

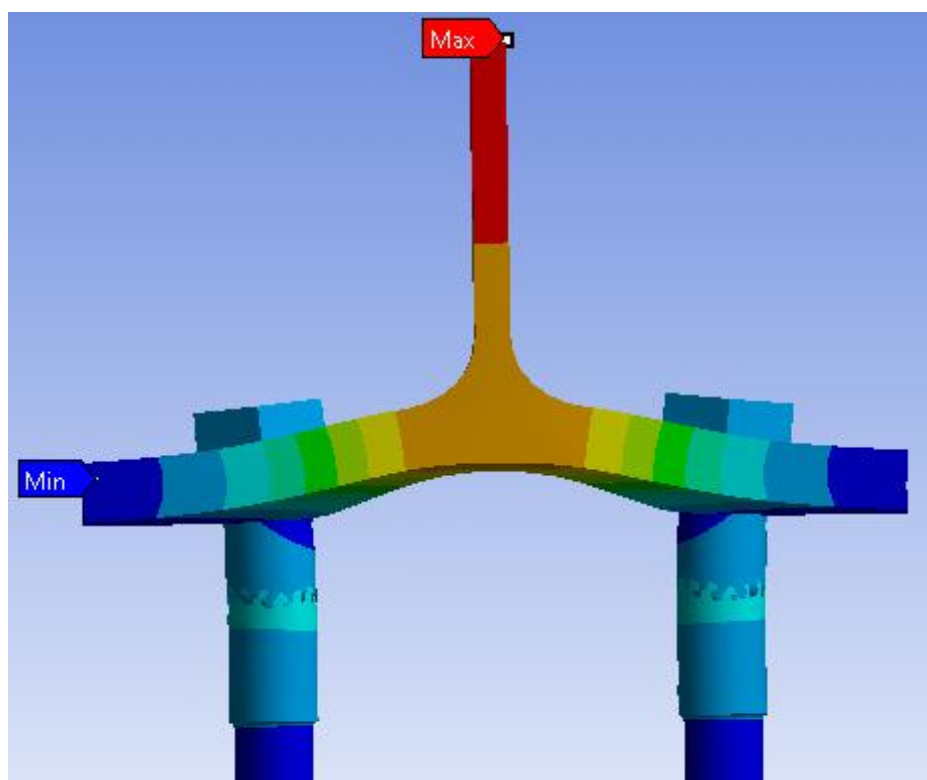
UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Beregning av hevarmskrefter i bolter i strekkpåkjennte T-stykkeforbindelser

av

Odd-Erik Zimmer



Gradsoppgave

Maskin- prosess- og produktutvikling

IMT/UMB, 2012

FORORD

Dette prosjektet er gjennomført som en del av masterprogrammet i Maskin-, prosess- og produktutvikling ved Institutt for matematiske realfag og teknologi ved UMB. Prosjektet er gjennomført i høstsemesteret 2012 med et omfang på 30 studiepoeng.

Oppgaven er resultatet av mitt arbeid med oversettelsen og tilpasningen av amerikansk teori som i mange år kun har vært tilgjengelig på engelsk.

Min motivasjon med arbeidet har i stor grad vært å se at andre vil kunne ha praktisk nytte av denne kunnskapen, og et underliggende mål for oppgaven har hele tiden vært å kunne presentere teorien på en måte som gjør det mulig å bruke oppgaven i undervisning. Jeg har derfor lagt vekt på å være så konkret som mulig, med tydelige figurer der det er behov.

Jeg har endt opp med to prosedyrer for beregning og kontroll av hevarmskrefter i T-stykkekoblinger, og en veileder til oppsett av analyse i ANSYS WorkBench 14. Sammen gjør disse det mulig å gjøre analyser i dag, og jeg mener de danner et godt grunnlag for videre arbeid innenfor feltet.

Denne oppgaven hadde ikke blitt til uten god hjelp, og jeg vil gjerne sende en stor takk til de som har bidratt til oppgaven. Veilederen min Geir Terjesen ved IMT for god oppfølging og oppmuntring underveis, Carlos Salas Bringas ved IMT for hjelp med SolidWorks, og spesielt Lars Kallum hos EDR Medeso for veldig god hjelp og veiledning med oppsettet av analysen i ANSYS WorkBench 14.

Ås, 12. desember 2012

Odd-Erik Zimmer

Sammendrag

Denne masteroppgaven tar utgangspunkt i teori som er utviklet og brukt i amerikanske standarder i flere tiår for å beregne hevarmskrefter i boltene i strekkpåkjennte T-koblingsstykker. Målet med oppgaven har vært å oversette teorien, og gjøre det mulig å beregne hevarmskrefter i boltene i strekkpåkjennte T-koblingsstykker med europeiske enheter.

Metoden brukt for å besvare oppgaven er en kombinasjon av en litteraturstudie av den amerikanske standarden «Manual of Steel Construction» [1], og et egenstudium av ANSYS WorkBench 14 i forbindelse med forspenning av bolter. Litteraturstudien tok utgangspunkt i den amerikanske standarden og ble utvidet med teori fra Abolhassan Astaneh [2] og William A. Thornton [3]. I tillegg førte litteratursøk frem til en sammenligning gjort av James A. Swanson [4] som ser på forskjellen mellom forskjellige beregningsmetoder.

I oppgaven blir den amerikanske teorien oversatt og beskrevet, og det nødvendige formelverket presentert. Med bakgrunn i denne teorien blir det presentert en prosedyre for å kunne beregne hevarmskreftene i et strekkpåkjent T-koblingsstykke, og bruken av denne prosedyren blir vist med to regneeksempler.

Det blir i tillegg foreslått en fremgangsmåte for å kontrollere kapasiteten til et strekkpåkjent T-koblingsstykke, uten å beregne hevarmskreftene på forhånd.

For å kontrollere prosedyren har det blitt laget en CAD-modell i SolidWorks, og en FEM-analyse har blitt foretatt i ANSYS WorkBench 14. Ettersom det ikke fantes en god veileder for oppsettet av analysen i ANSYS WorkBench 14 tilgjengelig, har det blitt utarbeidet en veileder til senere bruk.

En sammenligning av resultatene fra analysen i ANSYS WorkBench 14 og prosedyren viser at ved bruk av prosedyren oppnås det konservative resultater. Det vil si at verdiene fra prosedyren trygt kan brukes i arbeidet med å utforme og konstruere et strekkpåkjent T-koblingsstykke.

Abstract

This master thesis uses theory developed and used in American standards for several decades to calculate the prying forces in the bolts in T-stub connections under strain. The goal for this thesis has been to translate this theory, making it possible to calculate the prying forces in the bolts in T-stub connections using European units.

The method used in this thesis is a combination of a literature study of the American standard “Manual of Steel Construction” [1], and an own study of ANSYS WorkBench 14 in conjunction with preloaded bolts. The literature study was based on the U.S. standard, and expanded by theory from both Abolhassan Astaneh [2] and William A. Thornton [3]. A search in literature led to a comparison done by James A. Swanson [4] that looks at the differences between different methods of calculations.

The American theory is translated and described in the thesis, and the necessary sets of equations are presented. Using this theory as a basis, a procedure for calculating the prying forces in the bolts in T-stub connections under strain is presented, and the use of this procedure is shown using two examples.

In addition, a procedure to check the capacity of a T-stub connection under strain without the need to calculate the prying forces in the bolt is proposed.

To check the procedure, a CAD-model has been developed in SolidWorks, and a FEM-analysis has been done using ANSYS WorkBench 14. Since there was not already a guide on how to set up the analysis in ANSYS WorkBench 14 available, a guide has been developed for later use.

A comparison between the results from ANSYS WorkBench 14 and the procedure shows that the procedure attains conservative results. This means that the values obtained from the procedure is safe to use when designing and constructing a T-stub connection under strain.

