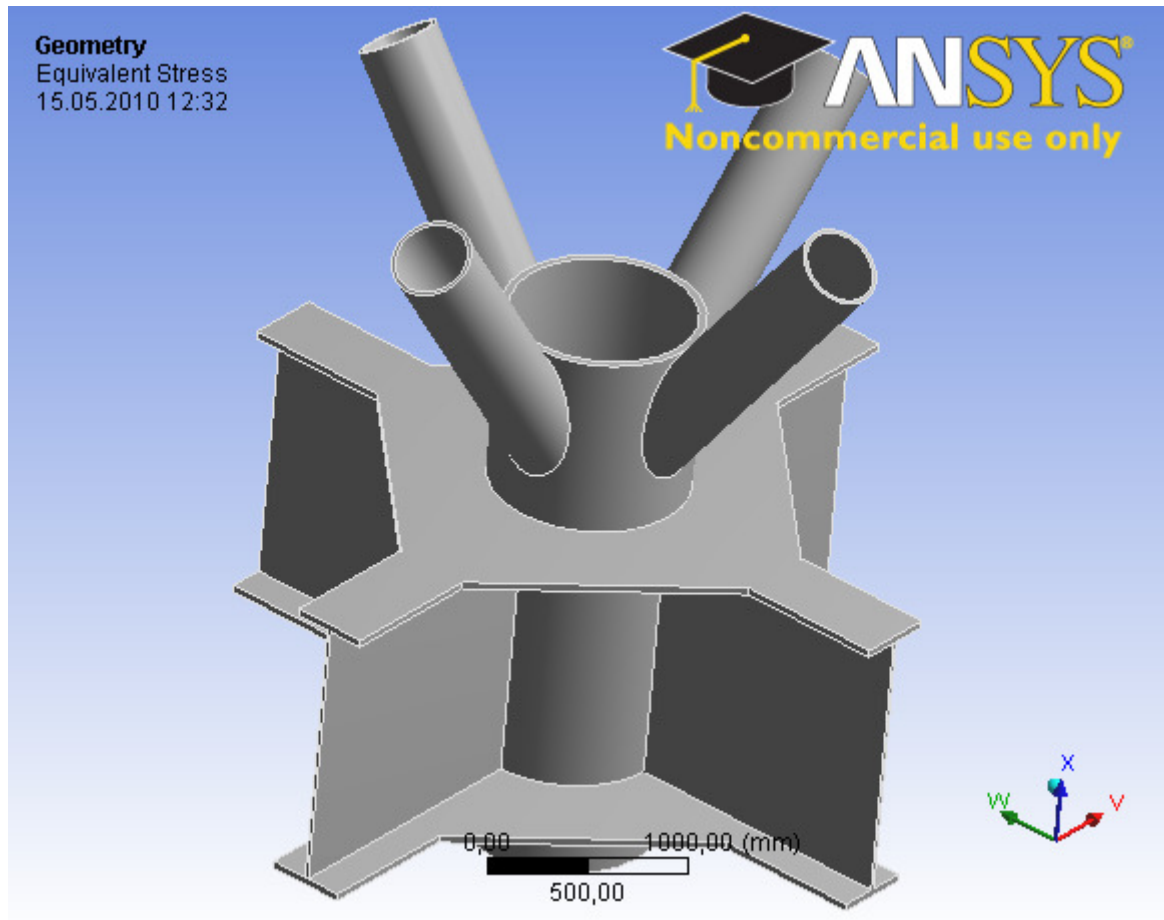




Bilde 2-4 Skjær krefter Modell W2

En ser av Bilde 2-4 at de største skjærkraft konsentrasjonene oppstår der RHS'ene treffer hovedrøret, dette fordi en får en stanse effekt ifra RHS'ene igjennom røret. Denne stanse effekten vil om en lar RHS'ene komme flatere inn mot røret bli mye større.

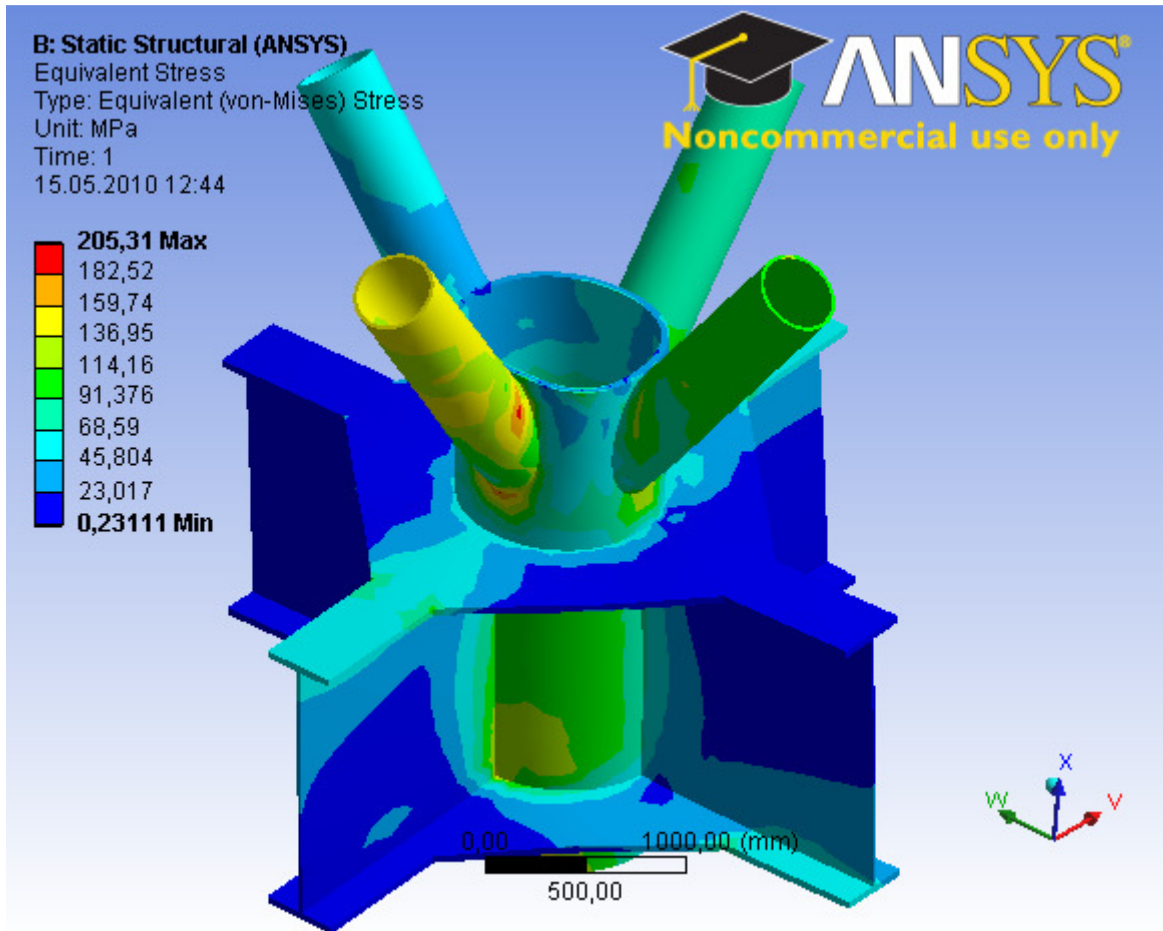
### 3 Resultat Modell W3



Bilde 3-1 Modell W3

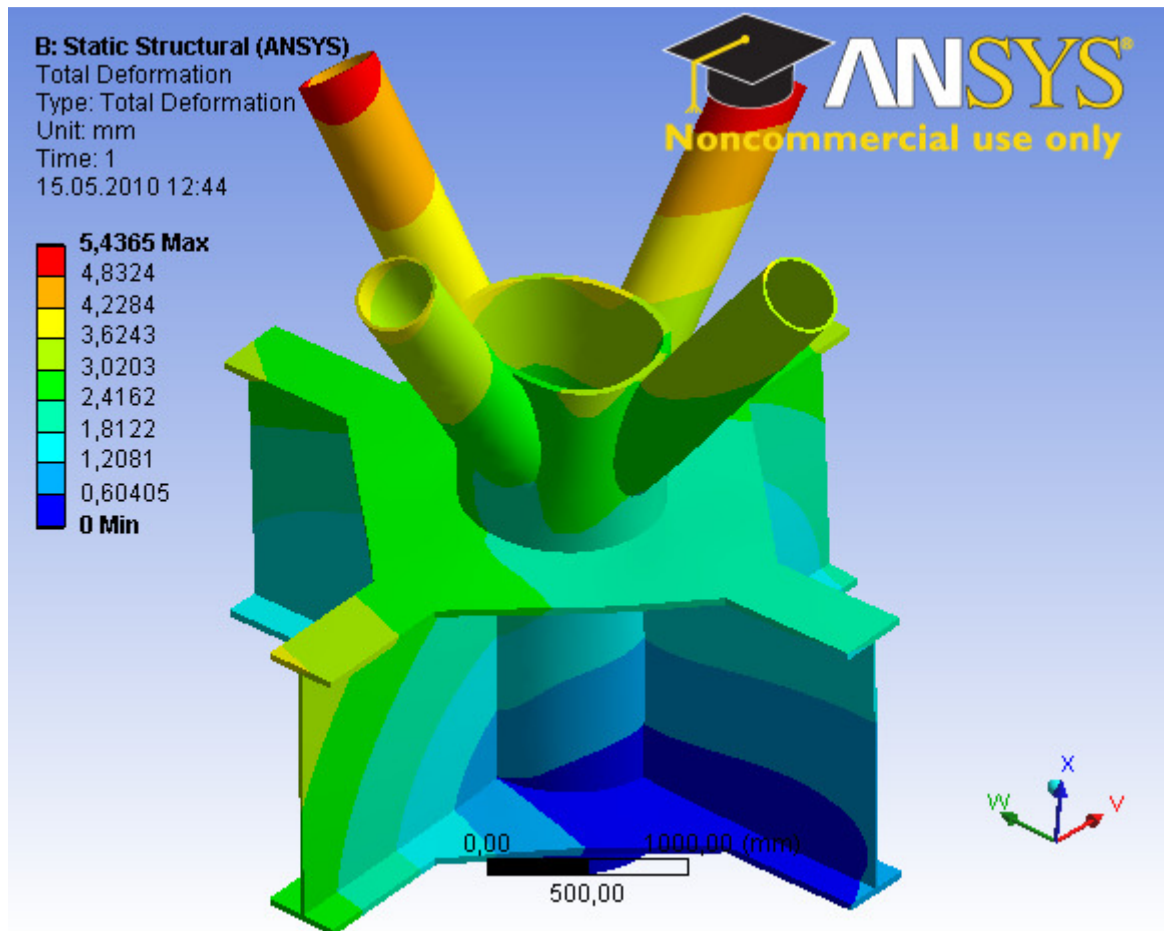
Det er sett på et alternativ der en bytter ut RHS'ene direkte på hovedrøret med rør se Bilde 3-1. Det har ikke blitt kjørt noen global analyse der en bruker rør som skråstag på substasjonen, så det er også her brukt samme kreftene som tidligere.

Det ble valgt å forsøke å konstruere knutepunktet med rør da en ikke ville få så store spenningskonsentrasjoner i hjørner og kanter som en får ved en bygd RHS.



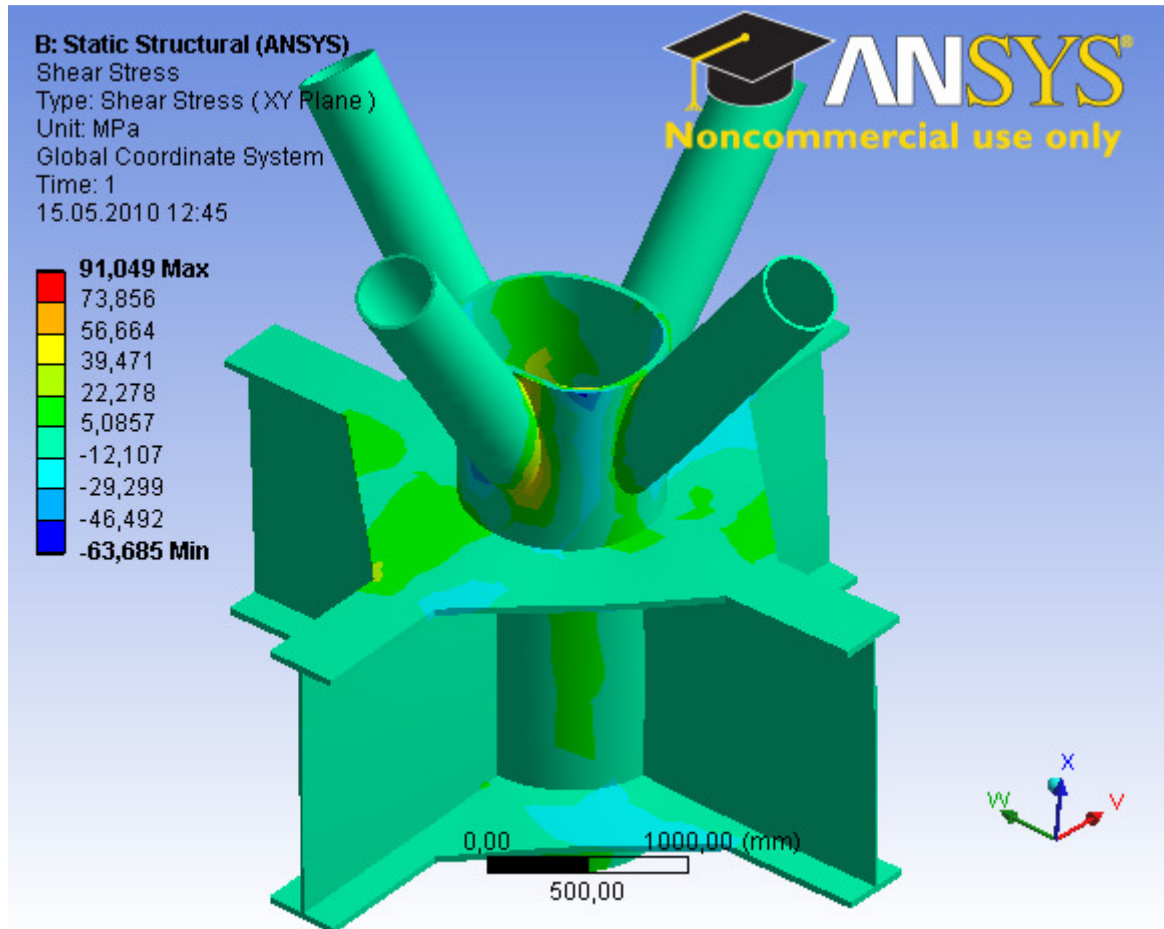
Bilde 3-2 Spenningsbilde Modell W3

En ser ut ifra Bilde 3-2 at en får fine overganger for spenningene og unngår store konsentrasjons områder.



Bilde 3-3 Deformasjon Modell W3

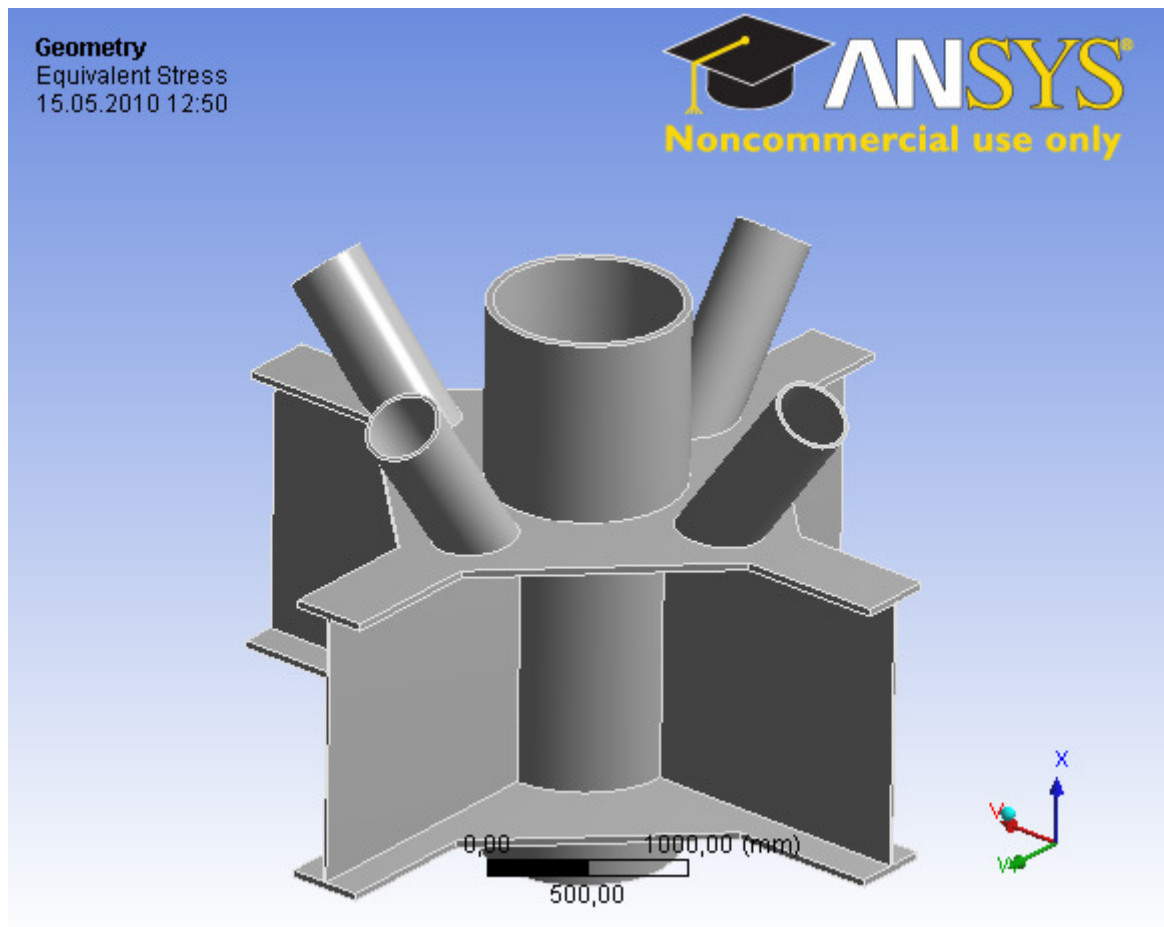
En ser også her at en får store deformasjoner ytterst på skråstagene. Også hovedrøret blir trykt inn her, noe som kan føre til knekking av hovedrøret.



Bilde 3-4 Skjær krefter Modell W3

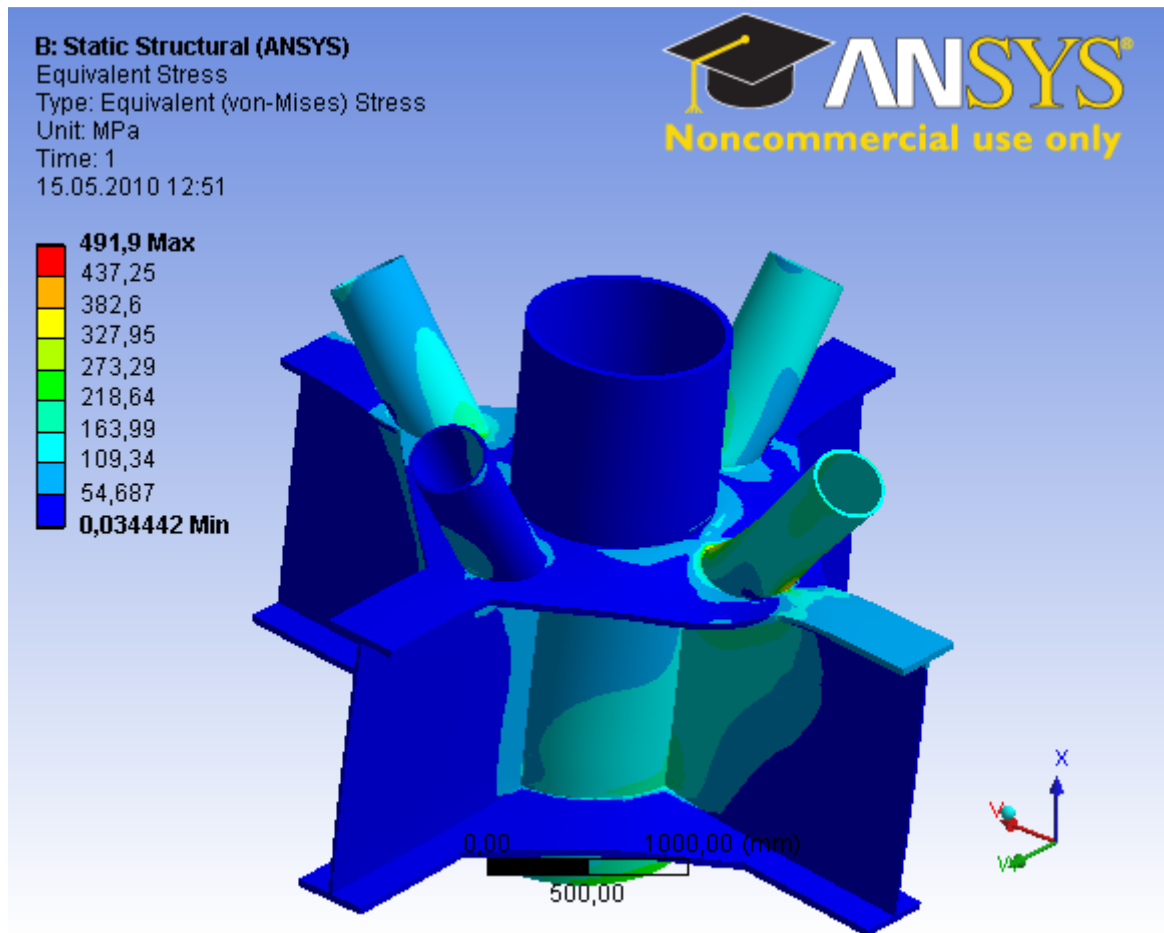
Bilde 3-4 viser hvordan skjær kreftene for denne modellen er, en ser her også i likhet med tidligere modell at en får en stanse effekt i hovedrøret som følger av kreftene fra skråstagnene.

## 4 Resultat modell W4



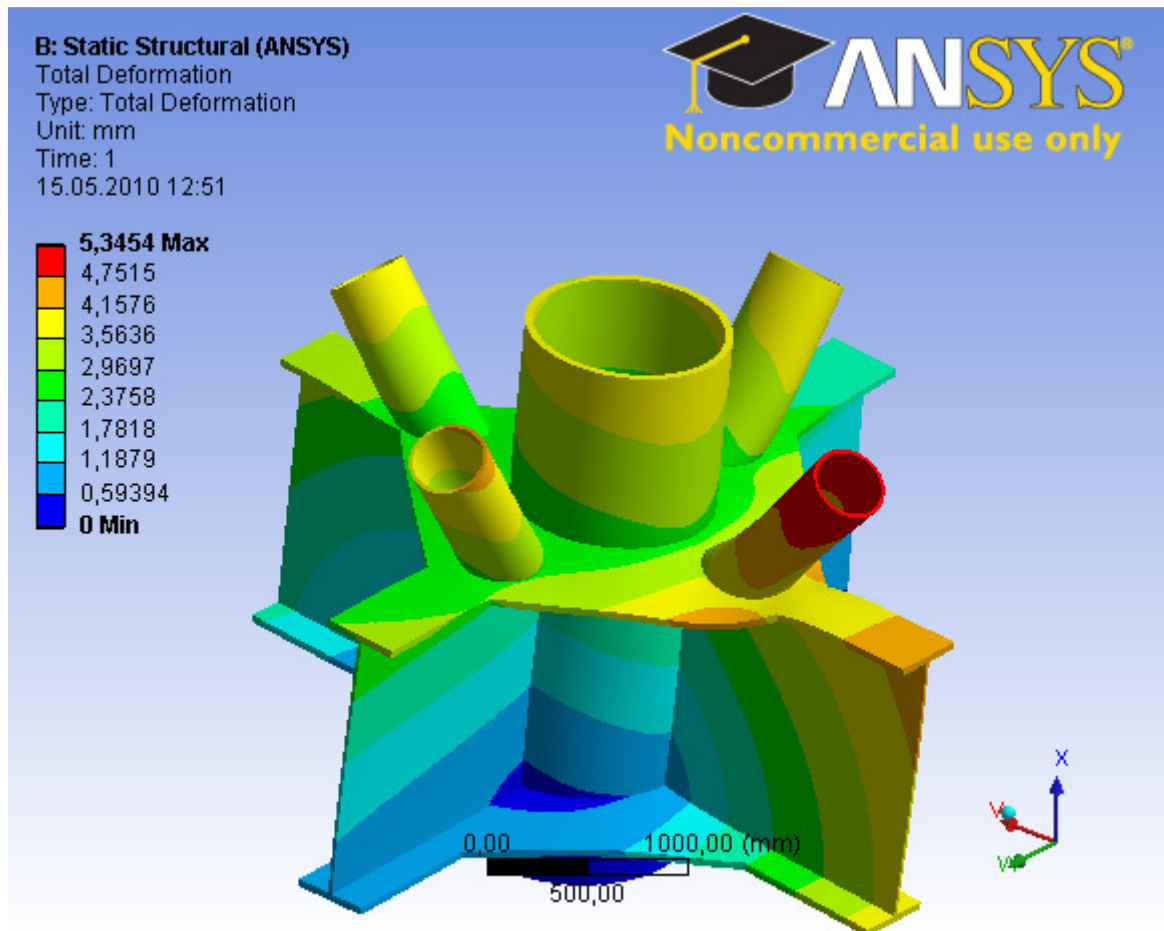
Bilde 4-1 Modell W4

Bilde 4-1 viser det fjerde geometri alternativet. Det er her tatt utgangspunkt i modell W1, men med bruk av rør i stedet for RHS.



Bilde 4-2 Spennings bilde Modell W4

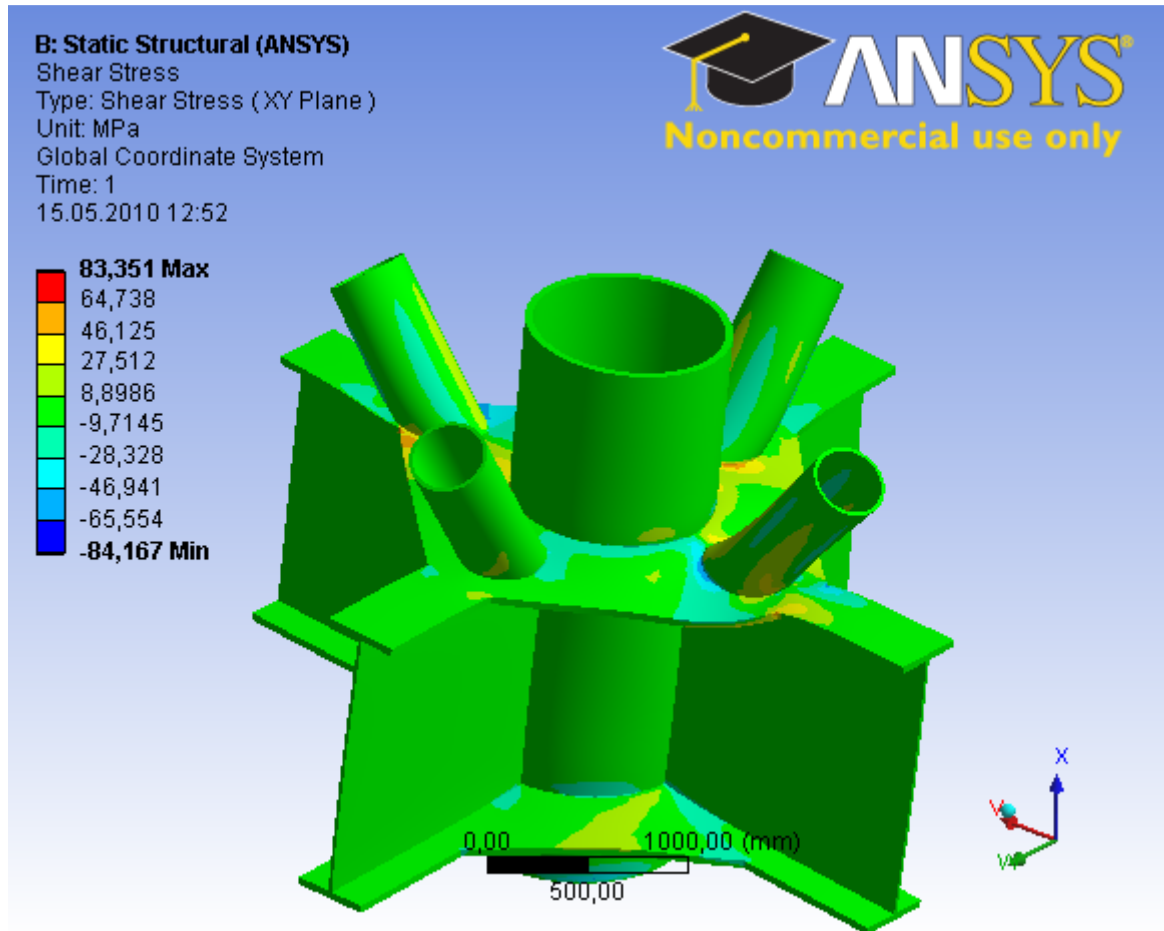
En ser ut ifra Bilde 4-2 at en også her får store spenningskonsentrasjoner i områdene der en får en stanse effekt fra steget i I-bjelkene på lik linje med modell W1. En får ved bruk av rør til skråstag en bedre fordeling av kreftene over hele røret i stedet for konsentrasjoner i hjørnepunkter som en får ved bruk av RHS.



Bilde 4-3 Deformasjon Modell W4

En får i modell W4 også de største deformasjonene i skråstagnene, men en får også deformasjoner på sidene av der skråstagnene treffet I-bjelkene.

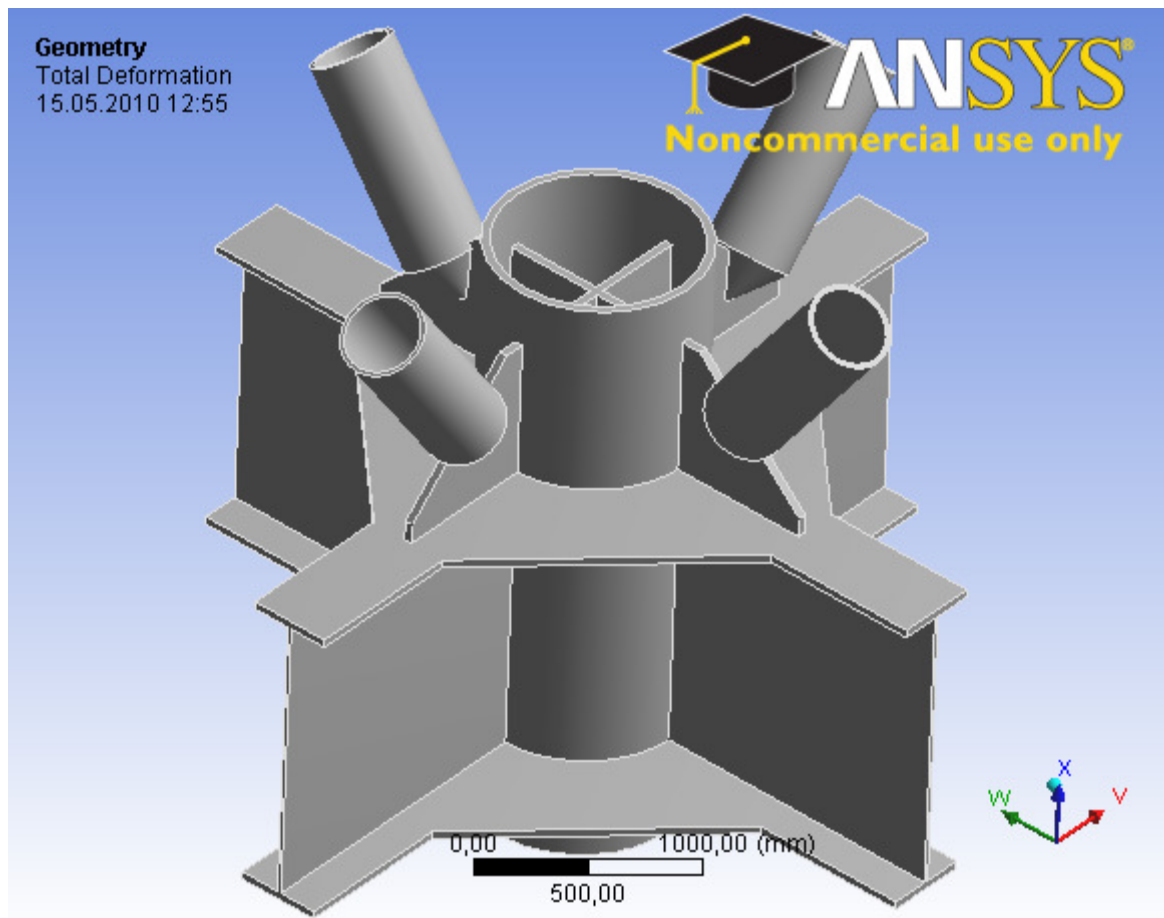




Bilde 4-4 Skjær krefter Modell W4

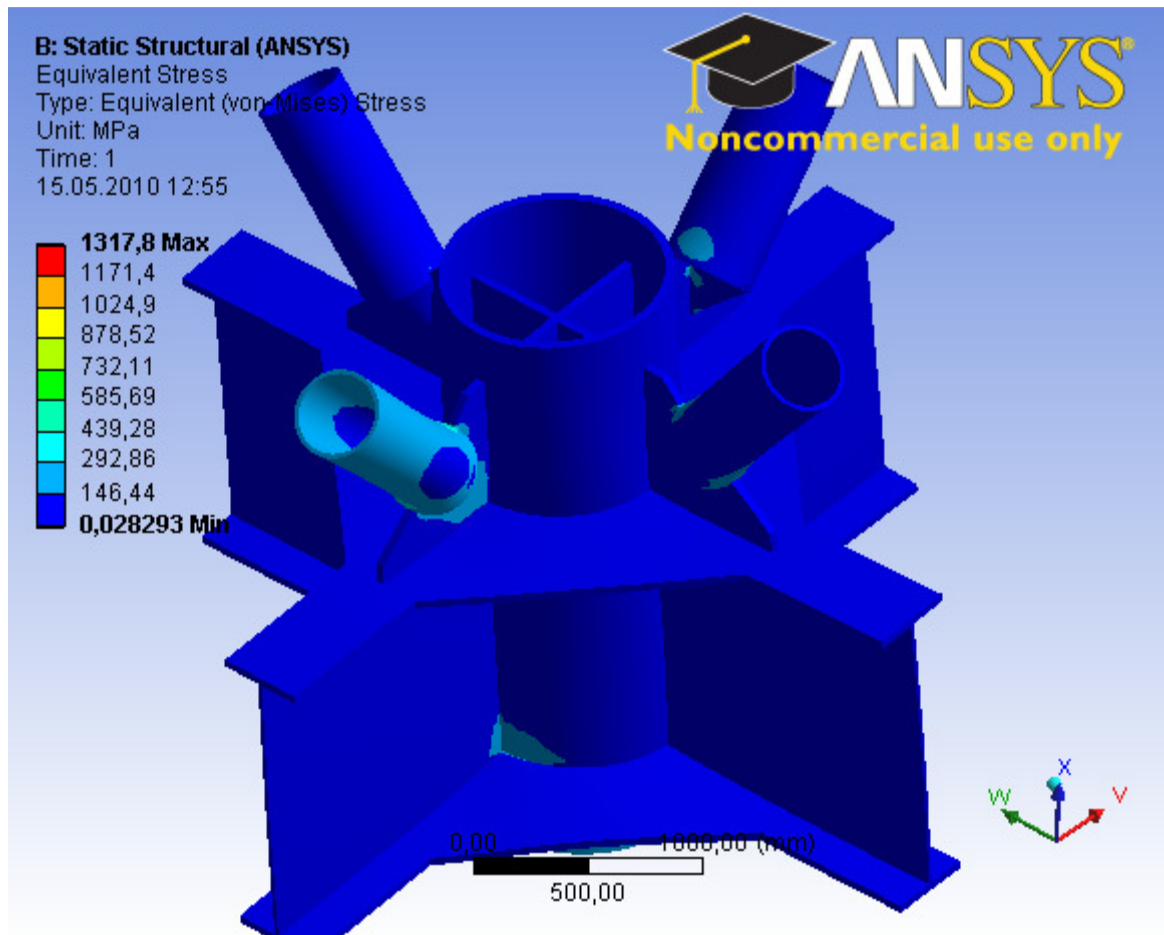
Modell W4 har ikke nevneverdige store verdier av skjær krefter, og de skjær kreftene som er er konsentrert i området der skråstagene treffer I-bjelkene.

## 5 Resultat Modell W6



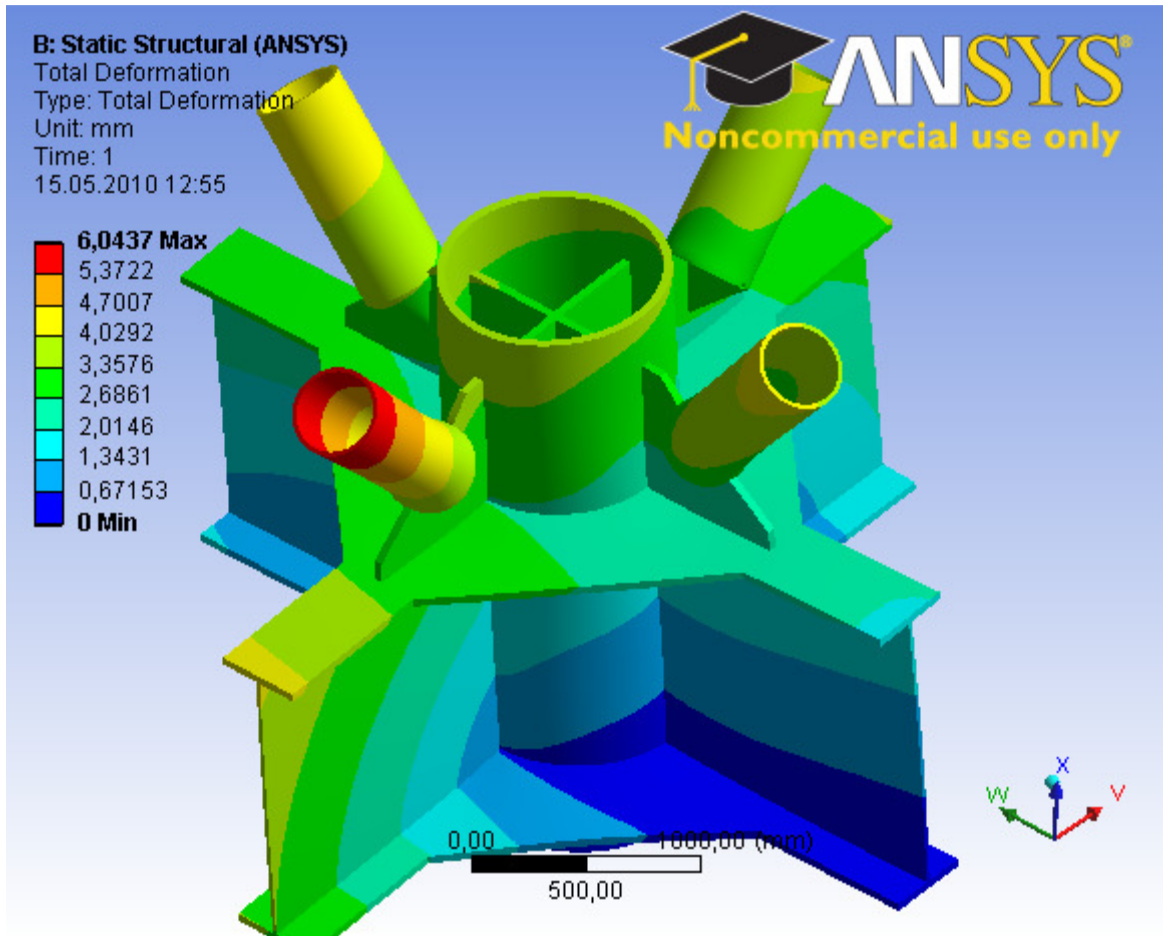
Bilde 5-1 Modell W6

For å prøve å få mest mulig lik eksentrisitet fra alle de innkommende kreftene i knutepunktet er det valgt å kjøre skråstagene ned mot I-bjelkene. Problemet med deformasjoner direkte på hovedrøret samt stanse effekten fra I-bjelkene er forsøkt løst ved bruk av gusset-plater samt forsterkninger inni hovedrøret.



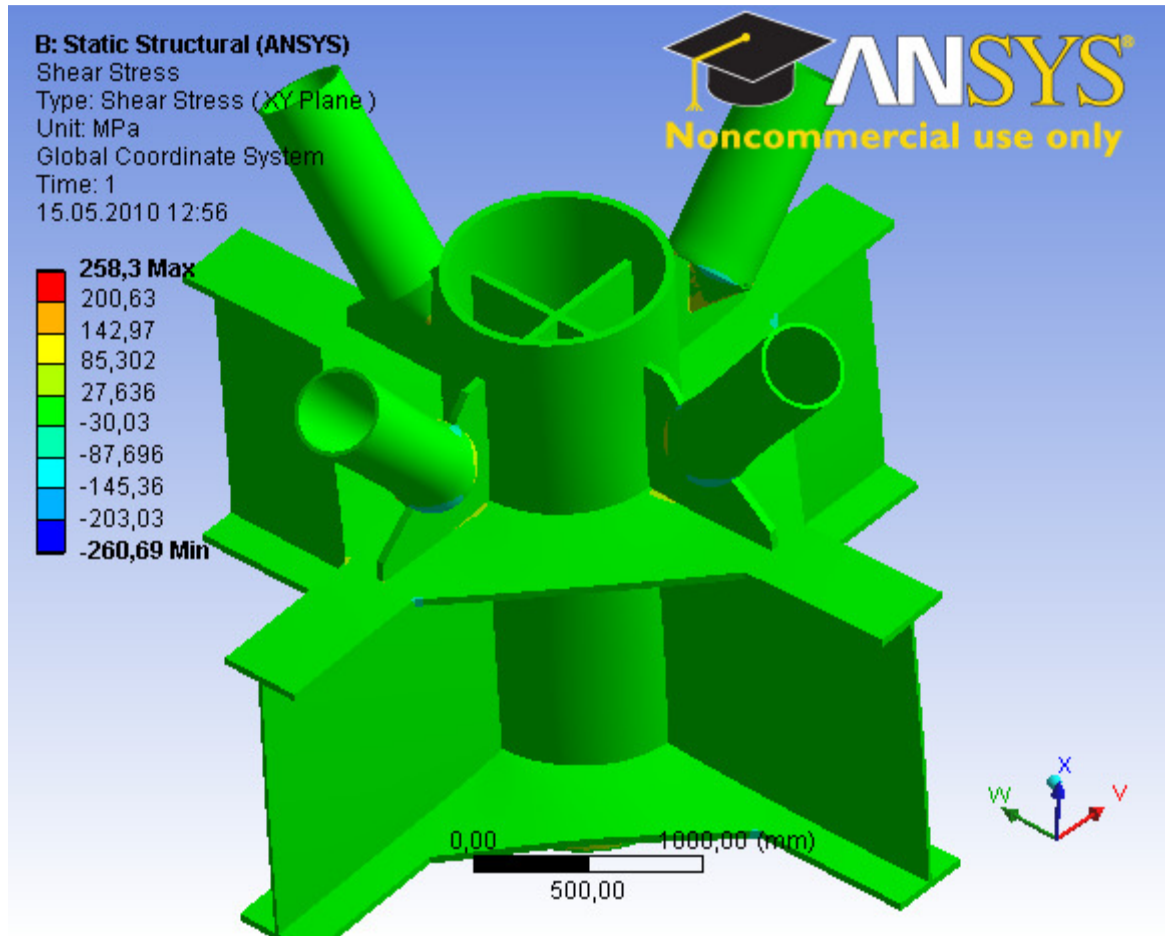
Bilde 5-2 Spennings bilde Modell W6

Ser en på Bilde 5-2 ser en at en får enormt store spennings konsentrasjoner der skråstagnene treffer gusset platen. Dette skyldes at området kreftene fordeler seg over blir lite i forhold til størrelsen på kraften.



Bilde 5-3 Deformasjon Modell W6

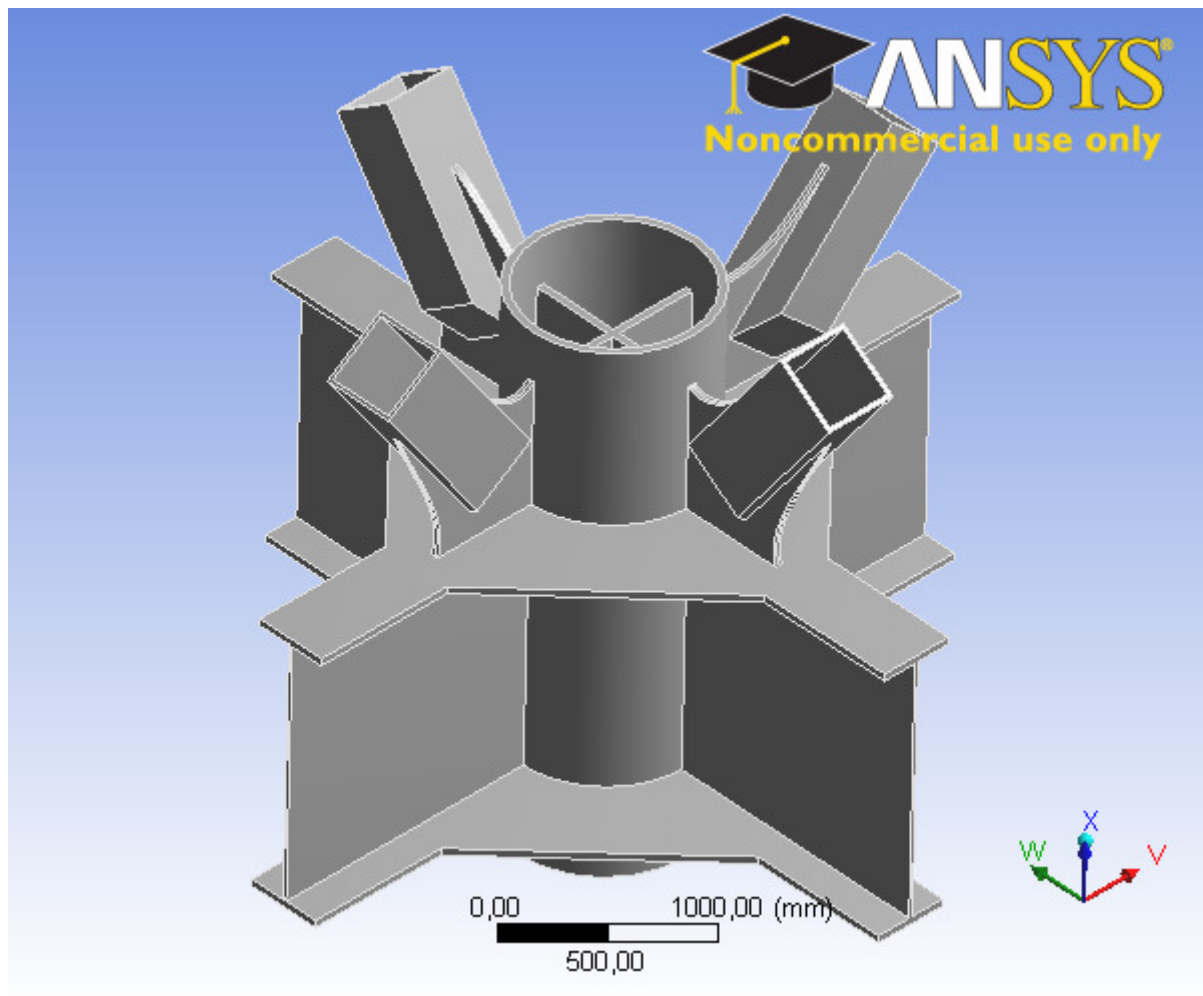
Som en ser av Bilde 5-3 så er de største deformasjonene også på denne modellen i enden av skråtagene.



Bilde 5-4 Skjær krefter

Bilde 5-4 viser at skjær kreftene i hovedsak fordeler seg i kontaktflaten mellom gusset platene og skråstaget.

## 6 Resultat Modell W5



Bilde 6-1 Modell W5

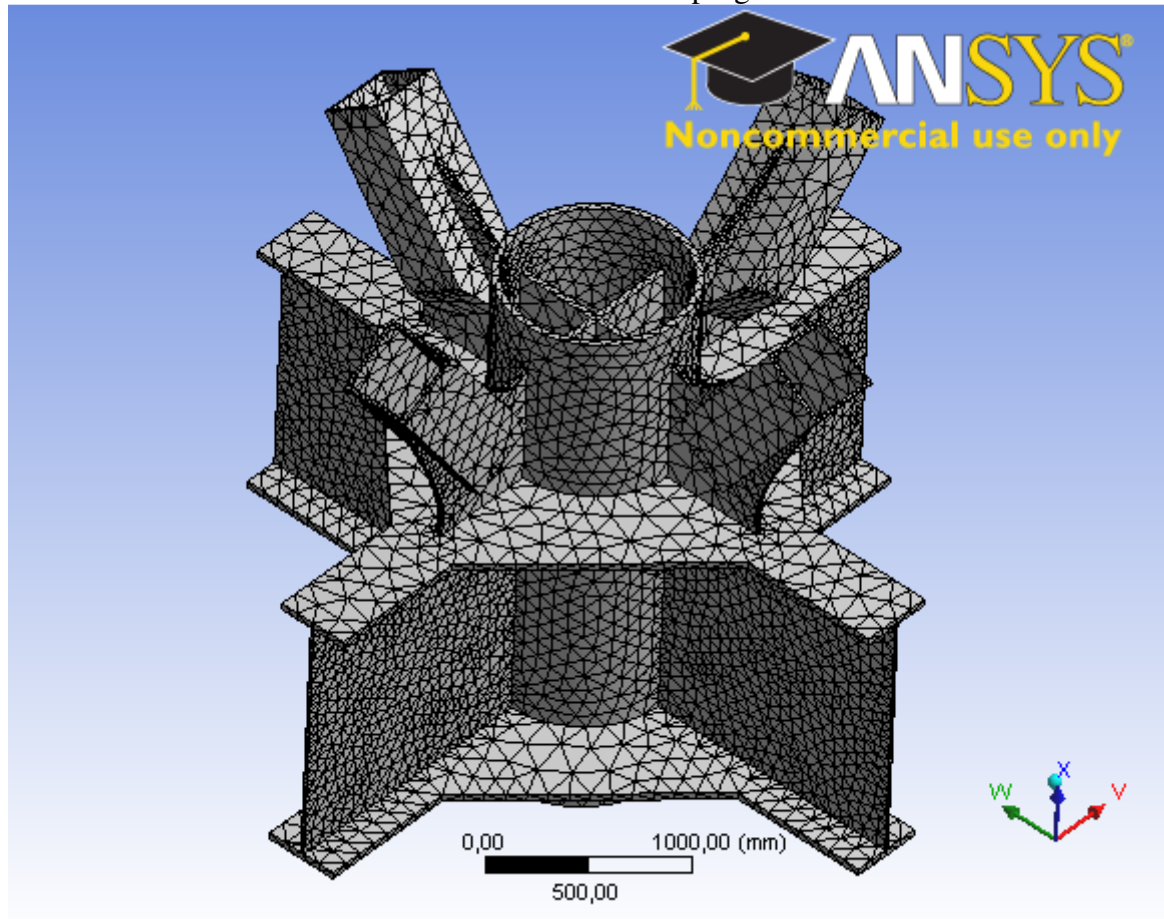
Modell W5 (Bilde 6-1) er det mest modifiserte bygde knutepunktet ut ifra utgangspunktet. Det har spesialformede gusset plater som tar opp store deler av kreftene fra skråstagene slik at en ikke får de store spenningskonsentrasjoner i skråstagene, samt forsterkningsplater inni hovedrøret som avlaster hovedrøret for trykk kreftene fra skråstagene. Også her er det lagt på plater rundt hovedrøret for å ta opp trykk og strekspenninger ifra I-bjelkene uten og føre de rundt hovedrøret.

Modell W5 er den bygde modellen som tilfredsstillter best ønskene fra Bergen Group Rosenberg om utformingen. Eksentrisiteten fra alle de innkommende bjelkene er samlet i samme punkt, trass forskjellig vinkler på de innkommende skråstagene, da alle gusset platene er ulike. Lik eksentrisitet samsvarer med de globale analysene som er kjørt på hovedstrukturen samt gir det en bedre spenningsfordeling i knutepunktet.

Det er fra denne modellen tatt med hvordan det er gått frem for å finne den meshing som gir de mest nøyaktige resultatene. Den meshingen som er valgt her er både vurdert ut ifra hvor lang tid det tar å kjøre analysene, hvor nøyaktig mesh inndelingen er, hvor bra formen på hvert element er, og en feilvurdering av resultatene fra programmet sin side.

## 6.1 MESH METODE 1

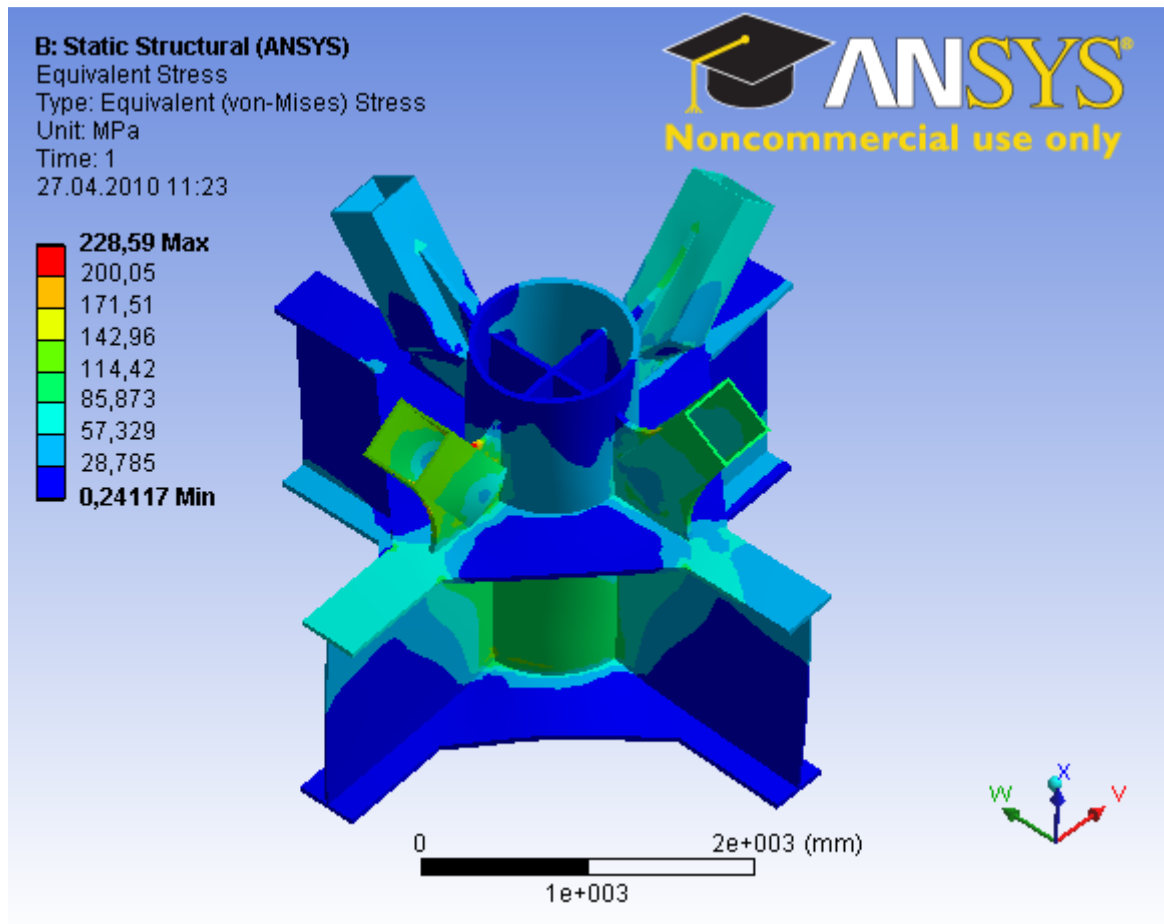
Dette er den metoden som er helt automatisk ifra dataprogrammet sin side.



Bilde 6-2 Default meshing Modell W5

Ser en på meshingen i Bilde 6-2 så ser en at størrelsen på elementene på de store flatene ikke er for tett, men derimot i de kritiske områdene så er størrelsen på elementene veldig store og vil kunne gi dårlige resultat.

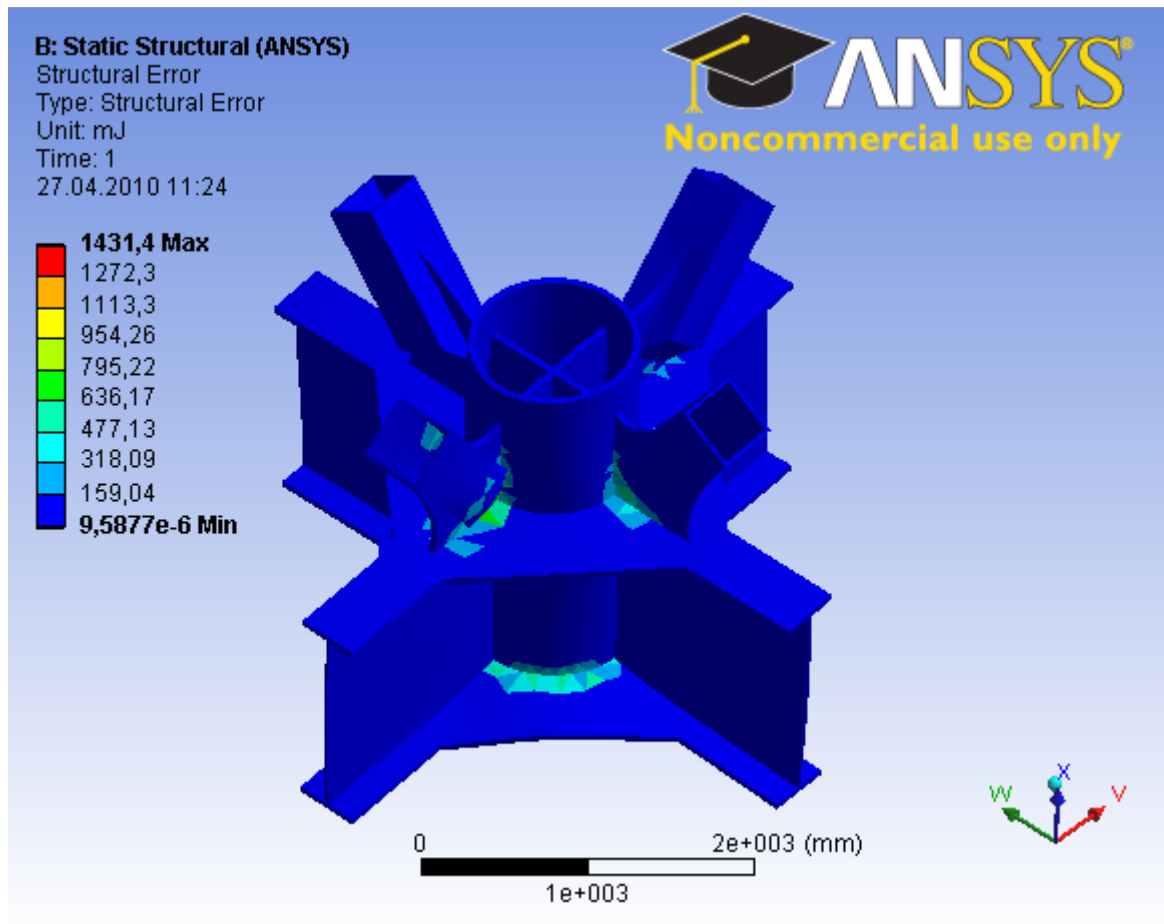
Denne modellen inneholder 68 308 noder og 34 313 elementer, noe som fører til en prosessid på ca 3 minutter. Skjevheten i elementene er på 0,6432 med et standardavvik på 0,1777, konsentrasjons området av de verste skjevhetene kan sees i Bilde 6-4.



Bilde 6-3 Spenningsplott meshing metode 1, Modell W5

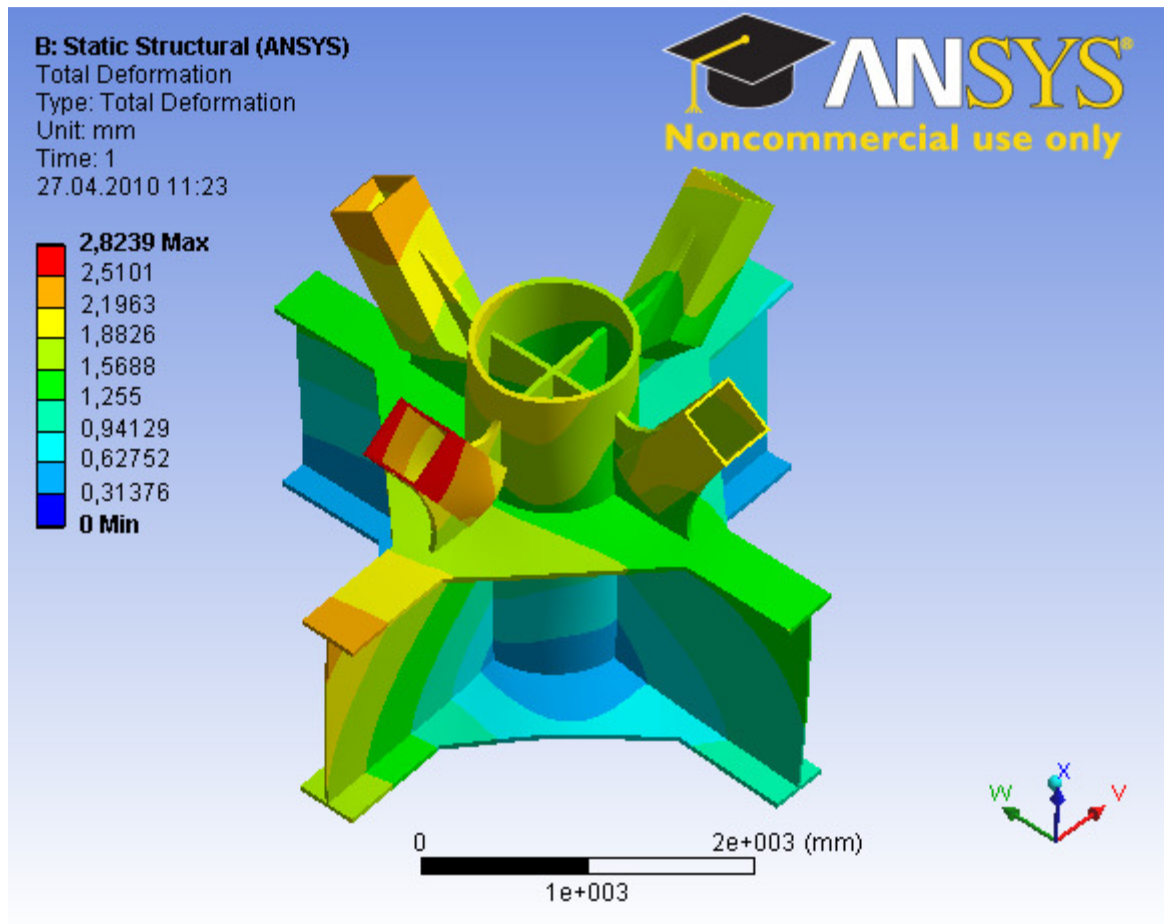
En ser ut ifra Bilde 6-3 at en får spenningskonsentrasjoner i gusset platene. Det at spenningene er såpass lave virker ved første øyekast veldig lovende, men der ligger en usikkerhet i resultatene ettersom meshingen ikke nødvendigvis er bra nok.





Bilde 6-4 Feilvurdering av meshing metode 1, Modell W5

Dataprogrammet har en metode der en kan se på hvilke områder som inneholder matematiske feil, og hvor store disse feilene er. Denne feilvurderingen er en av flere metoder for kontrollere hvor bra den matematiske modellen er for vurdering av den geometriske modellen. Ut ifra Bilde 6-4 kan en se at der er feil i resultatene, og en kan se i hvilke områder disse feilene er lokalisert. Det at den gjennomsnittlige skjevheten er så stor som den er tyder på at modellen ikke er noe god elementmodell og en bør velge en annen inndeling av elementene.

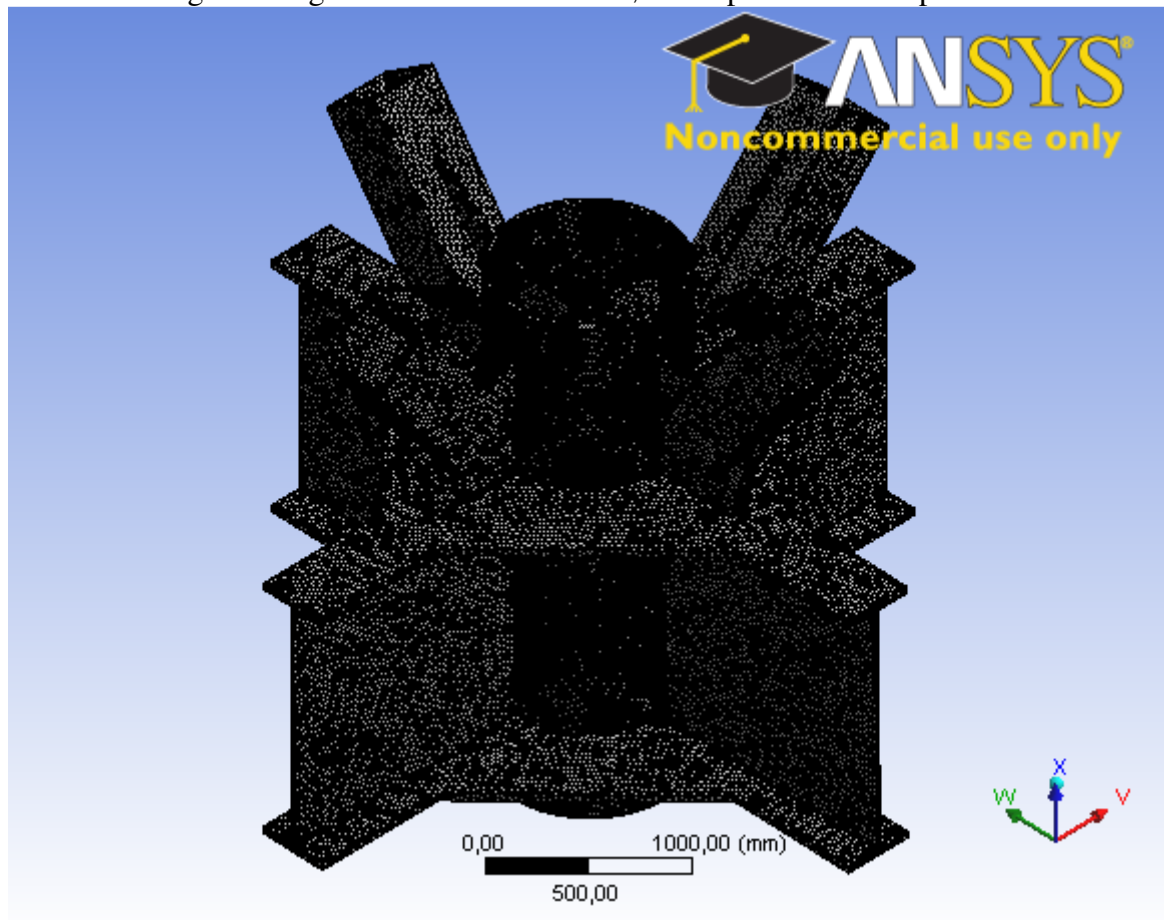


Bilde 6-5 Deformasjon mesh metode 1, modell W5

De største deformasjonene i modell W5 er i skråstagene som vist på Bilde 6-5.

## 6.2 MESH METODE 2

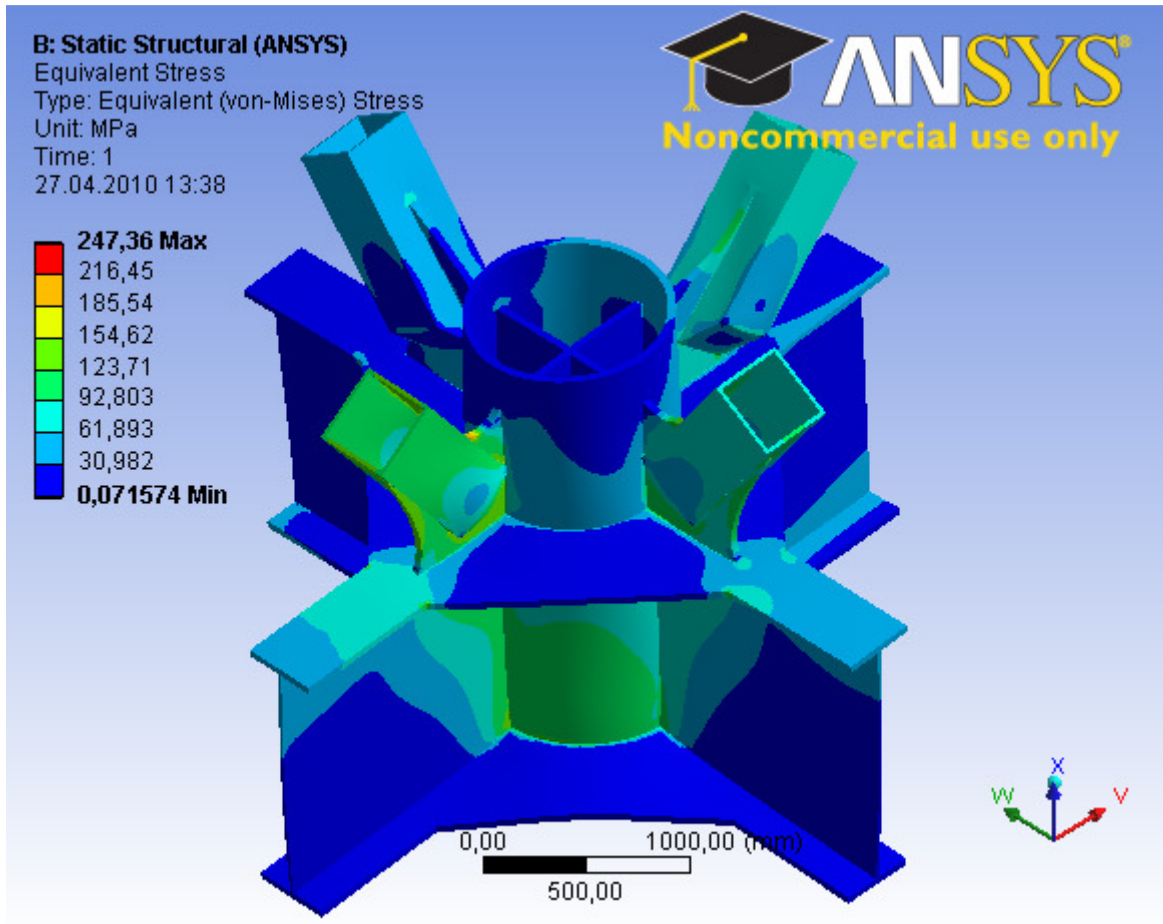
I denne er det gått inn og definert en maksimal størrelse på elementene på 20mm.



Bilde 6-6 Mesh metode 2, Modell W5

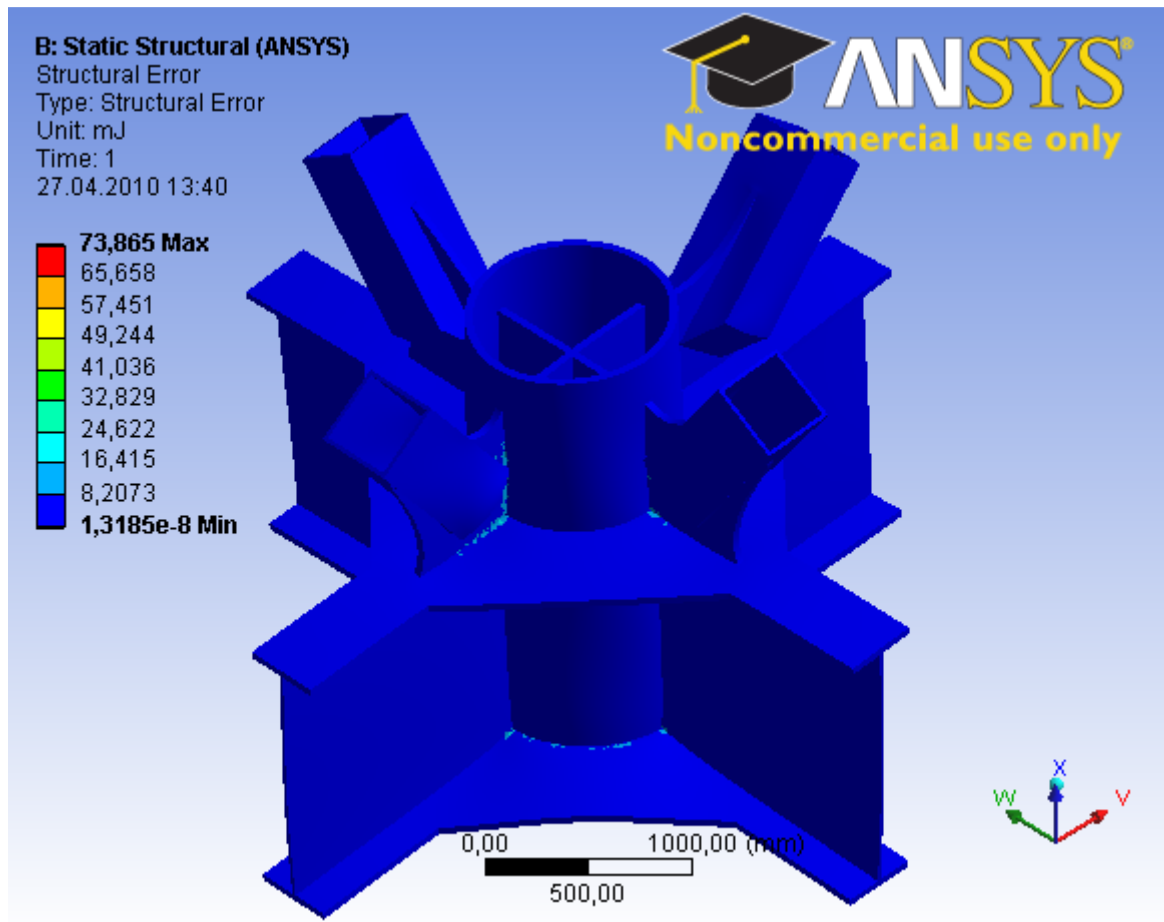
Mesh metode 2, som vist på Bilde 6-6, gir en tett inndeling av elementene i forhold til de store flatene i strukturen. Det er unødvendig mange elementer på stegene til I-bjelkene og muligens for mange elementer på skråstagnene og hovedrøret, men det tar meget kort tid å dele inn modellen i elementer. Det at der er så mange elementer i modellen gjør at det tar lenger prosesseringstid, men dette er ikke noe problem for dagens datamaskiner så lenge en holder seg til lineære analyser.

Denne modellen inneholder 957736 noder og 534305 elementer, noe som fører til en prosessetid på ca 30 minutter. Skjevheten i elementene er på 0,3012 med et standardavvik på 0,1416, konsentrasjons området av de verste skjevhetene kan sees i Bilde 6-8.



Bilde 6-7 Spenningsplott, mesh metode 2, modell W5

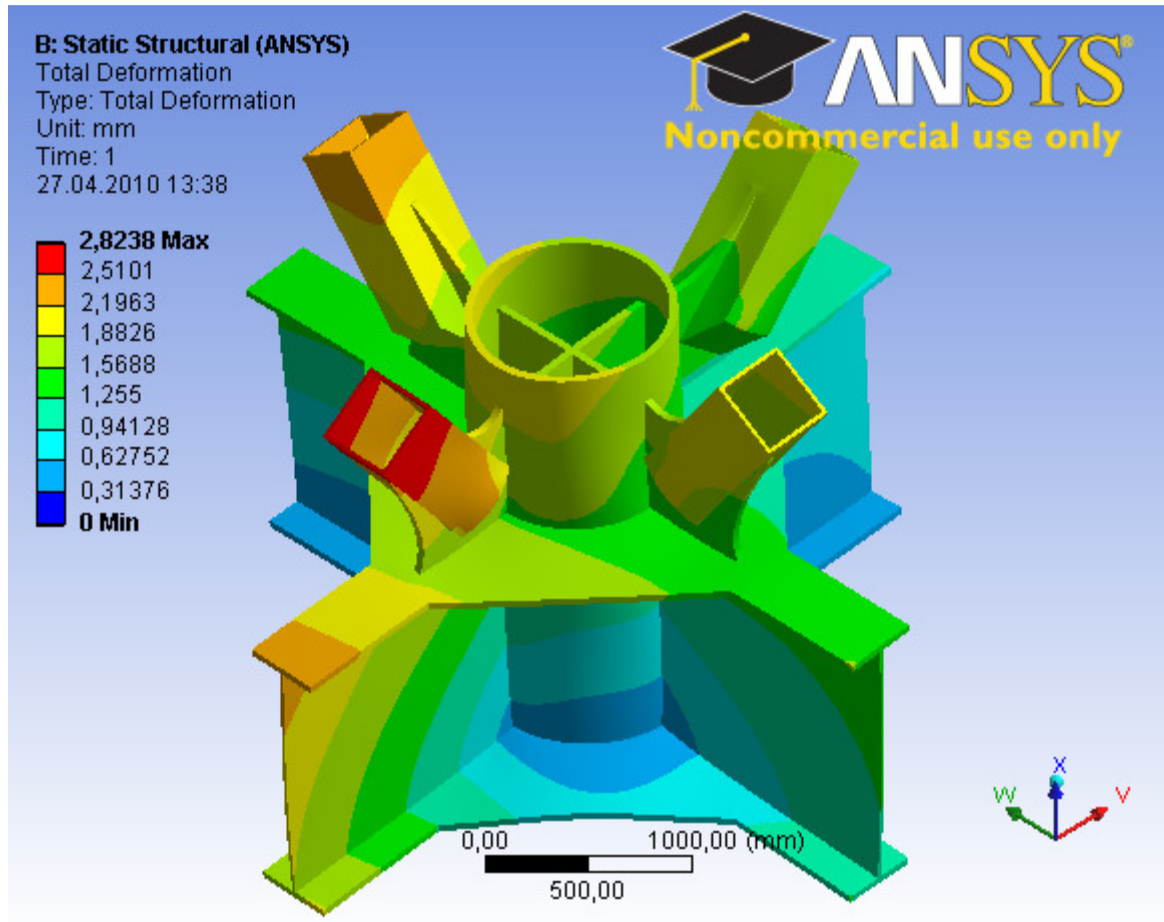
En ser på Bilde 6-7 at de største spenningene også her er konsentrert i områdene på skråstagene og gusset platene.



Bilde 6-8 Feilvurdering mesh metode 2, modell W5

En ser ut ifra Bilde 6-8 at meshing metoden som er brukt er mye mer nøyaktig enn mesh metode 1 (Bilde 6-4), dette skyldes at der er flere elementer som gjør at de enklere tilpasser seg geometrien.

En ser av modellen at feilene er konsentrert i de områdene det er geometriforandringer med brå overganger, det vil si vinkelrette hjørner med litt høyere spenningskonsentrasjon enn andre steder.

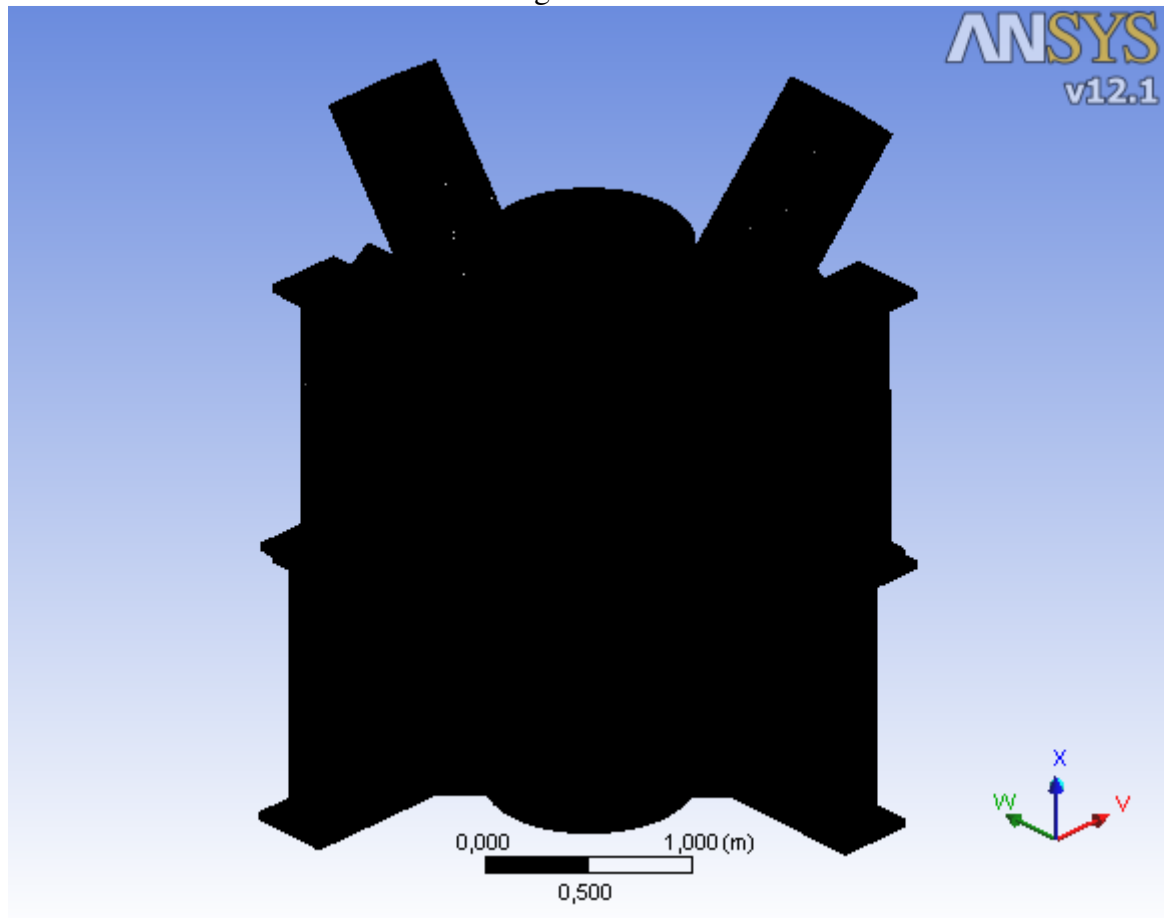


Bilde 6-9 Deformasjon mesh metode 2, modell W5

En ser her at en får den same deformasjonen som for mesh metode 1 med bare en liten forandring i fjerde desimal.

### 6.3 MESH METODE 3

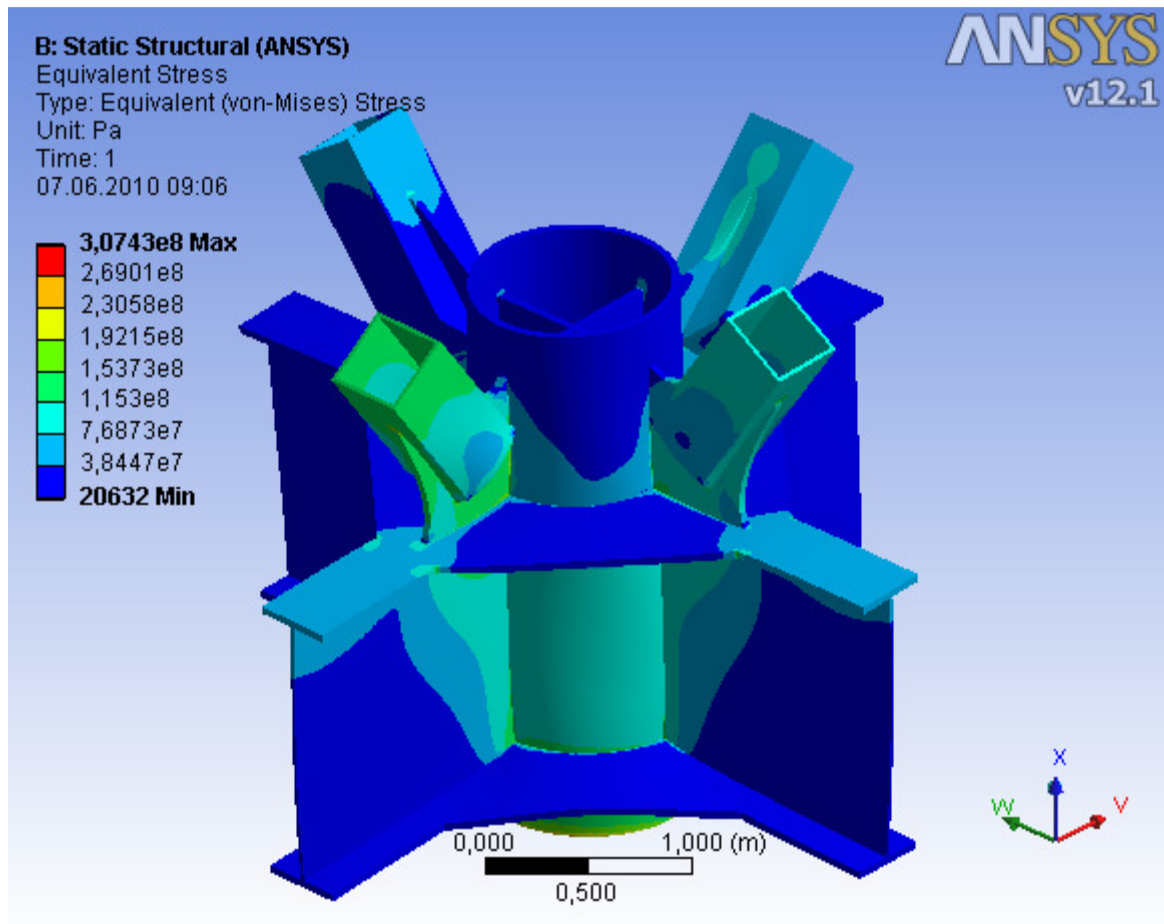
Dette er den metoden med finest inndeling av elementer.



Bilde 6-10 Meshing metode 3, modell W5

Mesh metode 3 har enormt mange elementer og noder, en ser av Bilde 6-10 at elementene blir så små at det ikke viser igjen på bildet. Det er brukt en standard inndeling av elementene med en øvre grense på 10mm, dette for å få flest mulig elementer over de tynne tverrsnittene som stegene i I-bjelkene som er på 20mm.

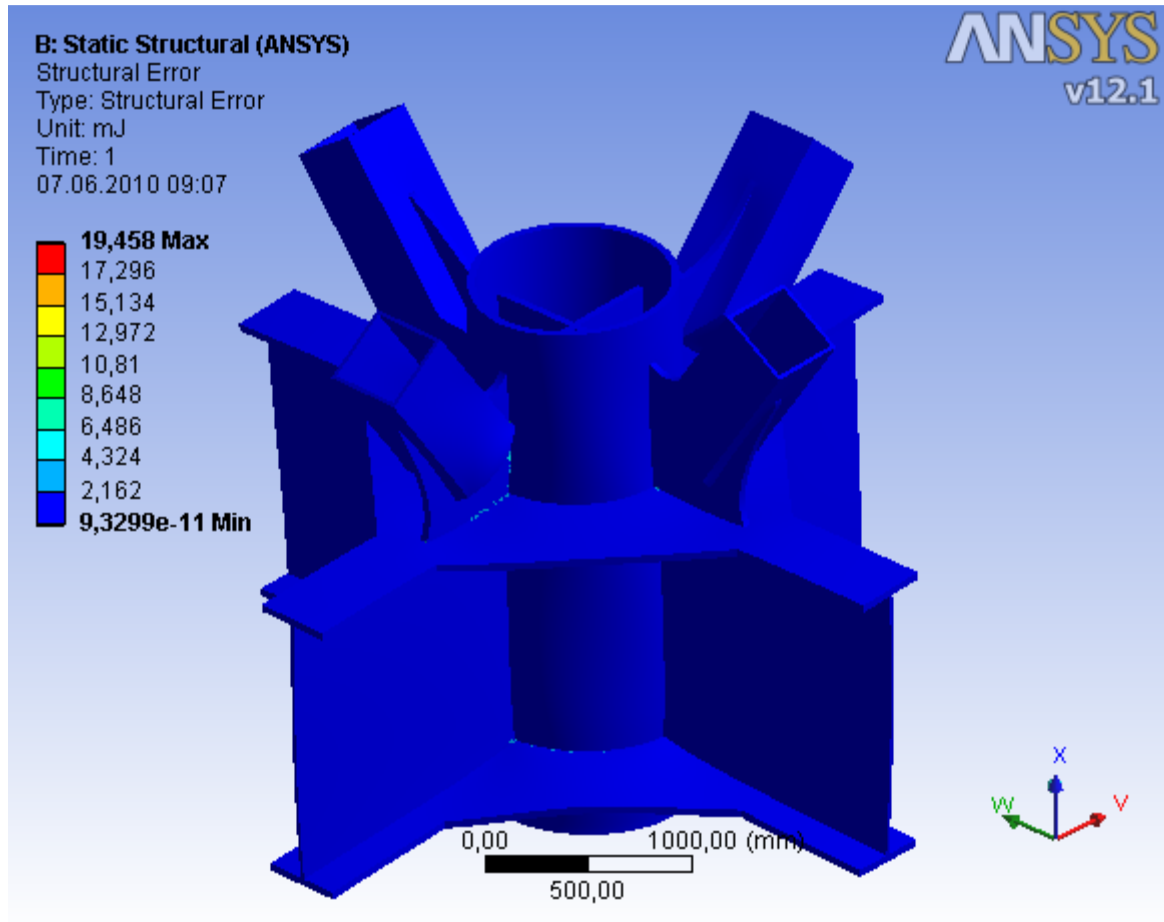
Dette er den tyngste lineære analysen som er kjørt, med 4 821 787 noder og 2 898 389 elementer og tiden datamaskinen brukte på denne analysen ble nesten 4 timer. Den gjennomsnittlige skjevheten for denne modellen ble 0,3741 med et standardavvik på 0,1792. Denne metoden ble kjørt for å finne ut hvor nøyaktig det var mulig å få modellen, samt å finne ut hvor store analyse datamaskinen ville være i stand til å takle.



Bilde 6-11 Spenningsplott mesh metode 3, modell W5

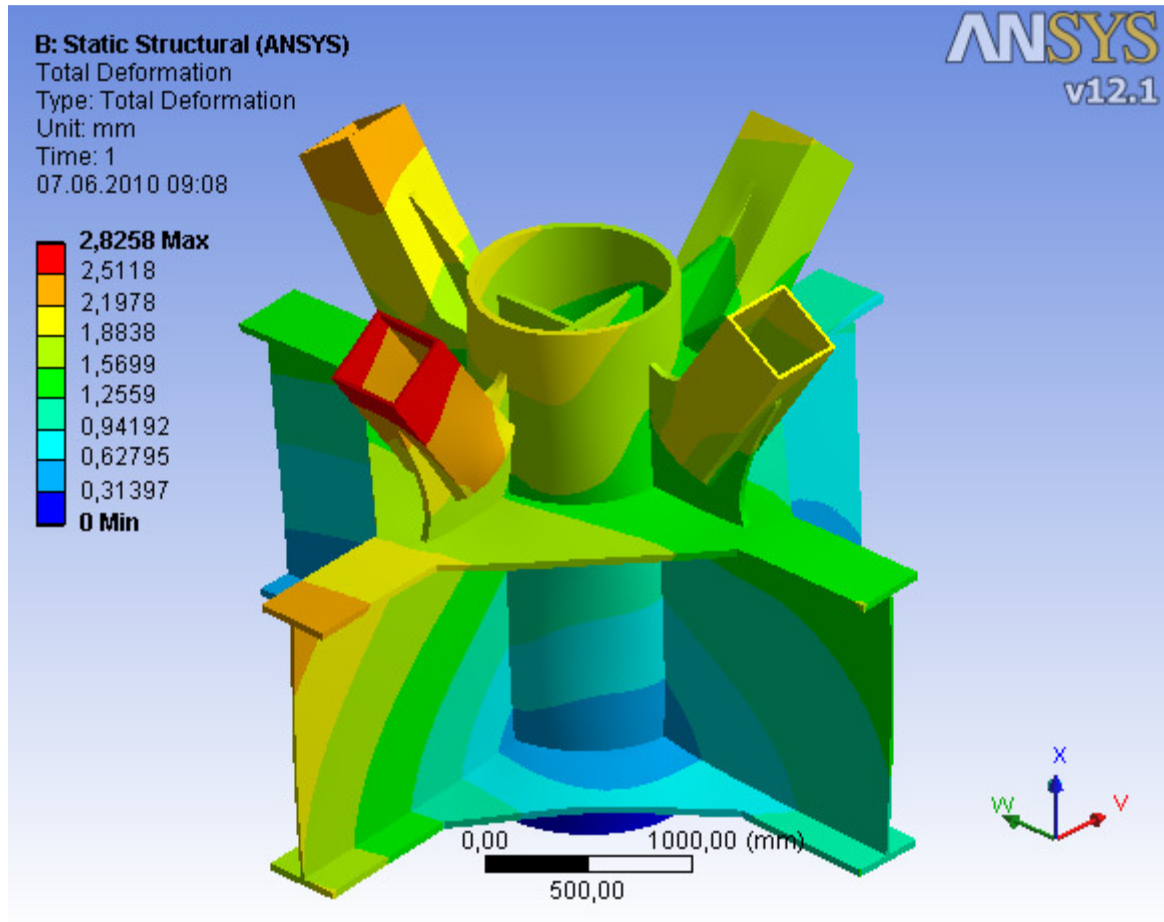
Ut ifra Bilde 6-11 ser en at en også her har spennings konsentrasjoner i gusset platene. Spenningene er noe høyere enn tidligere analyser da den er på 307,4 Mpa, men er fortsatt under grensen på 308,7.





Bilde 6-12 Feilvurdering mesh metode 3, modell W5

Ser en på Bilde 6-12 ser en at en også her får feilkonsentrasjon i de skarpkantede områdene, men feilene er mye lavere da antall elementer og noder er betydelig flere og mindre.

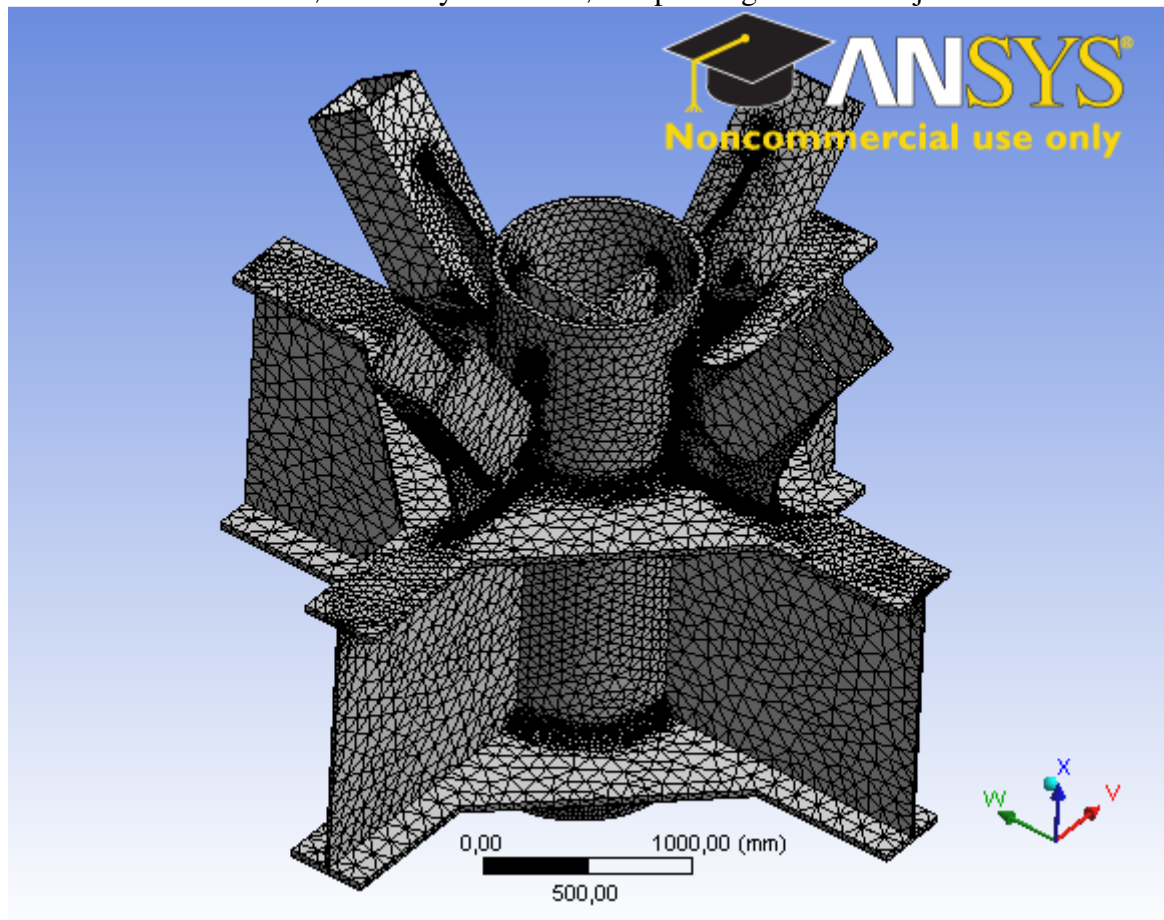


Bilde 6-13 Deformasjon mesh metode 3, modell W5

En ser av Bilde 6-13 at deformasjonen er også her ikke er mye forandret i forhold til de to foregående modellene.