INNHALDSFORTEGNELSE

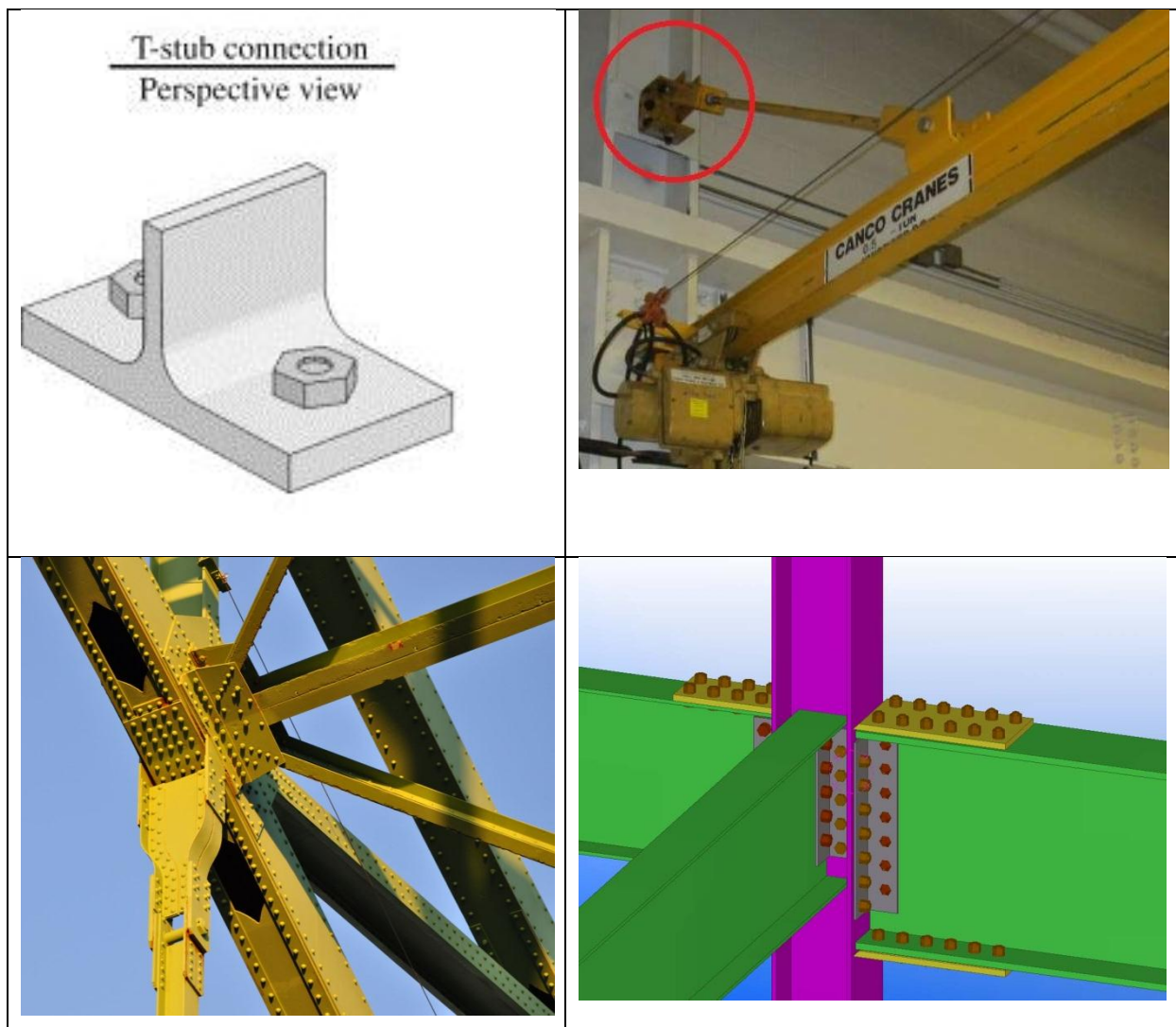
1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn.....	1
1.2	Problemstilling.....	2
1.3	Prosjekt mål og begrensninger.....	2
1.4	Kvalitetssikring (rapport og begrensninger).....	3
1.5	Symboler og terminologi.....	4
2	Beskrivelser.....	5
2.1	Bakgrunn for prosedyre.....	5
2.2	Kort om bolter og Eurokode 3.....	15
2.3	Forspenning av bolter.....	15
2.4	Tillatt spenning.....	17
3	Prosedyre for å beregne kreftene i boltene i strekkpåkente T-stykkeforbindelser med tillatt spenning.....	19
3.1	Eksempel 1: HE220B – 110mm.....	23
3.2	Eksempel 2: HE220B – 220mm.....	29
4	Kontroll av konstruksjon.....	35
4.1	Fremgangsmåte for kontroll av konstruksjon (oversatt og tilpasset fra «Procedure for Design and Analysis of Hanger-type Connections» [2]).....	35
4.2	Eksempel fremgangsmåte for kontroll.....	38
5	FEM-analyser.....	42
5.1	Modellering og opplagring.....	42
5.2	Oppsett av forsøk.....	42
5.3	Resultater.....	44
5.4	Sammenligning mot håndberegninger.....	46
6	CAD-presentasjon.....	47

6.1	Visualisering i 3D.....	47
6.2	Forbedringer	49
7	Diskusjon	50
8	Konklusjon og anbefalinger	53
8.1	Konklusjon	53
8.2	Anbefalinger	54
8.3	Videre arbeid	54
9	Referanser	55
9.1	Litteraturreferanser	55
9.2	Internettreferanser.....	55
10	Vedlegg.....	57

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn

T-stykkeforbindelser brukes ofte i knutepunkter. Det kan være en kran som er festet i taket, bjelker for å holde taket i en verkstedhall, bjelkene i konstruksjonen for en løpekran, forankring for støttewire til høye master, og mye mer.



Figur 1-1 Noen eksempler på T-stykkeforbindelser. Øvre venstre: T-stykkeforbinding (iv), Øvre høyre: Løpekran festet i vegg (i), Nedre venstre: Utsnitt av stålbro (ii), Nedre høyre: Bjelkesammenkobling i CAD-program (iii)

Det å designe en T-stykkeforbinding er i seg selv ingen stor utfordring. Fordel lasten på antall bolter i konstruksjonen, legg til sikkerhetsfaktor og finn de nødvendige dimensjonene til T-stykkeforbindingen. Utfordringen blir større når det skal gjøres utmattingsberegninger. Selv vesentlig lavere spenningscykluser over tid kan føre til brudd, og på grunn av dette er

det viktig å kunne finne alle spenningene som oppstår i konstruksjonen. I en T-stykkeforbindelse der flensen er tykk vil det være forholdsvis enkelt å finne spenningene, men når tykkelsen på flensen reduseres vil det kunne oppstå hevarmseffekter som fører til økte spenninger i boltene.

For å kunne gjennomføre utmattingsberegninger må hevarmskreftene kunne beregnes og de økte spenningene identifiseres. Det finnes flere måter å gjøre dette på i dag. Amerikanerne har jobbet lengst med dette og deres beregningsmetoder ligger som grunn for de fleste metodene som brukes i standarder i andre deler av verden, deriblant Eurokode 3.

Felles for disse beregningsmetodene er at de ikke bruker hevarmskreftene i utmattingsberegningene, i stedet tar de utgangspunkt i de statiske beregningene og multipliserer med en faktor avhengig av kravet satt til utmattingslevetid.

1.2 Problemstilling

Hovedproblemstillingen for denne oppgaven er å kunne beregne størrelsen på kreftene/spenningene i boltene i strekkpåkjennte T-koblinger for å kunne bruke disse verdiene i statiske beregninger og utmattingsberegninger.

Problemstilling 1: Hvordan kan man beregne kreftene/spenningene som også oppstår i boltene på grunn av hevarmseffekten?

Problemstilling 2: Hvordan samsvarer resultatene fra denne beregningsmetoden med dem man får fra FEM-analyseprogrammer (f.eks. ANSYS)?

For å kunne svare på disse problemstillingene tar jeg utgangspunkt i beregningsmetodene og fremgangsmåtene beskrevet i «Manual of Steel Construction» [1], og utvikler en prosedyre som passer med europeiske standarder og benevninger. Denne prosedyren kontrolleres opp mot analyse gjort i ANSYS WorkBench 14.

1.3 Prosjektmål og begrensninger

Hovedmål:

Utvikle en prosedyre for å beregne kreftene/spenningene i T-koblinger som oppstår på grunn av hevarmseffekten.

Delmål:

- Oversette og tilpasse teorien brukt i den amerikanske fremgangsmåten
- Kunne identifisere spenningene som oppstår på grunn av hevarmskreftene
- Sammenligne prosedyren med analyse foretatt i FEM-program

Begrensninger:

- Ingen utmattingsberegninger
- Begrenset lengde på bjelken
- Begrenset antall bolter
- Kun boltet til et fast underlag
- Kun påført last i en retning

1.4 Kvalitetssikring (rapport og begrensninger)

Kvalitetssikring rapport: Jeg har gått gjennom rapporten både manuelt, og med stavekontrollen innebygd i Word og kontrollert for skrivefeil. Alle referanser, tabeller, figurer, formler og sidetall er kontrollert og dobbeltsjekket, både med hensyn på innhold og nummerering. Malen fra oppdragsgiver er tilpasset denne oppgaven og oppsettet er godkjent av oppdragsgiver. Alle utregninger er gjort minimum to ganger, og for ekstra kontroll også gjort med tekniske hjelpemidler der det er mulig.

1.5 Symboler og terminologi

Tabell 1-1 Symboler og terminologi brukt i oppgaven

Symbol	Betydning	Enhet
F	Kraft generelt	N
F_{bolt}	Påført kraft per bolt	N
F_{last}	Total last på konstruksjonen	N
F_0	Grenselasten	N
F_i	Forspenningskraft per bolt	
$F_{total,bolt}$	Total kraft per bolt	N
$F_{tillatt,bolt}$	Tillatt kraft per bolt	N
$F_{hev,bolt}$	Hevarmskraft per bolt	N
σ_{bolt}	Bruddspenning for en bolt	MPa
$\sigma_{tillatt,bolt}$	Tillatt spenning for en bolt	MPa
w	Avstand mellom senterlinjene til boltene	mm
c	Bredden på bjelken	mm
s	Tykkelsen på steget	
t_f	Flenstykkelse	mm
t_c	Kritisk flenstykkelse	mm
a	Avstanden fra senterlinjen i bolten til kanten på flensen	mm
b	Avstanden fra senterlinjen på bolten til overflaten på steget	mm
a'	Modifisert a	mm
b'	Modifisert b	mm
δ	Forholdstall mellom netto areal ved boltlinjen og brutto areal ved overflaten til steget	
α	Forholdstall mellom momentet ved boltlinjen og momentet ved overflaten til steget	
d_{bolt}	Boltdiameter	mm
d_{hull}	Bolthulldiameter	mm
A	Skaftarealet til en bolt	mm^2
A_{sp}	Spenningsarealet til en bolt	mm^2
M_{steg}	Momentet ved overflaten til steget	Nmm
M_p	Plastisk moment kapasitet	Nmm
l_{flens}	Lengden på flens parallelt med steget	mm
p	Lengde av flens pr. bolt	mm
n_{bolt}	Antall bolter	
n_B	Sikkerhetsfaktor	
R_e	Flytegrense til materialet i bjelken	MPa
R_m	Strekfastheten til en bolt	MPa
R_p	Flytegrensen til en bolt	MPa

2 BESKRIVELSER

2.1 Bakgrunn for prosedyre

Arbeidet med å bestemme påvirkningen av hevarmseffekter har pågått i lang tid. Utviklingen har gått fra de matematiske modellene til Douty og McGuire [5] som var blant de første som kunne beregne størrelsen på hevarmskreftene, via Agerskov [6] som hadde en mer sofistikert måte å inkludere forlengelsen i bolten og ekspansjonen i flensen, til Kulak et. al. [7] som var blant de første til å lage en prosedyre der formelverket er likt for alle valgte bolter og flensmaterialer. Denne prosedyren har i ettertid blitt utviklet videre av Astaneh [2] til å bli en fremgangsmåte for kontroll av konstruksjoner uten gjentakelser.

Prosedyren jeg foreslår i denne oppgaven bygger i stor grad på den utviklet av Kulak et. al. [7] og fremgangsmåten for kontroll bygger på den utviklet av Astaneh [2] og det er derfor naturlig å beskrive bakgrunnen for begge disse.

I mitt forslag til prosedyre vil jeg oversette og justere terminologien som brukes i de eksisterende prosedyrene og bakgrunns materialet, så det passer bedre med den norske terminologien.

I en artikkel av James A. Swanson [4] fra 2002 blir de forskjellige modellene for beregning av hevarmskrefter og effekten av disse sammenlignet. Konklusjonen fra denne artikkelen er at modellen utviklet av Struik og de Back [8], som senere ble videreutviklet av Kulak et. al. [7], gir minst forskjell mellom beregningene og eksperimentelle data. Det vil si at modellen som er bakgrunnen for både prosedyren til Kulak et. al. [7], og fremgangsmåten til Astaneh [2], er regnet som den mest nøyaktige i dag. De danner med andre ord et godt grunnlag for mitt forslag til prosedyre.

Ettersom teorien innenfor dette feltet i stor grad er beskrevet for bruk med amerikanske standarder, har jeg oversatt/tilpasset symboler og terminologi fra den amerikanske teorien til de vi kjenner fra norsk standard og Eurokode 3. For å gjøre det lettere å følge utledningen av formelverket beskriver jeg en del av terminologien som går igjen i utledningen i dette avsnittet. Andre deler av terminologien som er nødvendig vil bli beskrevet underveis.

Jobben med å analysere en T-kobling blir gjort lettere ved å se på den lengden av flensen som tilhører ett sett med bolter. Denne tilhørende lengden kalles p og kan beregnes som

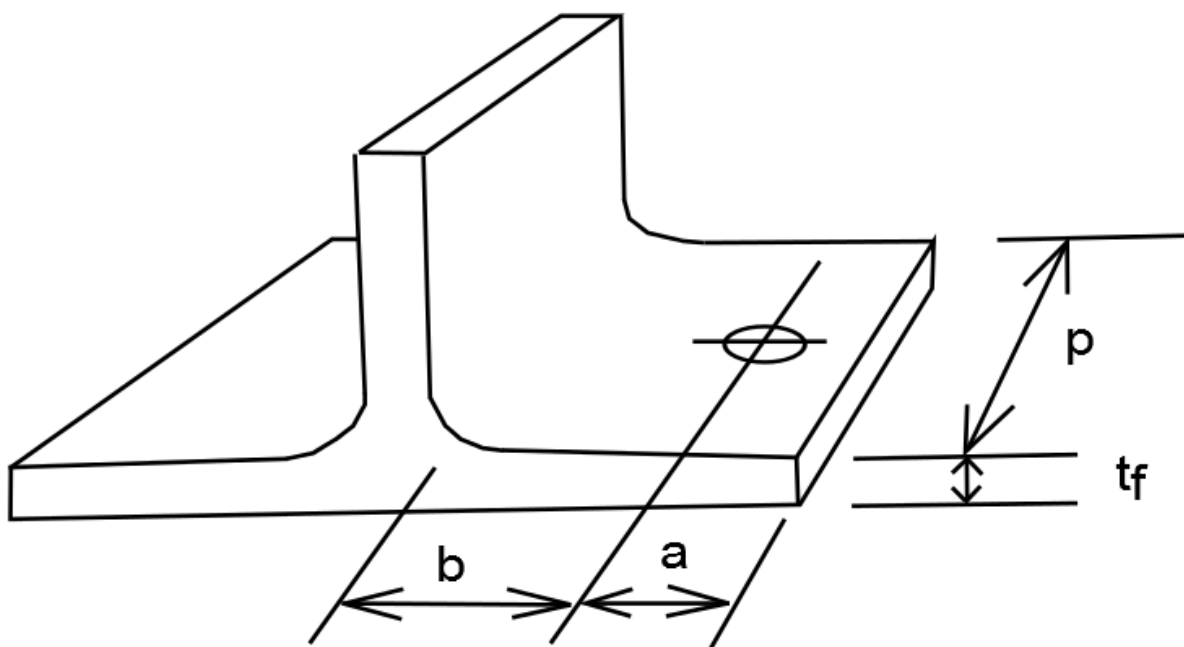
$$p = \frac{2 \cdot l_{flens}}{n_{bolt}} \quad (2.1)$$

Der

l_{flens} = lengden på flensen parallelt med steget

n_{bolt} = antall bolter som fester flensen til underlaget

Dette vil være gjeldene så lenge det ikke er snakk om et stort antall bolter og en lang flens i konstruksjonen.