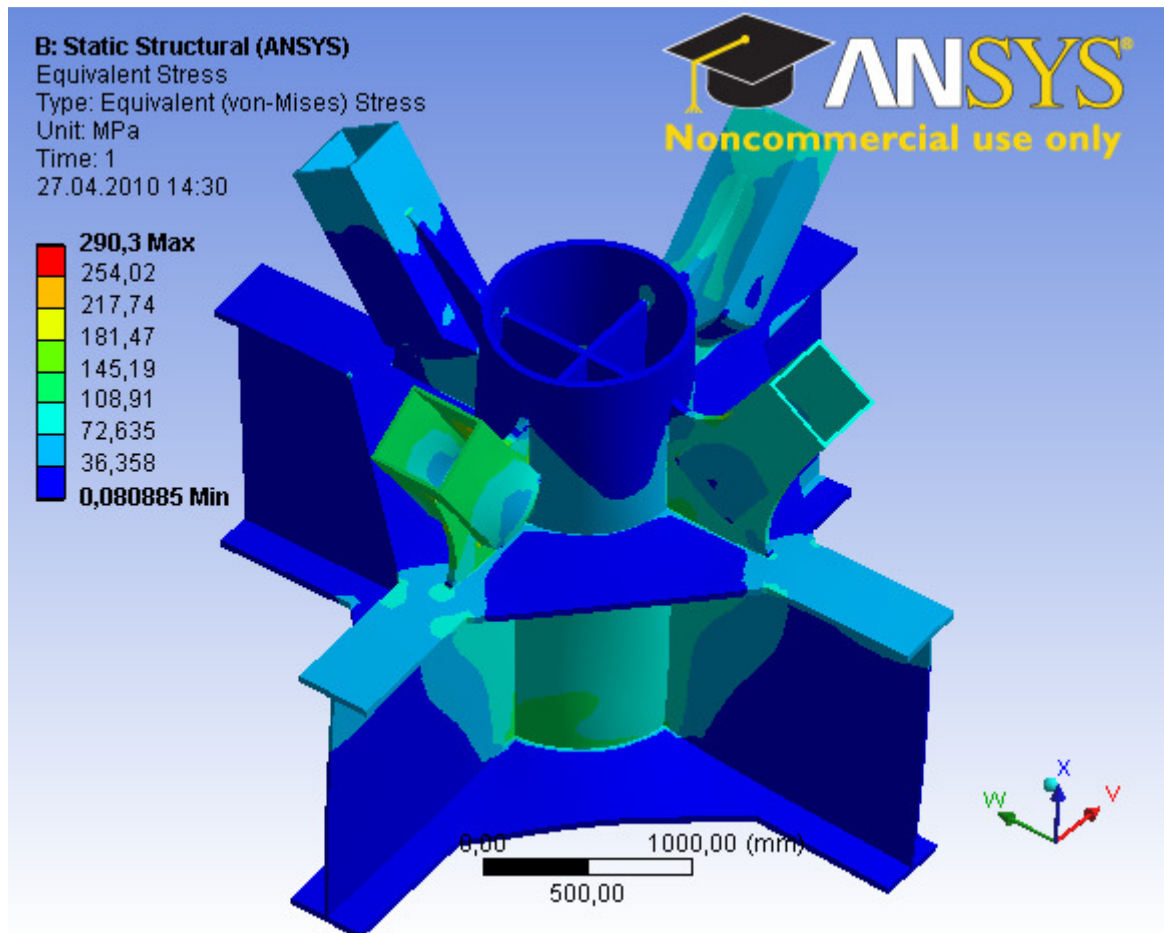
## 6.4 MESH METODE 4

Denne metoden er nesten samme metode som mesh metode 1, men med fin inndeling i visse områder der en fra den første analysen fikk størst spennings konsentrasjon.



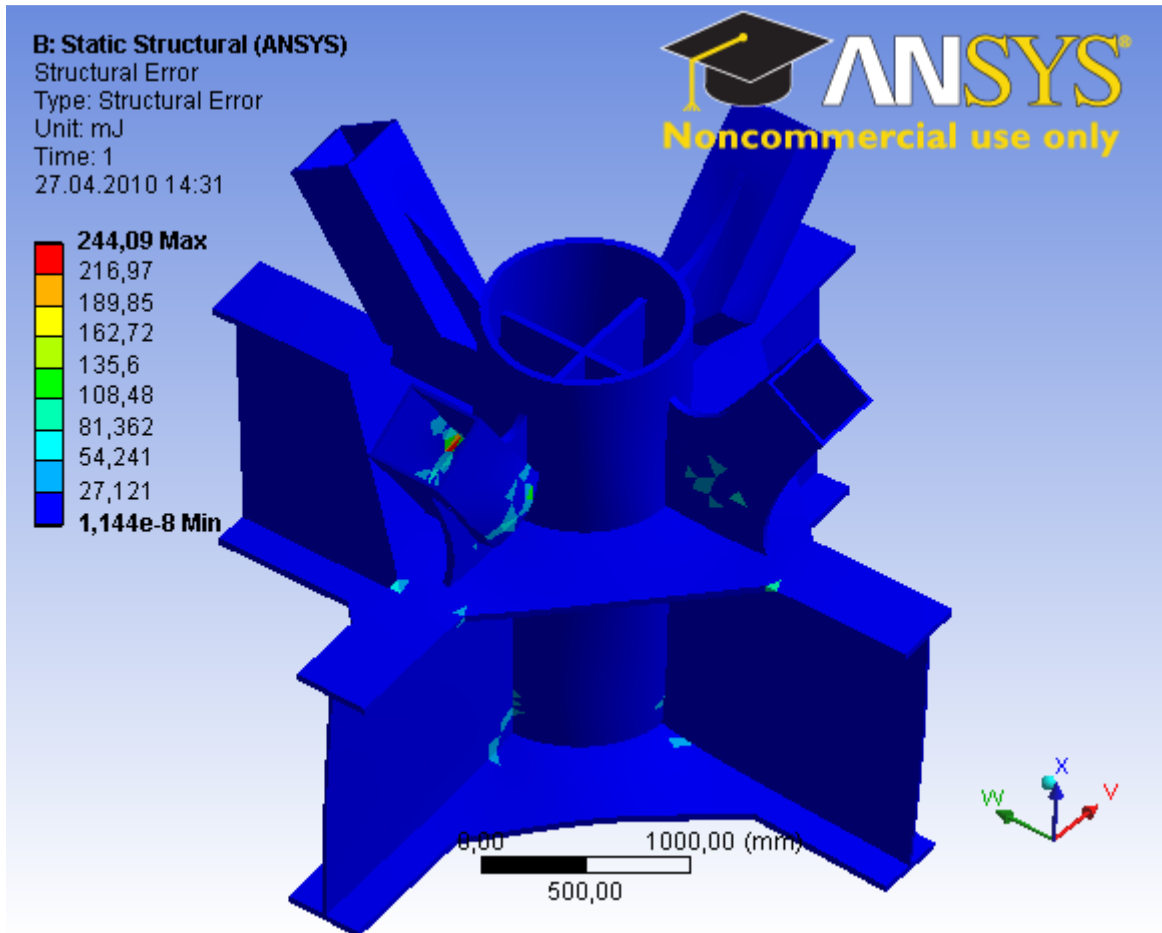
Bilde 6-14 Mesh metode 4, modell W5

En ser lett ut ifra Bilde 6-14 de områdene som det er finere inndeling av elementer i. Der er også her mindre med elementer ute i de store flatene på stegene til I-bjelkene, et område der det ikke trengs så mange elementer.



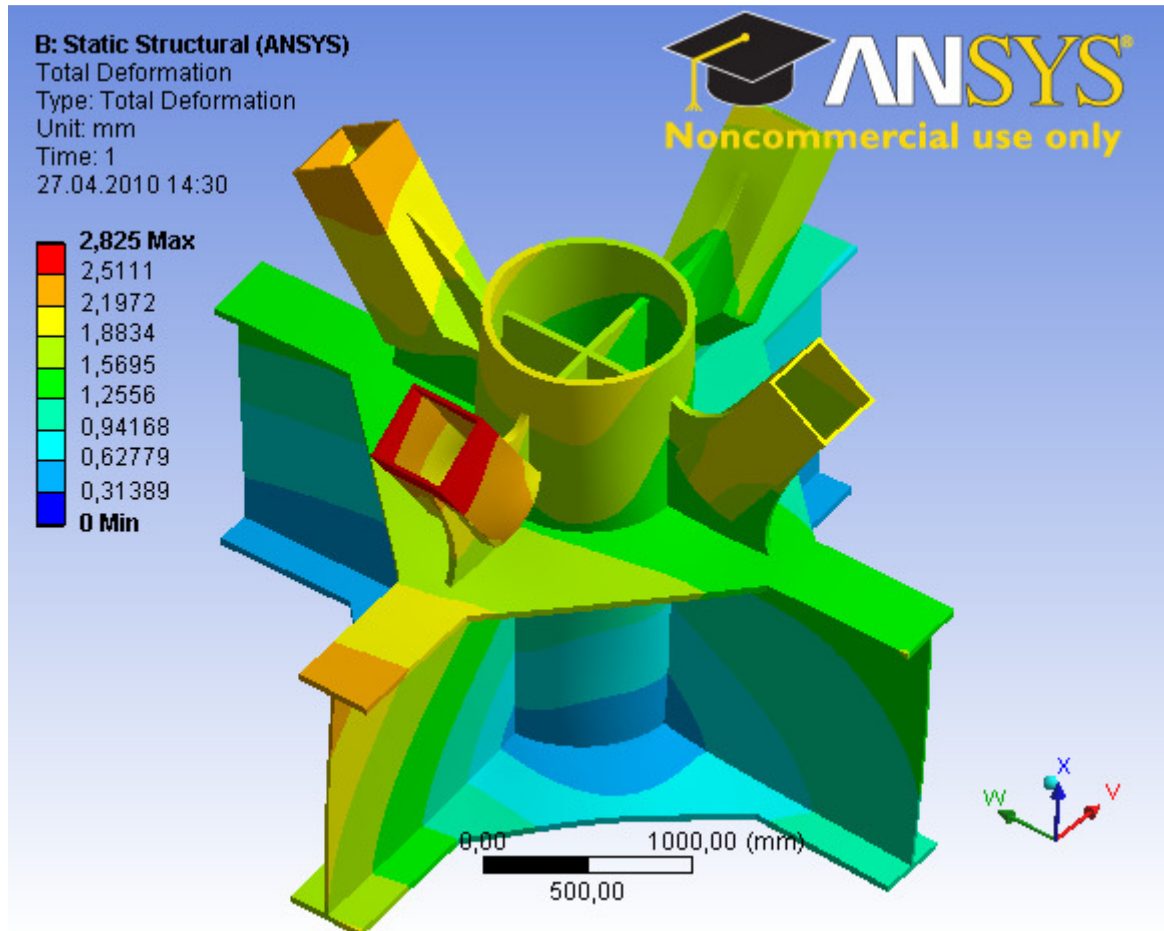
Bilde 6-15 Spenningsplott mesh metode 4, modell W5

En ser ut fra spenningsplotten at spenningene er fordelt i samme områder som tidligere analyser, men med litt høyere spenninger i de kritiske områdene. Dette skyldes finere inndeling og mer nøyaktig plotting som følge av større tetthet av elementer.



Bilde 6-16 Feilvurdering mesh metode 4, modell W5

Ut ifra Bilde 6-16 ser en at en får mye lavere feilestimat enn ved mesh metode 1, men det er fortsatt høyt. Feilene kommer i de områdene som har skarpe overganger, store kraftpåkjenninger og der det er det ikke er fininndelte elementer (skråstagnene).

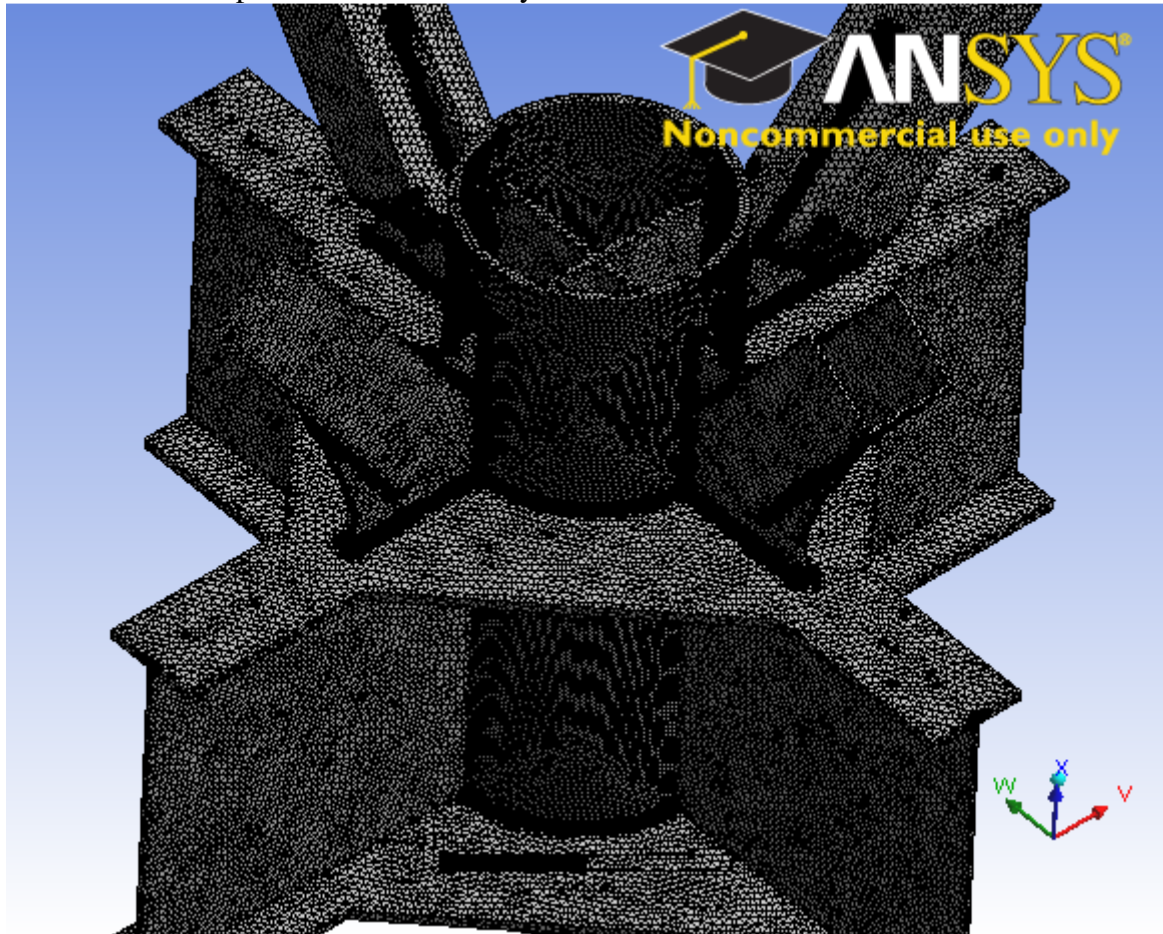


Bilde 6-17 Deformasjon mesh metode 4, modell W5

Deformasjonen for mesh metode 4 er også temmelig lik de andre meshing metodene for modell W5.

## 6.5 MESH METODE 5

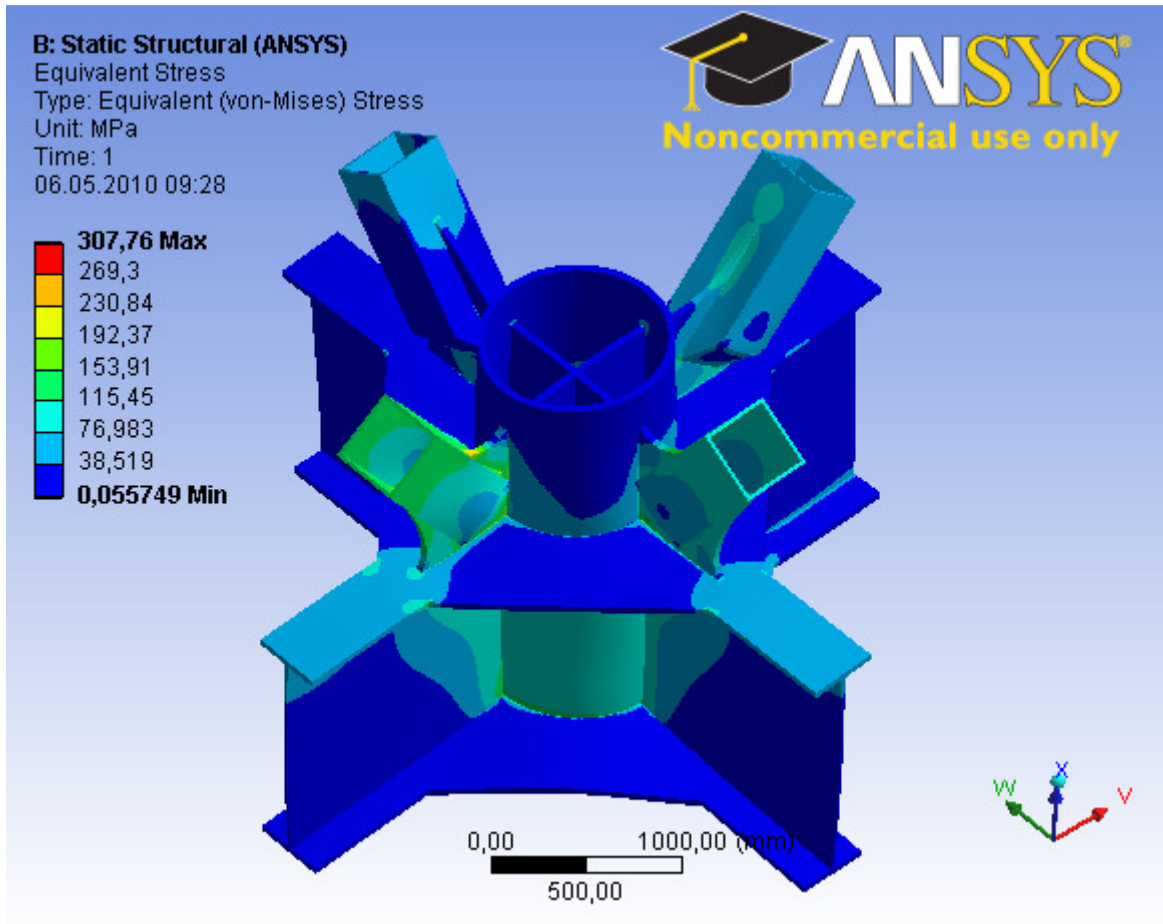
Metoden er en forbedring av mesh metode 2 med fin inndeling av elementene i de kritiske områdene fra resultatene i mesh metode 2. Det er med andre ord brukt en øvre grense på elementstørrelsen på 20mm i denne analysen.



Bilde 6-18 Mesh metode 5, modell W5

En ser ut ifra Bilde 6-18 at en får en meget tett inndeling av elementene også i de områdene en egentlig ikke trenger det. Dette da det tar meget lang tid å bygge opp meshingen manuelt i stedet for å la programmet gjøre jobben på få minutter.

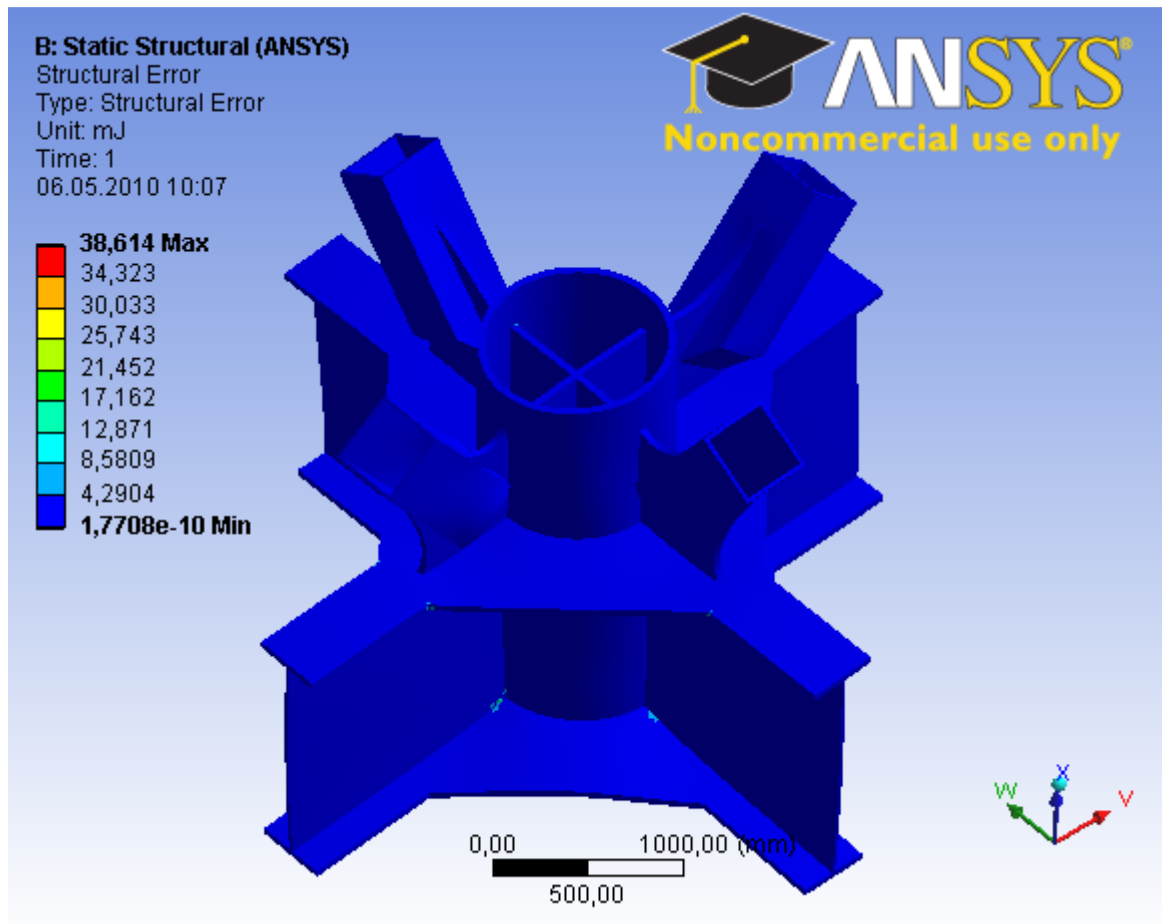
Statistisk sett er skjevheten på denne analysen på 0,3098 med et standardavvik på 0,1631. Der er 2 621 423 noder og 1 679 250 elementer, noe som førte til at denne lineære analysen tok ca 2 timer.



Bilde 6-19 Spenningsplott mesh metode 5, modell W5

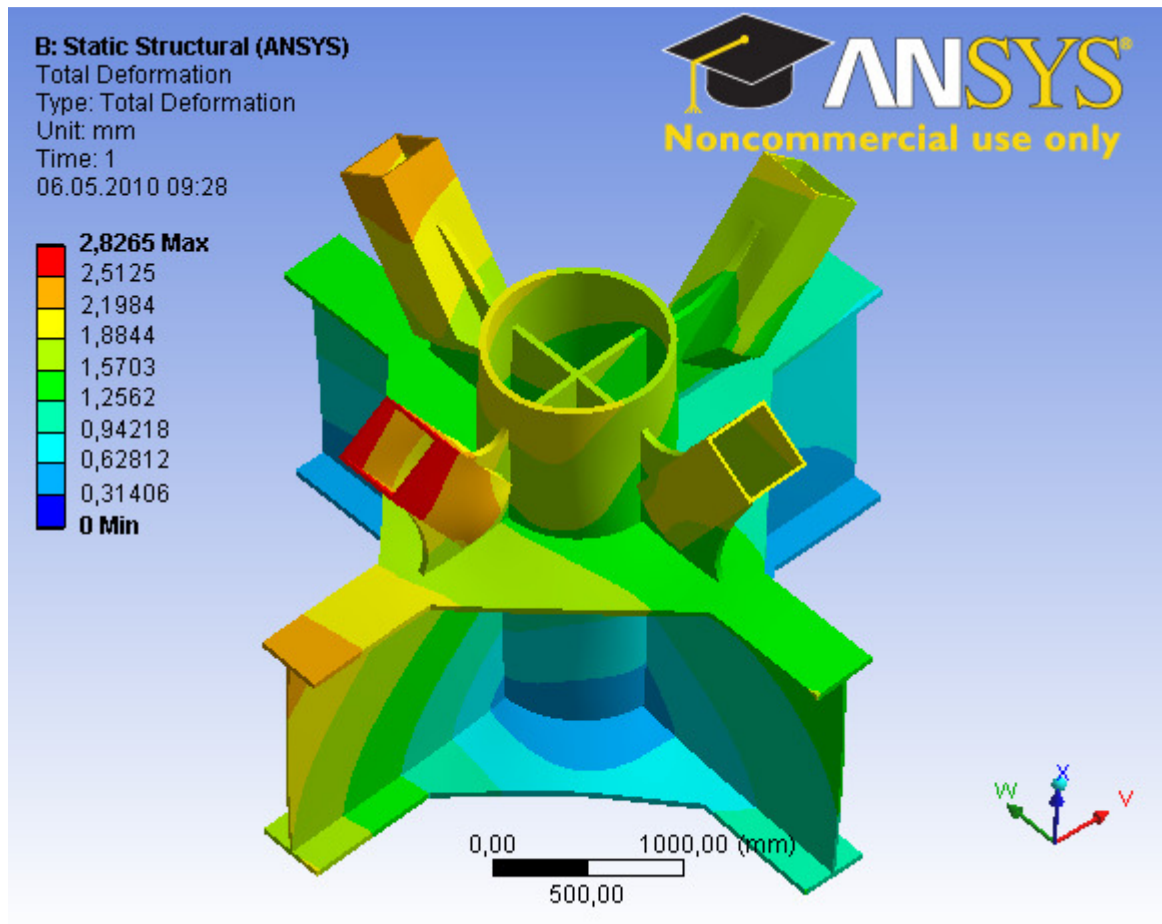
Bilde 6-19 viser at spenningene får samme konsentrasjonsområde som tidligere analyser, men med en noe høyere spenningsverdi fortsatt under grensen på 308,7MPa.





Bilde 6-20 Feilvurdering av mesh metode 5, modell W5

Områdene som det befinner seg feil i denne analysen er i hjørner med skarpe overganger, men det er langt mindre feil i modellen ved bruk av denne metoden sett opp imot de andre.

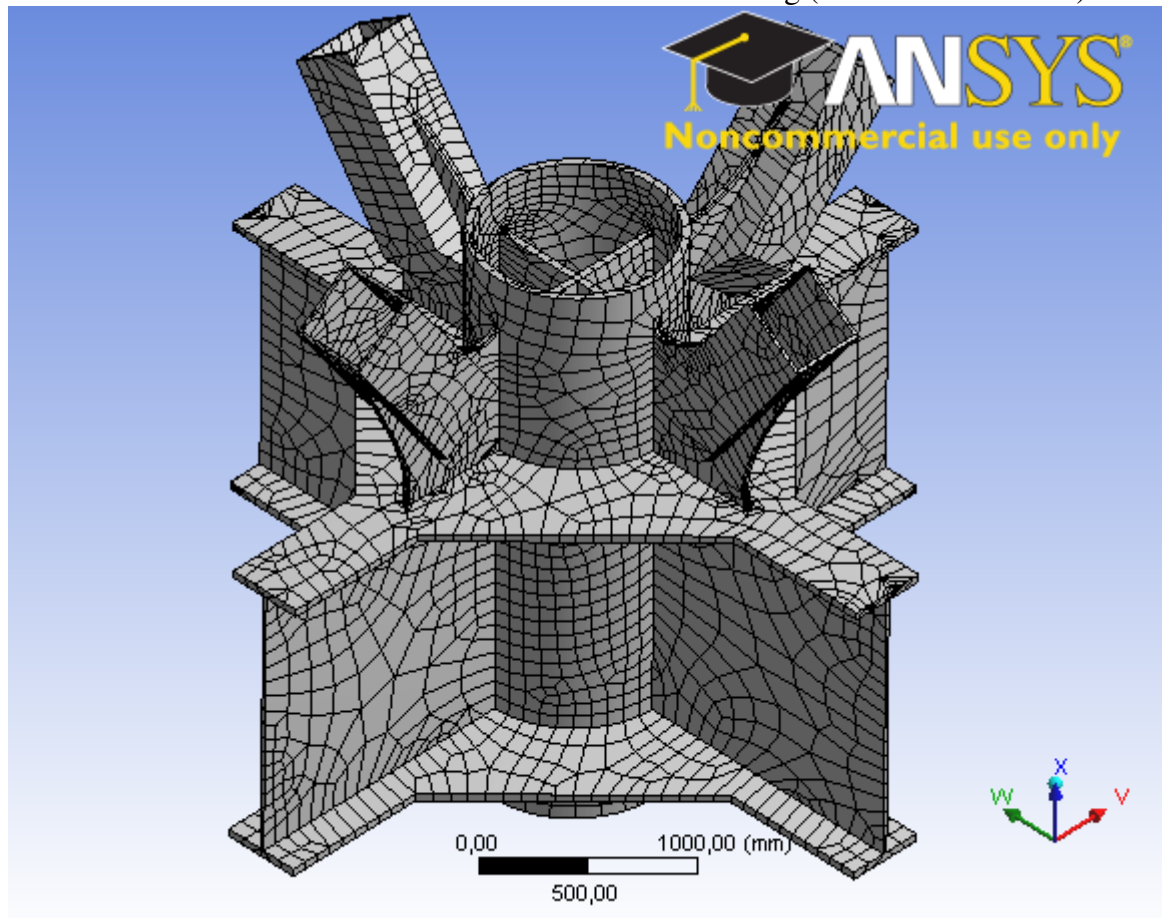


Bilde 6-21 Deformasjon mesh metode 5, modell W5

Det er heller ikke noen vesentlige endringer i forskyvingene ved bruk av elementinndelingen i mesh metode 5 sett opp imot de andre meshing metodene.

## 6.6 MESH METODE 6

Denne metoden er en automatisk heksaeder element inndeling (Solid 186 elementer).

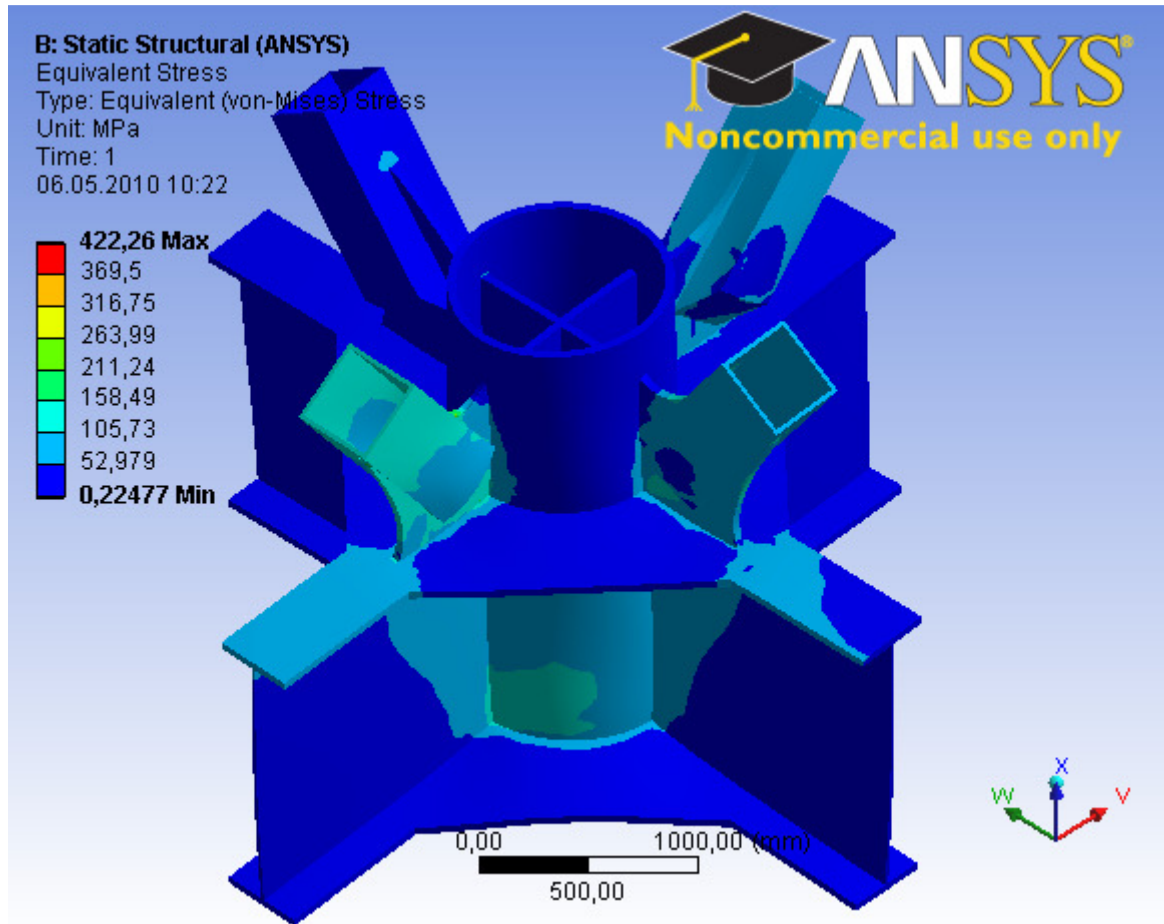


Bilde 6-22 Mesh metode 6, modell W5

Ser en på Bilde 6-22 ser en tydelig at inndelingen av elementene ikke er optimal alle steder, en får store variasjoner i størrelsene og formene på elementene da geometrien er såpass kompleks.

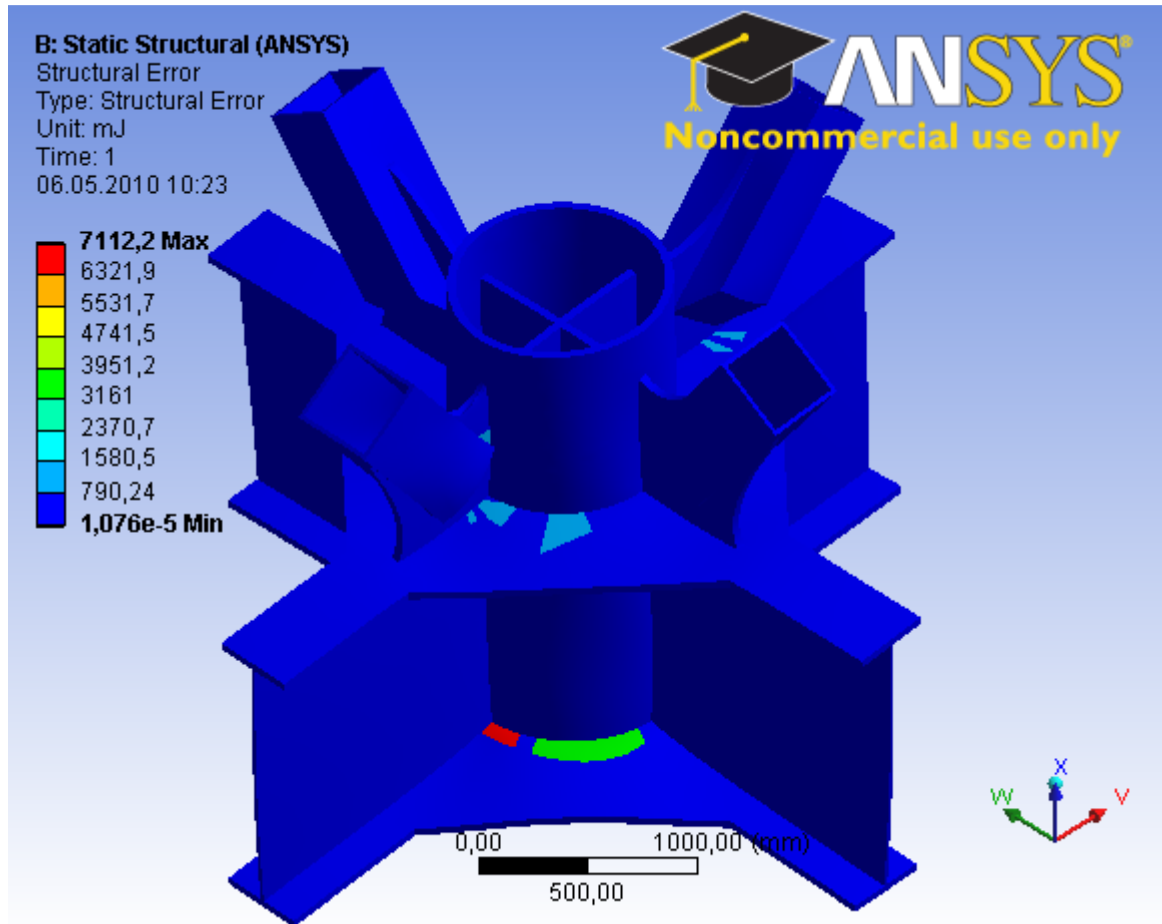
Den komplekse geometrien gjør at skjevheten til elementene blir hele 0,8028 med et standardavvik på 0,1613, noe som tyder på at elementene tilpasser seg geometrien på en heller dårlig måte.

Antallet noder på 74 748 og antallet elementer på 27 493 sammen med skjevheten tilsier at det ikke er nok for å tilpasse seg geometrien på en brukbar måte, og det er dermed et for lavt antall elementer ved bruk av heksaeder elementer.



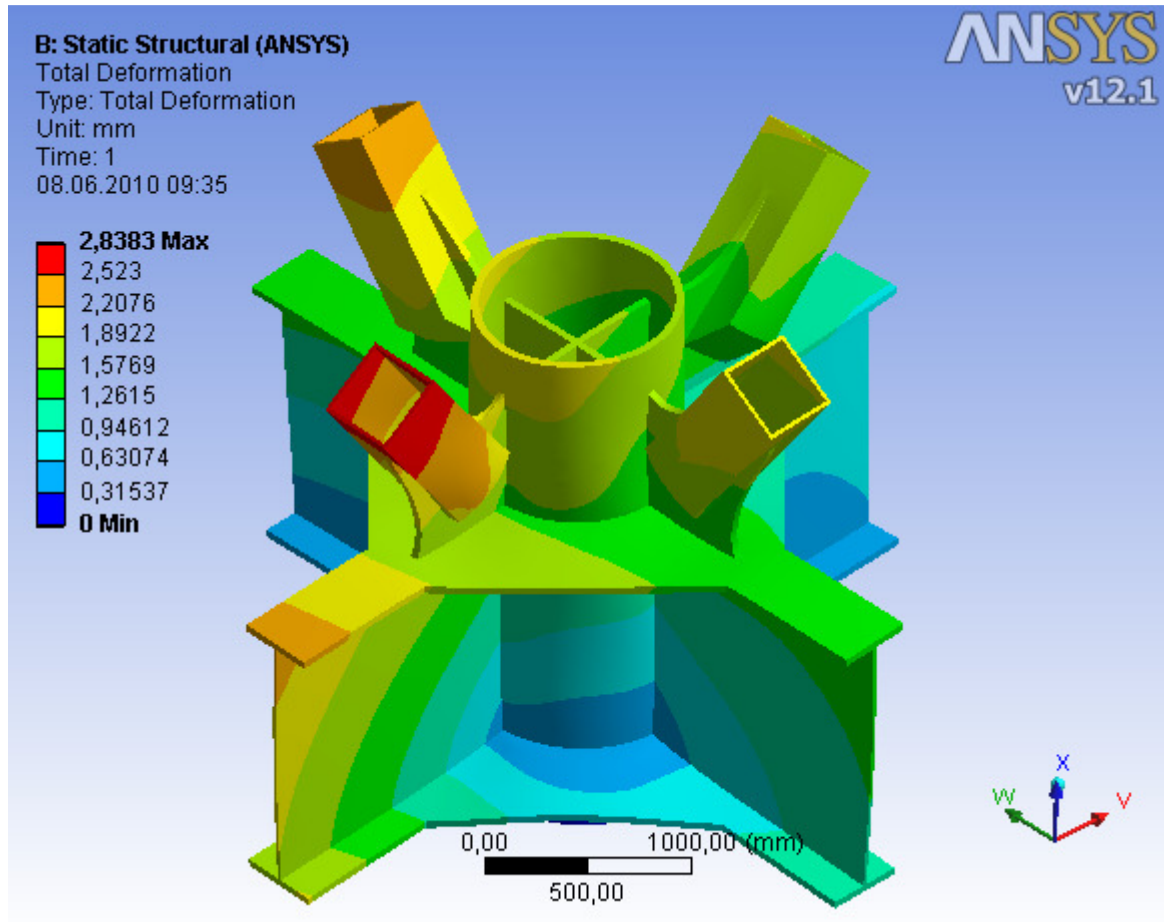
Bilde 6-23 Spenningsplott mesh metode 6, modell W5

Ser en på Bilde 6-23 ser en at spenningene er høyere enn materialverdien på 308,7MPa, og dermed tyder dette på at strukturen ikke vil holde.



Bilde 6-24 Feilvurdering mesh metode 6, modell W5

En ser ut ifra Bilde 6-24 at feilene i modellen er mye større enn for noen av de andre modellene. Disse høye verdiene gjør at en får en dårlig avbilding av feilene da skaleringen grunnet de ekstreme spissverdiene har større steg enn på noen av de andre analysene.

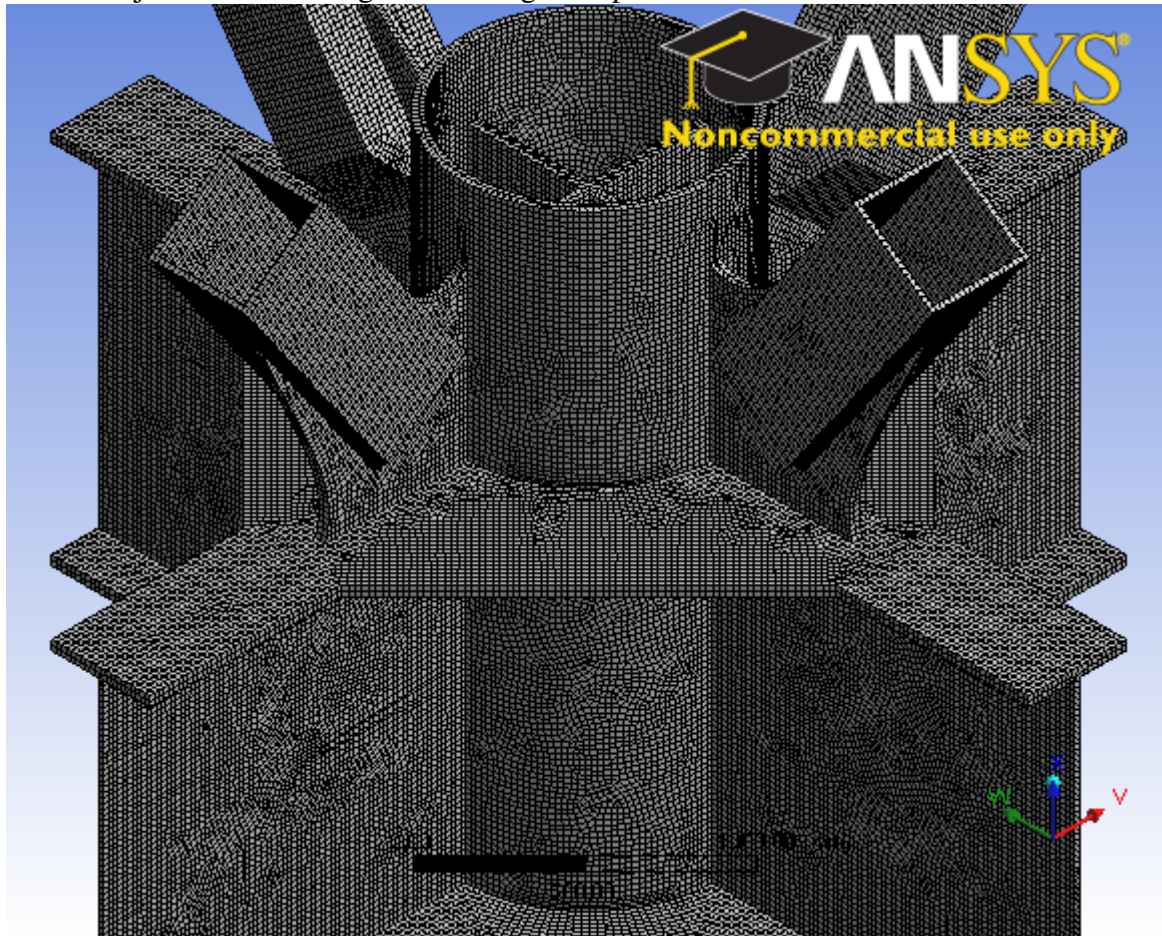


Bilde 6-25 Deformasjon mesh metode 6, modell W5

Deformasjonene ved bruk av mesh metode 6 blir, som vist på Bilde 6-25, omtrent den samme som for de andre meshing metodene på modell W5.

## 6.7 MESH METODE 7

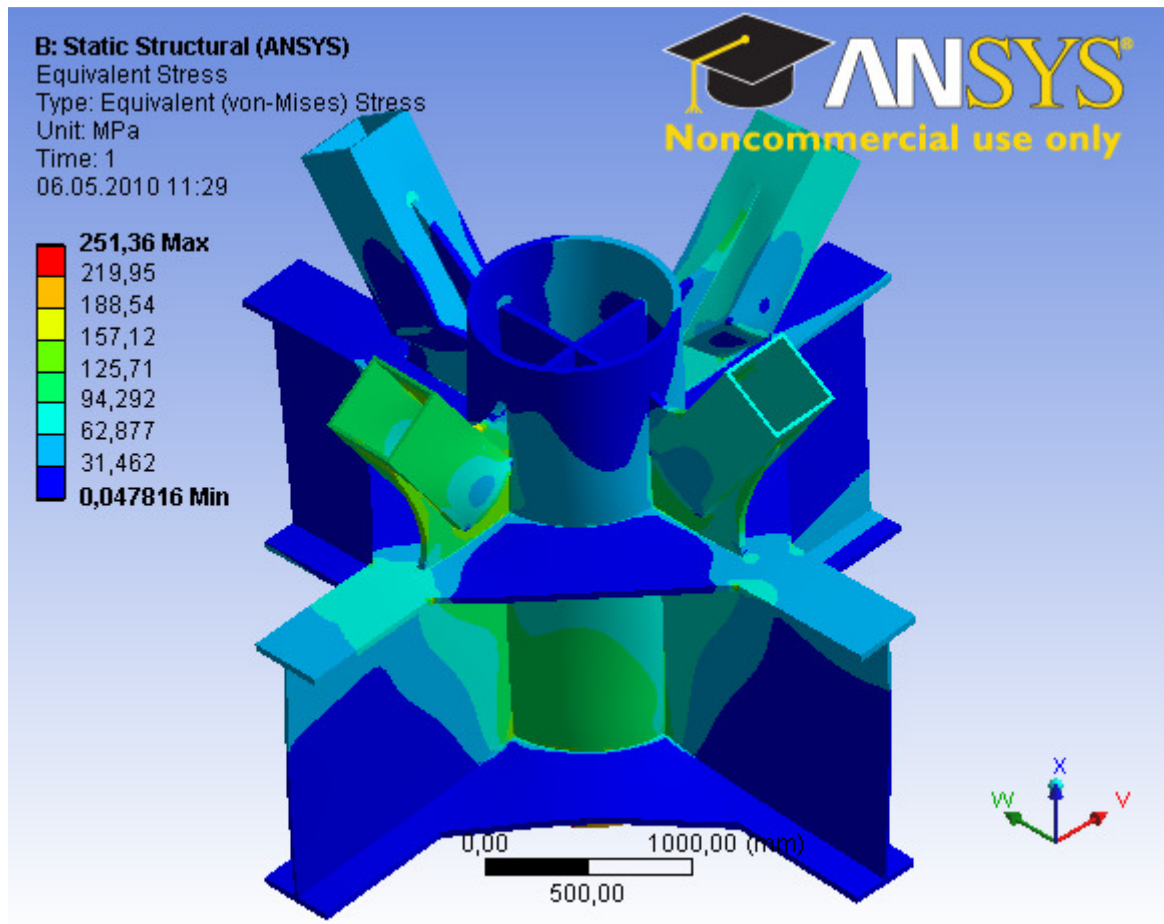
er en detaljer mesh inndeling med maks grense på 20mm med bruk av heksaeder elementer.



Bilde 6-26 Mesh metode 7, modell W5

En ser av Bilde 6-26 at inndelingen av elementene ved bruk av denne modellen har en mye bedre inndeling av elementene enn mesh metode 6. Dette skyldes at elementene i denne analysen har en maksimal størrelse på 20mm noe som samsvarer med de tynneste stålplatene i I-bjelke stegene på 20mm.