Figur 2-1 Eksempel på T-koblingsstykke

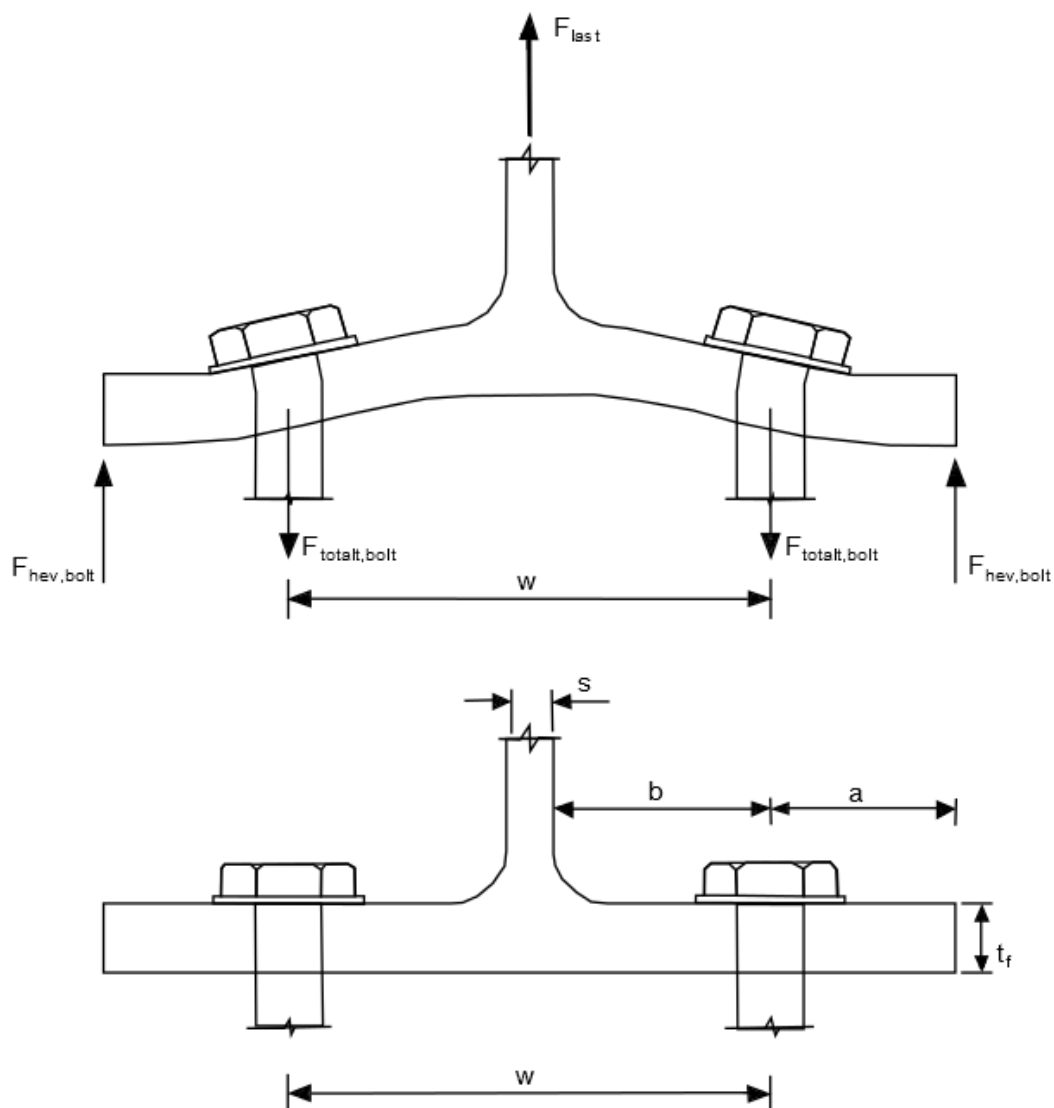
Noe av terminologien som brukes i beskrivelsen er:

F_{bolt}	=	påført kraft per bolt
F_{last}	=	total last på konstruksjonen
$F_{total,bolt}$	=	total kraft per bolt
$\sigma_{tillatt,bolt}$	=	tillatt spenning for en bolt
$F_{hev,bolt}$	=	hevarmskraft per bolt
w	=	avstand mellom senterlinjene til boltene
a	=	avstanden fra senterlinjen på bolten til kanten av flensen
b	=	avstanden fra senterlinjen på bolten til overflaten på steget

Det er viktig å huske at F_{bolt} er den tilførte lasten per bolt, det vil si at dersom T-stykket har to bolter vil F_{bolt} være halvparten av den totale påførte lasten. Er det en konstruksjon med flere bolter vil den totale lasten F_{last} , være lik $F_{bolt} \times n_{bolt}$, eller sagt med andre ord

$$F_{bolt} = \frac{\text{total påført last}}{\text{antall bolter}} \quad (2.2)$$

Figuren på neste side viser hvor de forskjellige kreftene påføres, og målene på en T-stykke forbindelse, der hevarmskrefter oppstår.



Figur 2-2 Over: T-kobling med påført last og reaksjonskrefter. Under: T-kobling med enheter for dimensjonering

Med utgangspunkt i figuren kan kriteriet for likevekt settes opp og ser da at kraften som virker i boltene er summen av den tilførte lasten og hevarmskraften,

$$F_{totalt,bolt} = F_{bolt} + F_{hev,bolt} \quad (2.3)$$

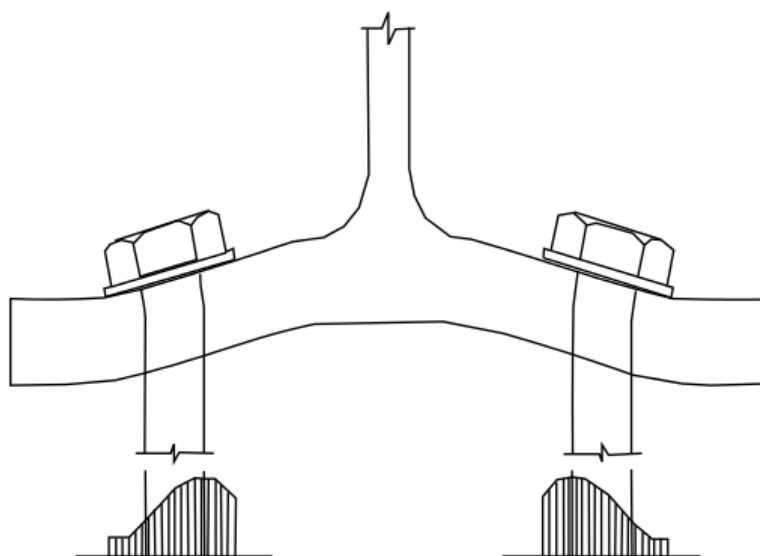
Løses denne ligningen med hensyn på hevarmskraften får man følgende ligning:

$$F_{hev,bolt} = F_{totalt,bolt} - F_{bolt} \quad (2.4)$$

Det er allment akseptert at hevarmskreftene beregnes som punktlaster som virker på kanten av flensen så lenge avstanden fra senter av bolten til kanten på flensen ikke er stor, eller tykkelsen på flensen blir for liten. Dette gir utslag i formelverket når det kommer til å bestemme dimensjonene til T-stykke koblingen og blir beskrevet senere.

Modellen jeg bruker som utgangspunkt i denne oppgaven har fått navnet sitt fra de som opprinnelig utviklet den, Struik og de Back [8]. Struik og de Back sin modell ble først publisert i 1969 og har i ettertid blitt videreutviklet av Kulak, Fisher og Struik [7], og av Astaneh [2]. Det er denne modellen som blir mest brukt til beregninger i bruddgrensetilstanden, og variasjoner av denne modellen ligger til grunn for flere nasjonale og internasjonale standarder. Blant annet tar Eurokode 3 utgangspunkt i modellen til Struik og de Back [8].

I denne modellen endres noen av parameterne for å få et bedre samsvar mellom beregningene og forsøk gjort i testlaboratoriet. Struik og de Back observerte at når lasten blir påført T-koblingen og hevarmskrefter oppstår, vil distribusjonen av spenningene i bolthodet endres på grunn av hevarmseffekten. Denne spenningsfordelingen oppstår på grunn av stivheten til bolten og vinkelen som oppstår når flensen heves fra underlaget.



Figur 2-3 Spenningsfordelingen i boltene ved påført last

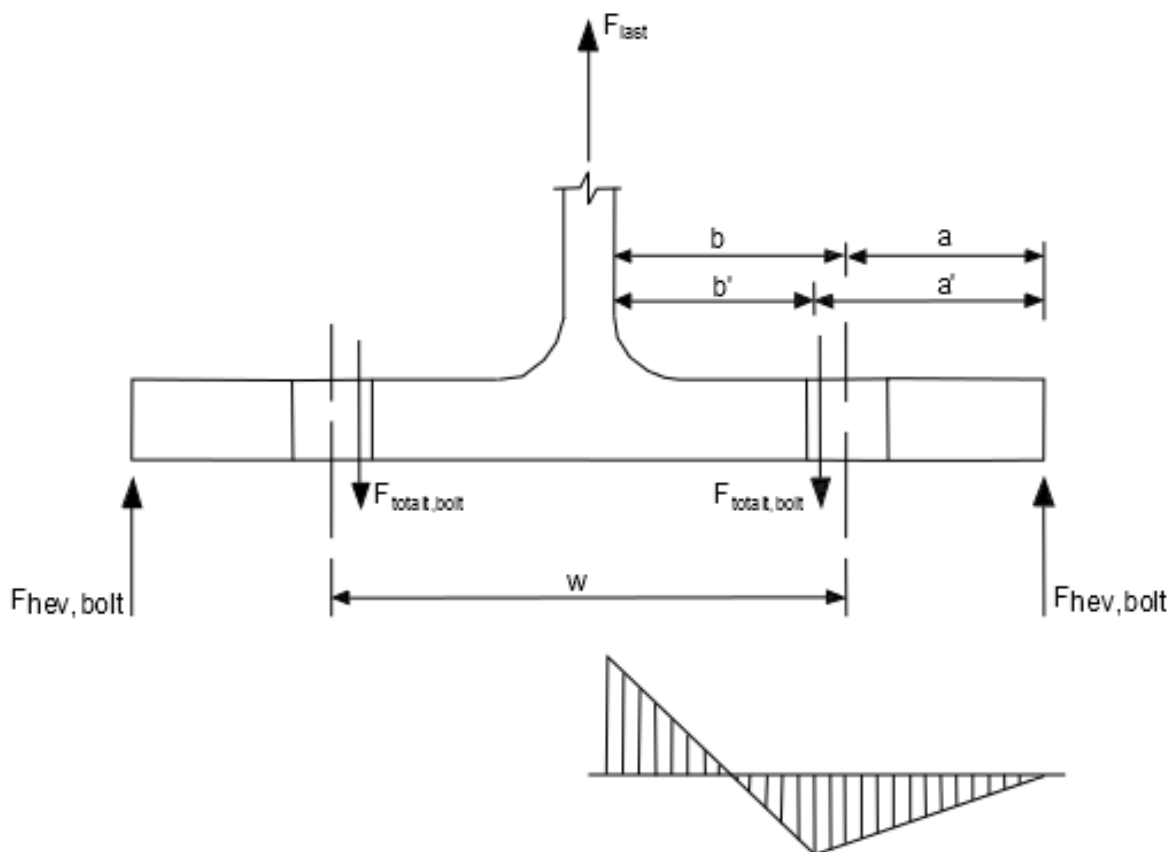
Dette fører til at resultantkraften til bolten ikke virker i senter av bolten, men blir forskjøvet. Denne forskyvingen blir det tatt hensyn til i modellen ved å modifisere avstandene a og b .

$$a' = a + \frac{d_{bolt}}{2} \quad (2.5)$$

$$b' = b - \frac{d_{bolt}}{2} \quad (2.6)$$

Der

d_{bolt} = diameter på bolten



Figur 2-4 T-kobling med modifiserte avstander og momentkurven

Som tidligere nevnt blir hevarmskraften idealisert som punktlaster i denne modellen. Hvis beregningene av hevarmskreftene skulle vært helt nøyaktige, skulle hevarmskraften vært modellert som fordelte krefter som virker på den delen av flensen som ligger utenfor boltene. Ved å beregne hevarmskreftene som punktlaster blir resultatene likevel nøyaktige nok, og blir vesentlig lettere å beregne. Kravet som stilles for å kunne beregne punktlastene på denne måten er at lengden til flensen utenfor boltene ikke er for stor. I modellen blir dette tatt hensyn til ved å begrense lengden a til ikke å være større enn 1,25 ganger lengden til b . Kravet blir altså: $a \leq 1,25b$.

Forholdet mellom momentet ved boltlinjen og momentet ved overflaten til steget kalles α og virker som en indikator for hevarmseffekten. Fysisk er verdien til α begrenset mellom 0 og 1. Er verdien 0 indikerer det at flensen ikke lenger er i kontakt med underlaget (ingen hevarmseffekt på boltene), og verdien 1 indikerer at boltene er stive nok til å holde flensen fast så den virker som en fast bjelke (maks hevarmseffekt på boltene). Når vi gjør beregninger kan α få en hvilken som helst verdi. En verdi mindre enn null vil si at flensen har en enkel kurvatur, hevarmseffekten er null, og boltene blir bare utsatt for strekk-krefter. Er verdien over 1 har bjelken dobbel kurvatur og hevarmseffekten er på sitt største.

Når $0 \leq \alpha \leq 1$ vil det være en kombinasjon av bøyning i flensen, og hevarmseffekt på boltene.

I tillegg er M_{steg} momentet ved overflaten til steget og δ er forholdstallet mellom netto areal ved boltlinjen, og brutto areal ved overflaten til steget (uten overgangen mellom flens og steg). Dette forholdstallet er gitt som

$$\delta = 1 - \frac{d_{hull}}{p} \quad (2.7)$$

Der

$d_{hull} = \text{diameter på bolthullet}$

Ved å forutsette likevekt for momentet i T-koblingen mellom overflaten til steget og boltlinjen og bruke den modifiserte avstanden b' , kommer man frem til følgende ligning

$$F_{bolt} \cdot b' = [1 + (\alpha \cdot \delta)] M_{steg} \quad (2.8)$$

Tilsvarende forutsettes likevekt for momentet mellom flensen og yttersiden av boltlinjen og bruker den modifiserte avstanden a' , og kommer frem til følgende ligning

$$F_{hev,bolt} \cdot a' = \alpha \cdot \delta \cdot M_{steg} \quad (2.9)$$

Til sist forutsettes det at summen av alle kreftene i flensen er lik null, noe som fører til følgende ligning

$$F_{totalt,bolt} = F_{bolt} + F_{hev,bolt} \quad (2.10)$$

Ved brudd vil momentet, M_{steg} , være gitt som den plastiske momentkapasiteten til flensen og kan skrives som

$$M_p = \left(\frac{p \cdot t_f^2}{4} \right) R_e \quad (2.11)$$

Settes dette inn i ligning 2.8 og løser med hensyn på α får man følgende ligning

$$\alpha = \left(\frac{1}{\delta} \right) \left(\frac{4F_{bolt} \cdot b'}{p \cdot t_f^2 \cdot R_e} - 1 \right) \quad (2.12)$$

Ved å løse ligningene for likevekt i momenter og krefter med hensyn på hevarmskraft kommer man frem til følgende ligning

$$F_{hev,bolt} = F_{bolt} \cdot \delta \cdot \alpha \cdot \left(\frac{b'}{a'} \right) \cdot \left(\frac{t_f}{t_k} \right)^2 \quad (2.13)$$

Der

$$t_k = \sqrt{\frac{8 \cdot F_{totalt,bolt} \cdot b'}{p \cdot R_e}}$$

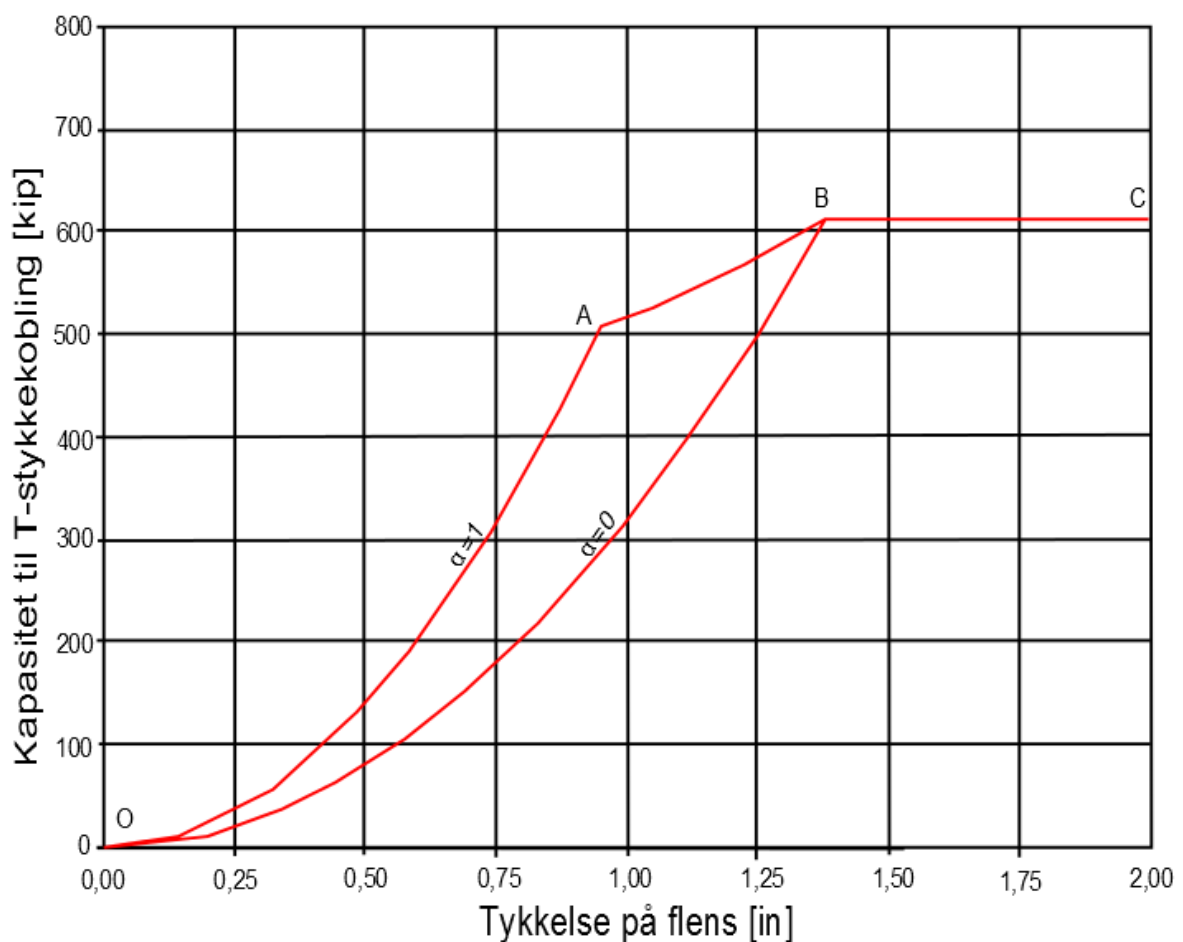
Kapasiteten til en gitt T-stykke forbindelse er den minste verdien fra de tre følgende ligningene