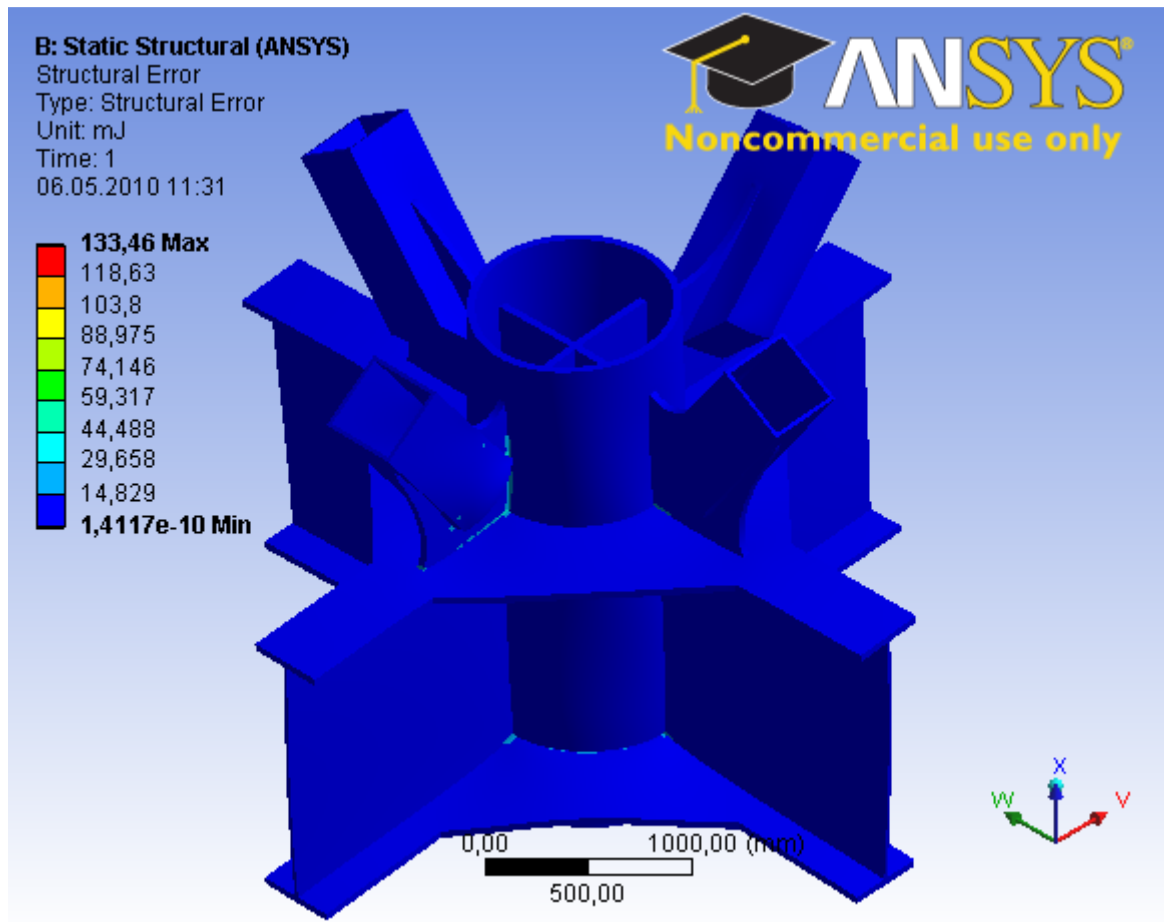
Skjevheten gikk drastisk ned når en fikk en finere inndeling, den gjennomsnittlige verdien kom på 0,4233 med et standardavvik på 0,2977. Det høye standardavviket skyldes at heksaeder elementene ikke er spesielt gode til å tilpasse seg den komplekse geometrien.



Bilde 6-27 Spenningsplott mesh metode 7, modell W5

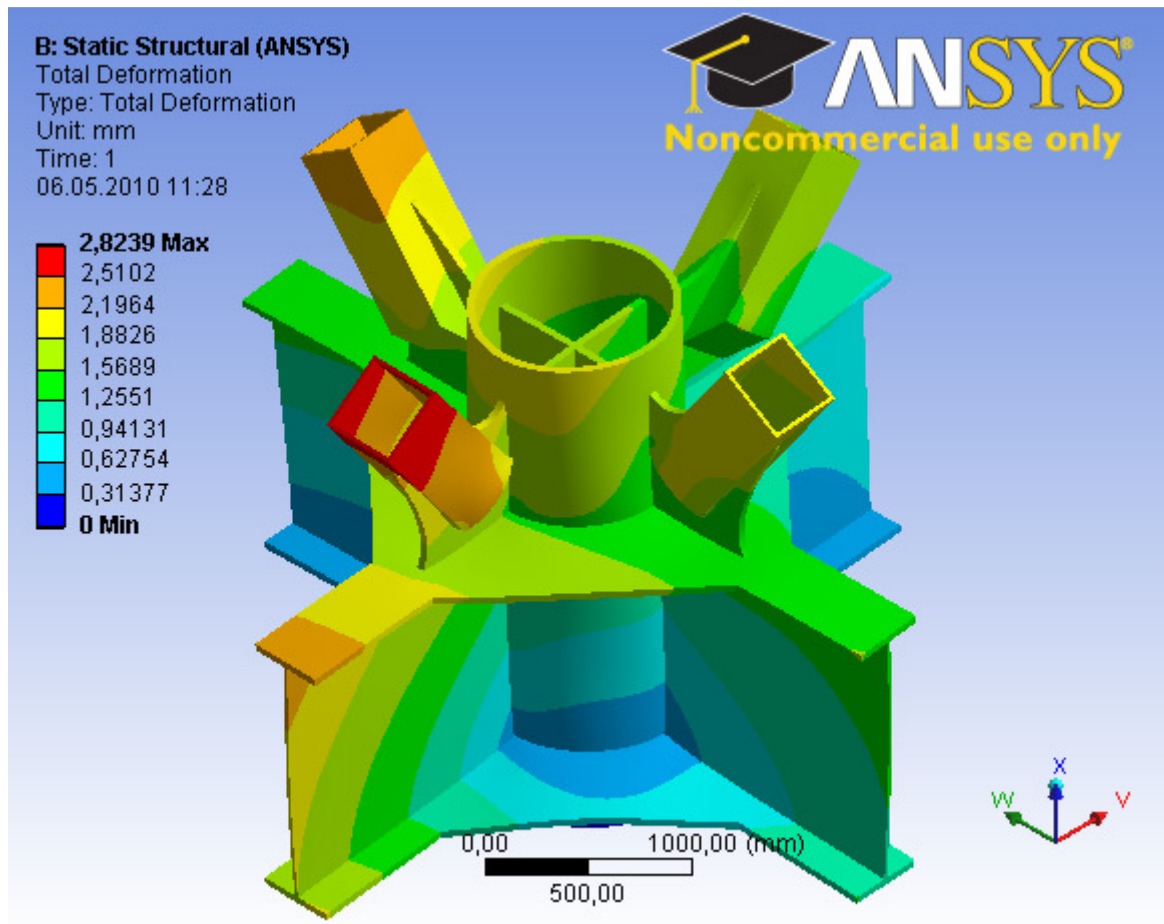
En får ved å bruke mesh metode 7 også de høyeste spenningskonsentrasjonene i gusset platene. Spenningsverdien kommer godt under materialkravet på 308,7MPa og er et langt bedre resultat enn for mesh metode 6.





Bilde 6-28 Feilvurdering mesh metode 7, modell W5

Ut ifra Bilde 6-28 ser en at en får feilkonsentrasjonene i de skarpe hjørnene i modellen, samt i selve skråstagnene. I størrelses orden er feilene betydelig mindre enn for mesh metode 6, det er dermed en bedre modell for tolkning av resultatene.



Bilde 6-29 Deformasjon mesh metode 7, modell W5

Deformasjonen som vist på Bilde 6-29 er tilnærmet lik den som kommer frem av tetraeder analysene (mesh metodene 1 til 5), samt deformasjonen fra den andre heksaeder inndelingen.

## VEDLEGG B

### Resultater fra lineære analyser for støpte knutepunkter

#### Innhold

Resultater Støpt knutepunkt .....	2
1 Resultat støpt modell C1 .....	2
1.1 Mesh metode 1 .....	3
1.2 Mesh metode 2 .....	7
1.3 Mesh metode 3 .....	11
1.4 Mesh metode 4 .....	15
2 Resultat støpt modell C2 .....	19

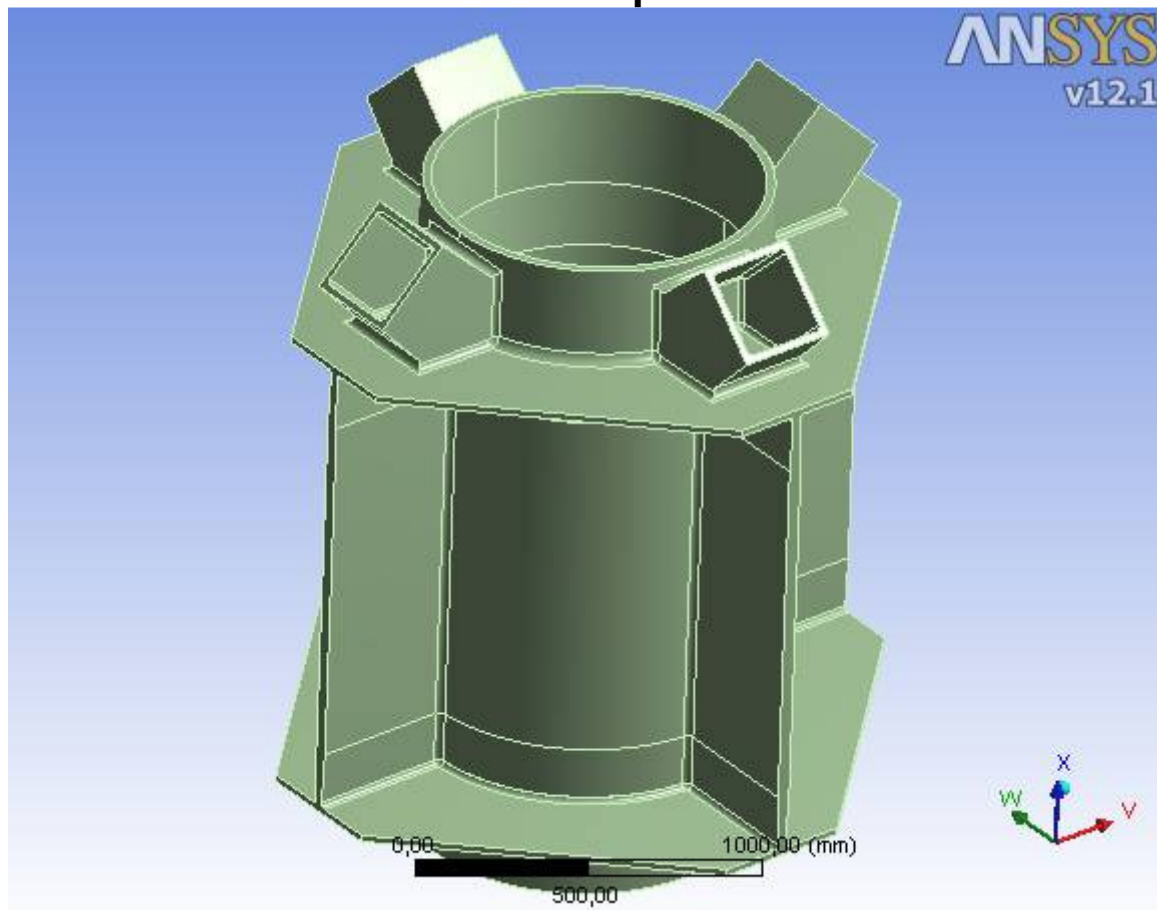
#### Bildeliste

Bilde 1-1 Støpt modell C1 .....	2
Bilde 1-2 Mesh metode 1, modell C1 .....	3
Bilde 1-3 Spenningsplott metode 1, modell C1 .....	4
Bilde 1-4 Feilvurdering mesh metode 1, modell C1 .....	5
Bilde 1-5 Deformasjoner mesh metode 1, modell C1 .....	6
Bilde 1-6 Mesh metode 2, modell C1 .....	7
Bilde 1-7 Spenningsbilde mesh metode 2, modell C1 .....	8
Bilde 1-8 Feilvurdering mesh metode 2, modell C1 .....	9
Bilde 1-9 Deformasjon mesh metode 2, modell C1 .....	10
Bilde 1-10 Mesh metode 3 .....	11
Bilde 1-11 Spenningsbilde mesh metode 3, modell C1 .....	12
Bilde 1-12 Feilvurdering mesh metode 3, modell C1 .....	13
Bilde 1-13 Deformasjon mesh metode 3, modell C1 .....	14
Bilde 1-14 Mesh metode 4, modell C1 .....	15
Bilde 1-15 Spenningsbilde mesh metode 4, modell C1 .....	16
Bilde 1-16 Feilvurdering mesh metode 4, modell C1 .....	17
Bilde 1-17 Deformasjon mesh metode 4, modell C1 .....	18
Bilde 2-1 Modell C2 .....	19
Bilde 2-2 Meshing modell C2 .....	20
Bilde 2-3 Spenningsbilde modell C2 .....	21
Bilde 2-4 Feilvurdering modell C2 .....	22
Bilde 2-5 Deformasjon modell C2 .....	23

## Resultater Støpt knutepunkt

Det er designet noen støpte modeller i samarbeid med Scana Steel Stavanger AS for å få en optimal geometrisk modell som både er sterk og enkel å støpe. Spesielt det at knutepunktet skal være støpevennlig har stor innvirkning på geometrien.

### 1 Resultat støpt modell C1



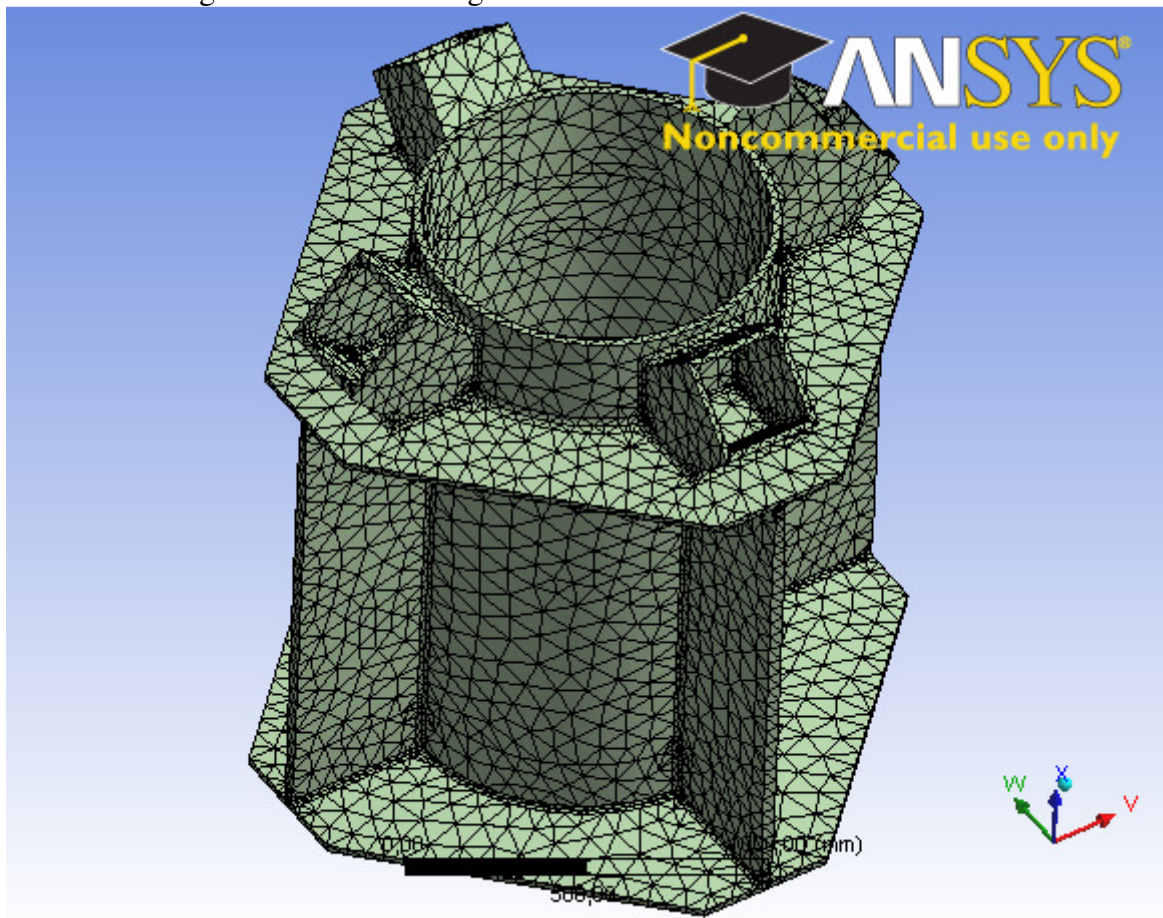
Bilde 1-1 Støpt modell C1

Den støpte modellen C1 er den som ligner mest på det sveiste knutepunktet, dette da den sveiste er tatt som utgangspunkt for det støpte. Veggykkelsene i det støpte er grunnet støpetekniske årsaker mye tykkere enn for det sveiste, dette gjør at vekten på modell C1 kommer over 8 tonn.

Det også på de støpte modellen gått frem for å finne den mest korrekte løsningen på problemet ved å prøve seg frem med forskjellige elementinndelinger.

## 1.1 Mesh metode 1

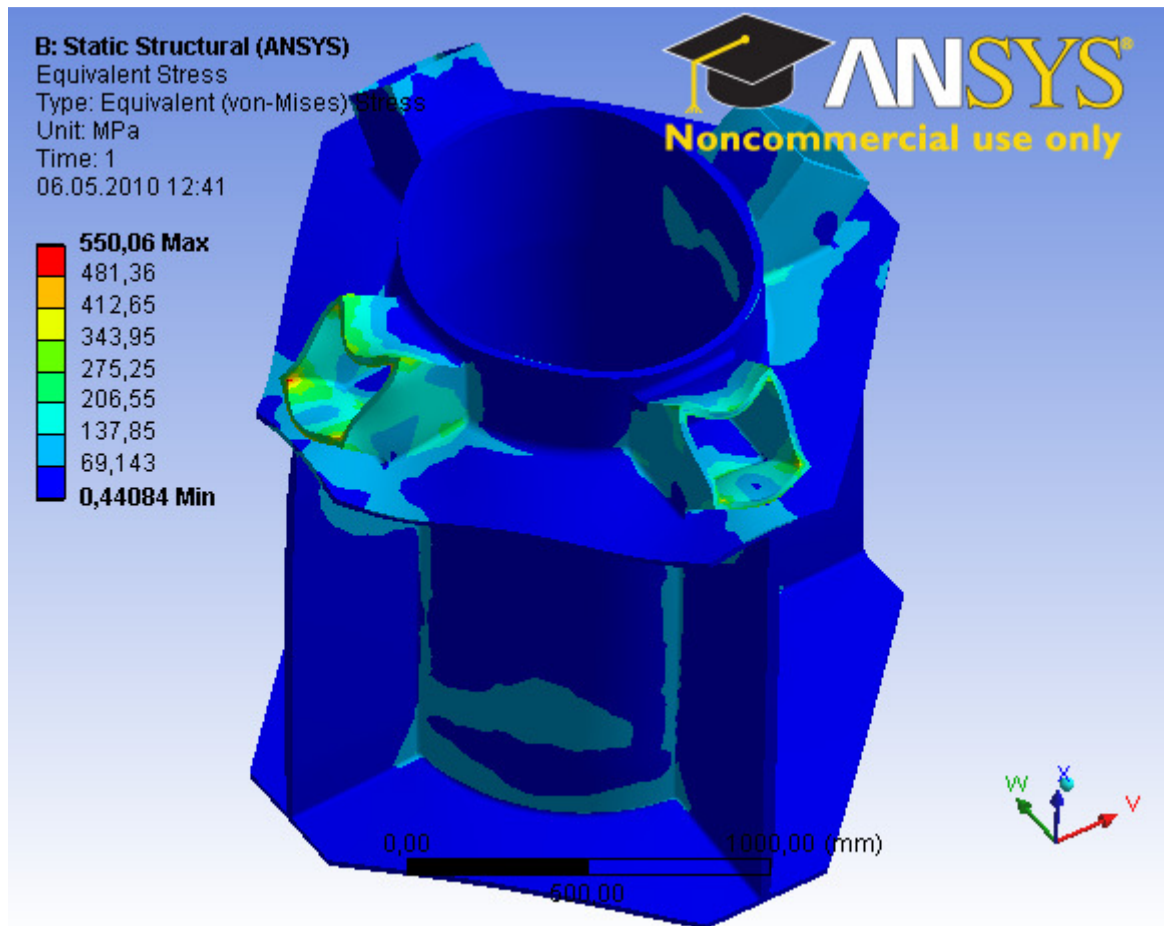
Automatisk valg av elementinndeling.



Bilde 1-2 Mesh metode 1, modell C1

Mesh metode 1 er det som programmet setter opp som automatisk valgt elementinndeling, det er da tetraeder elementer som er brukt. En ser av Bilde 1-2 at programmet tilpasser seg de runde kurvaturene i hjørnene og legger inn flere elementer i disse områdene, samtidig som det ikke legger inn for mange elementer i de store flatene.

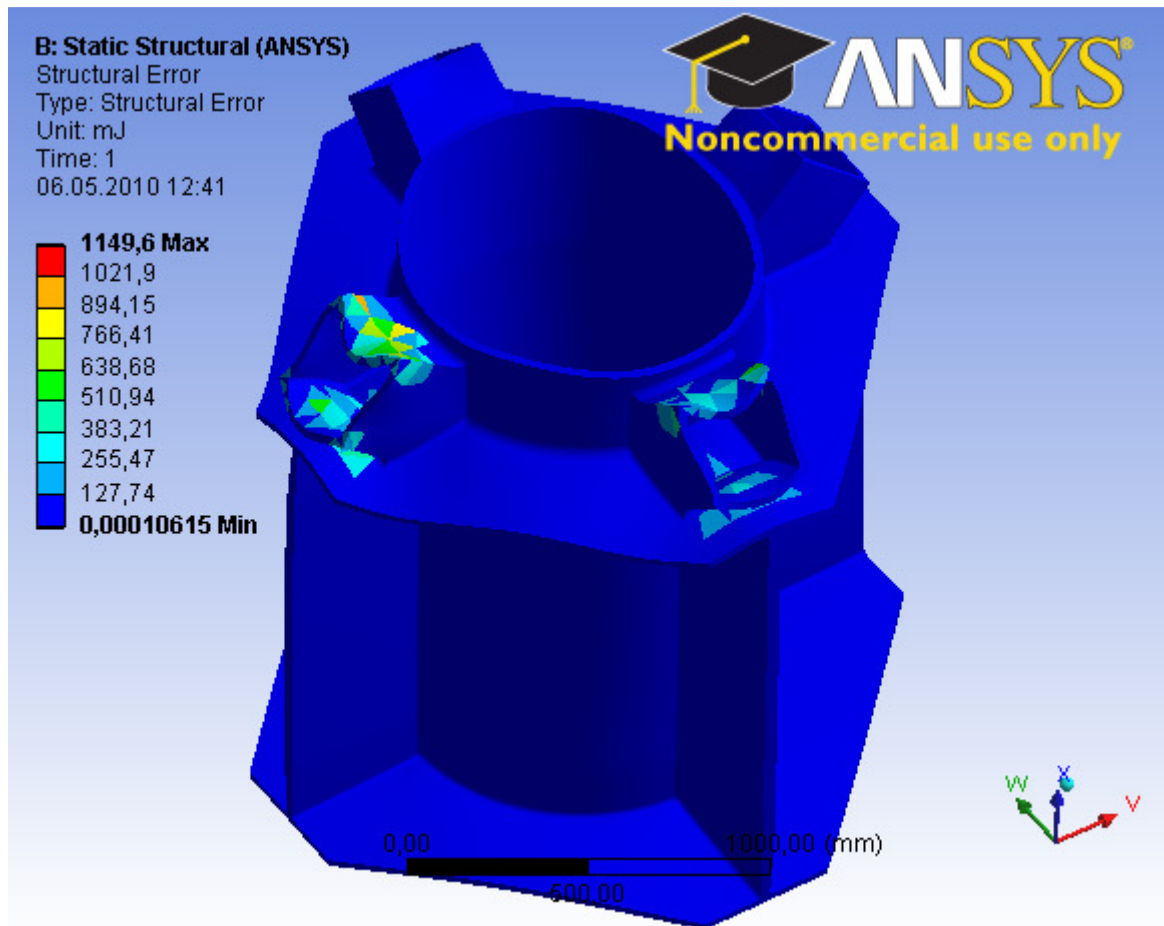
Statistisk er det i denne modellen en skjevhet på 0,4947 med et standard avvik på 0,2289. Der er 76 748 noder og 44 013 elementer, noe som er noenlunde det samme som for mesh metode 1 for det sveiste knutepunktet.



Bilde 1-3 Spenningsplott metode 1, modell C1

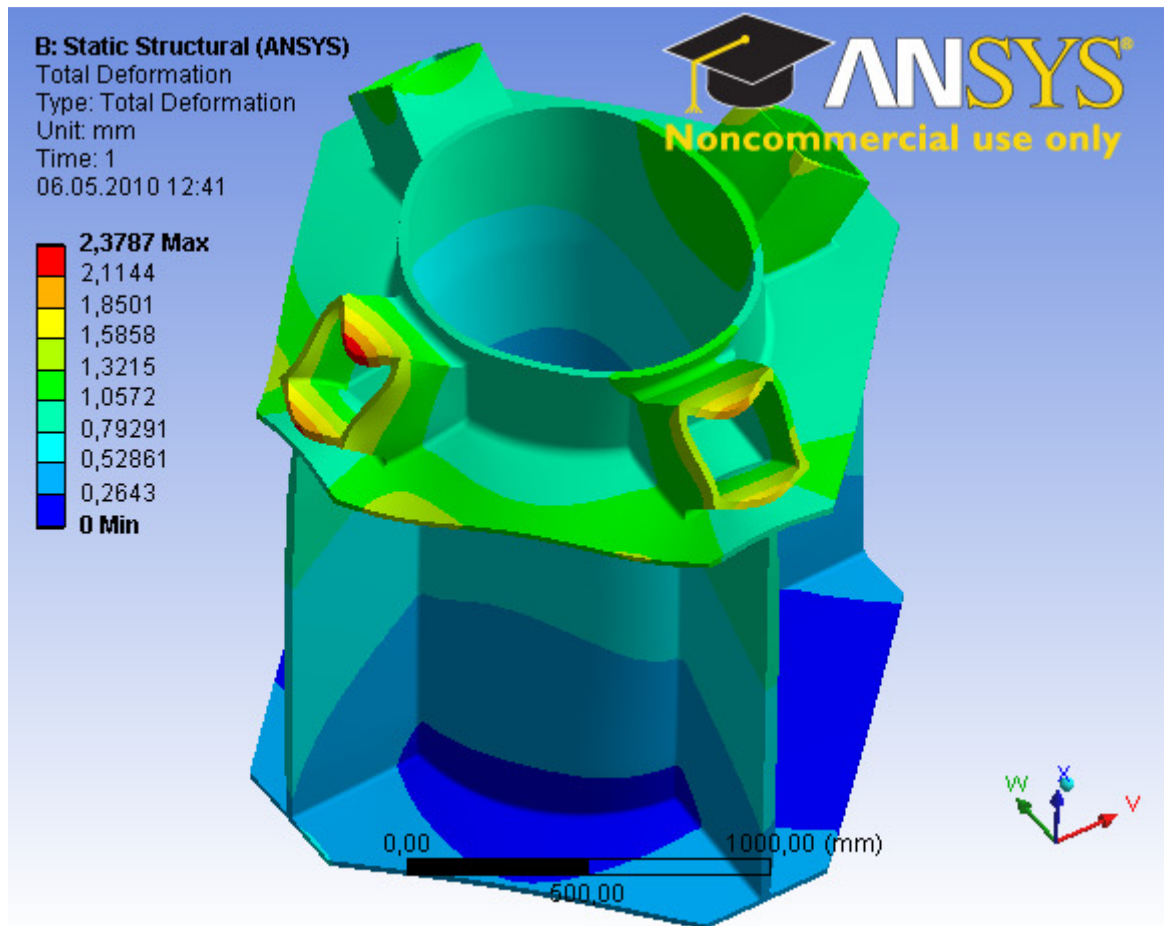
En ser av Bilde 1-3 at en får høye spenningsverdier i de punktene der skråstagene vil komme inn på knutepunktet. Dette skyldes at det har blitt forsøkt brukt en universal vinkel på 45grader på alle skråstagene, noe som ville vært optimalt dersom en ville forandre på vinklene til skråstagene uten å måtte produsere et nytt knutepunkt.

Spenningen på hele 550MPa tilsier at knutepunktet ikke vil holde for de gitte kreftene da det overstiger grensen på 365MPa.



Bilde 1-4 Feilvurdering mesh metode 1, modell C1

Ut ifra feilvurderingsbilde ser en at en får store feil i de områdene der skråstagnene kommer inn på knutepunktet. Dette skyldes store deformasjoner og spenningskonsentrasjoner i disse områdene.



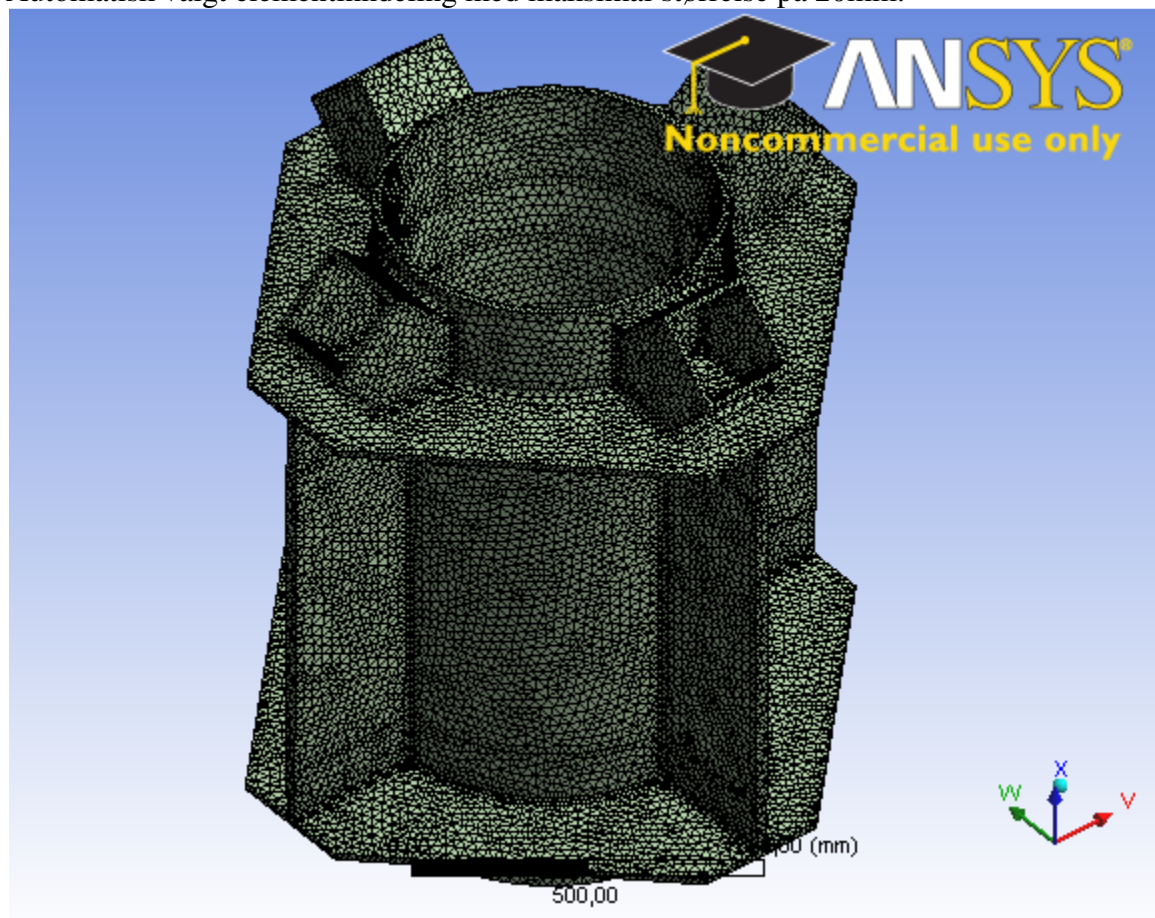
Bilde 1-5 Deformasjoner mesh metode 1, modell C1

Som en ser ut ifra deformasjonsbildet får en størst deformasjoner i de områdene der skråstagnene kommer inn på knutepunktet. Dette skyldes forsøket på å bruke en optimal vinkel i geometrien.



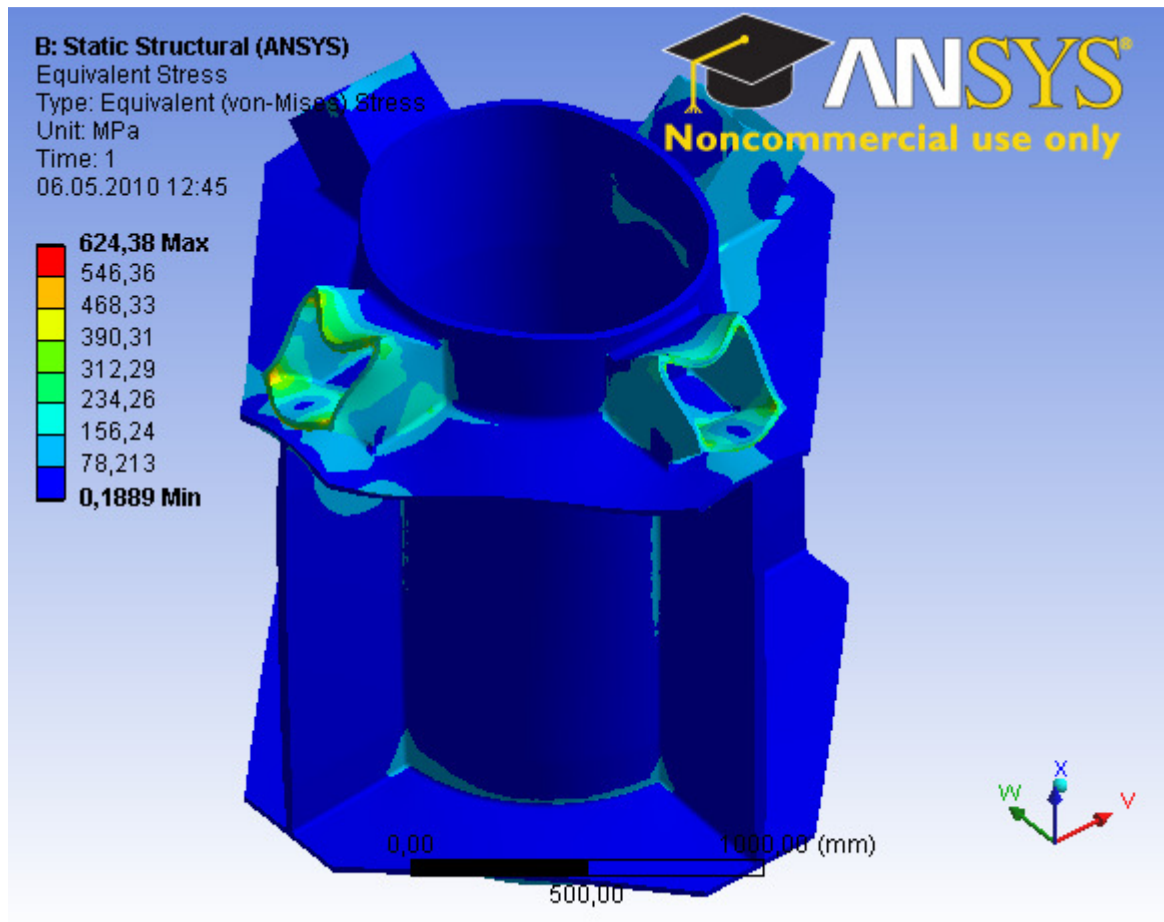
## 1.2 Mesh metode 2

Automatisk valgt elementinndeling med maksimal størrelse på 20mm.



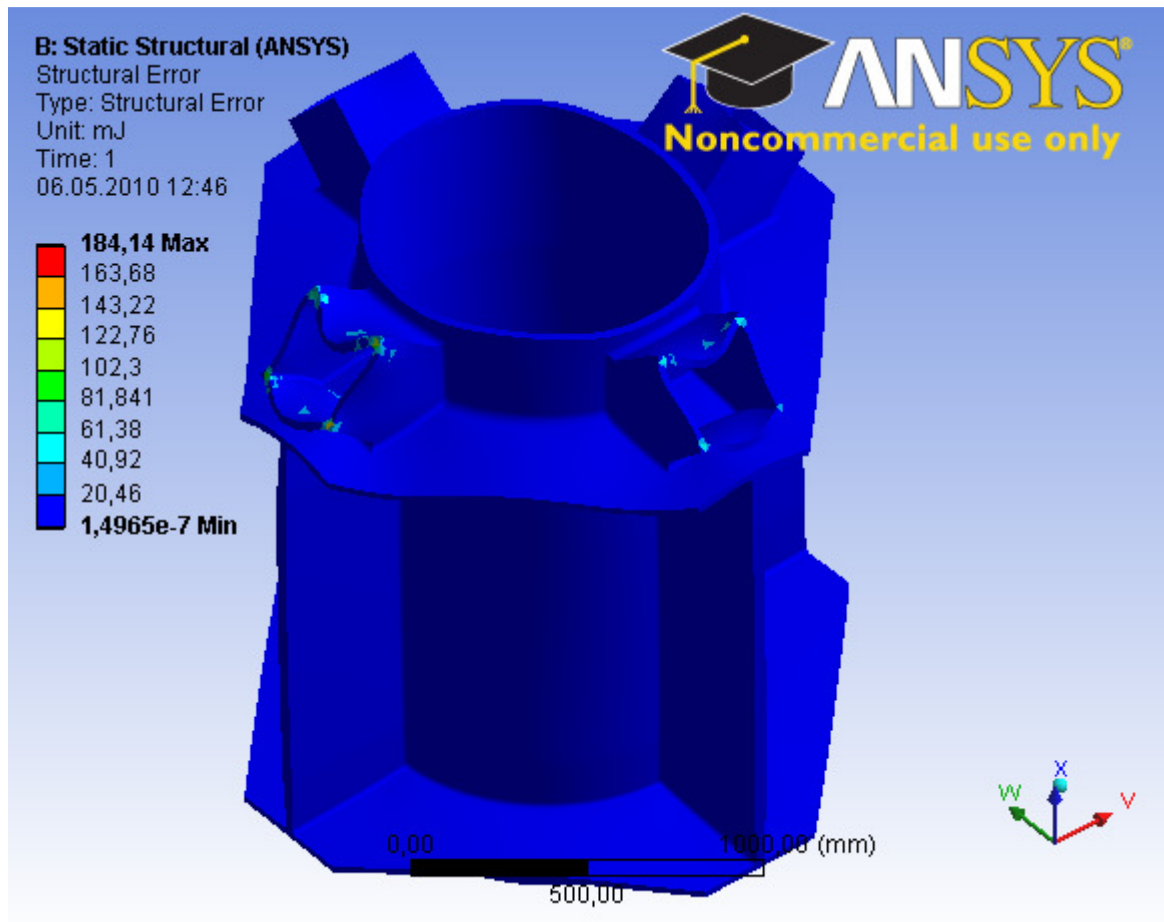
Bilde 1-6 Mesh metode 2, modell C1

Element inndelingen blir som vist på Bilde 1-6 temmelig tett og detaljert. Skjevheten i denne inndelingen er på 0,3114 med et standardavvik på 0,1574, og der er 352 100 noder og 205 448 elementer.



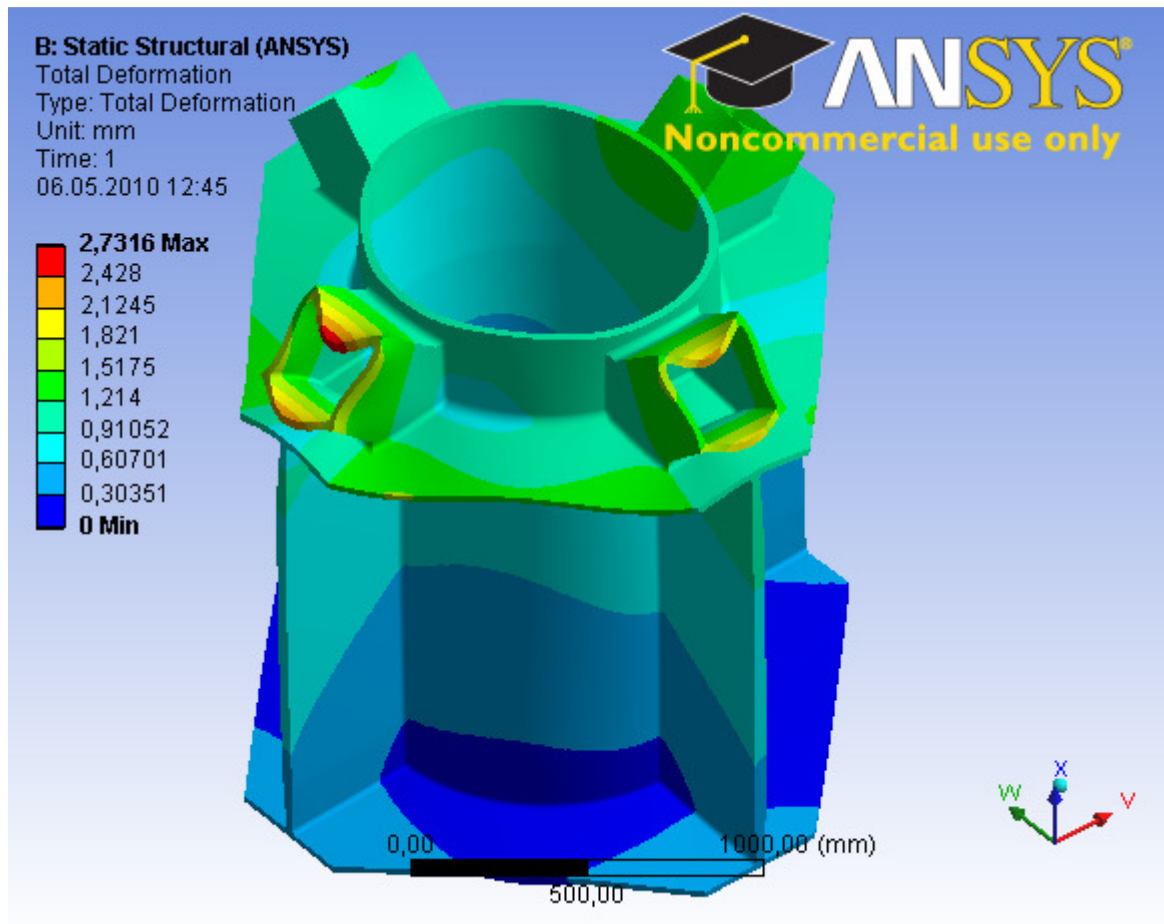
Bilde 1-7 Spenningsbilde mesh metode 2, modell C1

En ser fra spenningsbilde at spenningene i strukturen overstiger også her grenseverdien for det støpte materialet på 365MPa.



Bilde 1-8 Feilvurdering mesh metode 2, modell C1

Ser en på feilvurderingsbildet ser en at en får langt mindre feil i den matematiske modellen ved bruk av tetter element inndeling, men en får konsentrasjonen på feilen også her i de områdene der skråstagnene kommer inn på knutepunktet.

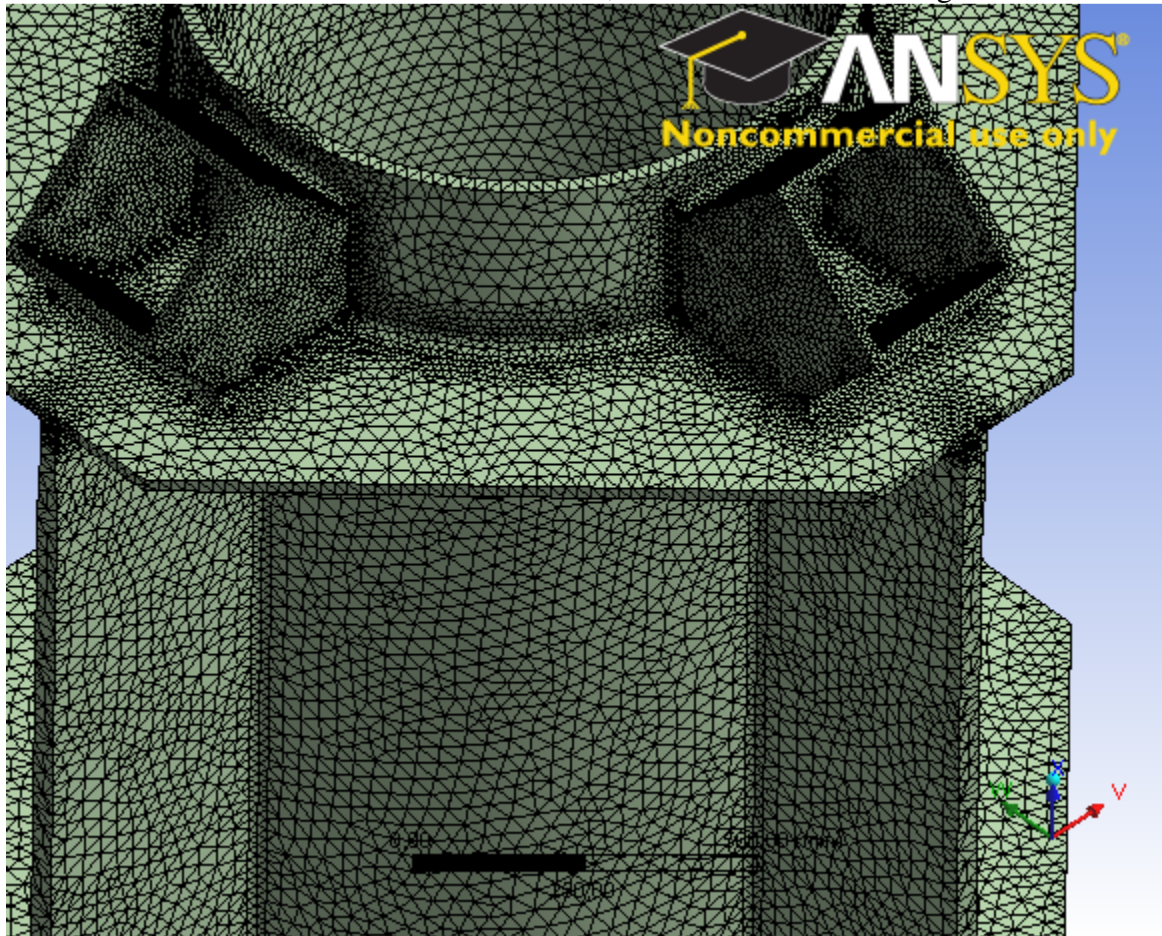


Bilde 1-9 Deformasjon mesh metode 2, modell C1

Deformasjonen kommer også ved bruk av mesh metode 2 i skråstagene, men er noe høyere enn ved mesh metode 1 da inndeling av elementene er noe tettere i det kritiske området.

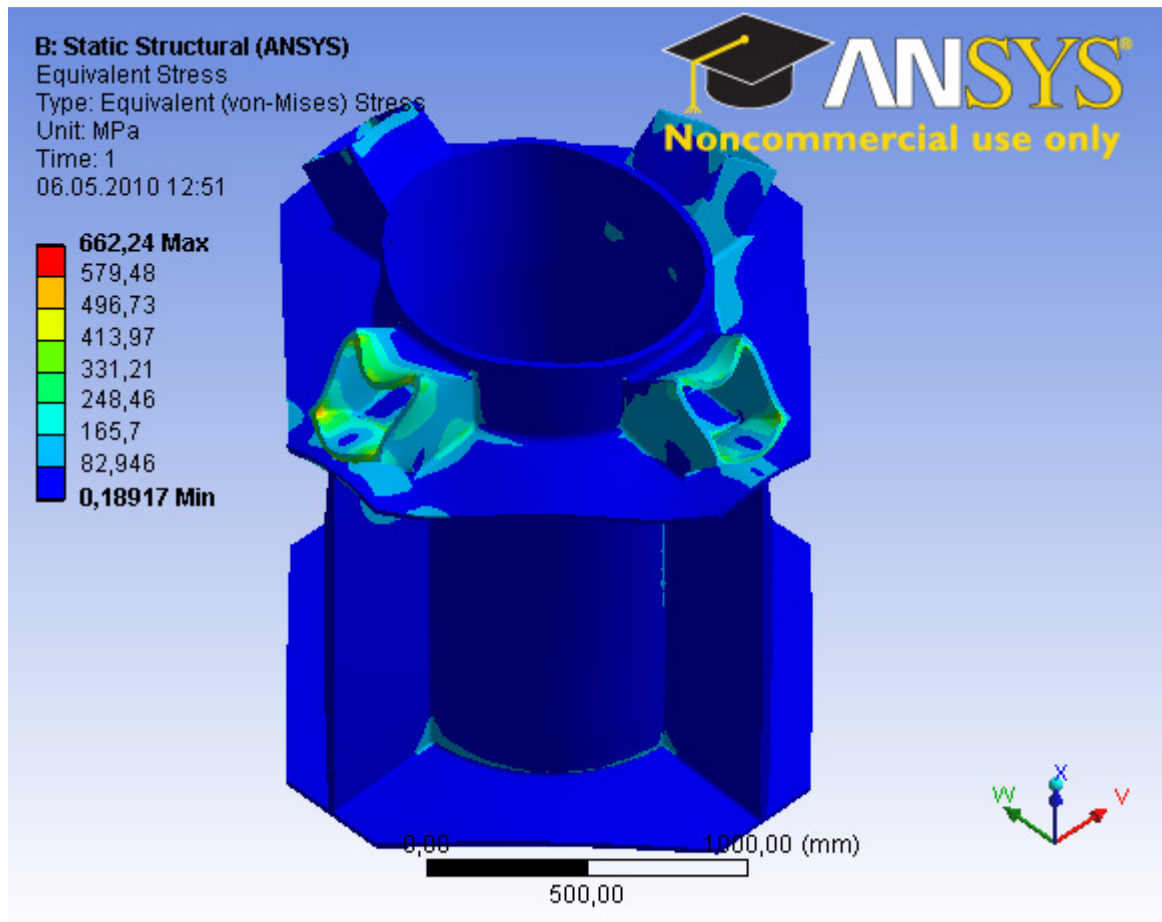
### 1.3 Mesh metode 3

Dette er en samme metode som mesh metode 2, men med finere inndeling i kritiske området.