$$F_{bolt} = \frac{(1 + \delta)}{4b'} (p \cdot R_e \cdot t_f^2) \quad (2.14)$$

$$F_{bolt} = \frac{(\sigma_{bolt} \cdot a')}{(a' + b')} + \frac{(p \cdot R_e \cdot t_f^2)}{4(a' + b')} \quad (2.15)$$

$$F_{bolt} = F_{total,bolt} \quad (2.16)$$

Løsningene for ligningene over er i Figur 2-5 plottet for en T-kobling med amerikanske måleenheter. Den vil se lik ut for alle T-koblinger, bare benevning og verdier vil være forskjellige. Linjen OABC definerer kapasiteten til flensen og boltene. Alle verdier som dekkes av arealet under kurven OABC angir en tilfredsstillende konstruksjon.



Figur 2-5 Kapasiteten til en gitt T-stykke kobling (amerikansk bjelke TA-01) [4]

Linjestykket OA finner vi ved å regne ut ligning 2.12 og antar $\alpha = 1$, dette linjestykket angir kapasiteten til flensen. Linjestykket AB finner vi ved å regne ut ligning 2.13, og angir

kapasiteten til bolten når hevarmskrefter er gjeldene. Linjestykket BC finner vi fra ligning 2.14, og angir kapasiteten til bolten uten hevarmskrefter.

Linjestykket OB er gjeldene når $\alpha = 0$. Arealet under kurven OBCD representerer en T-kobling med neglisjerbare hevarmseffekter. Ifølge den amerikanske teorien er det verdier fra dette området man ønsker når man skal utforme en T-kobling som blir utsatt for varierende spenningscykluser over tid.

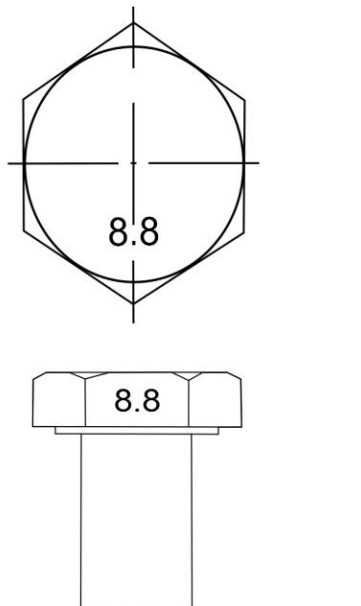
Tykkelsen på flensen i punkt B er ofte referert til som kritisk tykkelse, t_k . Dette kommer av at en tykkelse større enn t_k vil føre til neglisjerbare hevarmseffekter og det er strekkfastheten til bolten som blir gjeldene. I punkt A er både maksimal kapasitet til flens nådd samtidig som kreftene på bolten, inkludert hevarmskrefter, når bruddgrensen. Lasten som angir dette punktet blir referert til som F_0 , grenselasten. Verdiene for kritisk tykkelse og grenselasten finner vi ved hjelp av følgende to ligninger

$$t_k = \sqrt{\frac{8 \cdot F_{total,bolt} \cdot b'}{p \cdot R_e}} \quad (2.17)$$

$$F_0 = \frac{F_{total,bolt}}{1 + \left(\frac{\delta}{1 + \delta}\right) \left(\frac{b'}{a'}\right)} \quad (2.18)$$

2.2 Kort om bolter og Eurokode 3

Bolter, skiver og muttere som brukes til konstruksjoner er delt inn i fasthetsklasser som beskriver de tekniske egenskapene til delene. Fasthetsklassen til bolten er angitt på enten toppen eller siden av bolthodet.



Figur 2-6 Fasthetsklasse angitt på bolthodet

Det første sifferet multiplisert med 100 gir strekkfastheten, R_m , til bolten. Det andre sifferet angir flytegrensen, R_p , som prosentandel av strekkfastheten.

Ved beregninger av spenninger og krefter i bolter er det viktig å huske at det er en forskjell på skaftarealet, A , og spenningsarealet, A_{sp} . Spenningsarealet er noe mindre enn skaftarealet på grunn av gjengene på bolten.

I denne oppgaven brukes det bolter med fasthetsklasse 8.8 da dette er minimumskravet til fasthetsklasse etter Eurokode 3 når boltene skal være forspent. Boltene i denne klassen er laget av seigherdet stål med et middels karboninnhold. Dette kravet gjelder alle strekkforbindelser som utsettes for varierende strekkforbindelser og er gitt i kapittel 3.4.2 i Eurokode 3 Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser [9].

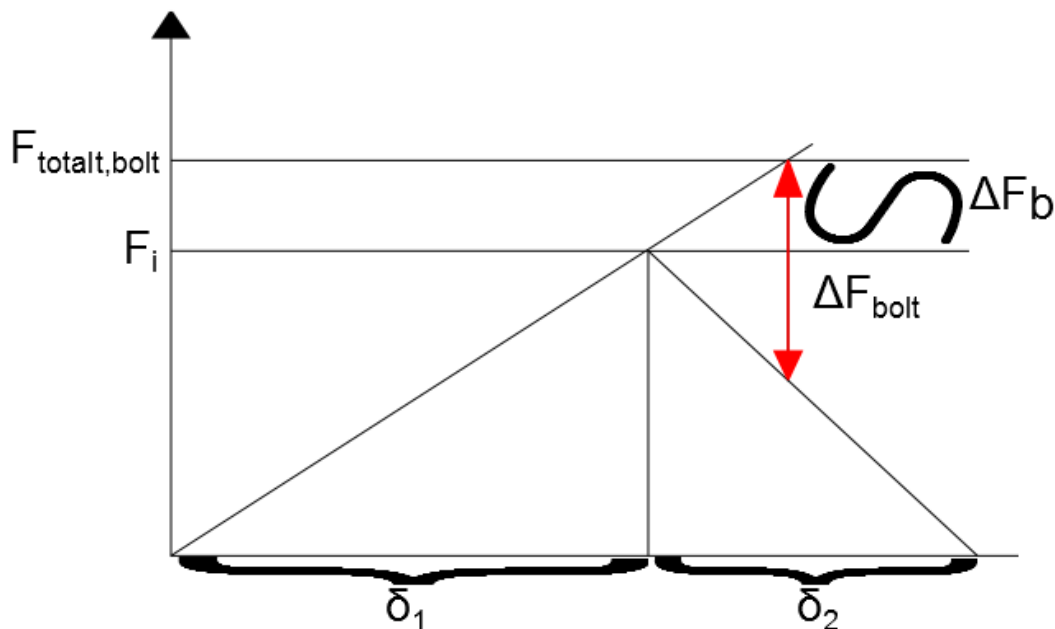
2.3 Forspenning av bolter

Fra «Dimensjonering av stålkonstruksjoner» [10]: «Når en høyfast skrue forspennes går det ytre tilførte arbeidet, foruten til friksjonsarbeid i gjengene, dels med til å forspenne skruen og

dels til å gi en elastisk sammentrykking av stålplatene som forbindes. Sammentrykkingen er en lokal effekt, som antas å omfatte en «trykksylinder» rundt skruen (...) NS-EN 1993-1-8 angir at 20 % av kraften tas av skruen. Forspente strekkforbindelser får dermed vesentlig lengre utmattingslevetid enn forbindelser uten forspenning»

Det vil si at når skruer eller bolter blir forspent vil bare 20 % av den påførte lasten tas opp av bolten. De resterende 80 % går med på å redusere kontaktrykket mellom T-koblingen og underlaget.

En måte å vise dette på er ved hjelp av et skruediagram.



Figur 2-7 Skruediagram med forspenning

Der:

- $F_{totalt,bolt}$ = Den totale kraften i bolten
- F_i = Forspenningskraften
- ΔF_b = Kraften som tas opp i bolten
- ΔF_{bolt} = Påført last på bolten
- δ_1 = Forlengelse av bolten
- δ_2 = Sammentrykking av underlaget

Forspenningen F_i fører til at bolten strekker seg med en forlengelse δ_1 og underlaget blir presset sammen med lengden δ_2 . Når bolten blir belastet vil som tidligere nevnt 80 % av den påførte lasten gå med på å redusere det opprinnelige kontaktrykket mellom T-koblingen og underlaget. Så lenge det er kontakt mellom de to flatene vil forlengelsen som skyldes tilleggs-kreftene være lik for både bolten og underlaget.

De kreftene som virker i bolten er delt inn i to deler. En del er de 20 % av den tilførte lasten som virker i bolten, den andre delen er hevarmskreftene.

Det er mulig å estimere de 20 % som kommer direkte fra den tilførte lasten.

$$\Delta F'_b = 0,2 \cdot F_{bolt} \quad (2.22)$$

Den virkelige verdien for kreftene som virker i bolten er forskjellen mellom den totale kraften i bolten og forspenningen.

$$\Delta F_b = F_{total,bolt} - F_i \quad (2.23)$$

Hevarmskraften blir da forskjellen mellom disse to verdiene.

$$F_{hev,bolt} = \Delta F_b - \Delta F'_b \quad (2.24)$$

Denne måten å beregne hevarmskraften på skiller seg fra den vi finner i den amerikanske teorien der utgangspunktet at boltene er forspent. Likevel er ikke forspenningen med når man gjør beregninger.

2.4 Tillatt spenning

Teorien frem til nå beskriver beregningsmetoden som brukes når konstruksjonen testes til brudd. Når det skal gjøres utmattingsberegninger er bruddgrensetilfellet mindre interessant ettersom spenninger som er vesentlig lavere enn bruddgrensen over tid kan føre til brudd. For å designe konstruksjoner som er ment å takle spenningsvingninger over tid brukes tillatt spenning. Det vil si at det legges til en sikkerhetsfaktor i forhold til bruddgrensetilfellet og verdiene vi finner angir grensene for hva konstruksjonen tåler.

Den maksimale kraften en bolt tåler finner vi ved å multiplisere spenningsarealet til bolten med bruddgrensen til bolten.

$$F_{maks,bolt} = A_{sp} \cdot \sigma_{bolt} \quad (2.25)$$

Ved å legge til en sikkerhetsfaktor på denne kraften får vi den tillatte kraften til bolten.

$$F_{tillatt,bolt} = \frac{A_{sp} \cdot \sigma_{bolt}}{n_B} \quad (2.26)$$

Sikkerhetsfaktoren kan varieres i forhold til kravene som settes til konstruksjonen. Vanligvis brukes en sikkerhetsfaktor på 1,7 ved beregninger på bolter. Jeg velger i denne oppgaven å følge den amerikanske teorien der de bruker en sikkerhetsfaktor på 2,0. Ved å øke sikkerhetsfaktoren tas det hensyn til konstruksjonens utforming der radien ved overgangen mellom flens og steg kan føre til kjerneeffekter og lokale flytsoner/spenningskonsentrasjoner.

I likhet med teorien beskrevet tidligere der det settes krav om statisk likevekt, settes det nå krav om at den tillatte lasten ikke overskrider den tilførte lasten og hevarmskreftene.

$$F_{tillatt,bolt} \geq F_{bolt} + F_{hev,bolt} \quad (2.27)$$

Både den tilførte lasten, F_{bolt} , og hevarmskraften, $F_{hev,bolt}$, finnes på samme måte som beskrevet i teorien tidligere.

3 PROSEDYRE FOR Å BEREGNE KREFTENE I BOLTENE I STREKKPÅKJENTE T-STYKKEFORBINDELSER MED TILLATT SPENNING

Med utgangspunkt i den amerikanske teorien har jeg utviklet det jeg mener er en enkel og rask prosedyre for å beregne kreftene i boltene i strekkpåkjente T-stykkeforbindelser med tillatt spenning. Prosedyren har en trinnvis inndeling der hvert trinn bygger på det foregående. Ved å velge denne oppbygningen mener jeg prosedyren blir enkel å bruke også for de som ikke kjenner teorien bak formelverket.

Trinn 1

Bestem nødvendig antall og størrelse på boltene.

Hulldiameteren og krav til klaring mellom hull og bolt er avgjørende for valg av størrelsen på boltene. Hulldiameteren er angitt i tabeller for bjelketyper.

Da det vanligvis brukes bolter med normal klaring i denne type konstruksjoner, tar også denne prosedyren utgangspunkt i det. Hvis det er krav om bruk av passbolter eller nagler regnes hulldiameteren også som bolt diameter.

Kravene som blir gitt til normal klaring er gitt av NS 3462 og et utdrag er gjengitt under.

Krav til normal klaring (NS 3462)[10]:

$$\text{M12-M14: } d_{hull} \leq d_{bolt} + 1 [mm]$$

$$\text{M16-M24: } d_{hull} \leq d_{bolt} + 2 [mm]$$

$$\text{M27-: } d_{hull} \leq d_{bolt} + 3 [mm]$$

Når størrelsen på bolten er bestemt, finn tillatt kraft per bolt ved hjelp av ligning (2.20)

$$F_{tillatt,bolt} = \frac{A_{sp} \cdot \sigma_{bolt}}{n_B}$$

Det nødvendige antall bolter bestemmes ved å dele den totale påførte lasten på tillatt kraft per bolt

$$n_{bolt} = \frac{F_{last}}{F_{tillatt,bolt}}$$

Bestem lengden p ved hjelp av ligning (2.1).

$$p = \frac{2 \cdot l_{flens}}{n_{bolt}}$$

Trinn 2

Bestem påført last per bolt ved å dele den totale påførte lasten på antall bolter. (Ligning (2.20))

$$F_{bolt} = \frac{F_{last}}{n_{bolt}}$$

Kontroller om forholdet mellom påført last og tillatt last per bolt er ok.

$$F_{bolt} \leq F_{tillatt,bolt} \quad \text{OK! Fortsett prosedyren}$$

$$F_{bolt} \geq F_{tillatt,bolt} \quad \text{STOPP! Bruk flere eller sterkere bolter}$$

Bestem avstandene a og b der

$$a = \frac{c - w}{2}$$

Og

$$b = \frac{w - s}{2}$$

NB! Husk kravet $a \leq 1,25b$

Trinn 3

Bestem de modifiserte avstandene a' og b' ved hjelp av ligningene (2.5) og (2.6), og forholdstallet δ fra ligning (2.7).

$$a' = a + \frac{d_{bolt}}{2}$$

$$b' = b - \frac{d_{bolt}}{2}$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{hull}}{p}$$

Trinn 4

For å bestemme forholdstallet α innføres en faktor β . Denne faktoren brukes for å finne en midlertidig verdi for α som kalles α' . Denne midlertidige verdien for α brukes for å finne minimum flenstykkelser.

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{F_{tillatt,bolt}}{F_{bolt}} - 1 \right)$$

Der $\rho = \frac{b'}{a'}$

Hvis $\beta \geq 1$ sett $\alpha' = 1$

Hvis $0 \leq \beta < 1$ blir $\alpha' = \min \left\{ \frac{1}{\delta} \left(\frac{\beta}{1-\beta} \right), 1 \right\}$

Trinn 5

Finn minimum godkjente flenstykkelser.

$$t_{min} = \sqrt{\frac{8 \cdot F_{bolt} \cdot b'}{p \cdot R_e \cdot (1 + \delta \cdot \alpha')}}}$$

Kontroller at flensen holder

$t_f \geq t_{min}$ OK! Forsett med prosedyren

$t_f \leq t_{min}$ STOPP! Bytt til en bjelke med større flenstykkelser

Hvis $t_f > t_{min}$ må den faktiske verdien for α regnes ut. Regn først ut t_k fra ligning (2.17)

$$t_k = \sqrt{\frac{8 \cdot F_{tillatt,bolt} \cdot b'}{p \cdot R_e}}$$

$$\alpha = \frac{1}{\delta} \left(\frac{F_{bolt}/F_{tillatt,bolt}}{\left(\frac{t_f}{t_k}\right)^2} - 1 \right)$$

Hvis $\alpha < 0$ sett $\alpha = 0$

Trinn 6

Regn ut hevarmskraften ved hjelp av ligning (2.13)

$$F_{hev,bolt} = F_{tillatt,bolt} \cdot \delta \cdot \alpha \cdot \left(\frac{b'}{a'}\right) \cdot \left(\frac{t_f}{t_k}\right)^2$$

Trinn 7

Kontroller kravet om at påført last per bolt og hevarmskraften ikke overstiger den tillatte kraften per bolt (ligning (2.21)).

$$F_{tillatt,bolt} \geq F_{bolt} + F_{hev,bolt}$$

Trinn 8

Kontroller at bøyespenningen i flensen ikke er for høy.