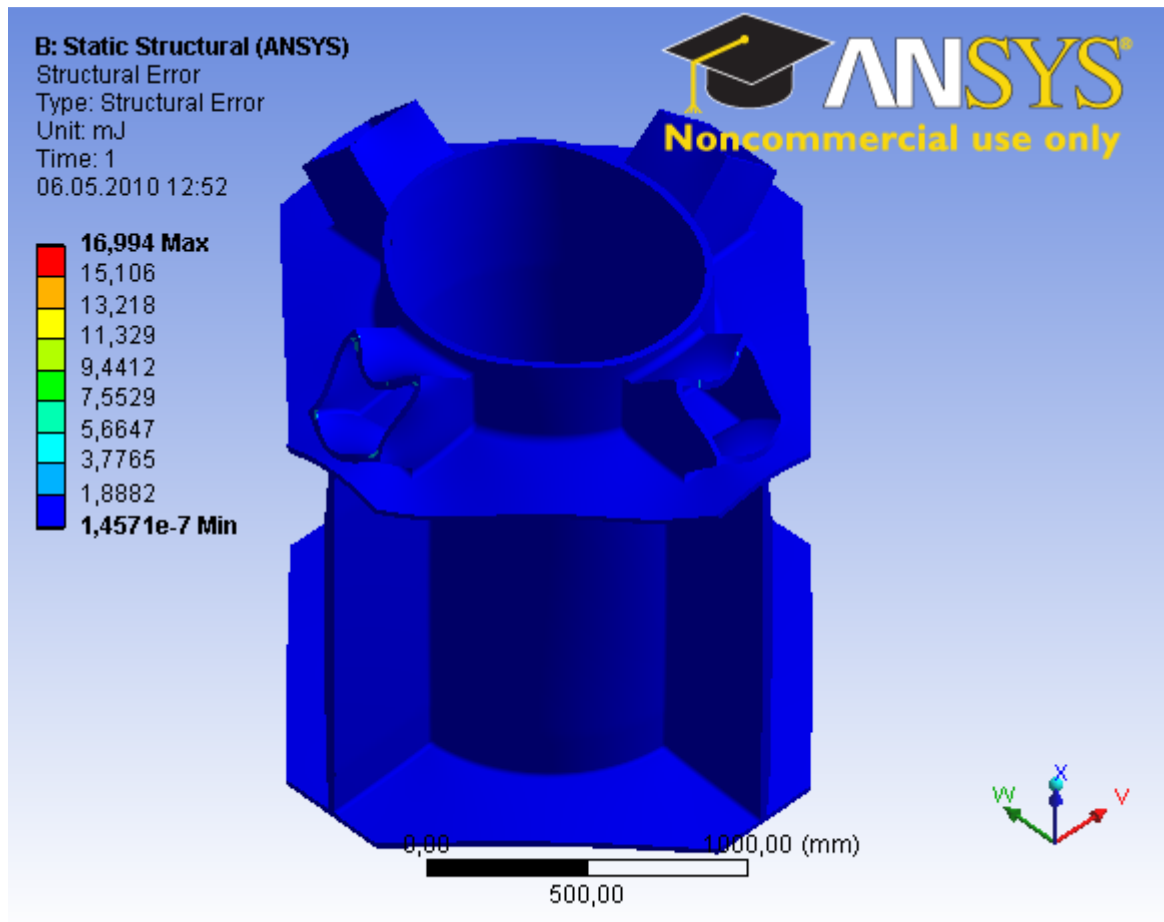
Bilde 1-10 Mesh metode 3

Som vist på meshing bildet så er inndelingen mye finere i de områdene en har hatt størst feil i de foregående modellene. Statistisk så er her en skevhet på 0,2971 med et standardavvik på 0,1539, og der er 859 514 noder og 545 555 elementer.



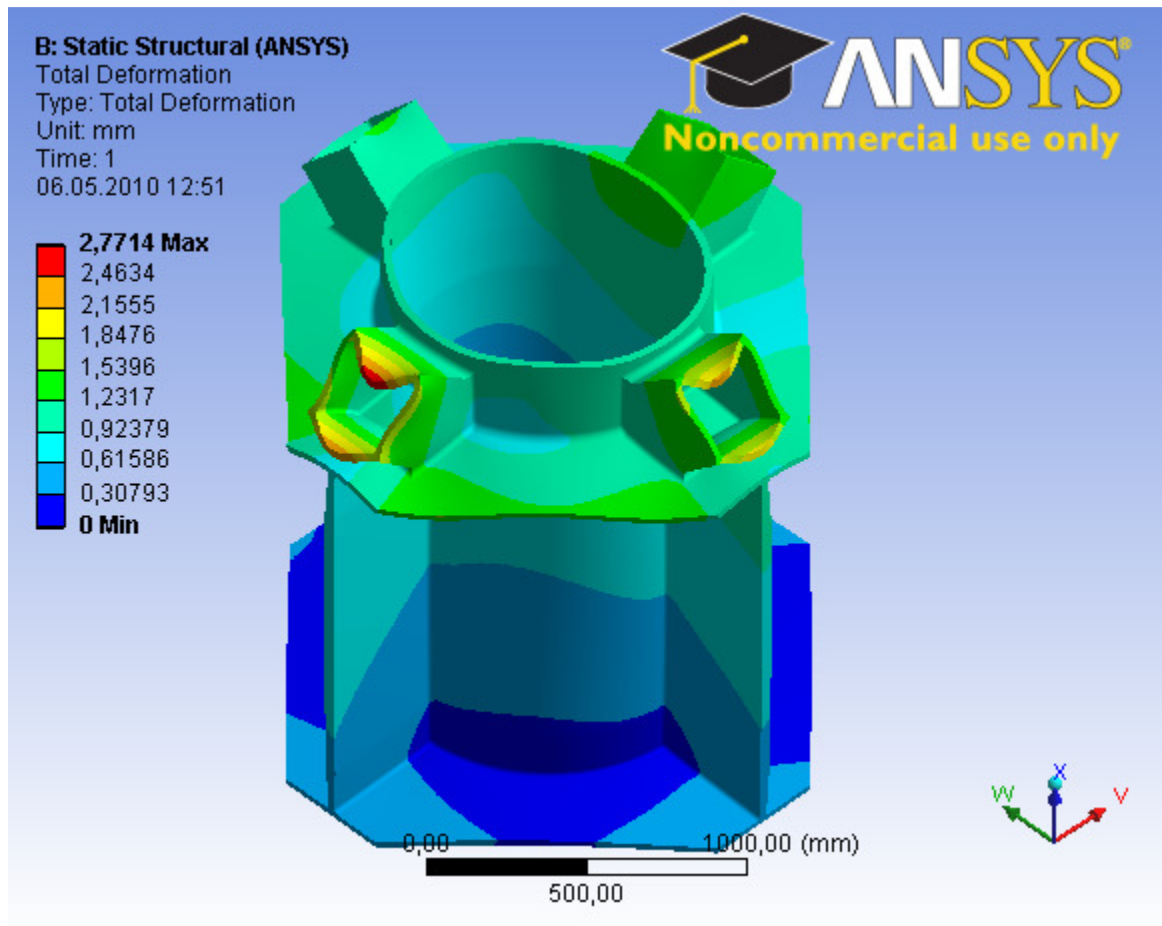
Bilde 1-11 Spenningsbilde mesh metode 3, modell C1

Spenningene overstiger også her grensen på 365MPa, og er konsentrert på skråstagene.



Bilde 1-12 Feilvurdering mesh metode 3, modell C1

Ser en på feilvurderings bildet ser en at der nesten ikke er feil i den matematiske modellen, og en kan med stor sikkerhet si at resultatene for denne modellen er meget lik et realistisk tilfelle.



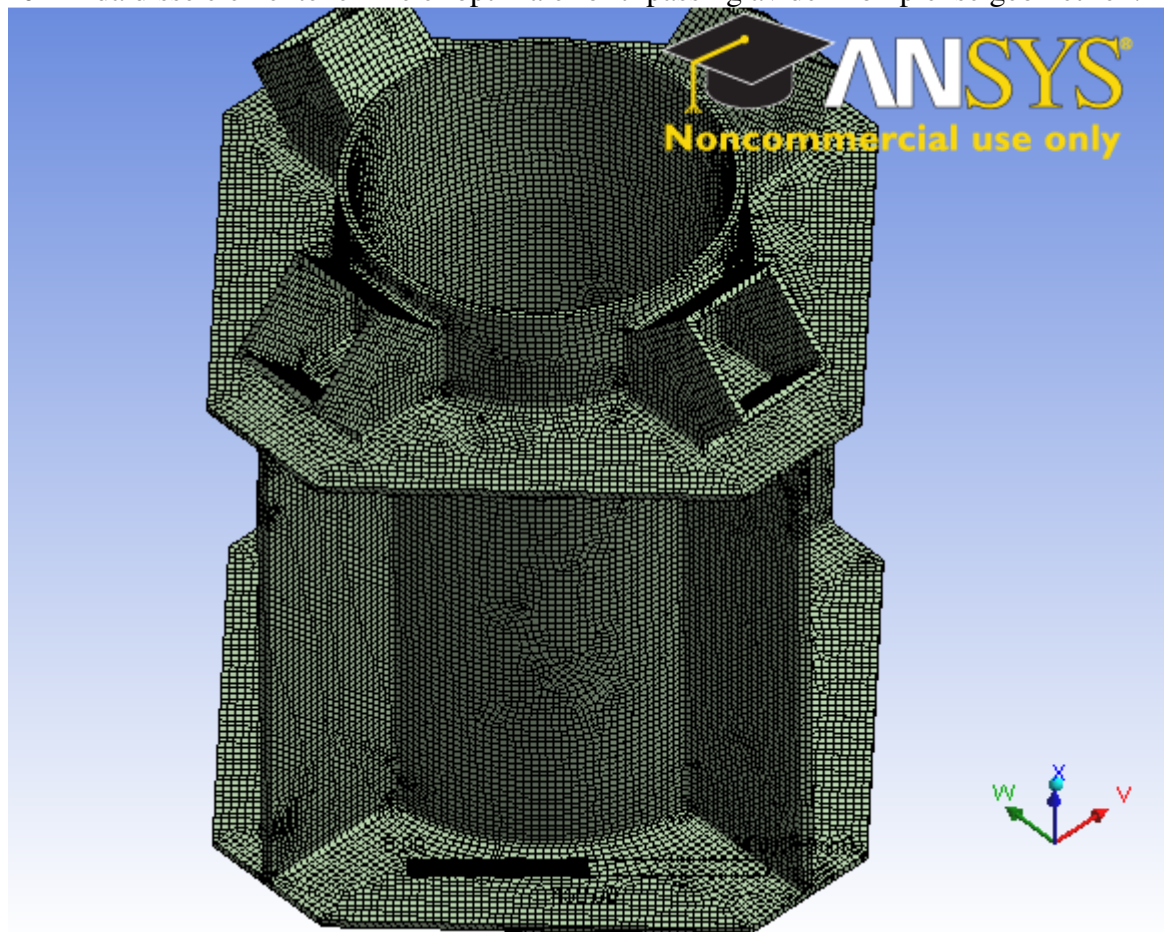
Bilde 1-13 Deformasjon mesh metode 3, modell C1

Deformasjonen er noe høyere ved bruk av denne metoden enn for de foregående metodene, men grunnet de lave verdiene på feilene kan en si at dette er meget nært et realistisk tilfelle for denne modellen.



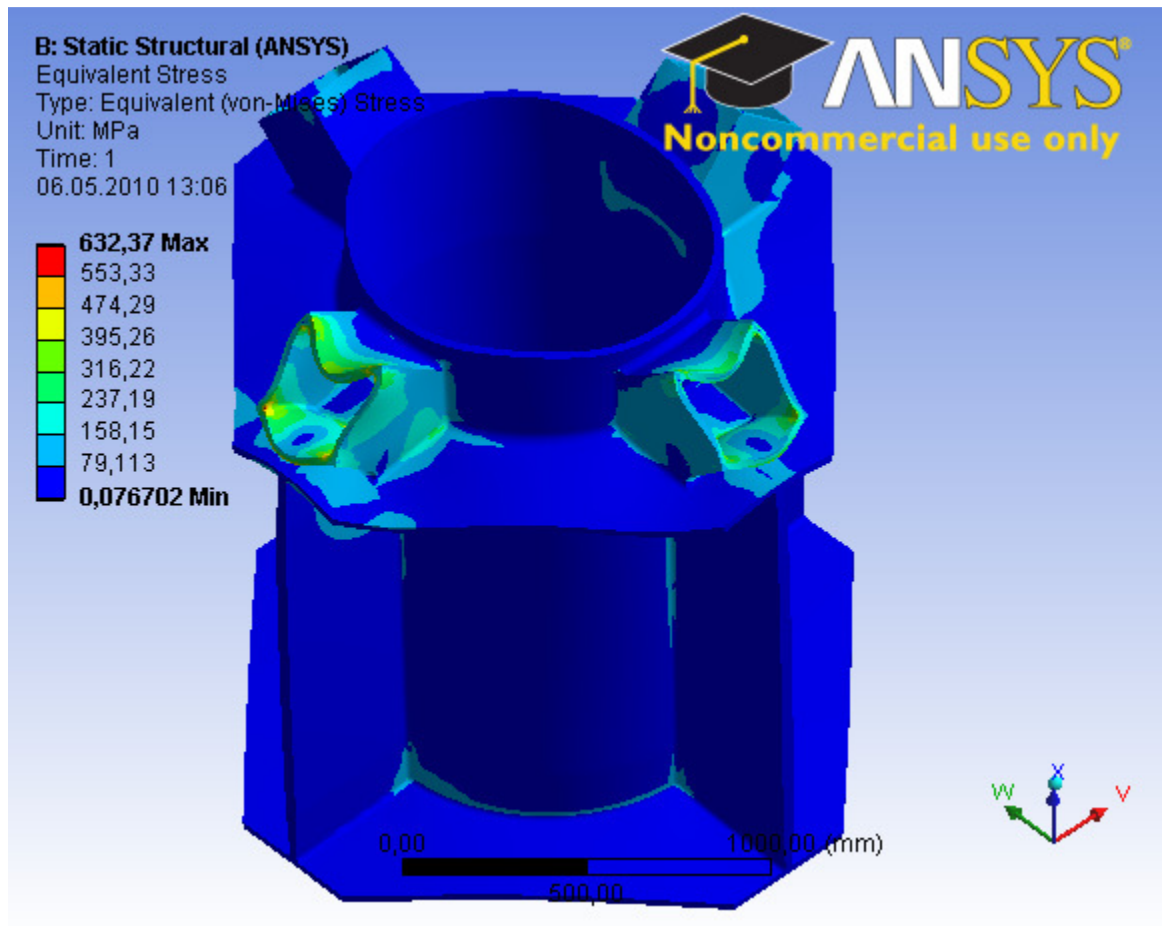
## 1.4 Mesh metode 4

Det er her brukt en automatisk heksaeder metode med en maksimal størrelse på elementene på 20mm da disse elementene ikke er optimale for tilpassing av den komplekse geometrien.



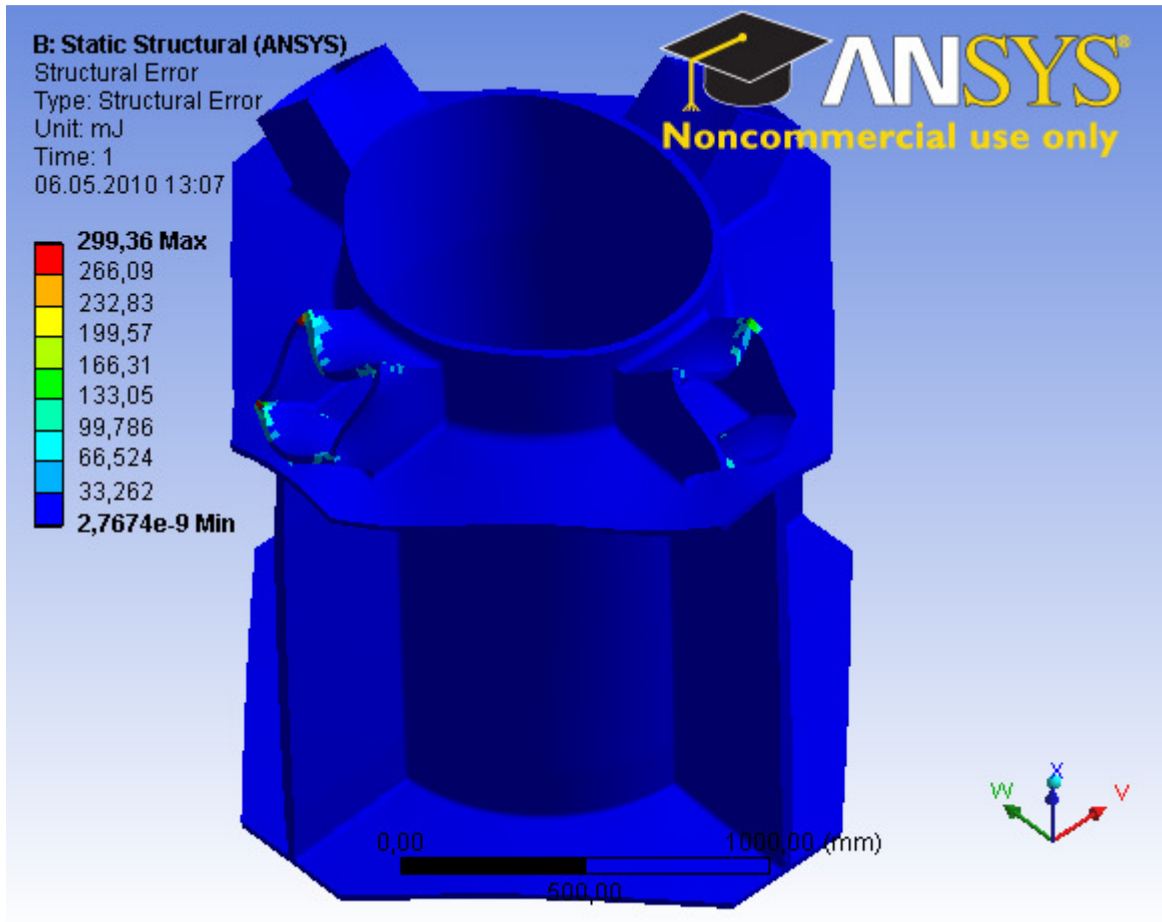
Bilde 1-14 Mesh metode 4, modell C1

En ser ut ifra bildet at en får en tett inndeling av elementer. Skjevheten er på 0,4174 med et standardavvik på 0,2819, noe som er betydelig høyere enn for de andre modellene. Antall noder er 603 751 og antall elementer er 158 261. Dette gjør at denne modellen ta lenger tid å prosessere samt vil en kunne få større feil i kurvaturendringene.



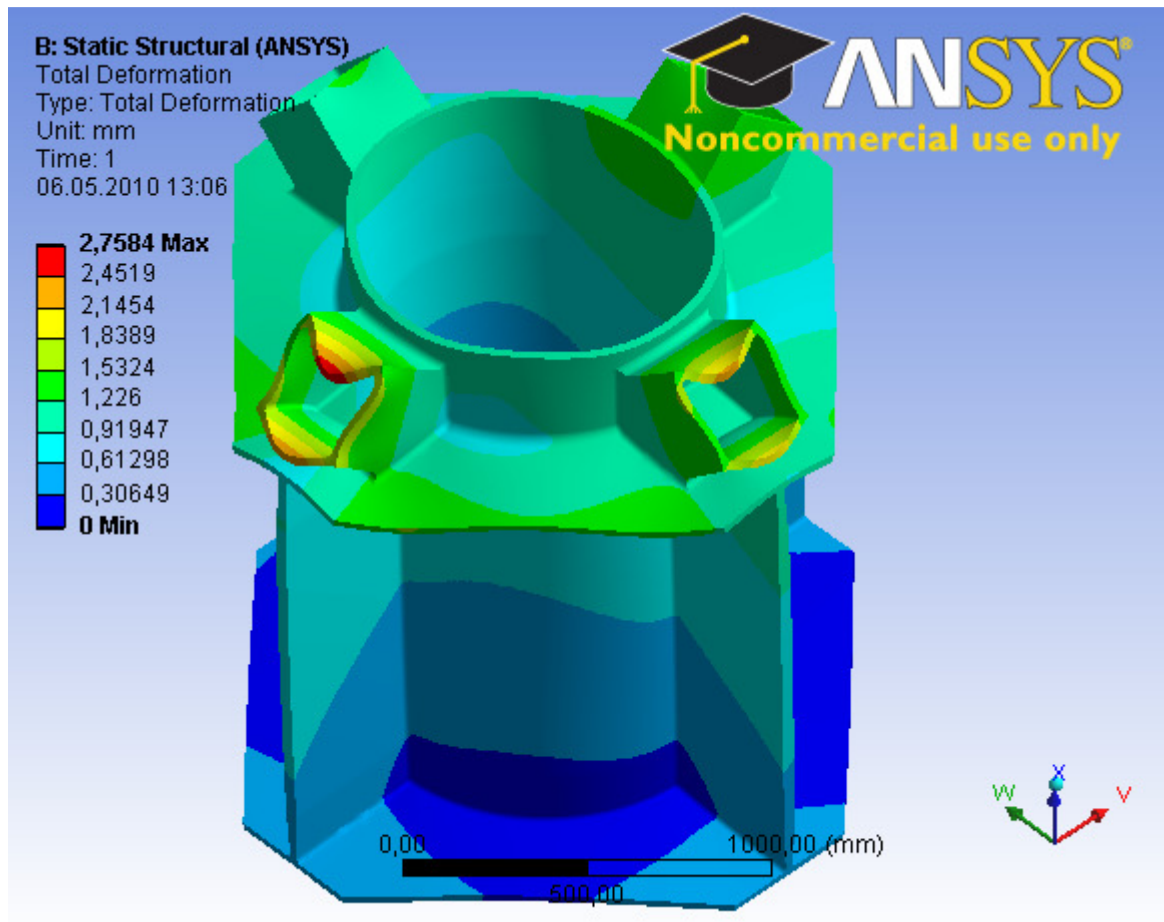
Bilde 1-15 Spenningsbilde mesh metode 4, modell C1

En ser ut ifra spenningsbilde at en får spenningskonsentrasjoner i samme områder som for de foregående modellene, altså skråstagene. Spenningen på 632MPa er også her alt for høy i forhold til kravet på 365MPa.



Bilde 1-16 Feilvurdering mesh metode 4, modell C1

En ser ifra feilvurderingsbildet at en får forholdsvis store feil i skråstagen.

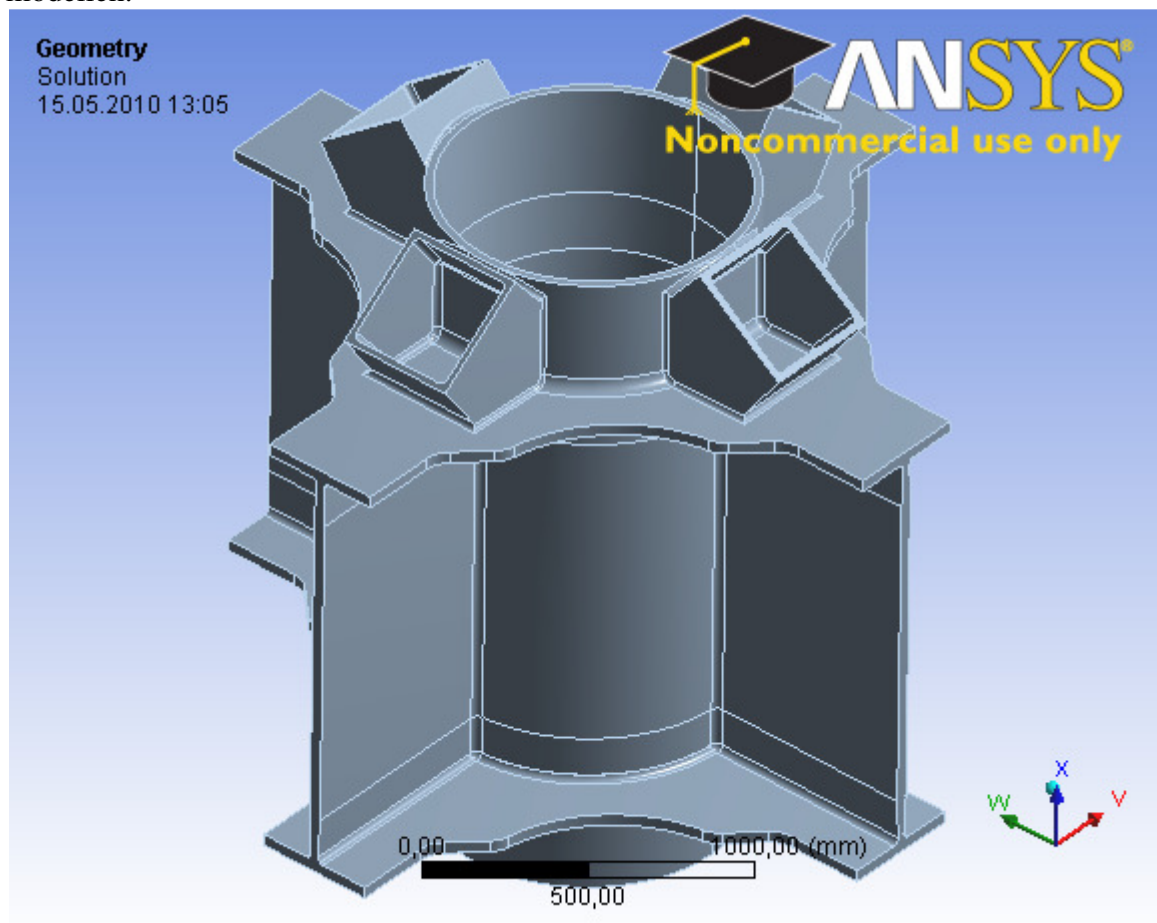


Bilde 1-17 Deformasjon mesh metode 4, modell C1

Deformasjonen blir ved bruk av denne metoden temmelig lik de foregående modellene, og befinner seg i skrånstagen.

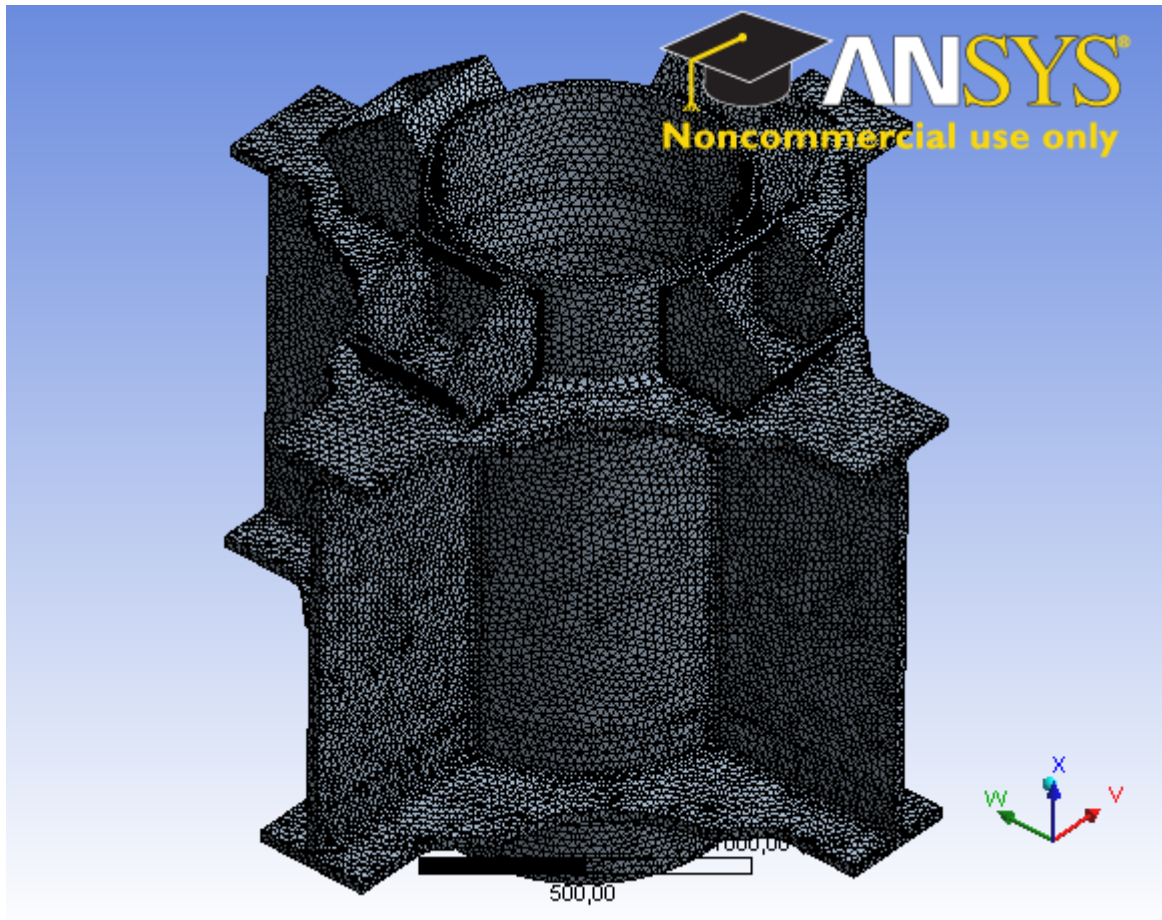
## 2 Resultat støpt modell C2

Dette er den modellen som er mest forandret i forhold til utgangsmodellen da det er lagt inn forandringer ut ifra erfaringene med de sveiste modellen samt fra den foregående støpte modellen.



Bilde 2-1 Modell C2

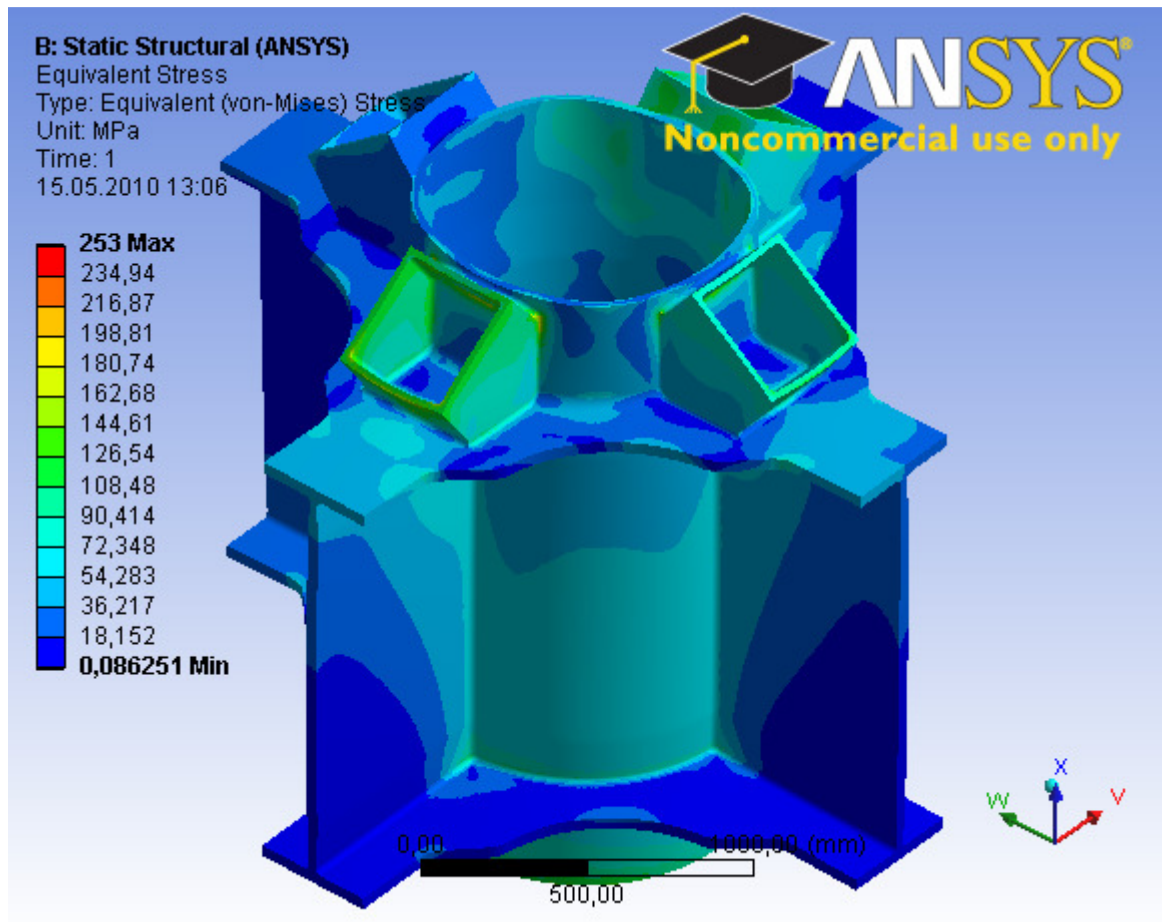
Som en er ut ifra bildet av modell C2 så er der gjort en del geometriske forandringer, det er kuttet ut deler av materialet som gjør at en får noe lavere vekt. Vinklene på skråstagnene er justert opp til 52,5grader da dette gjør modellen symmetrisk og brukes på alle knutepunktene i substasjonen. Den like vinkelen hele veien rundt gjør at en kan bruke samme knutepunktsmodell uten å måtte tilpasse den til hvert av de fire knutepunktene i substasjonen, samtidig som den vil holde de kreftene som kommer ned mot festene for skråstagnene med en annen vinkel.



Bilde 2-2 Meshing modell C2

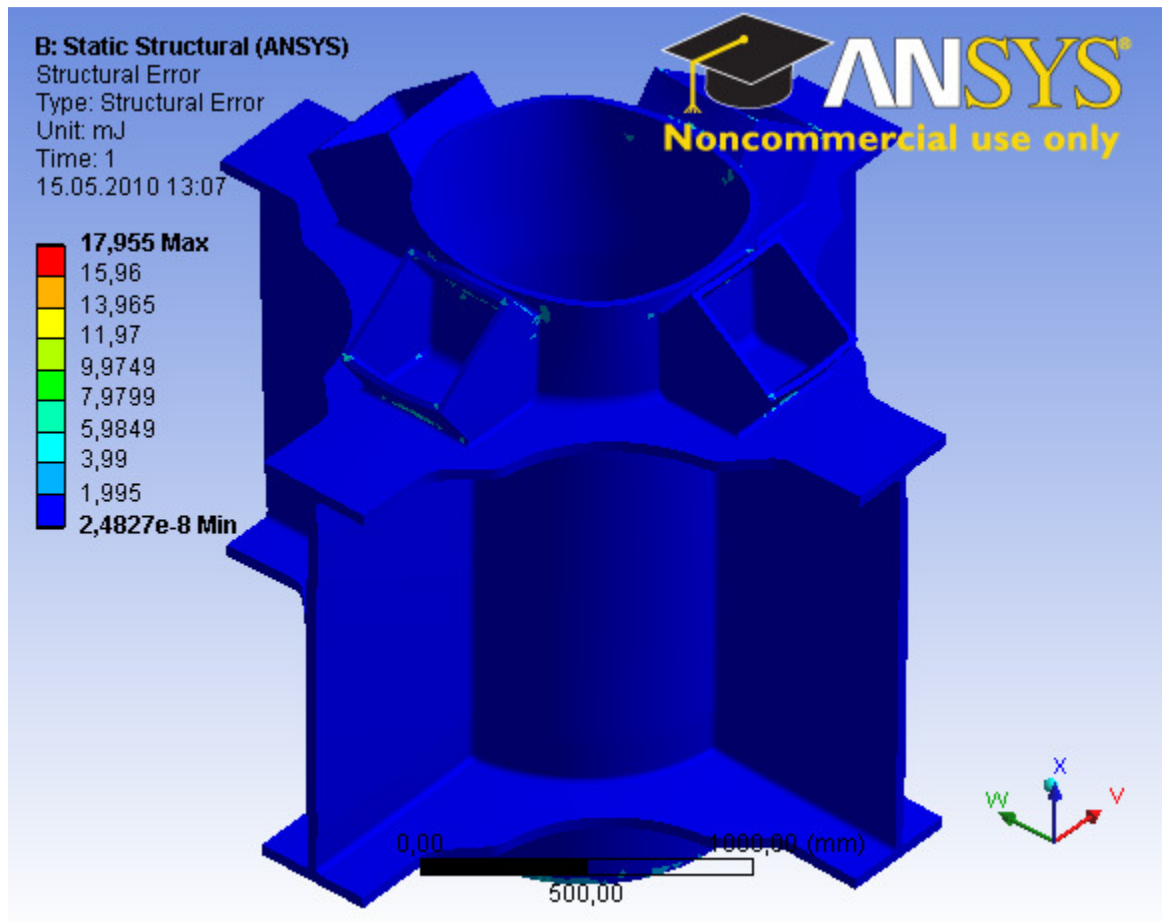
Det har på modell C2 kun blitt kjørt en automatisk element inndeling med 20mm som største mulige elementstørrelse.

Denne modellen har en skjevhet på 0,3110 med et standardavvik på 0,1574, der er 452 430 noder og 268 676 elementer.



Bilde 2-3 Spenningsbilde modell C2

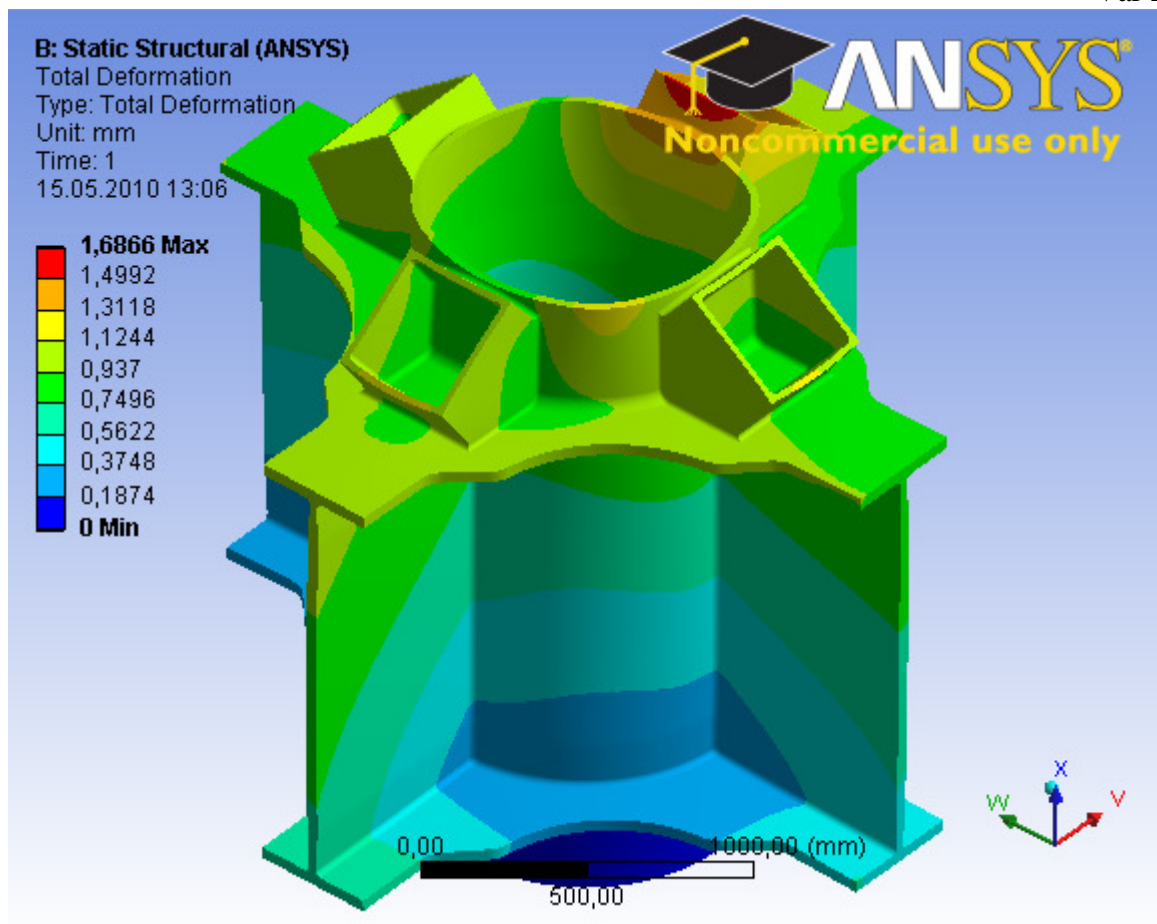
En ser ut ifra spenningsbildet at en får mye lavere og bedre fordeling av spenningene enn for den støpte modellen C1. Spenningene på 253MPa er godt under kravet på 365MPa.



Bilde 2-4 Feilvurdering modell C2

En ser fra feilvurderingsbildet at en nesten ikke har feil i den matematiske modellen. Dette i sammenheng med den lave skjevheten og det relativt lave antallet med noder og elementer gjør at en kan fastlå at dette er den beste modellen både på styrkesiden og modelleringssiden.





Bilde 2-5 Deformasjon modell C2

En ser av deformasjonsbildet at en får en deformasjon på 1,7mm, noe som er meget lavt, og tilsier at modellen er godt utformet for å ta imot de innkommende kreftene. De høyeste deformasjonene er samlet i skråstagnene da disse er helt symmetriske rundt hele konstruksjonen for å kunne brukes på alle de fire knutepunktene.



## VEDLEGG C

### Resultater fra ikke lineære analyser for sveist knutepunkt

#### Innhold

1	Resultat ikke-lineær analyse modell W5.....	2
2	Kapasitetskontroll sveist knutepunkt .....	6

#### Bildeliste

Bilde 1-1	Spenningsplott ikke lineær analyse modell W5 .....	2
Bilde 1-2	Feilvurdering ikke lineær analyse modell W5 .....	3
Bilde 1-3	Deformasjon ikke lineær analyse modell W5 .....	4
Bilde 1-4	Plastisk tøyning, modell W5 .....	5
Bilde 2-1	Spenningsplott kapasitetskontroll ikke lineær analyse modell W5.....	6

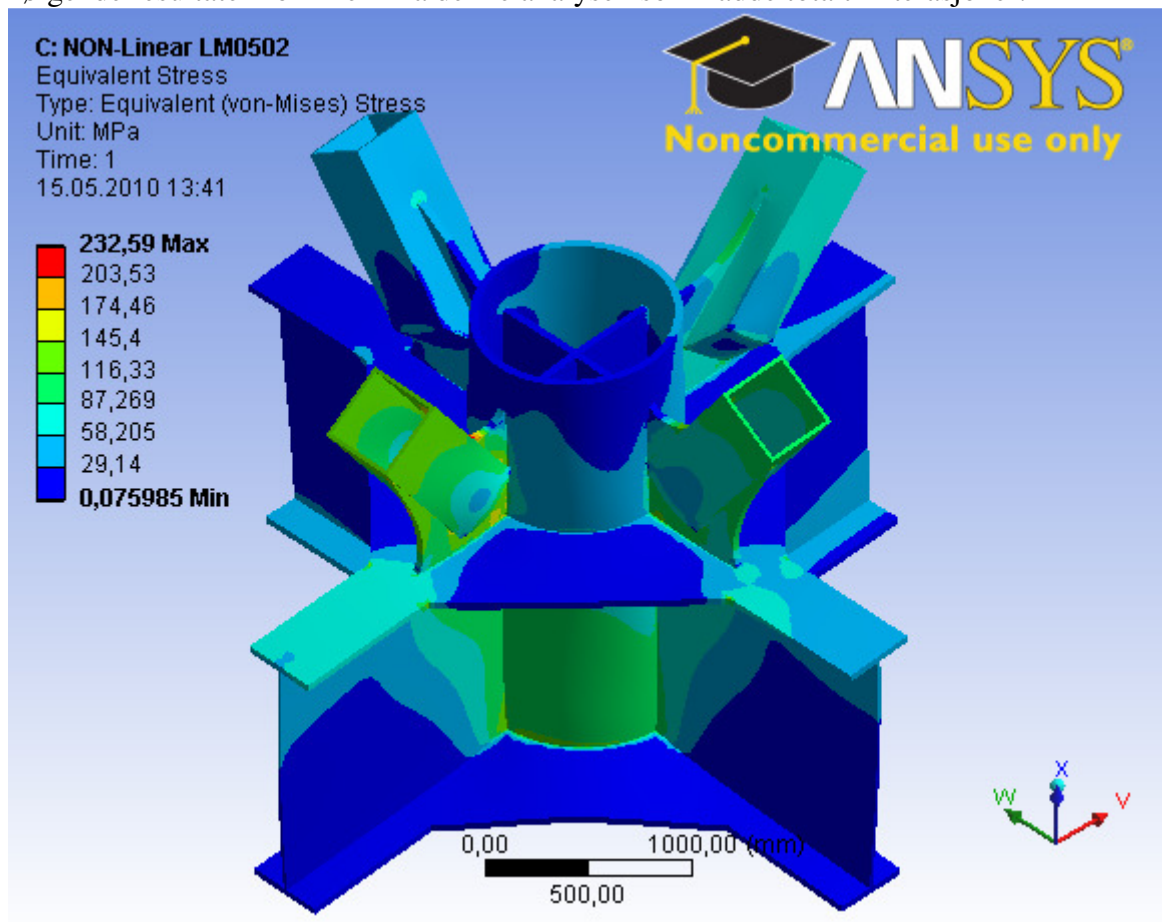
## 1 Resultat ikke-lineær analyse modell W5

For kjøring av den ikke lineære analysen av et av de sveiste knutepunktene ble det tatt utgangspunkt i modell W5, og da med mesh metode 2 som utgangspunkt.

Mesh metode 2 er valgt som utgangspunkt av flere grunner. Dette gjelder seg den lave skjevheten i elementene som gjør at en slipper en enorm økning i feilene i strukturen etter hvert som løsningene blir itererte. Det gjelder seg de lave verdiene i feilvurderingen for mesh metode 2 og at spennings verdien som har kommet frem i de lineære analysene har en akseptabel verdi før en kjører en ikke-lineær løsningsmetode med flere iterasjoner. Sist men ikke minst er det antallet noder og elementer som har noe å si på tiden det tar å løse problemet, mesh metode 2 har mange noder og elementer men langt færre enn mange av de andre metodene. Samlet sett er derfor mesh metode 2 den mest anvendelige metoden for å løse det ikke-lineære problemet.

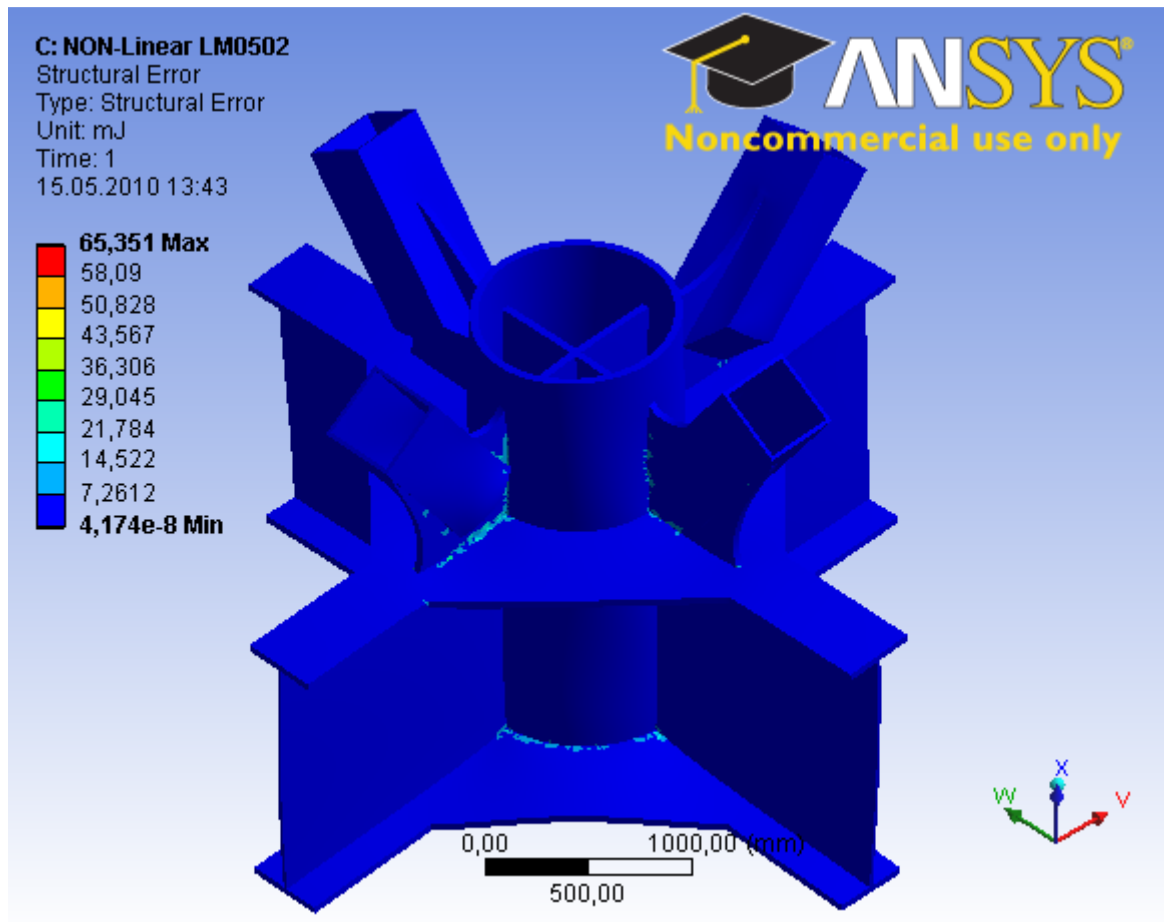
Som nevnt i TEORI delen av rapporten er materialfaktoren ikke tatt med i beregningen når det er kjørt ikke-lineær analyse da stålet først går over i plastisk område ved 355MPa.

Følgende resultater kom frem fra denne analysen som hadde totalt 4 iterasjoner:



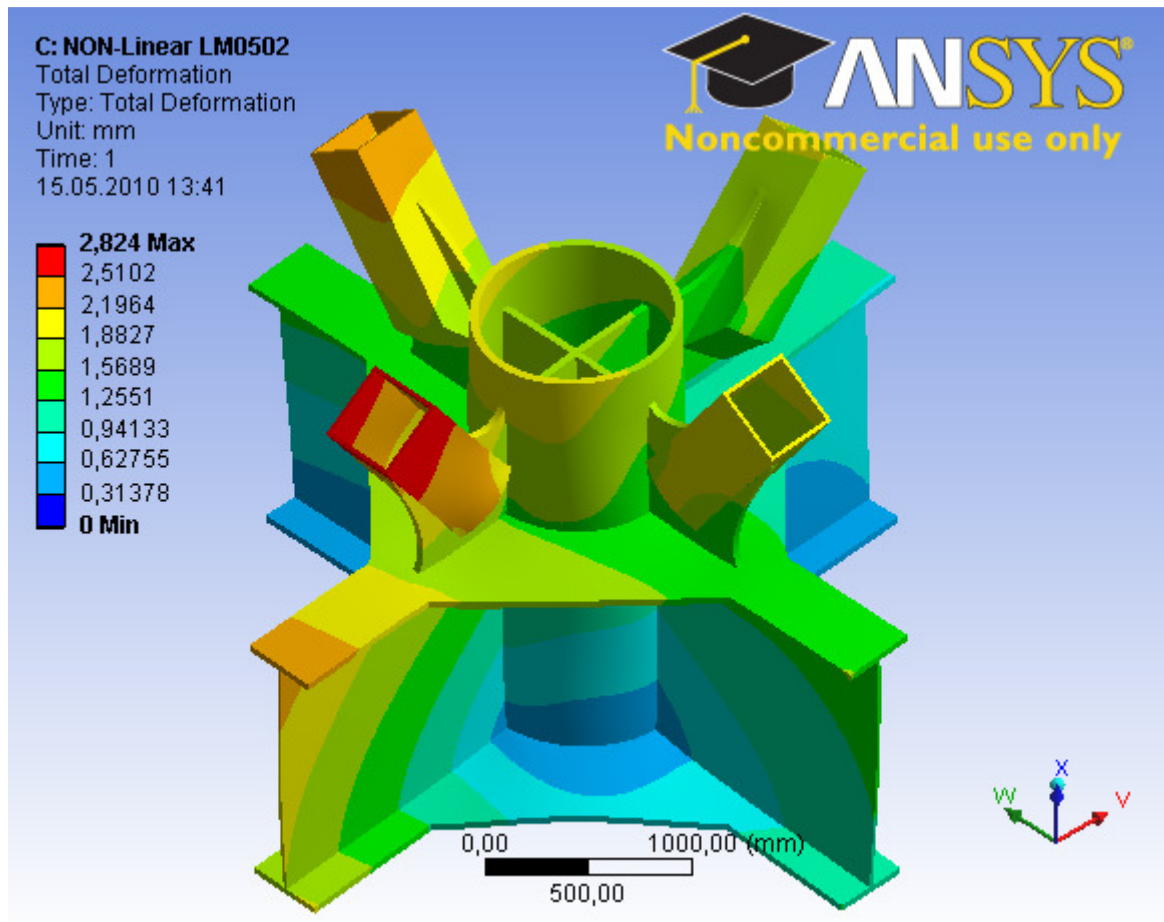
Bilde 1-1 Spenningsplott ikke lineær analyse modell W5

En ser ut ifra Bilde 1-1 at en får samme spenningsområder som for den lineære analysen, men selve spenningen blir noe lavere da resultatene er iterert 4 ganger mot den direkte lineære løsningen.



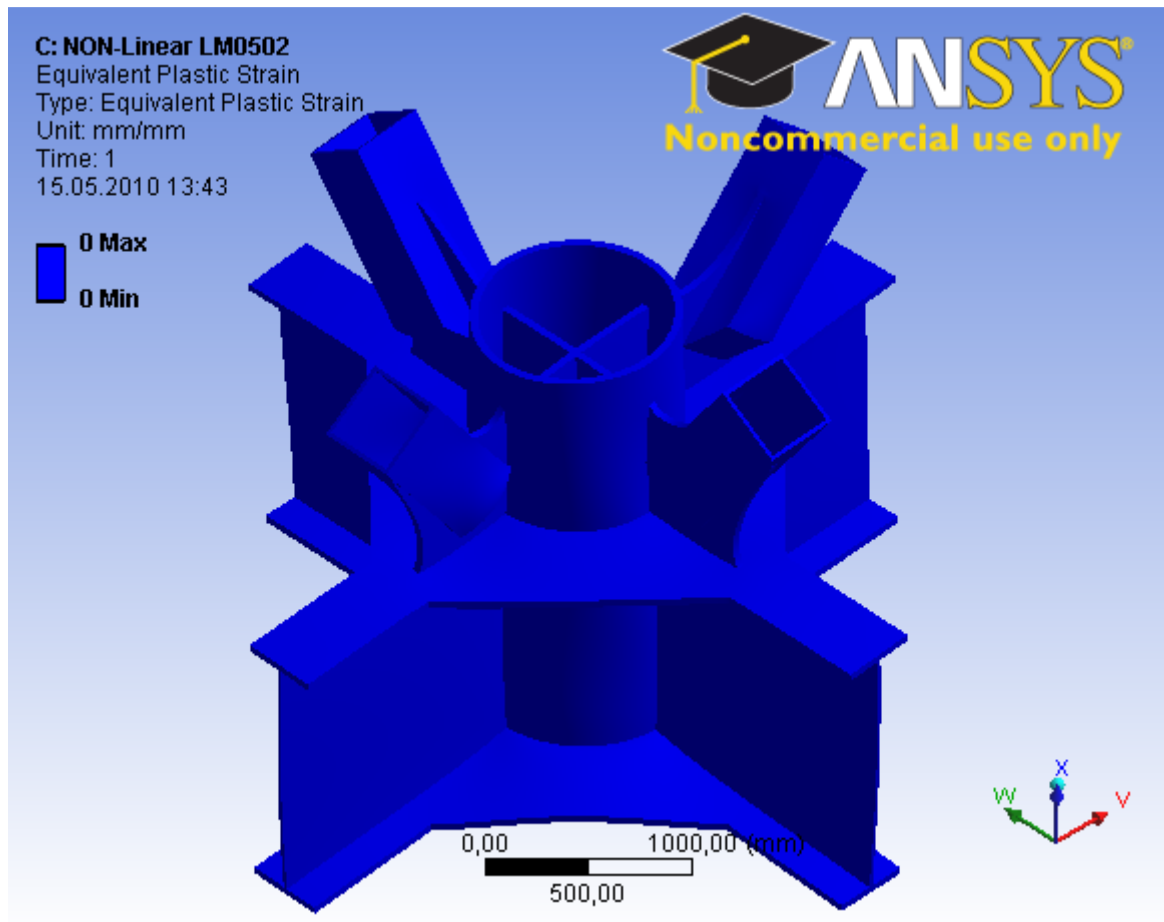
Bilde 1-2 Feilvurdering ikke lineær analyse modell W5

En ser fra Bilde 1-2 at lokasjonen av de største feilene er i de skarpe overgangsområdene, samt er feilverdien noe lavere enn for den lineære analysen.



Bilde 1-3 Deformasjon ikke lineær analyse modell W5

En ser på Bilde 1-3 at deformasjonen ikke er noe vesentlig forandret i forhold til den lineære analysen, dette skyldes at så lenge spenningen holder seg under flytgrensen på 355MPa så vil forandringen i deformasjonen være den samme for en lineær og en ikke-lineær analyse.

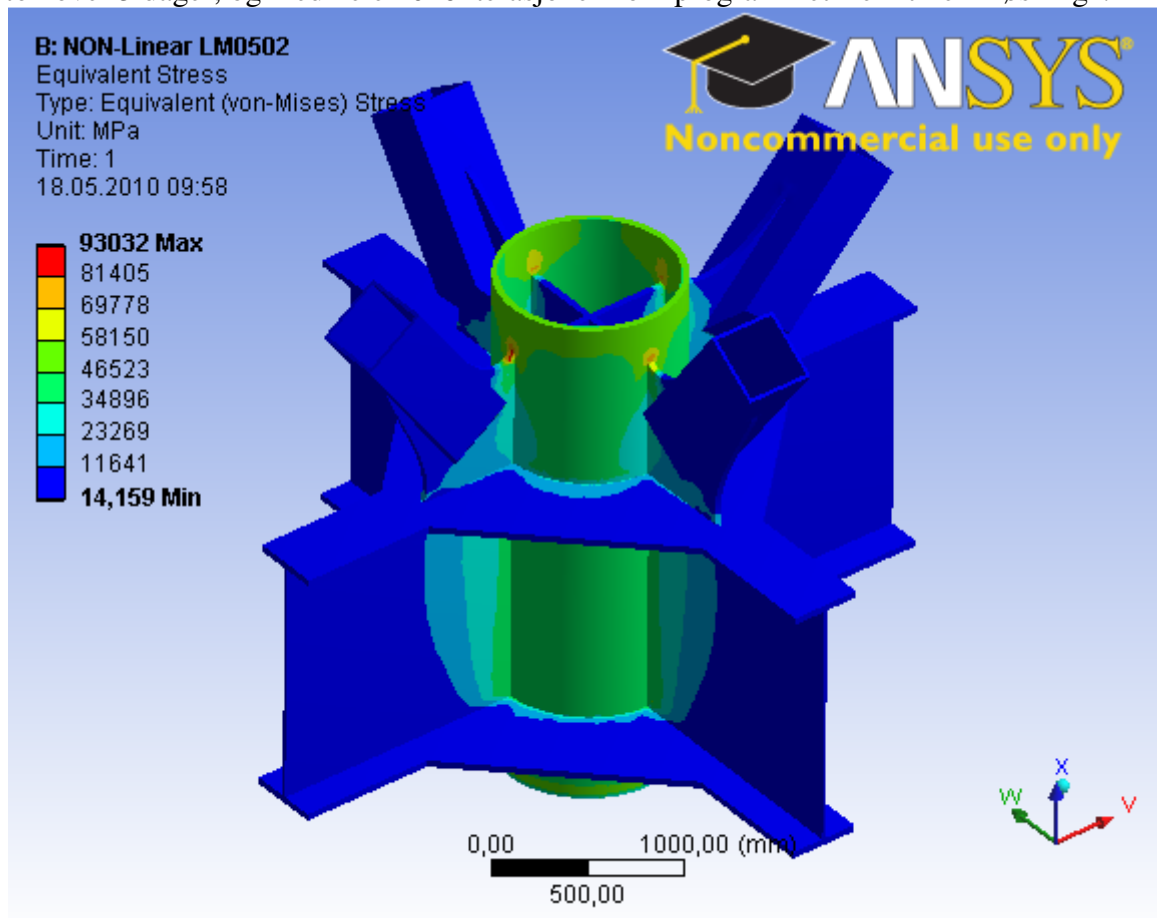


Bilde 1-4 Plastisk tøyning, modell W5

Bilde 1-4 viser at det ikke oppstår plastisk tøyning i denne modellen, dette da spenningene i modellen ikke overstiger flytgrensen.

## 2 Kapasitetskontroll sveist knutepunkt

Det ble kjørt en analyse der det ble forsøkt påsatt doble krefter og momenter. Denne analysen tok over 3 dager, og med hele 1016 iterasjoner kom programmet frem til en "løsning".



Bilde 2-1 Spenningsplott kapasitetskontroll ikke lineær analyse modell W5

Som en ser ut ifra Bilde 2-1 så er spenningene i materialet på hele 93GPa, noe som er total kollaps for knutepunktet. Programmet kom ut med en deformasjon på hele 175meter, noe som ikke er fysisk mulig i et reelt tilfelle så ingen av resultatene fra denne analysen er brukbare og derfor er ikke mer tatt med i rapporten.



## VEDLEGG D

### Resultater fra ikke-lineære analyser for støpte knutepunkt

#### Innhold

1	Resultat ikke-lineær analyse modell C1 .....	3
1.1	Ikke-lineær analyse meshing metode 1 .....	3
1.2	Ikke-lineær analyse meshing metode 2 .....	8
2	Resultat ikke-lineær analyse modell C2 .....	13
2.1	Ikke-lineær analyse bruddgrensetilstand .....	14
2.2	Ikke-lineær analyse 2 ganger bruddgrensetilstanden.....	18
2.3	Ikke-lineær analyse 3 ganger bruddgrensetilstanden.....	22
2.4	Ikke-lineær analyse 4 ganger bruddgrensetilstanden.....	26
2.5	Ikke-lineær analyse 5 ganger bruddgrensetilstanden.....	30
2.6	Ikke-lineær analyse 10 ganger bruddgrensetilstanden.....	34

#### Bildeliste

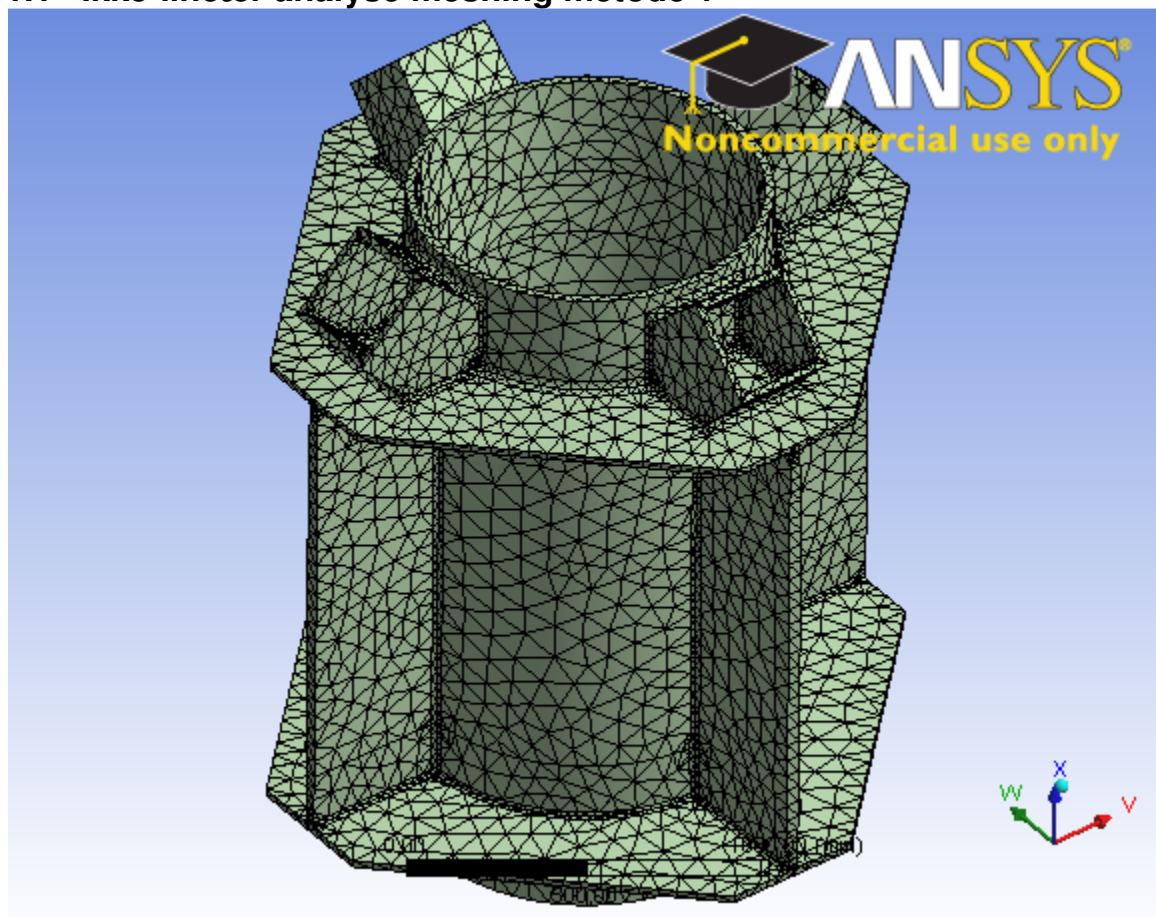
Bilde 1-1	Mesh metode 1 modell C1 .....	3
Bilde 1-2	Spenningsbilde mesh metode 1 ikke-lineær analyse, modell C1 .....	4
Bilde 1-3	Feilvurdering mesh metode 1, ikke-lineær analyse, modell C1 .....	5
Bilde 1-4	Deformasjon mesh metode 1, ikke-lineær analyse, modell C1 .....	6
Bilde 1-5	Plastisk tøyning, mesh metode 1, modell C1 .....	7
Bilde 1-6	Mesh metode 2, modell C1 .....	8
Bilde 1-7	Spenningsbilde mesh metode 2, ikke-lineær analyse, modell C1 .....	9
Bilde 1-8	Feilvurdering mesh metode 2, ikke-lineær analyse, modell C1 .....	10
Bilde 1-9	Deformasjon mesh metode 2, ikke-lineær analyse, modell C1 .....	11
Bilde 1-10	Plastisk tøyning mesh metode 2, modell C1 .....	12
Bilde 2-1	Mesh metode for ikke-lineær analyse for modell C2.....	13
Bilde 2-2	Deformasjon ikke-lineær analyse, 1x Bruddgrensetilstand, modell C2.....	14
Bilde 2-3	Feilvurdering ikke-lineær analyse, 1x bruddgrensetilstanden, modell C2.....	15
Bilde 2-4	Deformasjon ikke-lineær analyse, 1x bruddgrensetilstand, modell C2.....	16
Bilde 2-5	Plastisk tøyning, 1x bruddgrensetilstand, modell C2.....	17
Bilde 2-6	Spenningsfordeling ikke lineær analyse, 2x bruddgrensetilstand, modell C2 .....	18
Bilde 2-7	Feilvurdering ikke-lineær analyse, 2x bruddgrensetilstand, modell C2.....	19
Bilde 2-8	Deformasjon ikke-lineær analyse, 2x bruddgrensetilstand, modell C2.....	20
Bilde 2-9	Plastisk tøyning, 2x bruddgrensetilstand, modell C2.....	21
Bilde 2-10	Spenningsbilde ikke-lineær analyse, 3x bruddgrensetilstanden, modell C2.....	22
Bilde 2-11	Feilvurdering ikke-lineær analyse, 3x bruddgrensetilstand, modell C2.....	23
Bilde 2-12	Deformasjon ikke-lineær analyse, 3xbruddgrensetilstand, modell C2.....	24

Bilde 2-13 Plastisk tøyning, 3x bruddgrensetilstanden, modell C2 .....	25
Bilde 2-14 Spenningsfordeling ikke-lineær analyse 4x bruddgrensetilstand, modell C2 .....	26
Bilde 2-15 Feilvurdering ikke-lineær analyse, 4x bruddgrensetilstand, modell C2.....	27
Bilde 2-16 Deformasjon ikke-lineær analyse, 4x bruddgrensetilstand, modell C2.....	28
Bilde 2-17 Plastisk tøyning 4x bruddgrensetilstand, modell C2 .....	29
Bilde 2-18 Spenningsfordeling ikke-lineær analyse, 5x bruddgrensetilstand, modell C2 .....	30
Bilde 2-19 Feilvurdering ikke-lineær analyse, 5x bruddgrensetilstand, modell C2.....	31
Bilde 2-20 Deformasjon ikke-lineær analyse, 5x bruddgrensetilstand, modell C2.....	32
Bilde 2-21 Plastisk tøyning, 5x bruddgrensetilstand, modell C2.....	33
Bilde 2-22 Spenningsfordeling ikke-lineær analyse, 10x bruddgrensetilstand, modell C2 .....	34
Bilde 2-23 Feilvurdering ikke-lineær analyse, 10x bruddgrensetilstand, modell C2.....	35
Bilde 2-24 Deformasjoner ikke-lineær analyse, 10x bruddgrensetilstand, modell C2 .....	36
Bilde 2-25 Plastisk tøyning, 10x bruddgrensetilstand, modell C2.....	37

# 1 Resultat ikke-lineær analyse modell C1

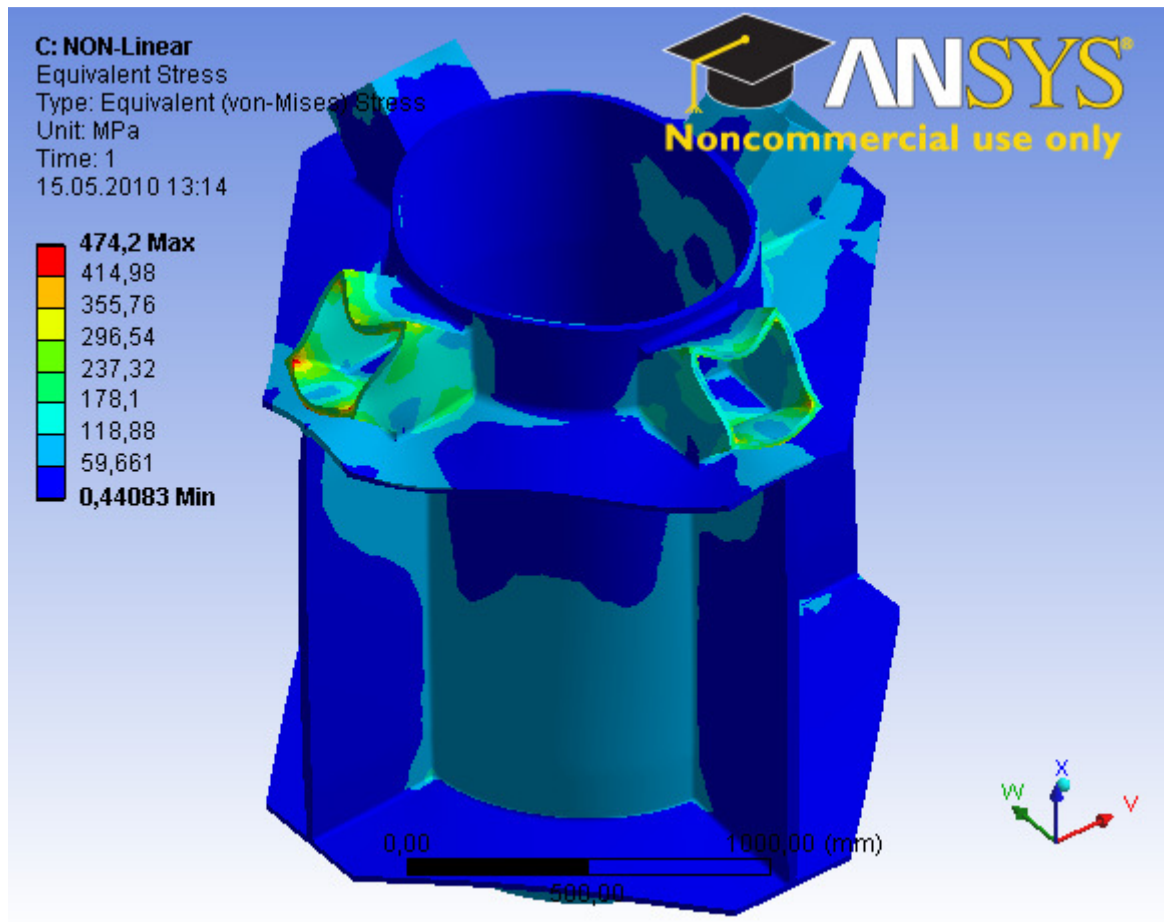
Det er kjørt to ikke-lineære analyser av det støpte knutepunktet C1, dette siden dette knutepunktet hadde i den lineære analysen en overskridelse av spenningene i forhold til kravene. Det er da to forskjellige element inndelinger som det er tatt utgangspunkt i dette fordi det ikke var enkelt å si hvor lang tid hver analyse ville ta.

## 1.1 Ikke-lineær analyse meshing metode 1



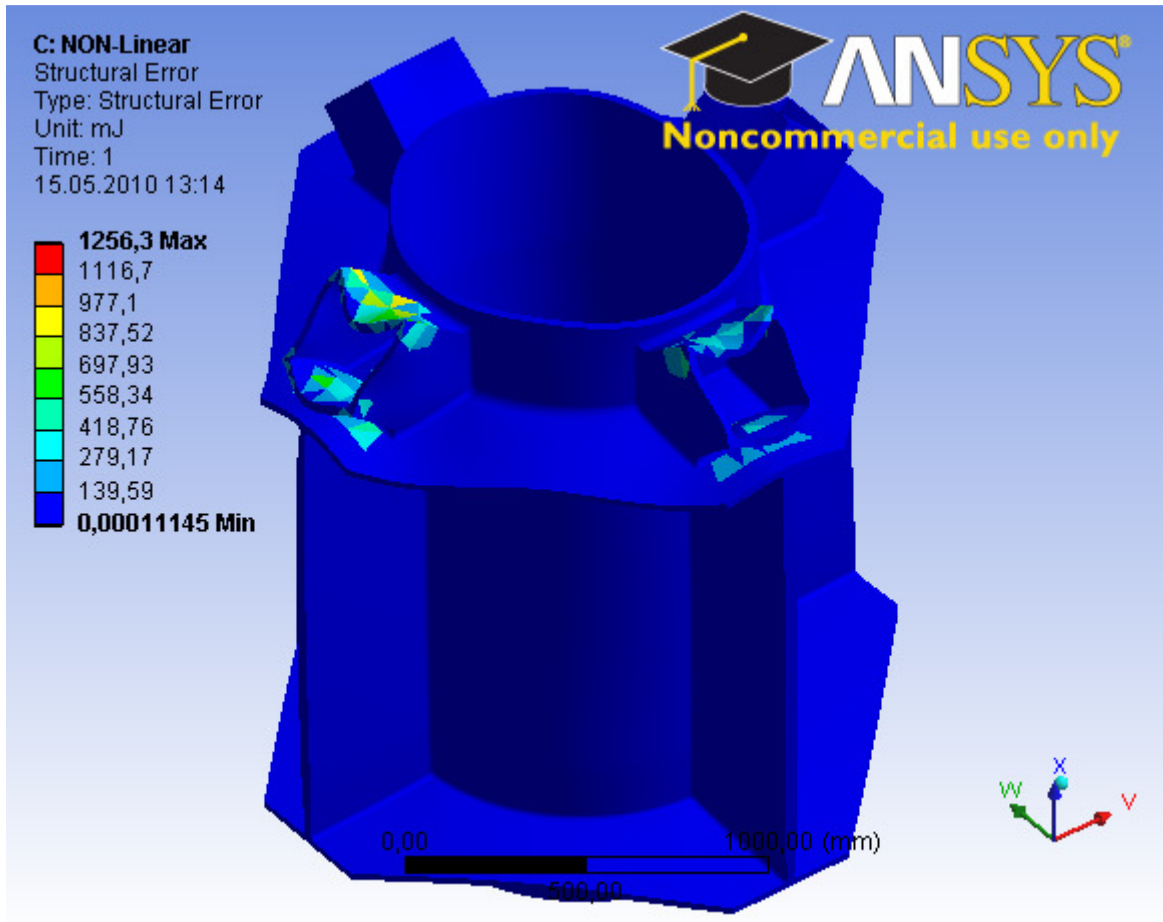
Bilde 1-1 Mesh metode 1 modell C1

Som en ser av meshingbildet så er elementinndelingen grovt fordelt over strukturen. Dette gjør at den ikke-lineære analysen tar kort tid. Dette er samme metode for element inndeling som for Vedlegg B – mesh metode 1.



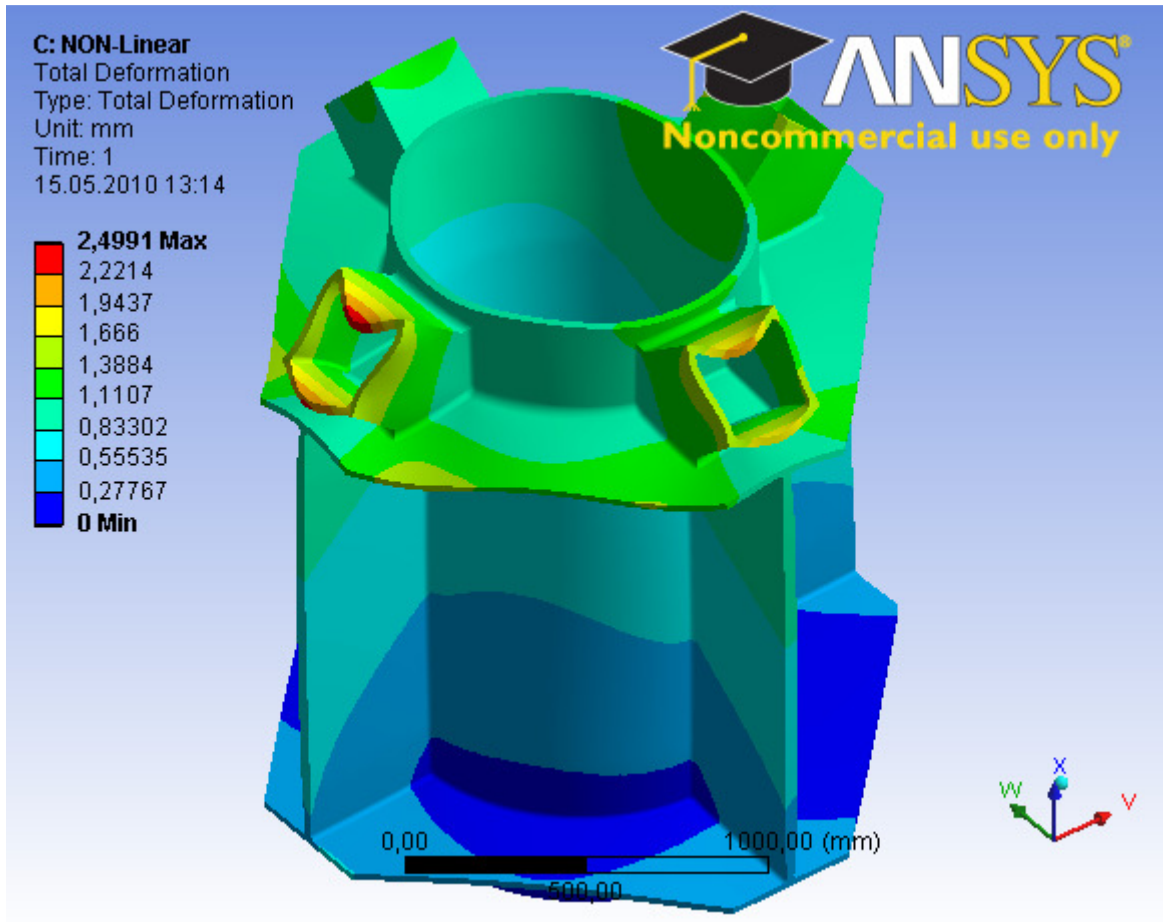
Bilde 1-2 Spenningsbilde mesh metode 1 ikke-lineær analyse, modell C1

Spenningsene i konstruksjonen fra den ikke-lineære analysen blir mye lavere enn fra den lineære. Verdien på 474MPa er over flytgrensen, men innefor den plastiske kapasiteten.



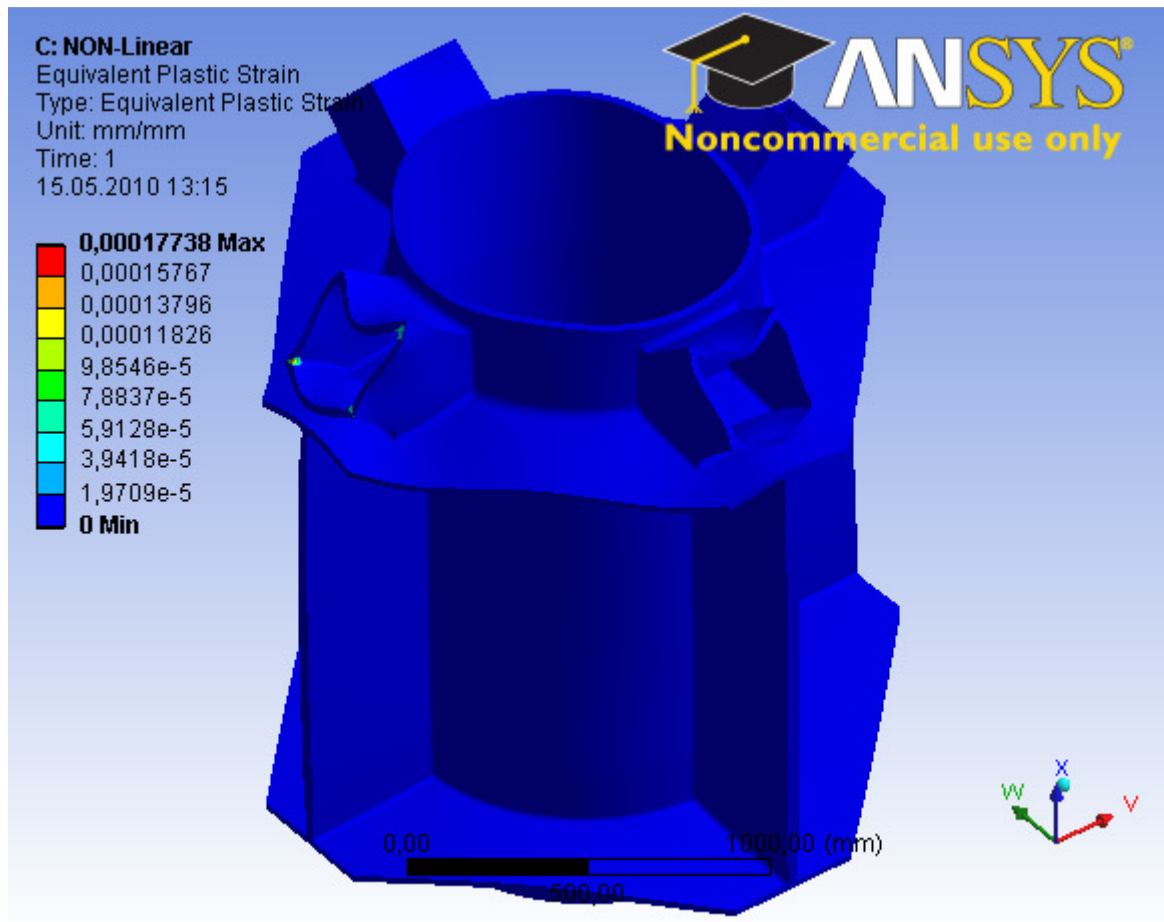
Bilde 1-3 Feilvurdering mesh metode 1, ikke-lineær analyse, modell C1

En ser ut fra feilvurderingsbildet at en får store feil i modellen, og dermed feil i resultatene.



Bilde 1-4 Deformasjon mesh metode 1, ikke-lineær analyse, modell C1

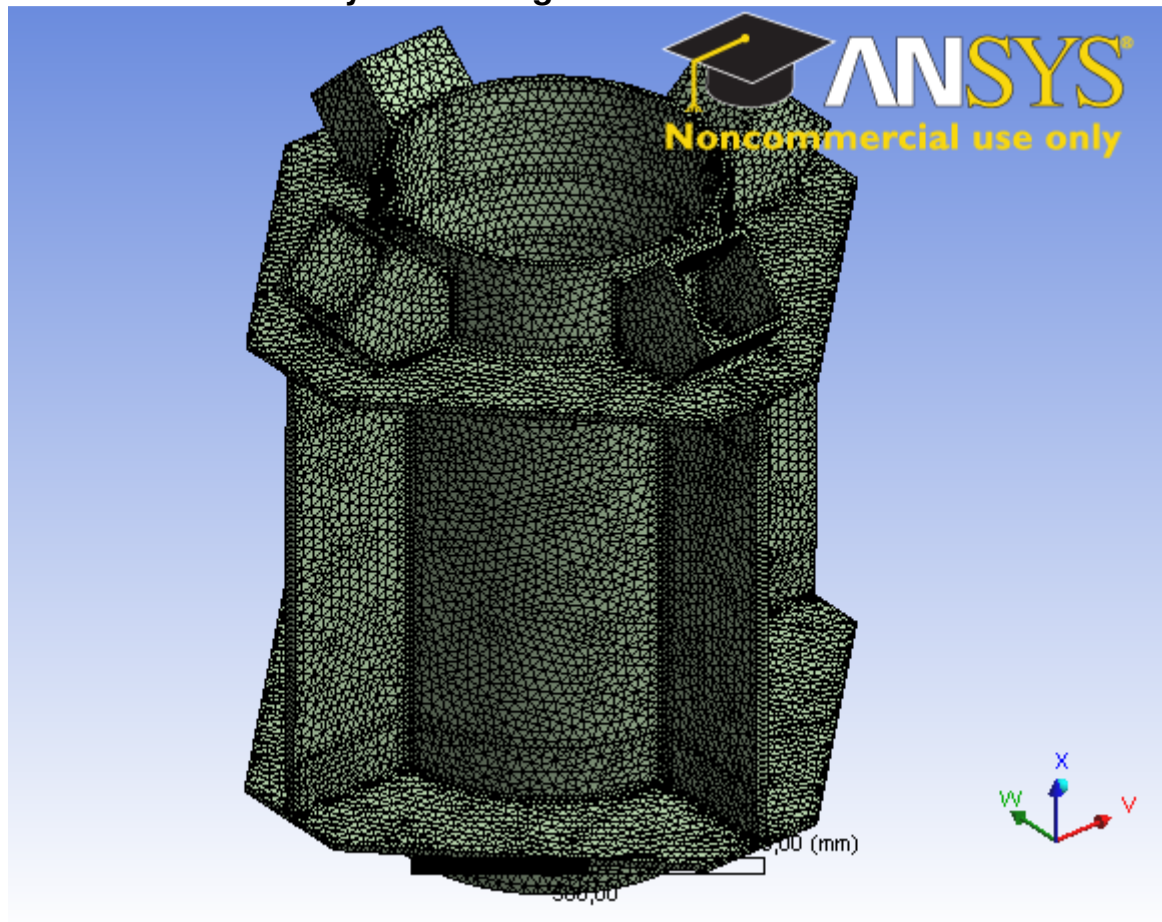
Deformasjonen blir ifølge deformasjonsbildet på 2,5mm.



Bilde 1-5 Plastisk tøyning, mesh metode 1, modell C1

Som en ser fra bildet så er den plastiske tøyningen i dette knutepunktet på under 0,02%. Dette vil si at knutepunktet ville holdt de kreftene som er påført selv om deler av tverrsnittet ville begynt å flyte.

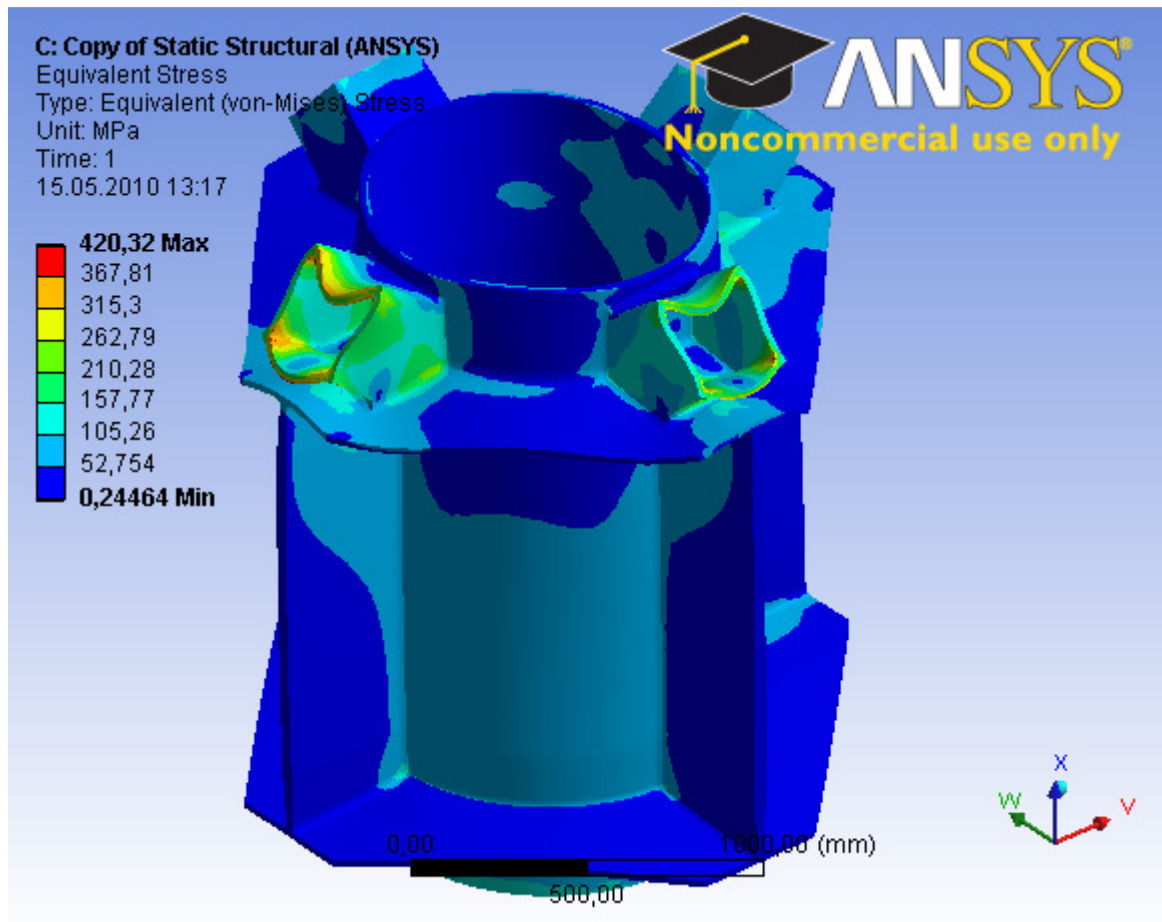
## 1.2 Ikke-lineær analyse meshing metode 2



Bilde 1-6 Mesh metode 2, modell C1

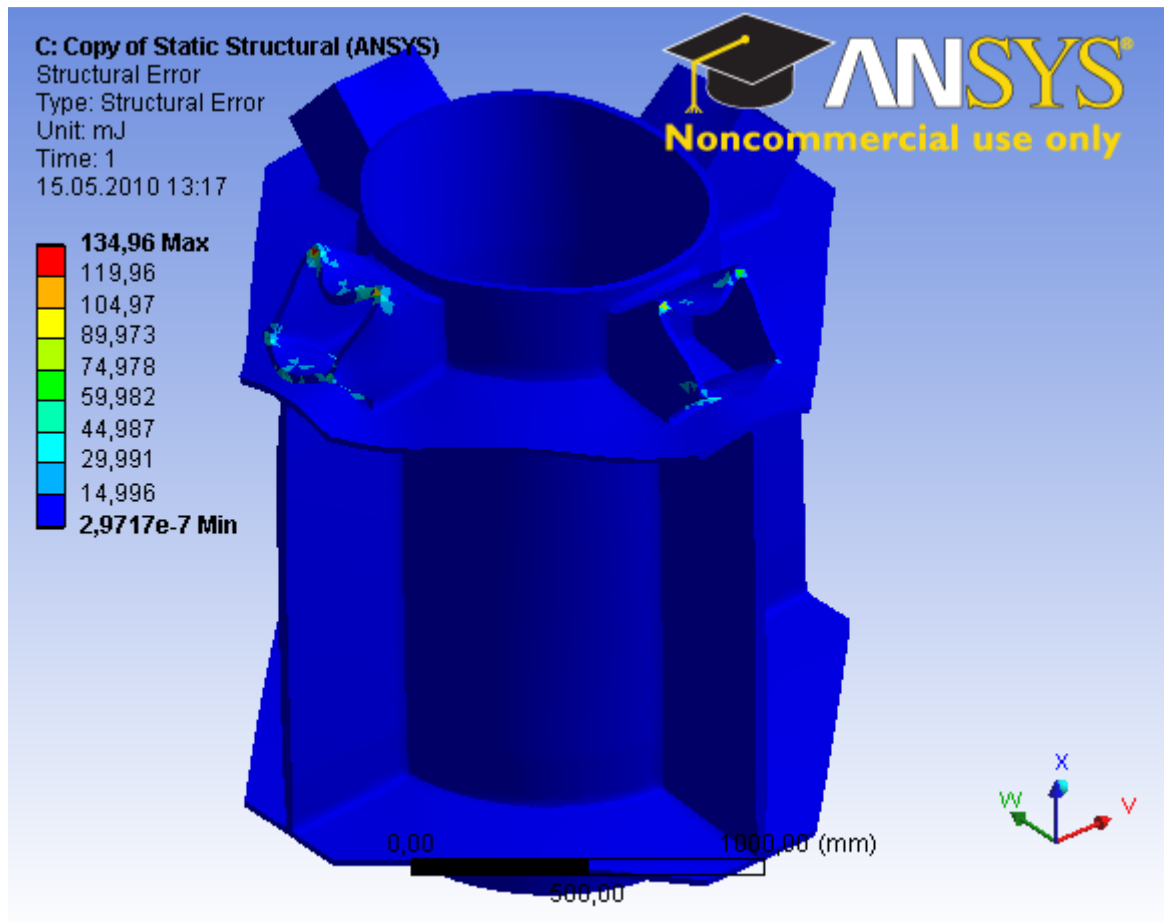
Denne modellen er den samme som mesh metode 2 i Vedlegg B. Denne er valgt da den gav lave verdier i antall noder og elementer, samt tilstrekkelig korrekte resultater.





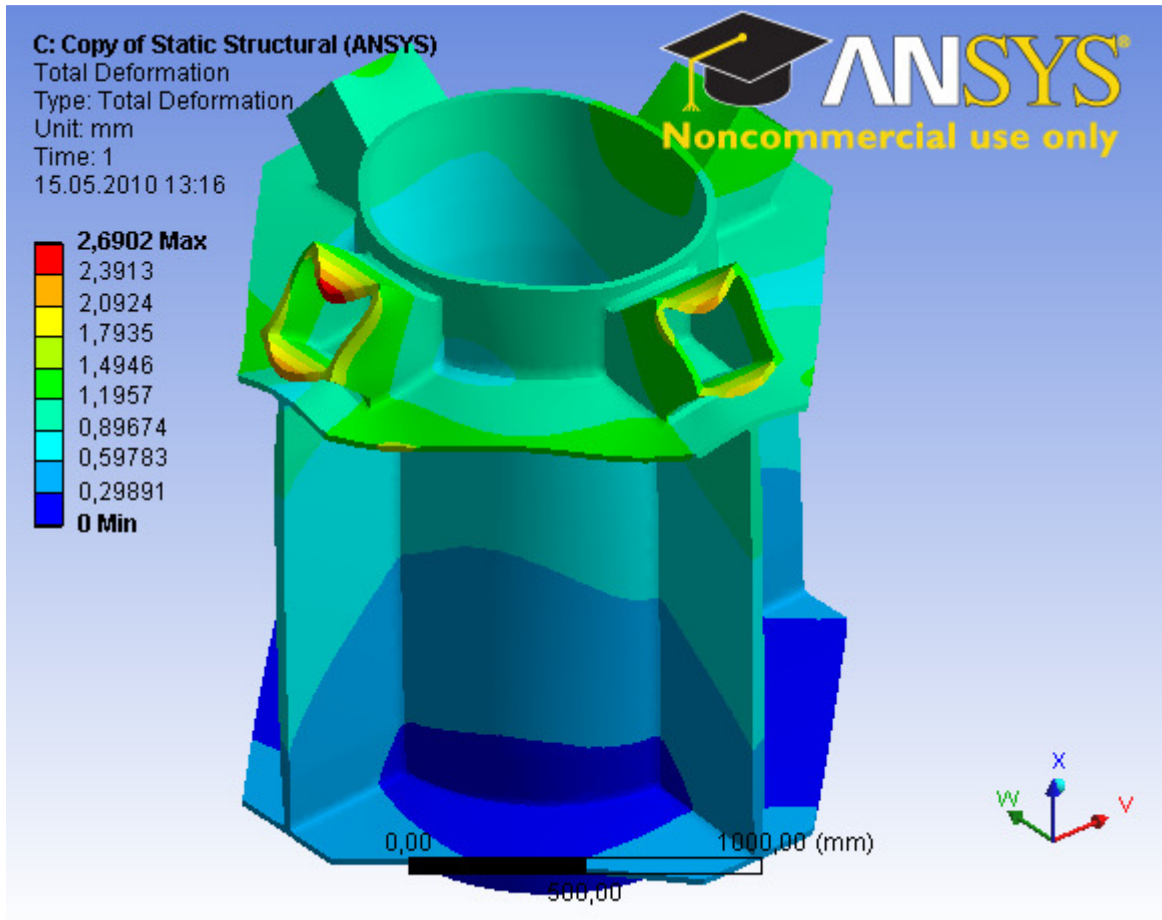
Bilde 1-7 Spenningsbilde mesh metode 2, ikke-lineær analyse, modell C1

Ved bruk av tettere elementer får en en mer nøyaktig metode og et mer korrekt resultat. Spenningsbildet viser at en får en spenning som er lik flytgrensen for materialet.



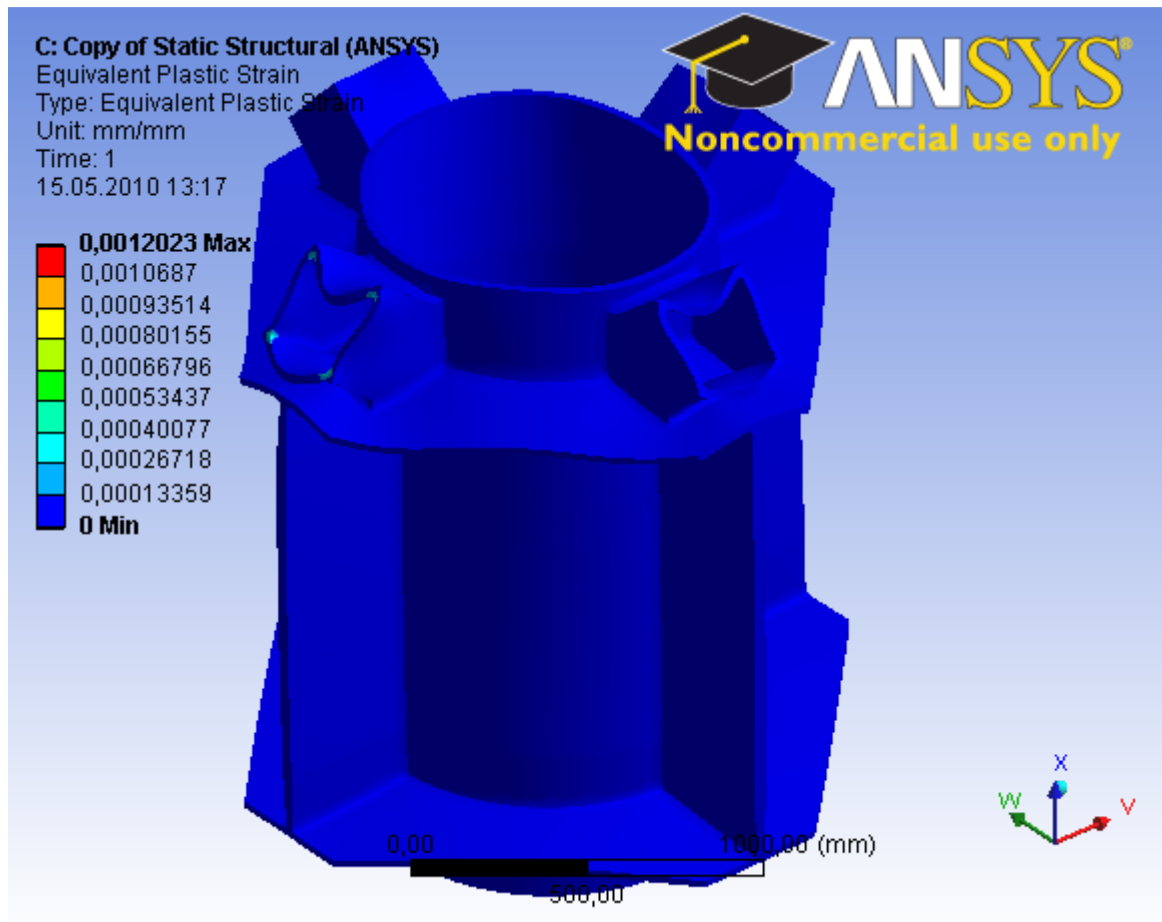
Bilde 1-8 Feilvurdering mesh metode 2, ikke-lineær analyse, modell C1

Som en ser ut ifra feilvurderingsbildet så er feilene i denne modellen betydelig mindre enn for mesh metode 1. Dette tyder på at resultatene er mer korrekte for denne metoden enn for mesh metode 1.



Bilde 1-9 Deformasjon mesh metode 2, ikke-lineær analyse, modell C1

En ser at en får en deformasjon på 2,7mm i skråstagnene ut ifra deformasjonsbildet.

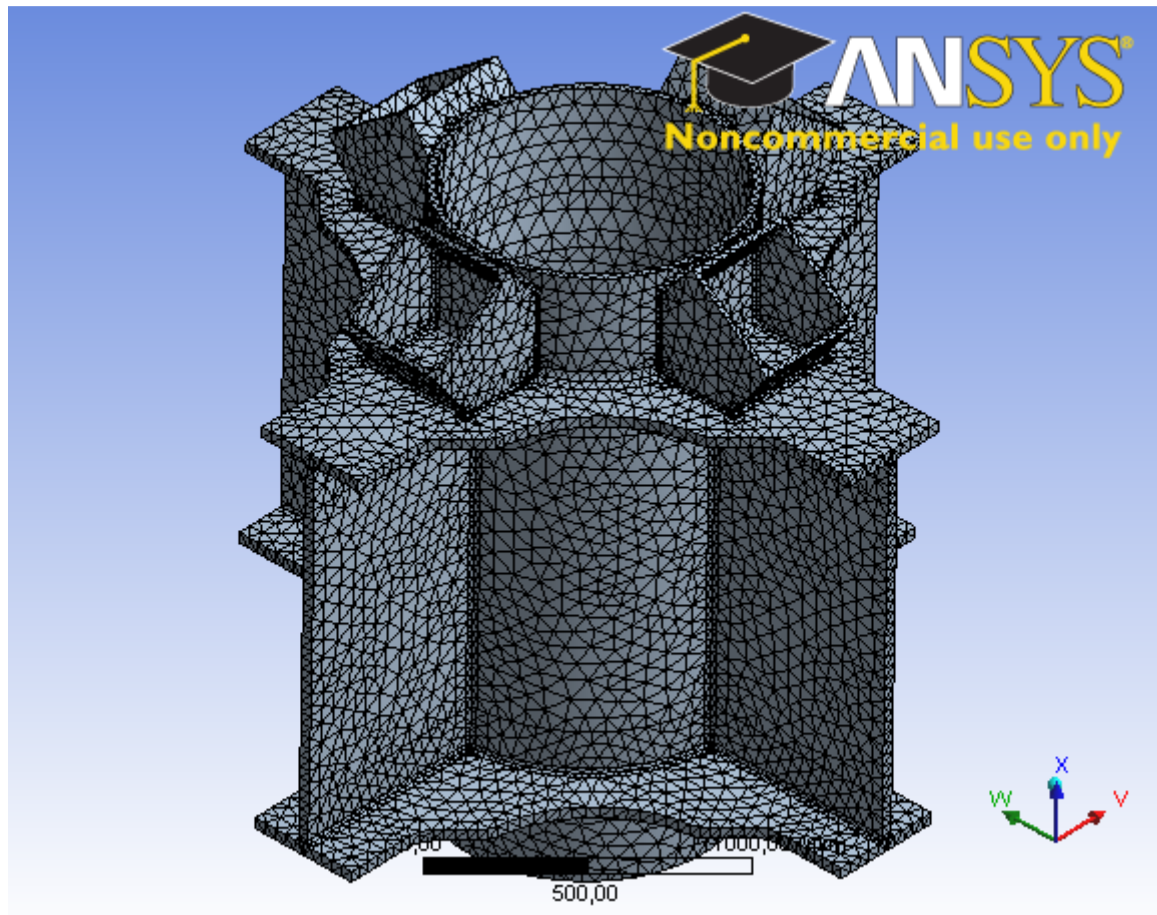


Bilde 1-10 Plastisk tøyning mesh metode 2, modell C1

En ser ut ifra tøyningens bildet at en får en plastisk tøyning på 0,12%. Dette er høyere enn for mesh metode 1, men grunnet mindre element inndeling og mindre feil får en en bedre fordeling av tøyningene over et større område og dermed høyere plastisk tøyning.

## 2 Resultat ikke-lineær analyse modell C2

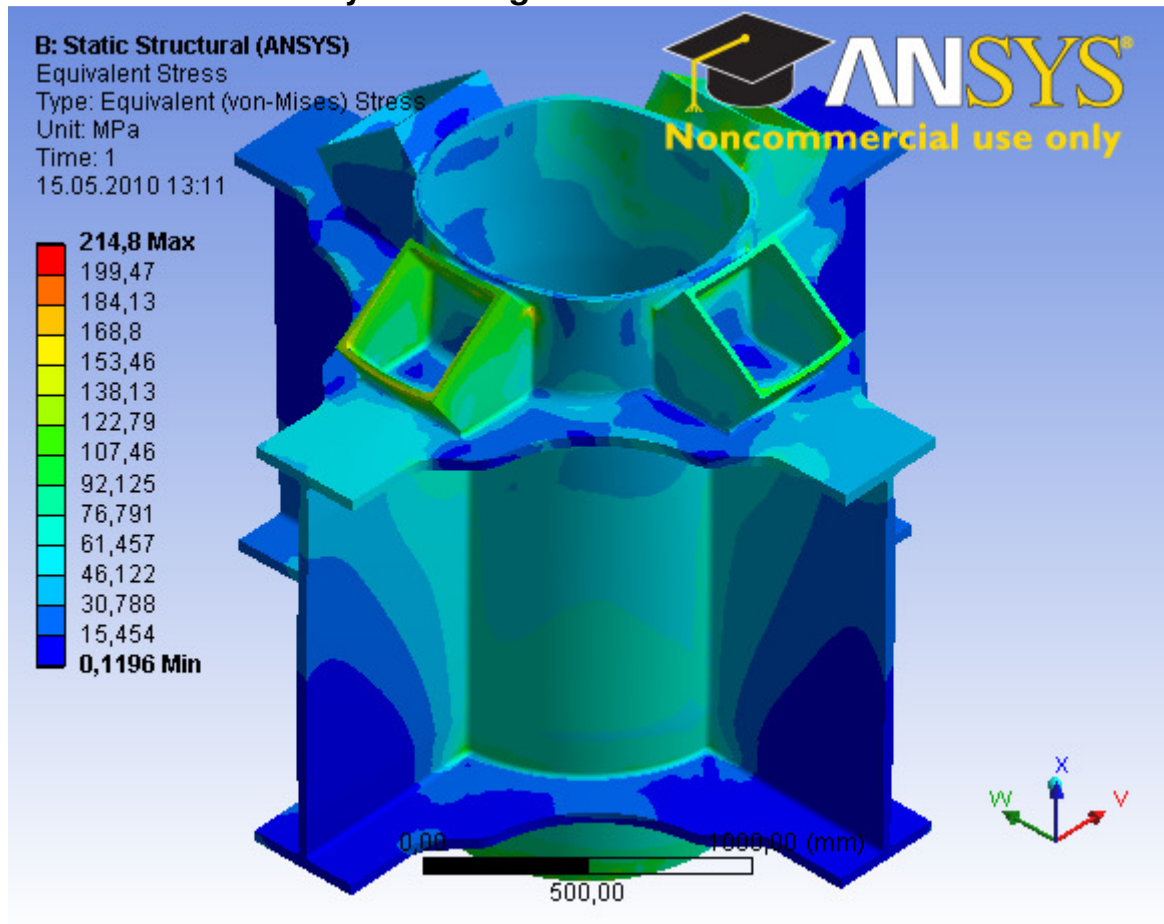
Det er for denne disse analysene brukt en element inndeling som gir et lavere antall noder og elementer for å prøve å gå ned på tidsbruken til analysene. Det er kjørt flere analyser for å prøve å finne den egentlige kapasiteten til knutepunktet. Det er da satt på en multiplikasjonsfaktor på kreftene fra bruddgrensetilstanden på henholdsvis 1, 2,3,4,5 og 10



Bilde 2-1 Mesh metode for ikke-lineær analyse for modell C2

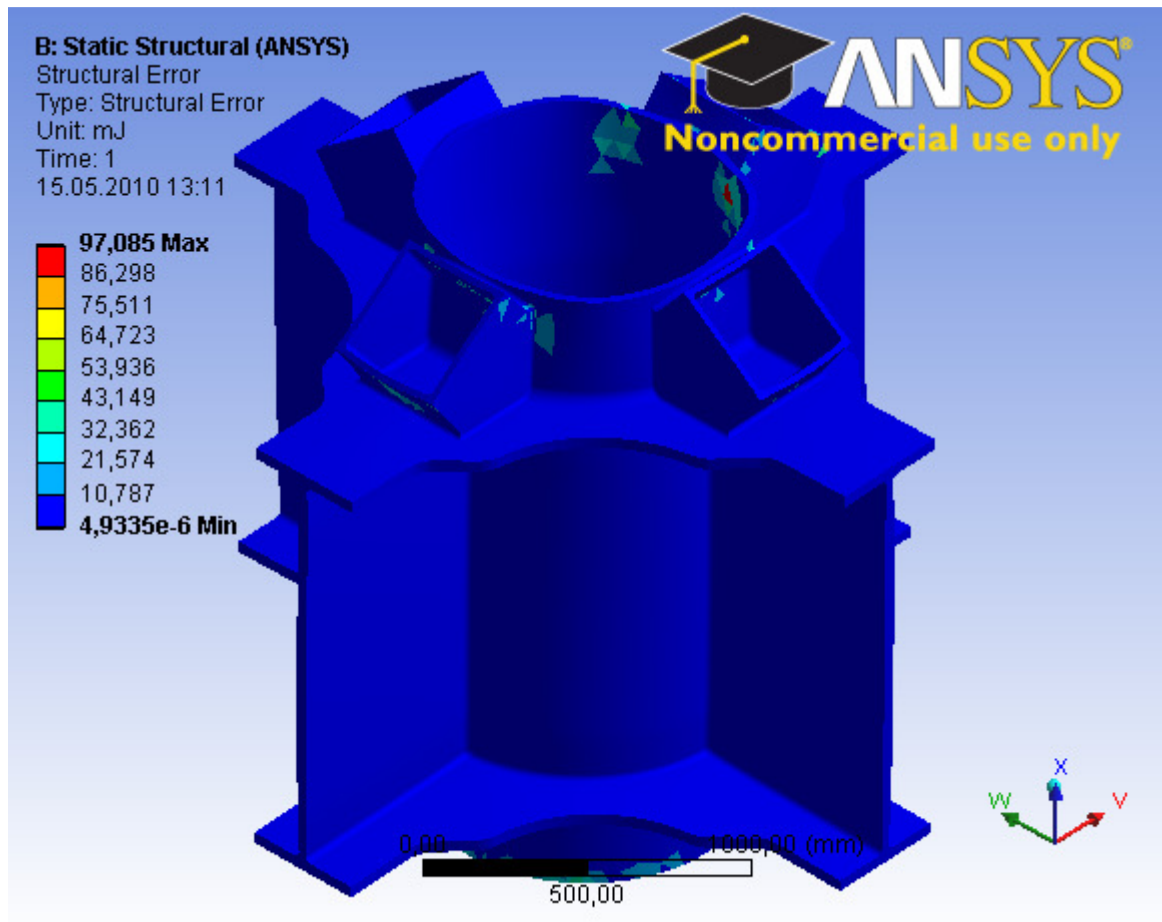
Element inndelingsmetoden som er valgt har 127 029 noder og 73 148 elementer, skjevheten er på 0,3872 med et standardavvik på 0,1900. Skjevheten blir dårligere på bekostning av antall elementer og noder, men det er viktig å holde disse tallene lave da en ved flere iterasjoner bruke enormt lang tid.

## 2.1 Ikke-lineær analyse bruddgrensetilstand



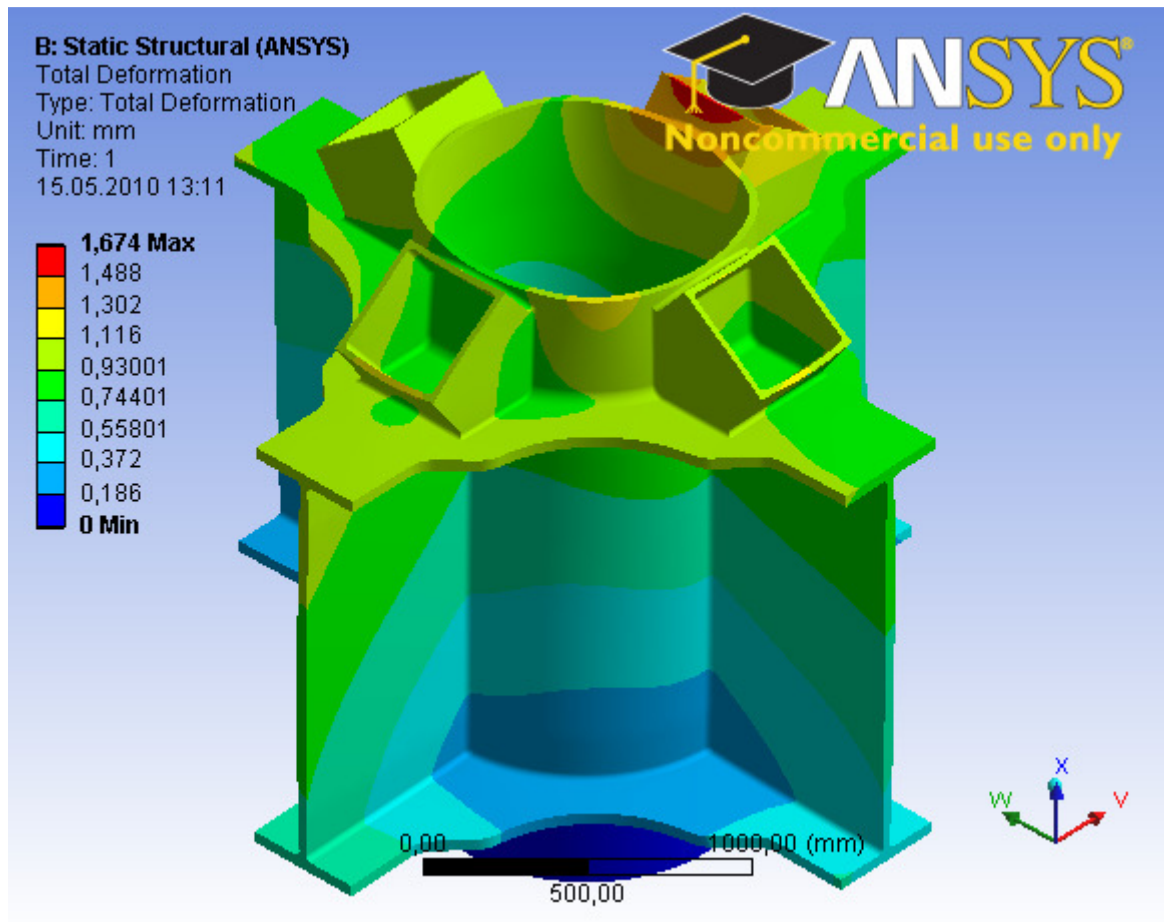
Bilde 2-2 Deformasjon ikke-lineær analyse, 1x Bruddgrensetilstand, modell C2

Spenningsene blir ved kjøring av ikke lineære analyse av modell C2 på 214MPa, noe som er mye lavere enn flytegrensen på 420MPa for denne analysen.



Bilde 2-3 Feilvurdering ikke-lineær analyse, 1x bruddgrensetilstanden, modell C2

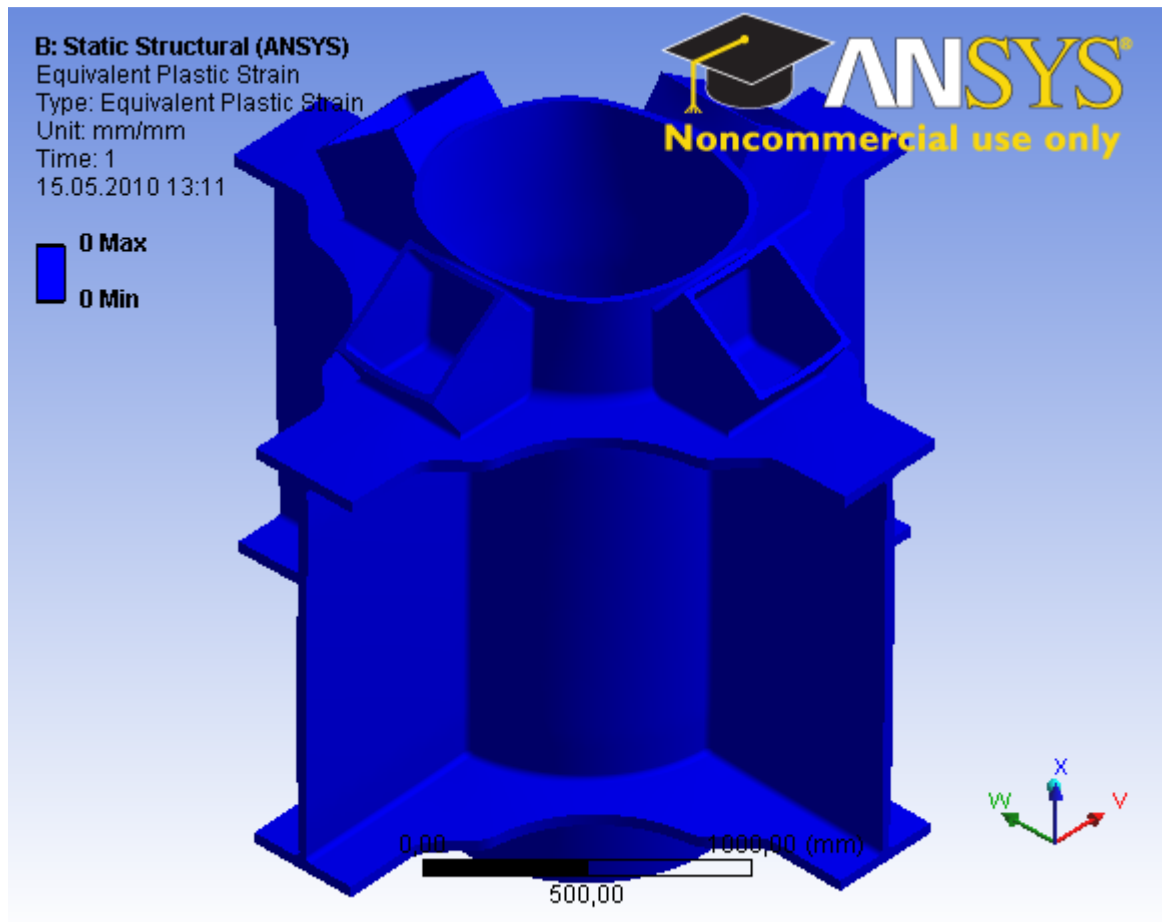
Det oppstår noen feil i modellen ved bruk av den element inndelingen som er valgt, men feilene er relativt lave sett opp imot de lineære analysene som er kjørte.



Bilde 2-4 Deformasjon ikke-lineær analyse, 1x bruddgrensetilstand, modell C2

Deformasjonen er noenlunde lik den som kommer frem fra den lineære analysen.

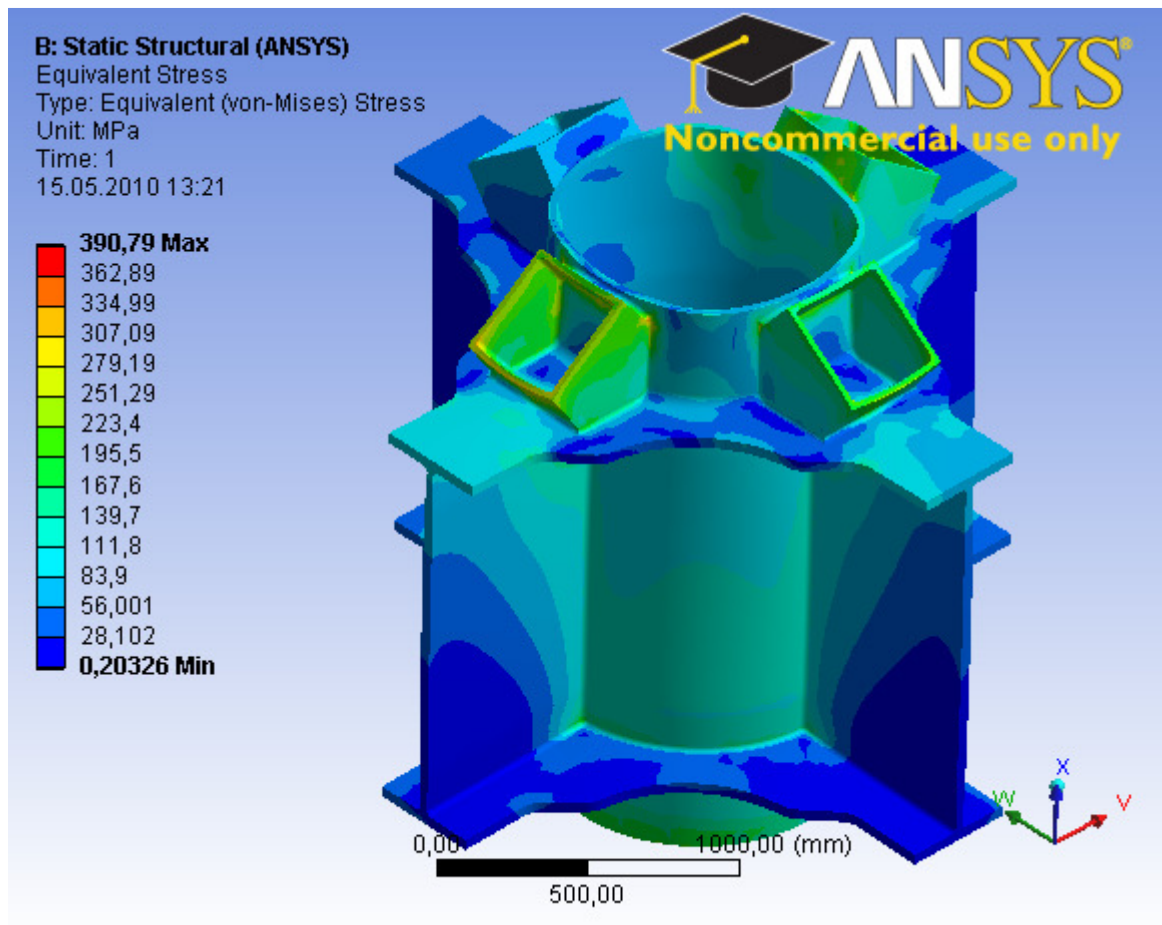




Bilde 2-5 Plastisk tøyning, 1x bruddgrensetilstand, modell C2

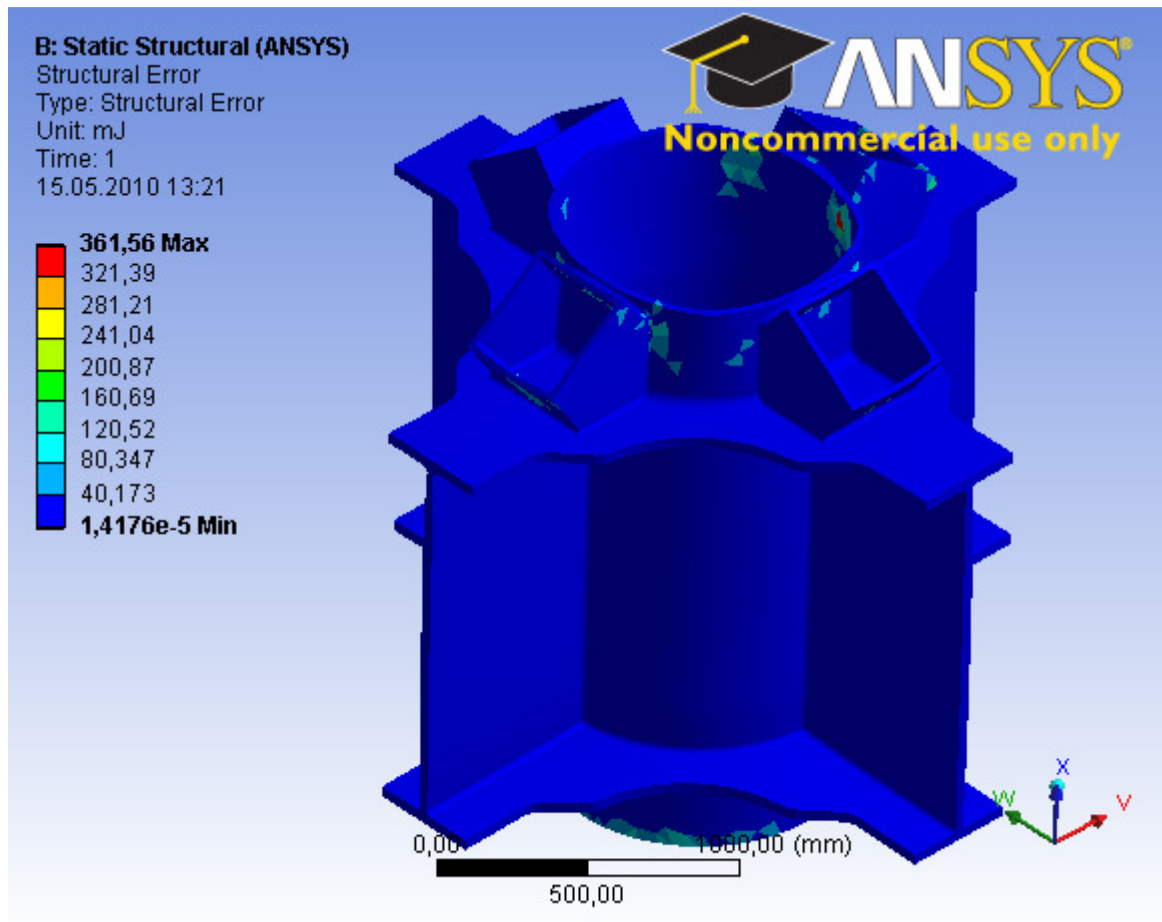
Etttersom spenningene i konstruksjonen ikke kommer over flytgrensen på 420MPa får en ikke noen form for plastisk flyt i tverrsnittet som vist i tøyningsbildet.

## 2.2 Ikke-lineær analyse 2 ganger bruddgrensetilstanden



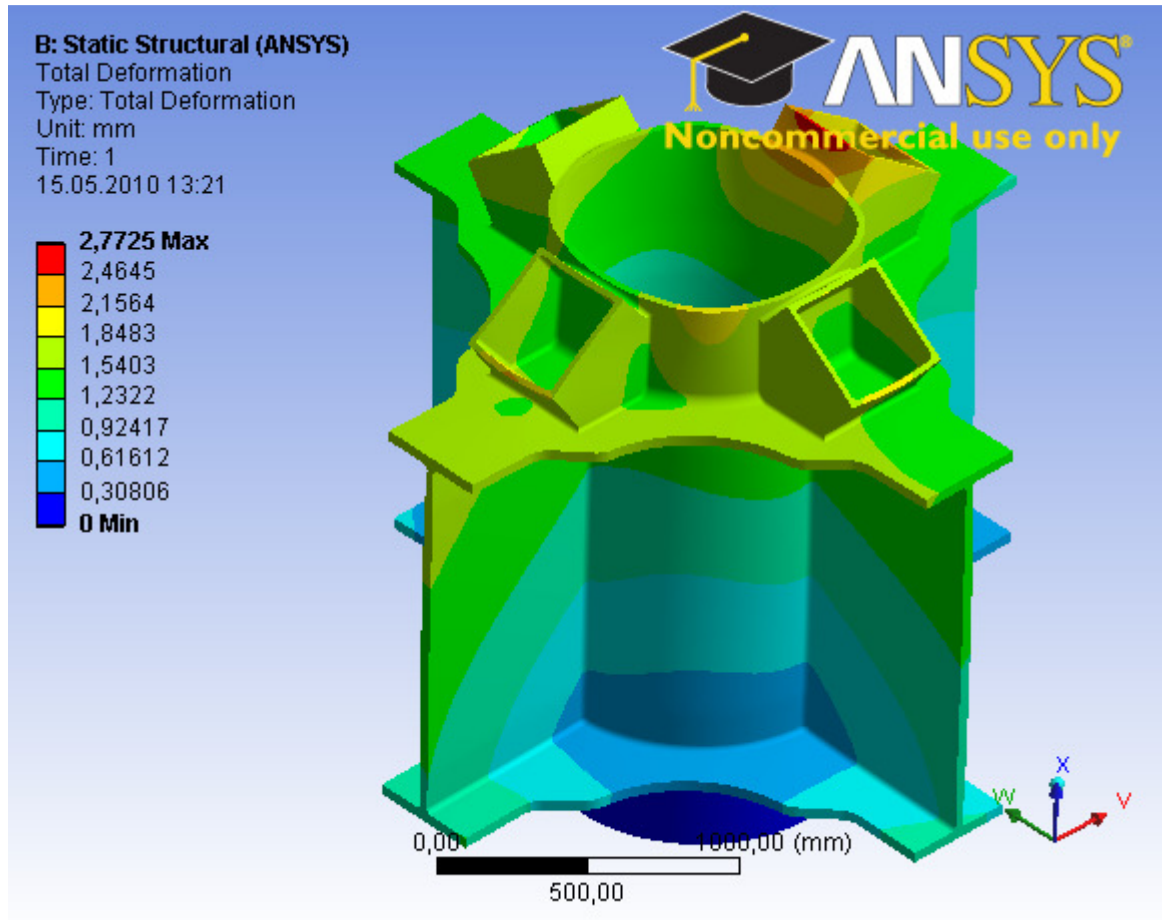
Bilde 2-6 Spenningsfordeling ikke lineær analyse, 2x bruddgrensetilstand, modell C2

Som en ser fra spenningsbildet så har ikke spenningsene oversteget flytgrensen på 420MPa selv om en setter på doble krefter. Dette tyder på at dette knutepunktet er overdimensjonert, men grunnet støpeteknikk får en ikke til å lage tynnere tverrsnitt i de områdene med lave spenninger.



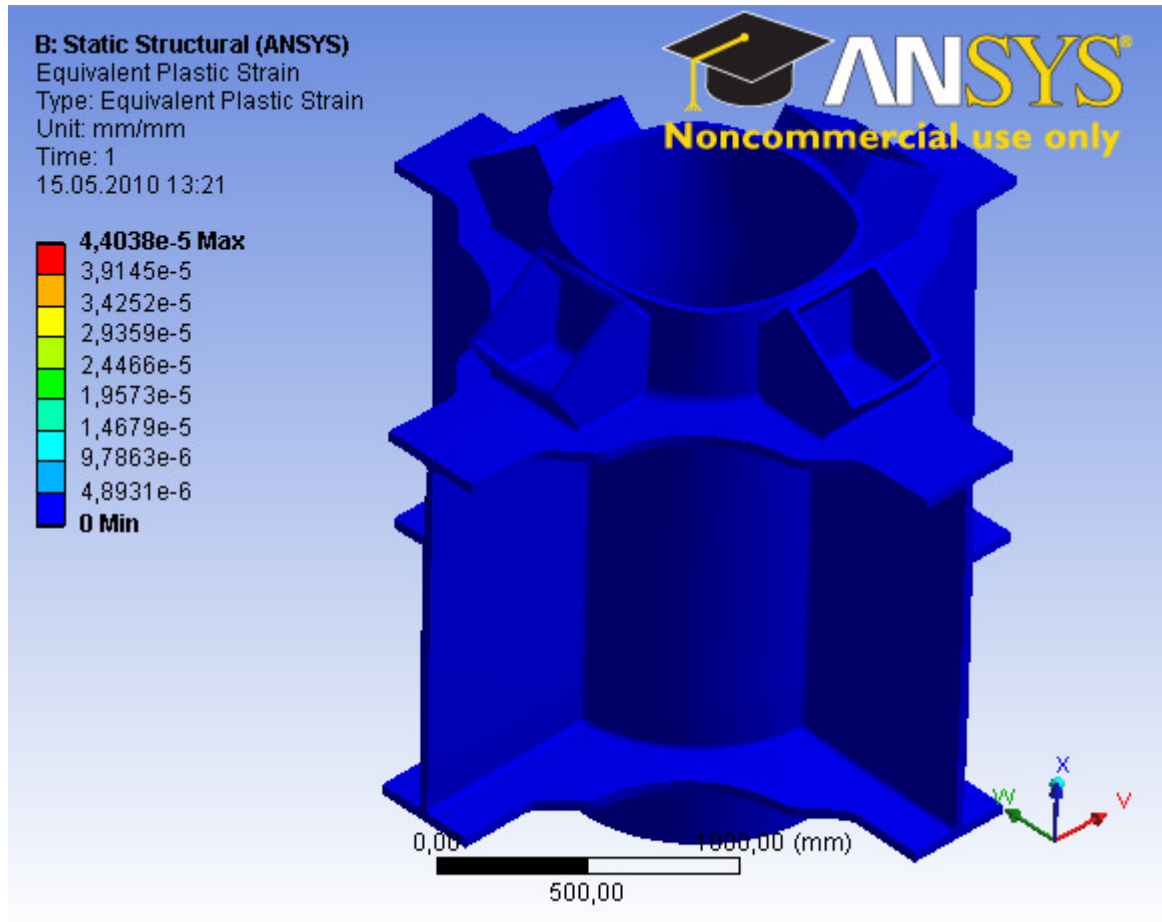
Bilde 2-7 Feilvurdering ikke-lineær analyse, 2x bruddgrensetilstand, modell C2

Som en ser ut ifra feilvurderingsbildet så er feilene mye høyere grunnet at spenningene i konstruksjonen øker.



Bilde 2-8 Deformasjon ikke-lineær analyse, 2x bruddgrensetilstand, modell C2

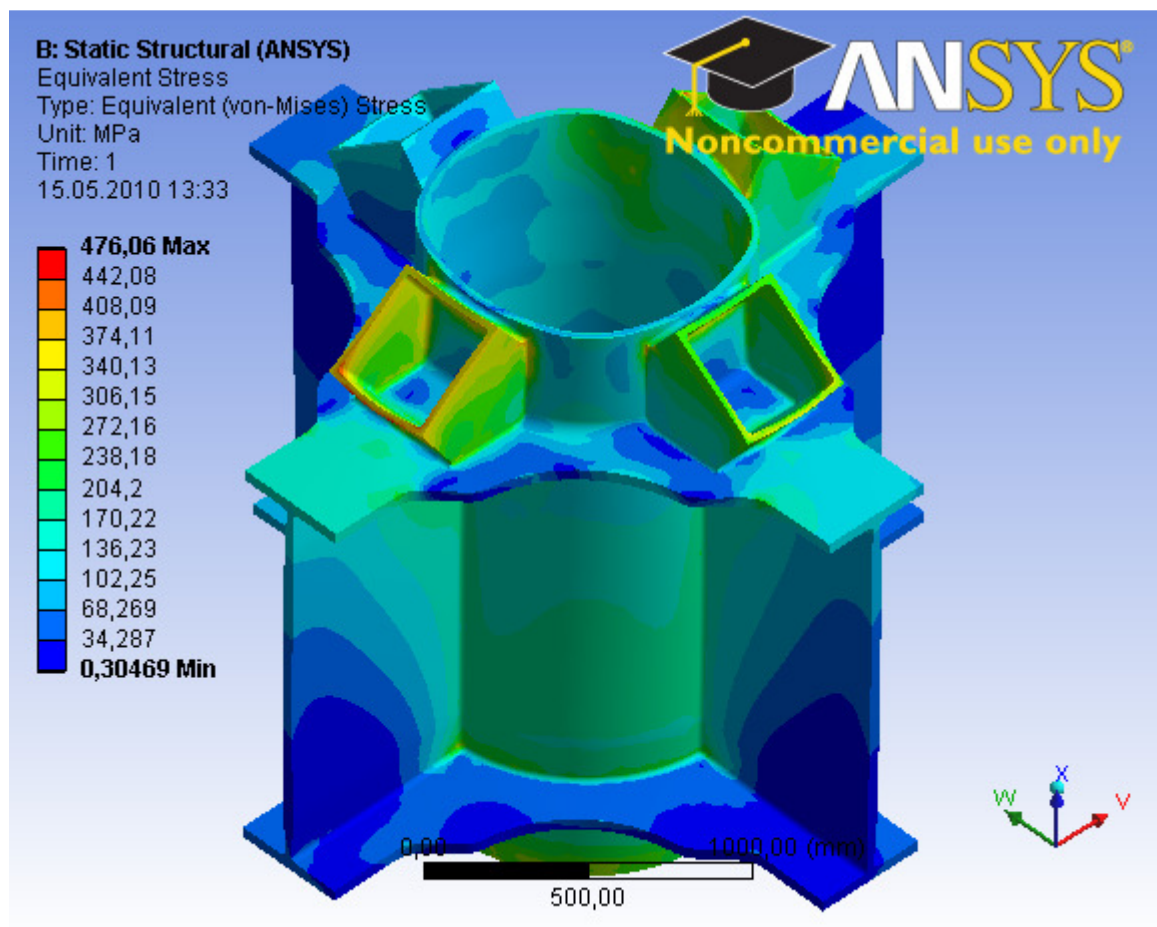
En ser fra deformasjonsbildet at deformasjonen øker litt ved påsetting av større krefter.



Bilde 2-9 Plastisk tøyning, 2x bruddgrensetilstand, modell C2

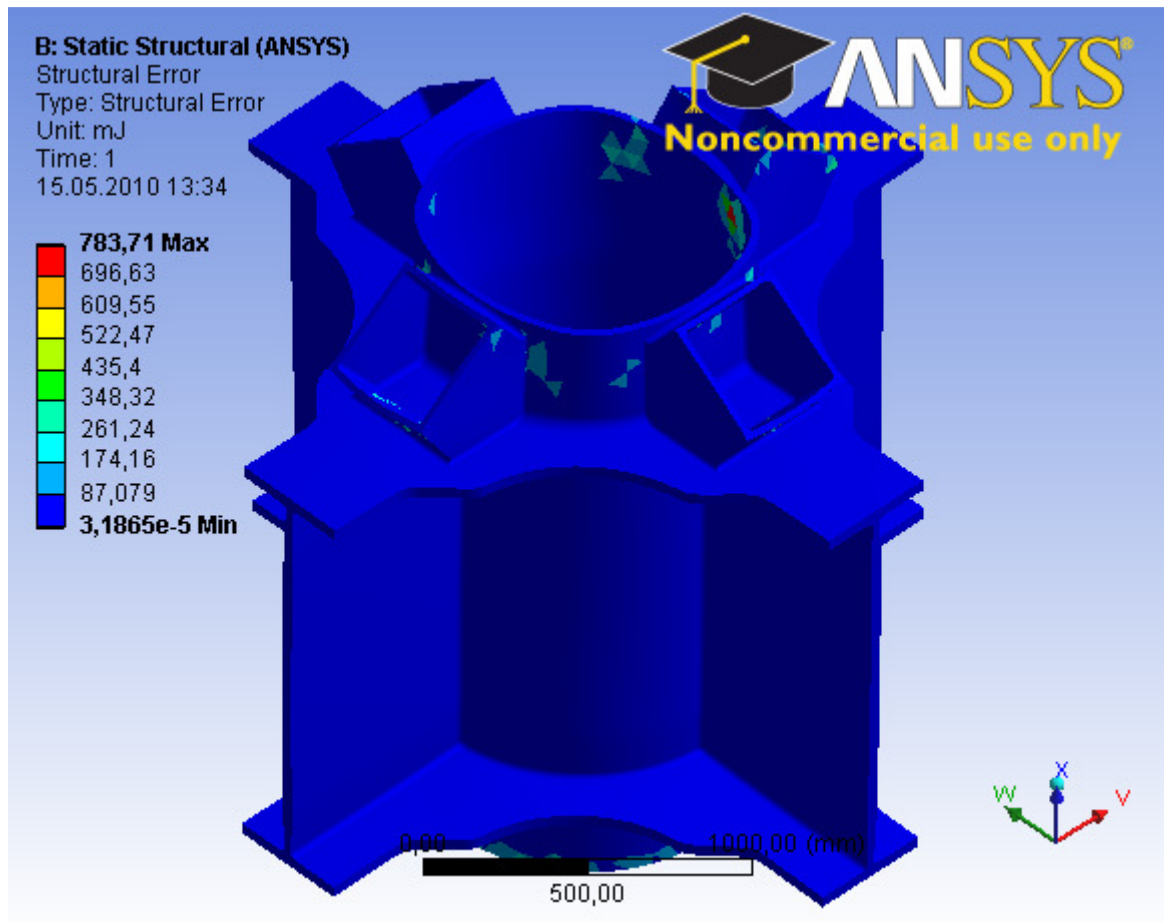
En ser av tøyningsbildet at en får en liten plastisk tøyning i konstruksjonen, men den er så liten at den er neglisjerbar.

## 2.3 Ikke-lineær analyse 3 ganger bruddgrensetilstanden



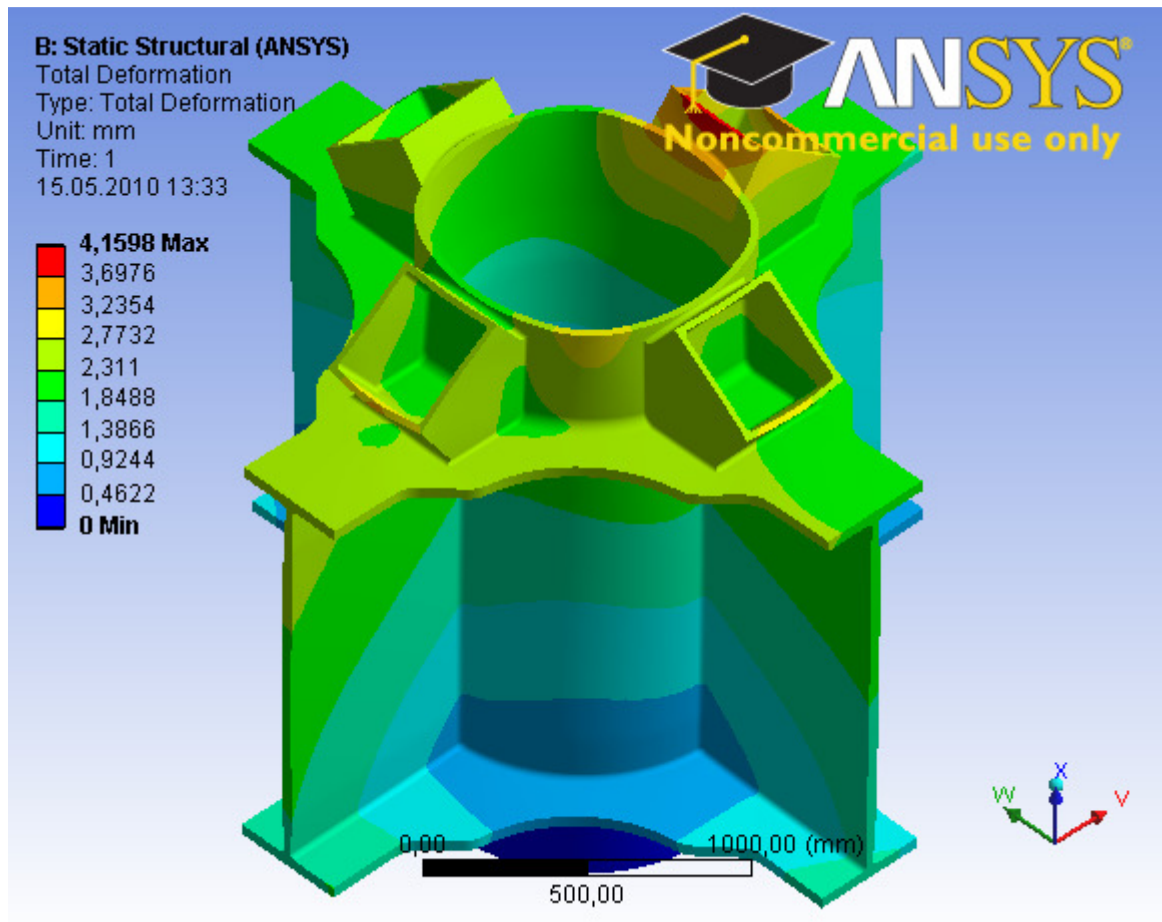
Bilde 2-10 Spenningsbilde ikke-lineær analyse, 3x bruddgrensetilstanden, modell C2

Som en ser av spenningsbildet får en en spenning som er høyere enn flytgrensen på 420MPa, noe som sier at deler av tverrsnittet går i plastisk flyt ved påsetting av krefter tilsvarende 3 ganger bruddgrensetilstanden.



Bilde 2-11 Feilvurdering ikke-lineær analyse, 3x bruddgrensetilstand, modell C2

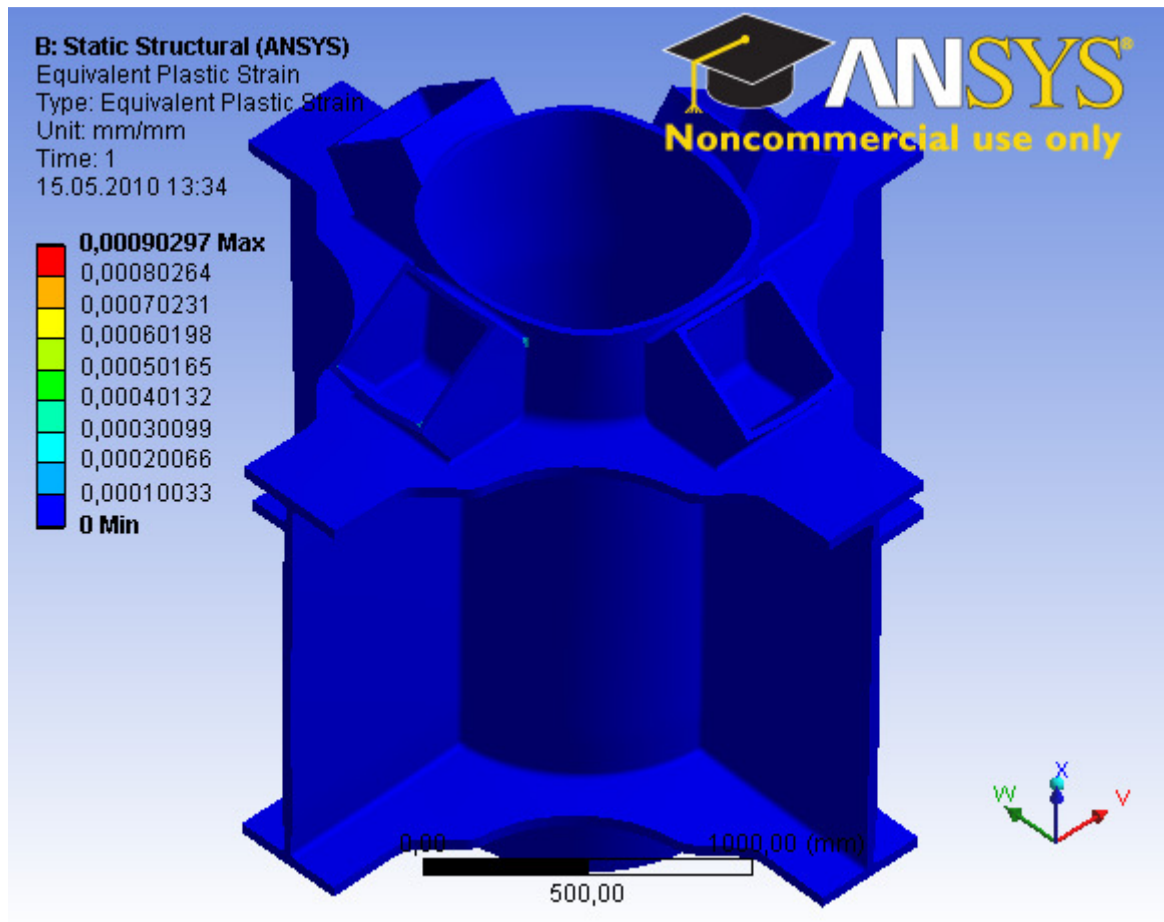
En ser av feilvurderingsbildet at en får store feil i modellen i visse områder. Dette gjør at resultatene avviker fra et realistisk tilfelle.



Bilde 2-12 Deformasjon ikke-lineær analyse, 3xbruddgrensetilstand, modell C2

En ser at en får deformasjoner nærmest hele tverrsnittet, med de største deformasjonene konsentrert i skråstagene.

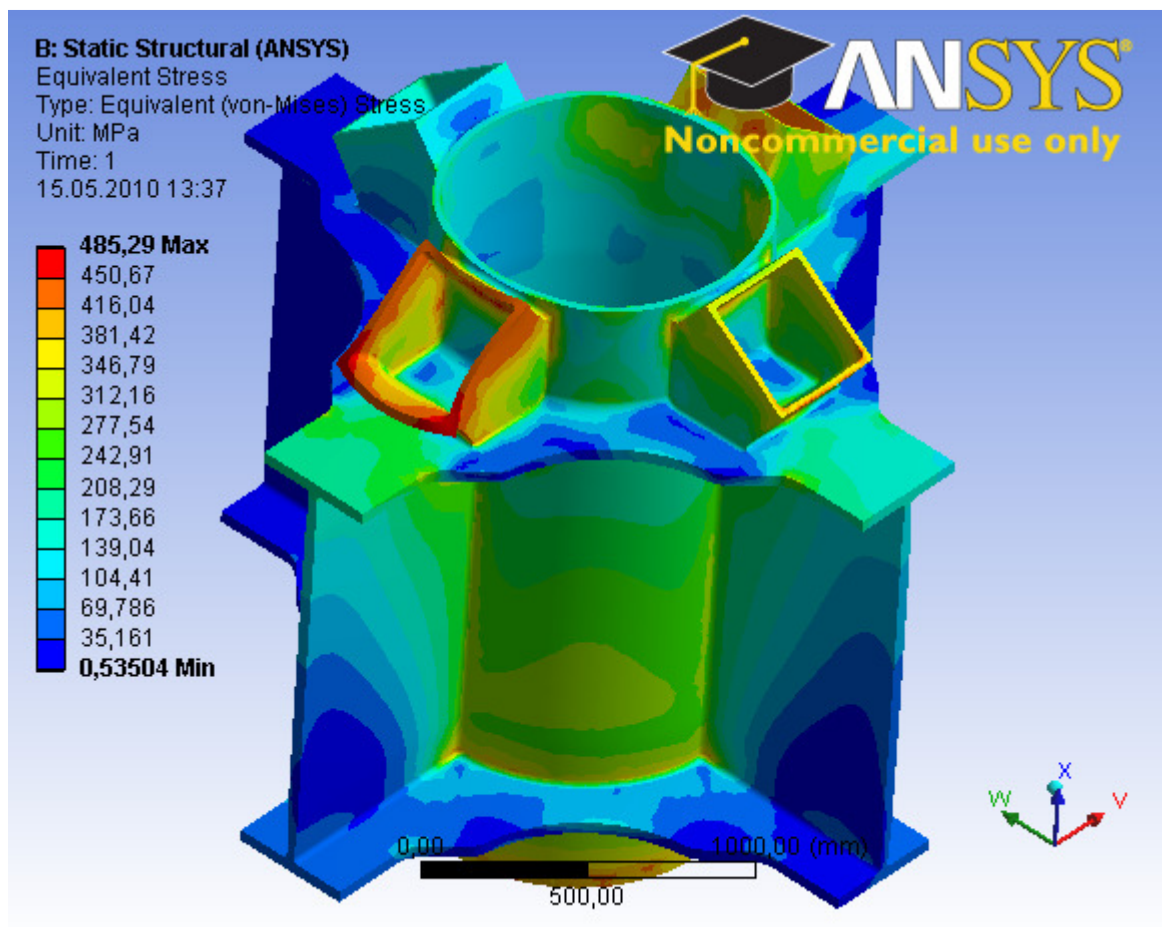




Bilde 2-13 Plastisk tøyning, 3x buddgrensetilstanden, modell C2

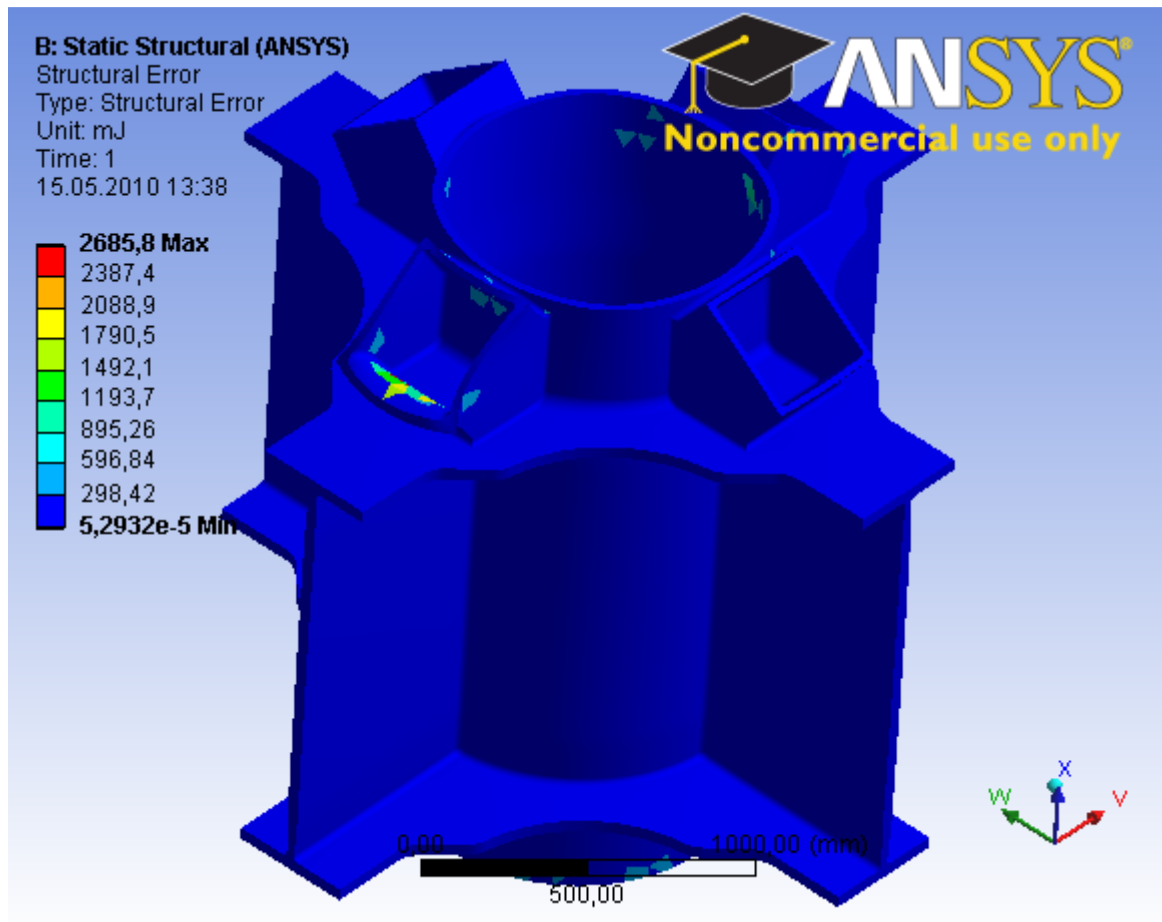
En ser fra tøyingsbildet at der oppstår en plastisk tøyning på 0,01%, noe som er mye lavere enn hva materialet tåler.

## 2.4 Ikke-lineær analyse 4 ganger bruddgrensetilstanden



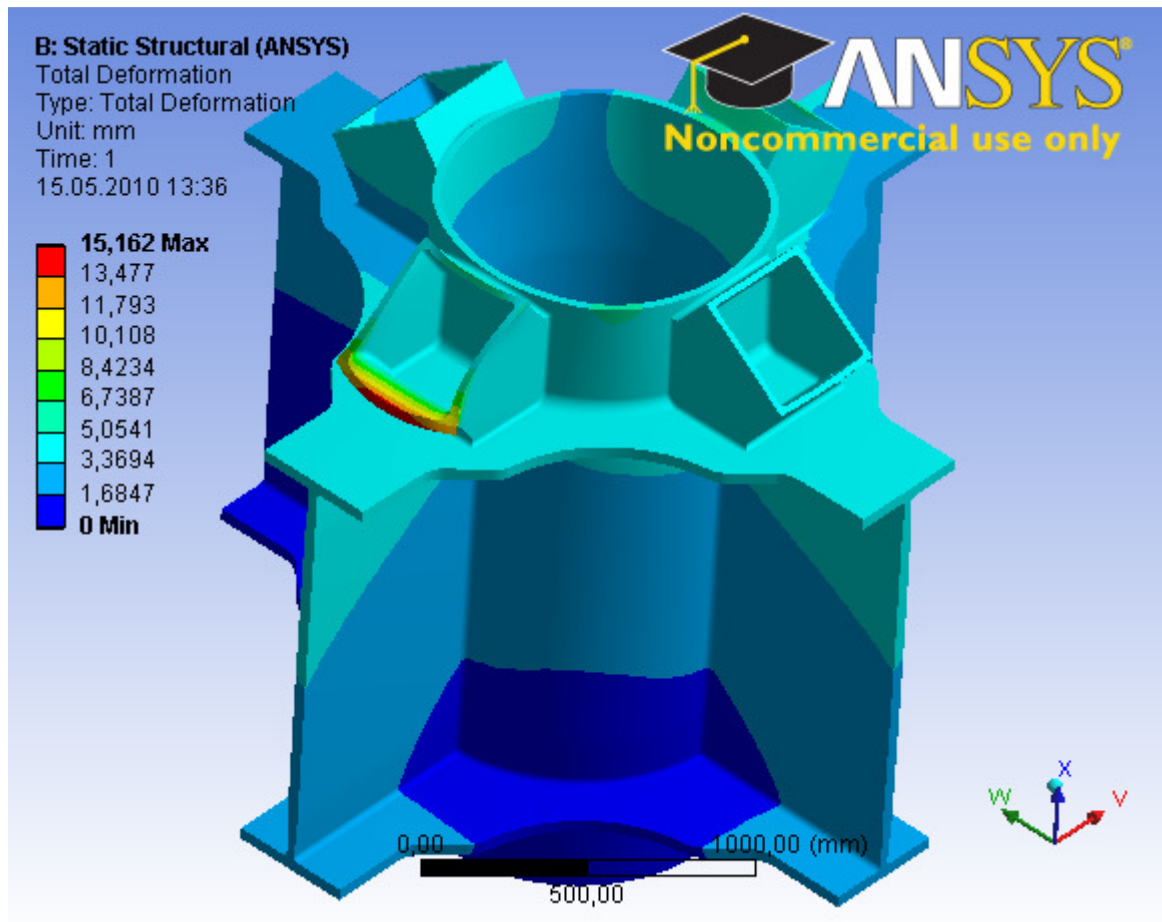
Bilde 2-14 Spenningsfordeling ikke-lineær analyse 4x bruddgrensetilstand, modell C2

Som en ser ut ifra bildet får en store spenningskonsentrasjoner i skråstagnene.



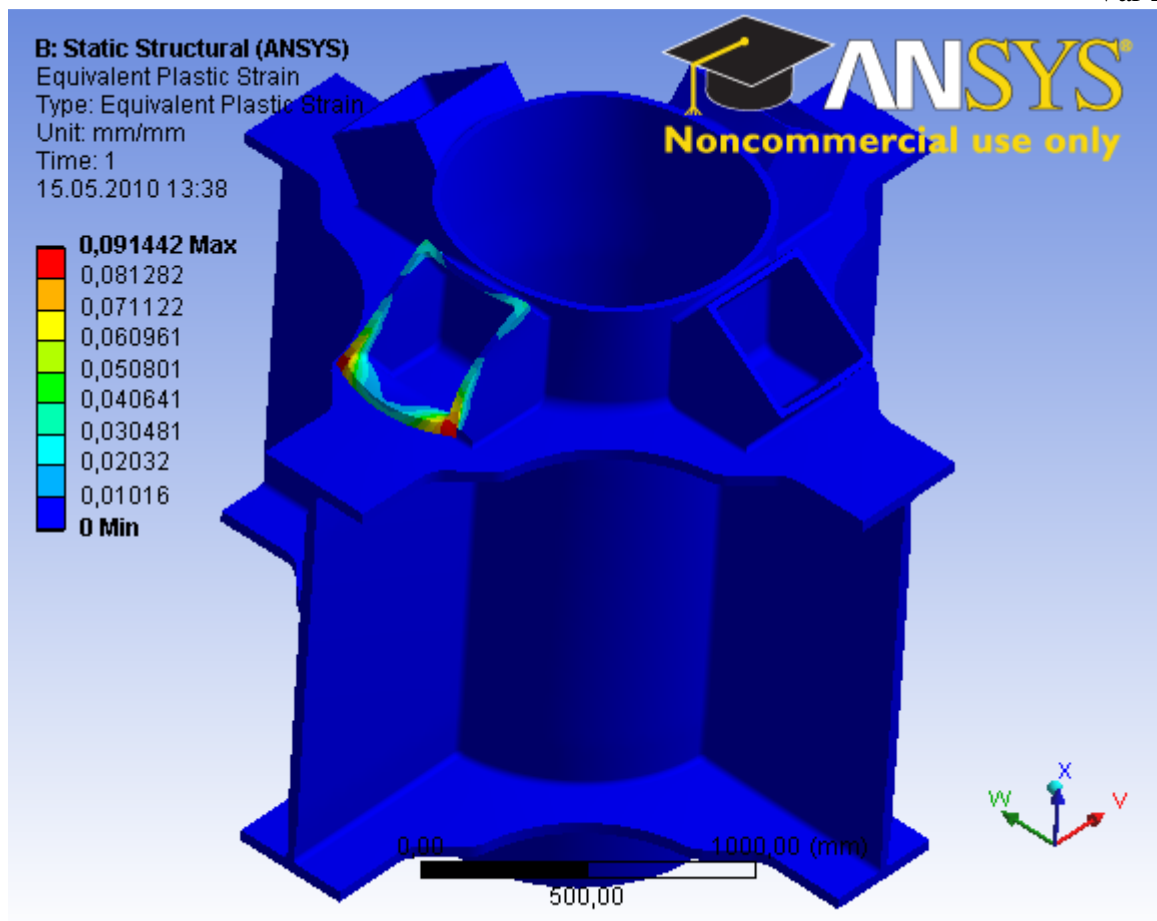
Bilde 2-15 Feilvurdering ikke-lineær analyse, 4x bruddgrensetilstand, modell C2

En ser her at en får store feil i den matematiske modellen grunnet den grove element inndelingen, det er derfor vanskelig å si noe om hvor gode resultatene er.



Bilde 2-16 Deformasjon ikke-lineær analyse, 4x bruddgrensetilstand, modell C2

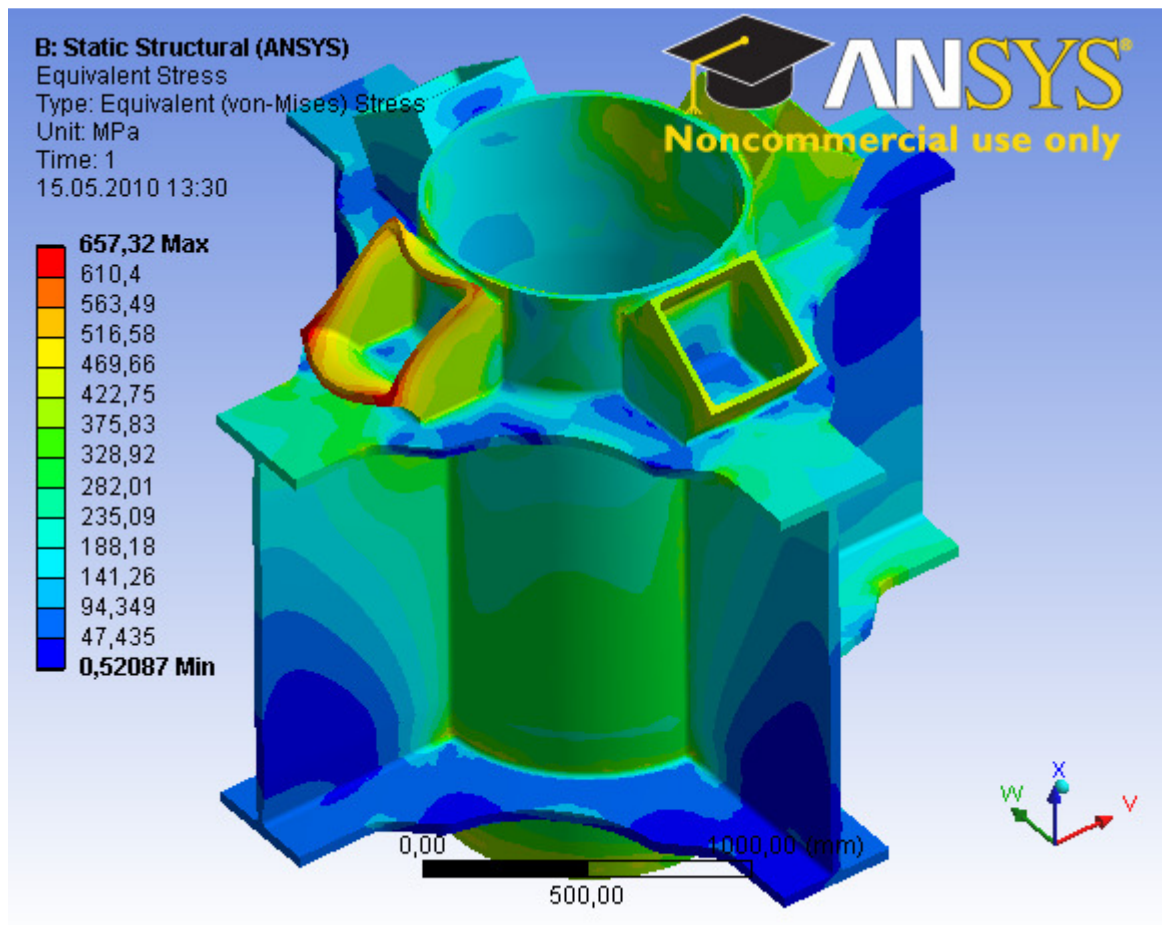
En ser at en får store deformasjoner i ene skråstøtten. Den egentlige deformasjonen vil nok bli noe mindre om en hadde kjørt en mer detaljert element inndeling i de kritiske områdene, men da ville analysen tatt flere dager.



Bilde 2-17 Plastisk tøyning 4x bruddgrensetilstand, modell C2

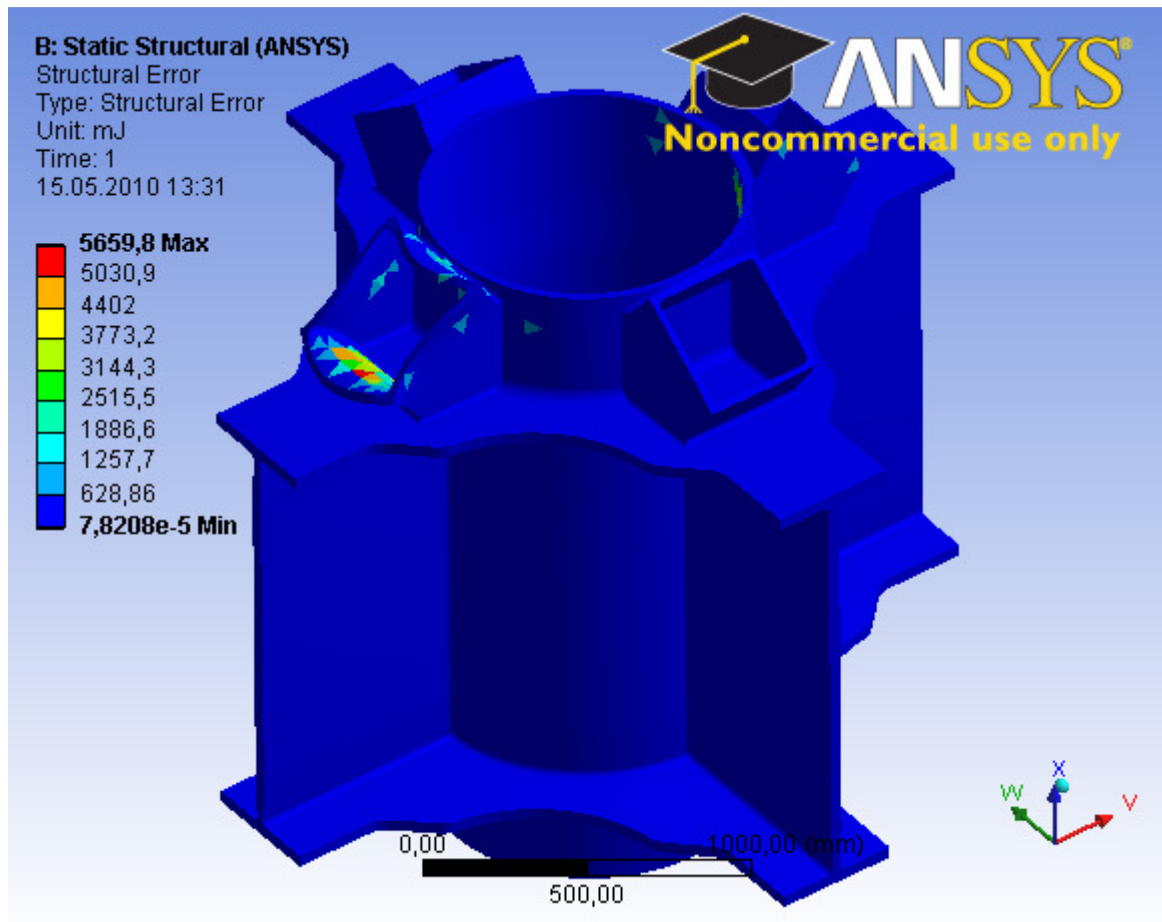
En får ved bruk av krefter 4 ganger bruddgrensetilstanden en plastisk tøyning på over 9%, noe som er rett under grensen for S460 stål i henhold til NORSOK N-004. Hvor nøyaktig dette resultatet er vanskelig å si da der er store feil i den matematiske modellen i det kritiske området.

## 2.5 Ikke-lineær analyse 5 ganger bruddgrensetilstanden



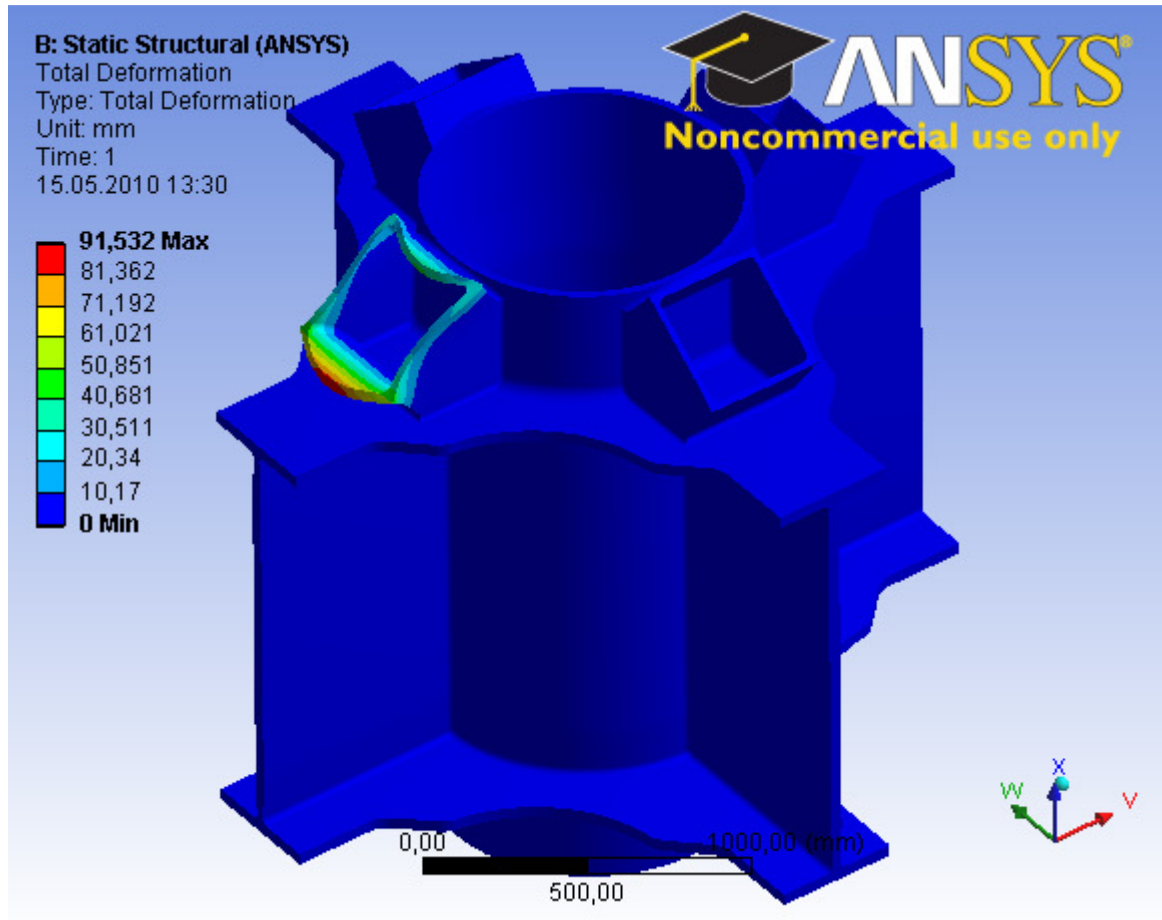
Bilde 2-18 Spenningsfordeling ikke-lineær analyse, 5x bruddgrensetilstand, modell C2

Når en kjører på med krefter 5 ganger bruddgrensetilstanden får en spenninger langt over flytgrensen på 420MPa.



Bilde 2-19 Feilvurdering ikke-lineær analyse, 5x bruddgrensetilstand, modell C2

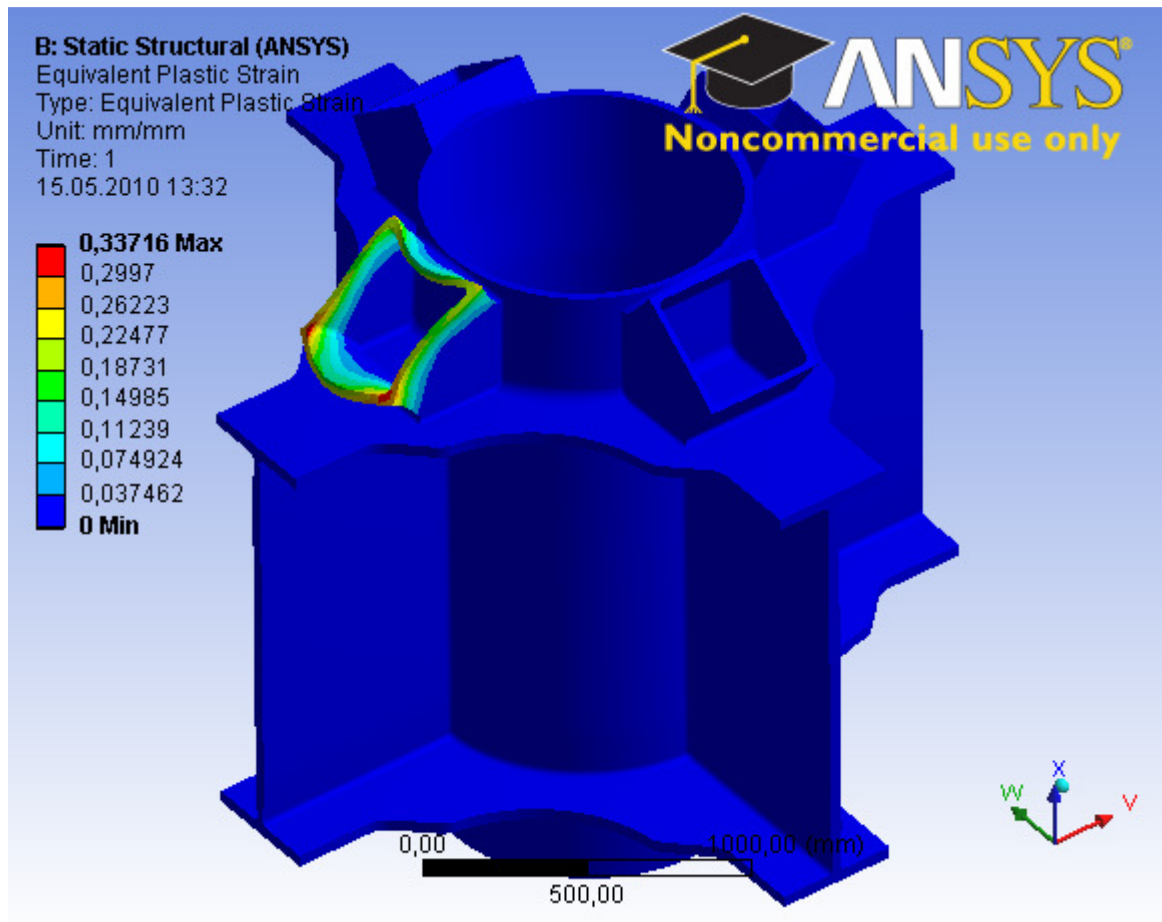
Som en ser fra feilvurderingsbildet så er feilene så store i skråstagnene at resultatene mest sannsynlig ikke er gyldige for denne analysen.



Bilde 2-20 Deformasjon ikke-lineær analyse, 5x bruddgrensetilstand, modell C2

Som en ser av deformasjonsbildet så får en størst deformasjon i ene skråstaket.





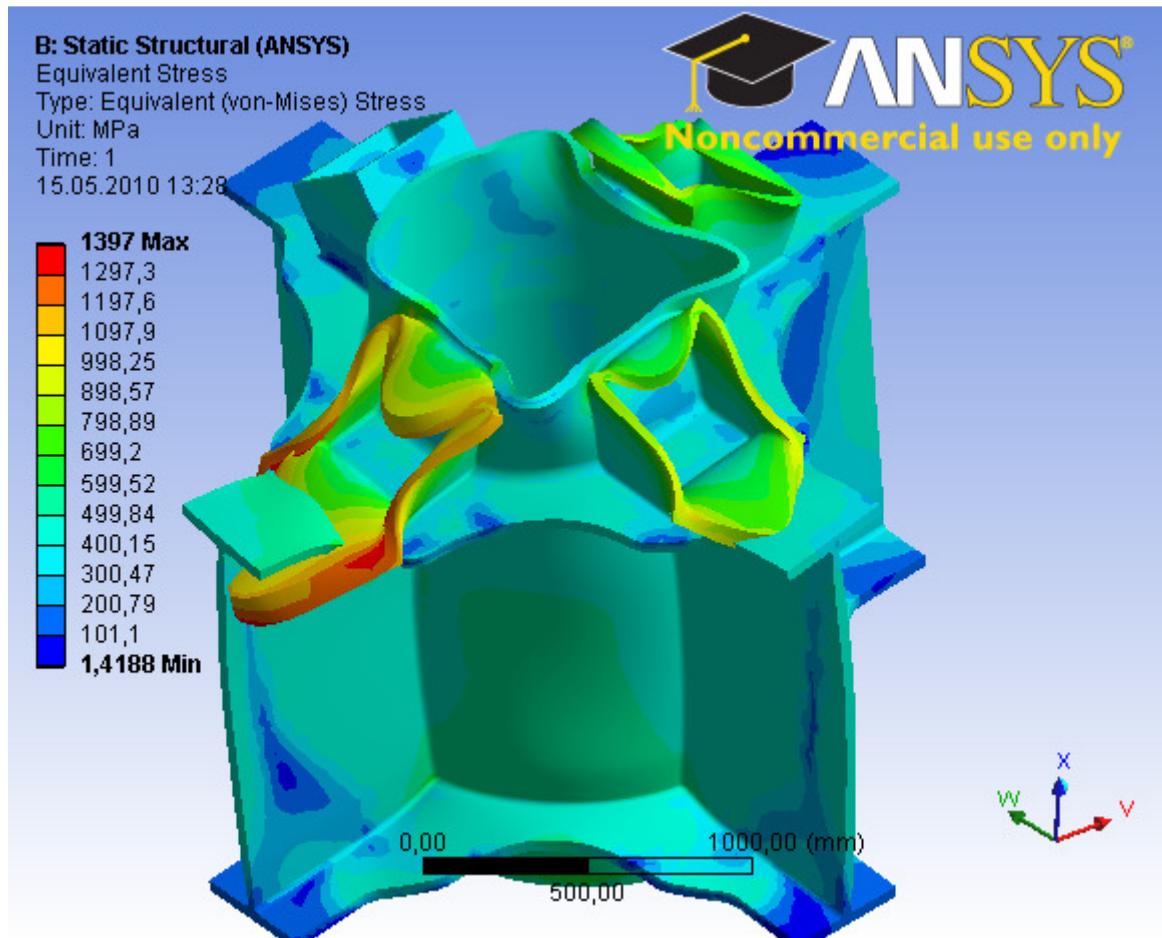
Bilde 2-21 Plastisk tøyning, 5x bruddgrensetilstand, modell C2

Som en ser av tøyningens bildet så er tøyningen på over 33%, noe som er langt mer enn det som er tillatt. Dette vil si at knutepunktet ryker ved påsetting av krefter tilsvarende 5 ganger bruddgrensetilstanden.

Det er store usikkerheter i dette resultatet da den matematiske modellen har store feil i det kritiske området.

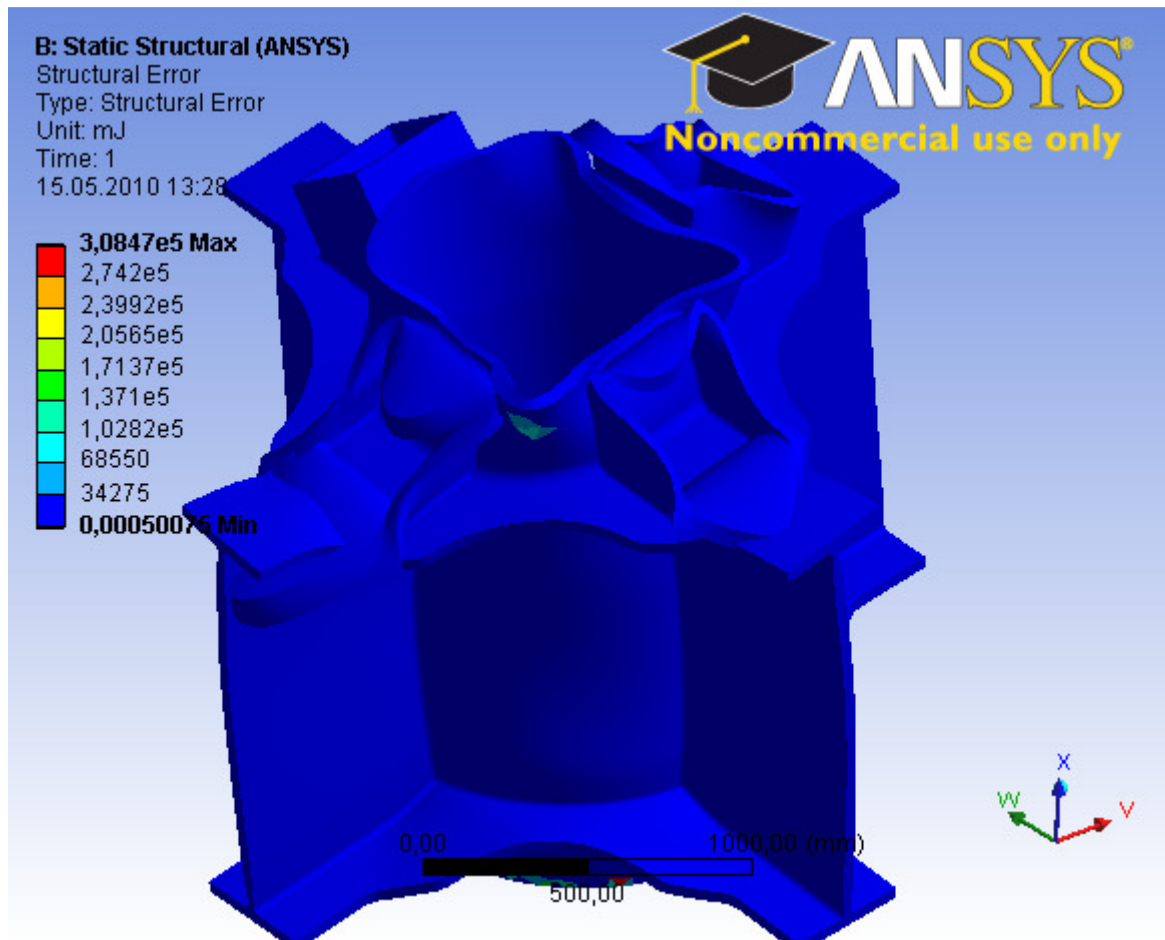
## 2.6 Ikke-lineær analyse 10 ganger bruddgrensetilstanden

Det ble forsøkt å sette på krefter og momenter lik 10 ganger bruddgrensetilstanden for å se om andre deler av tverrsnittet ville oppnå flyt enn bare i skråstagene.



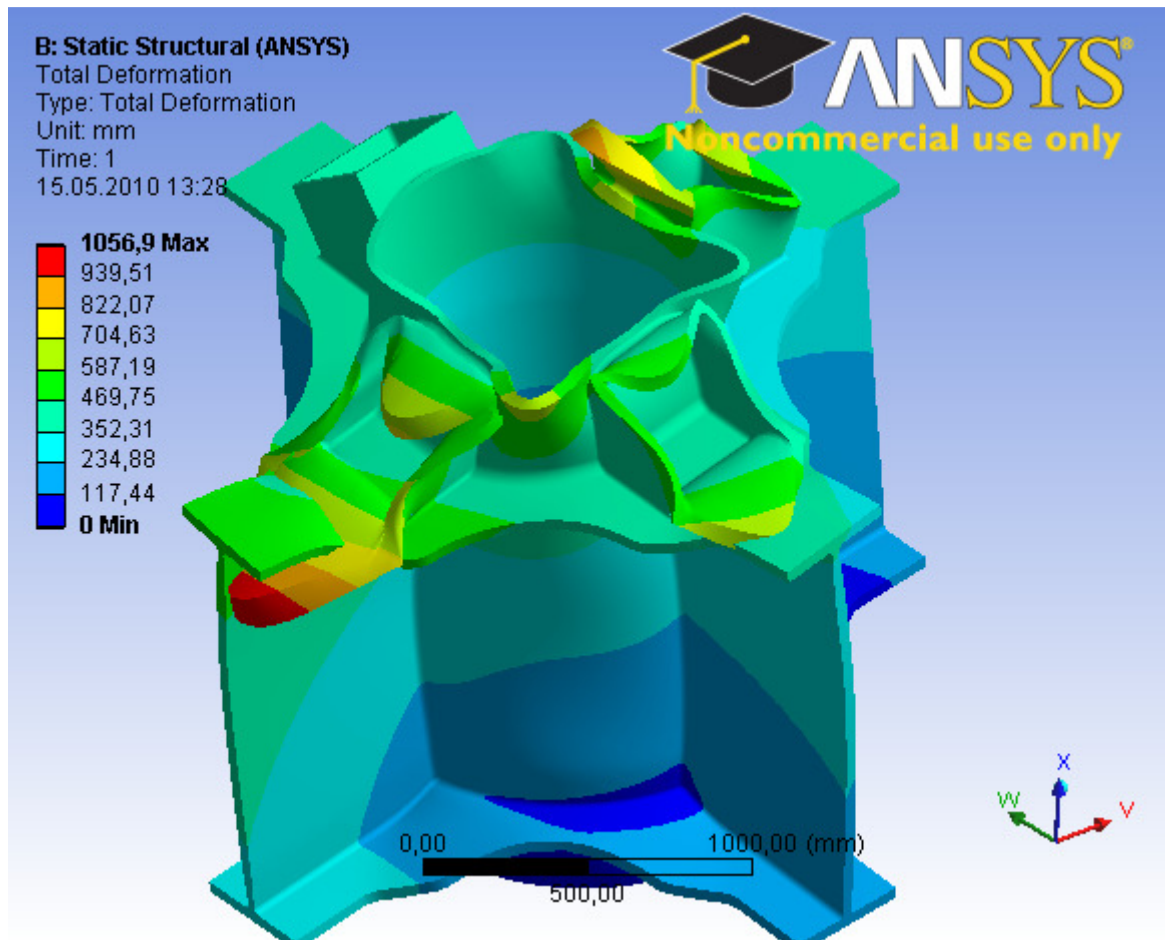
Bilde 2-22 Spenningsfordeling ikke-lineær analyse, 10x bruddgrensetilstand, modell C2

Som en ser av spenningsbildet så er spenningene langt høyere enn hva materialet tåler.



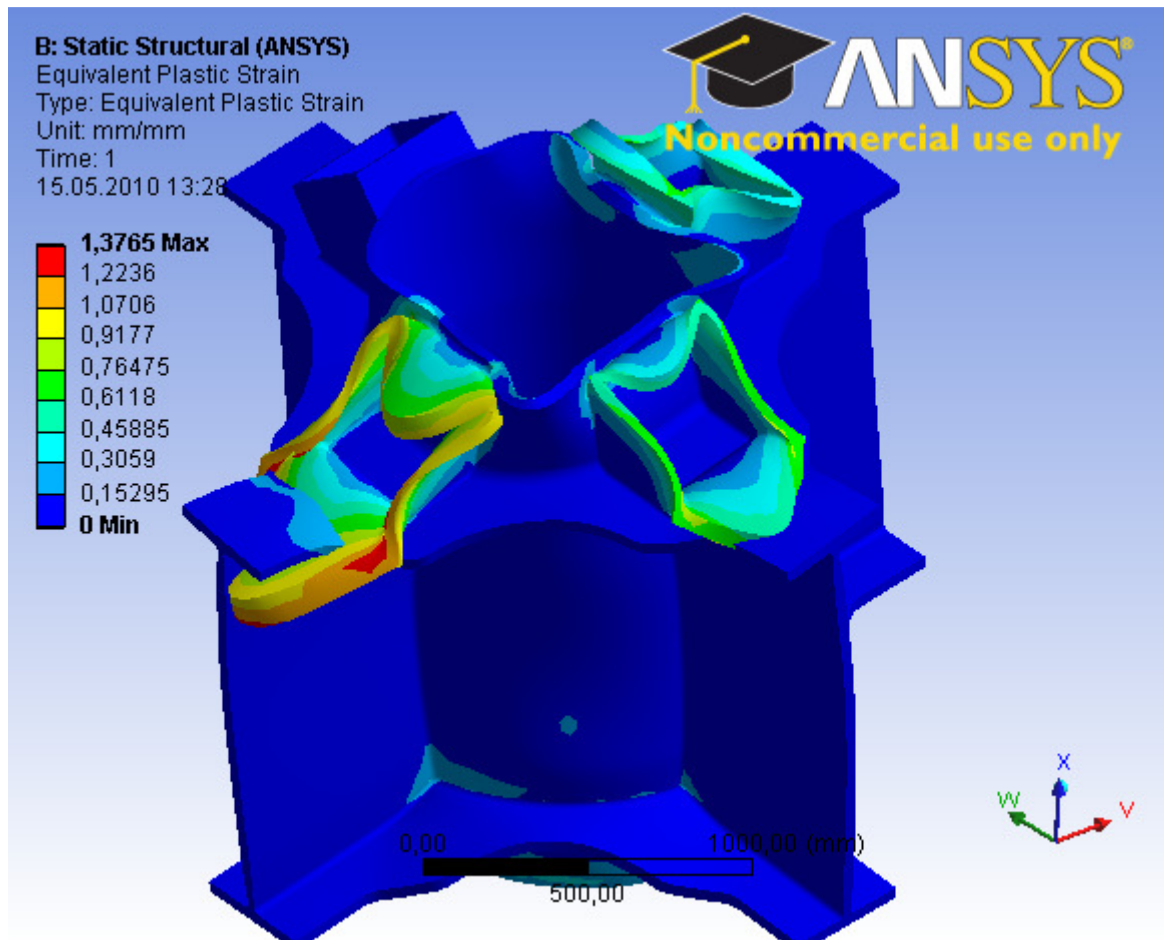
Bilde 2-23 Feilvurdering ikke-lineær analyse, 10x bruddgrensetilstand, modell C2

Som en ser ut ifra feilvurderingene så oppstår der enorme feil i modellen og resultatene er da ikke realistiske.



Bilde 2-24 Deformasjoner ikke-lineær analyse, 10x bruddgrensetilstand, modell C2

Som en ser fra deformasjonsbildet oppstår der deformasjoner over 1 meter. Dette er ikke realistisk for denne modellen, men er tatt med i resultatene for å vise hvordan en total kollaps kan se ut.



Bilde 2-25 Plastisk tøyning, 10x bruddgrensetilstand, modell C2

Som en ser av tøyningsbildet så er her en tøyning på over 137%, noe som er fysisk umulig. Men ser en på områdene i nedre del av modellen så ser en at der er en tøyning mellom 30 og 45%, noe som er ikke så langt ifra kravene i standardene. En kan ut ifra dette si at nedre del at knutepunktet tåler en kraftpåkjenning høyere enn 5 ganger men mindre enn 10 ganger bruddgrensetilstanden.