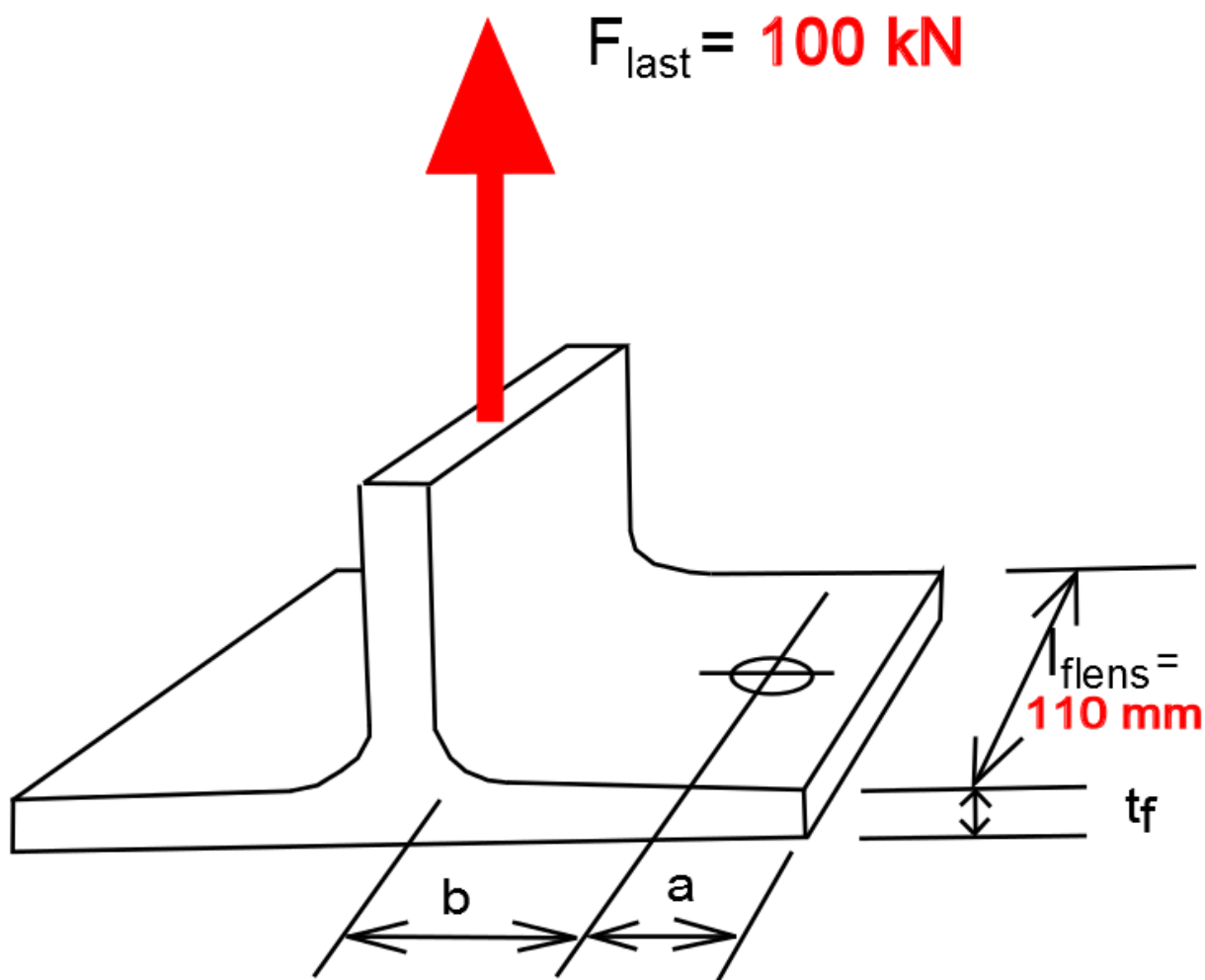
$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} = \frac{n_{bolt}/2 \cdot F_{hev,bolt} \cdot a}{\frac{(l_{flens} - (n_{bolt}/2)) \cdot d_{hull}}{6} \cdot t_f^2}$$

$$n_F = \frac{R_e}{\sigma_b}$$

For å vise hvordan prosedyren kan brukes følger nå to eksempler der prosedyren brukes, og hvert trinn blir forklart fra start til slutt.

3.1 Eksempel 1: HE220B - 110mm

I det første eksempelet er det en halv HE220B-bjelke med en lengde på 110 mm. Denne bjelken er boltet til et fast underlag med to bolter. Materialet i bjelken er S355J0 som har en flytegrense, R_e , på 355 MPa. Bjelken blir påført en last på 100 kN. Bruk prosedyren for å beregne hvor store kreftene blir i boltene, og hvor stor hevarmskraften blir. Konstruksjonen med den påførte lasten er vist i figuren under.



Figur 3-1 Eksempel 1: HE220B - 110mm med påført last og flenslengde

Trinn 1

Bestem nødvendig antall og størrelse på boltene.

Hulldiameteren og krav til klaring mellom hull og bolt er avgjørende for valg av størrelsen på boltene. Hulldiameteren er angitt i tabeller for bjelketyper.

Da det vanligvis brukes bolter med normal klaring i denne type konstruksjoner, tar også denne prosedyren utgangspunkt i det. Hvis det er krav om bruk av passbolter eller nagler regnes hulldiameteren også som bolt diameter.

Kravene som blir gitt til normal klaring er gitt av NS 3462 og et utdrag er gjengitt under.

Krav til normal klaring (NS 3462)[10]:

$$\text{M12-M14: } d_{hull} \leq d_{bolt} + 1 \text{ [mm]}$$

$$\text{M16-M24: } d_{hull} \leq d_{bolt} + 2 \text{ [mm]}$$

$$\text{M27-: } d_{hull} \leq d_{bolt} + 3 \text{ [mm]}$$

Fra tabell 1.3 i Formler og tabeller [11] finner vi følgende dimensjoner til HE220B-bjelken.

$$w = 120 \text{ mm}$$

$$t_f = 16 \text{ mm}$$

$$c = 220 \text{ mm}$$

$$d_{hull} = 25 \text{ mm}$$

$$s = 9,5 \text{ mm}$$

Hulldiameteren tilsier at bolter av type M24 kan brukes. Dataene for bolter hentes ut fra tabeller, i dette eksempelet er de hentet fra Skrueforbindelser – Repetisjon [12].

$$\text{For M24: } A_{sp} = 353 \text{ mm}^2$$

Når størrelsen på bolten er bestemt, finn tillatt kraft per bolt ved hjelp av ligning (2.20)

$$F_{tillatt,bolt} = \frac{A_{sp} \cdot \sigma_{bolt}}{n_B} = \frac{353 \text{ mm}^2 \cdot 640 \text{ MPa}}{2,0} = 112960 \text{ N} \approx 113 \text{ kN}$$

Det nødvendige antall bolter bestemmes ved å dele den totale påførte lasten på tillatt kraft per bolt

$$n_{bolt} = \frac{F_{last}}{F_{tillatt,bolt}} = \frac{100 \text{ kN}}{113 \text{ kN}} = 0,88$$

Det vil si at minimum antall bolter er 2 (runder alltid av oppover til nærmeste par), det samme som er gitt i oppgaven.

Bestem lengden p ved hjelp av ligning (2.1).

$$p = \frac{2 \cdot l_{flens}}{n_{bolt}} = \frac{2 \cdot 110 \text{ mm}}{2} = 110 \text{ mm}$$

Siden det bare er en bolt på hver side av T-koblingen blir lengden p den samme som lengden på flensen.

Trinn 2

Bestem påført last per bolt ved å dele den totale påførte lasten på antall bolter. (Ligning (2.20))

$$F_{bolt} = \frac{F_{last}}{n_{bolt}} = \frac{100 \text{ kN}}{2} = 50 \text{ kN}$$

Kontroller om forholdet mellom påført last og tillatt last per bolt er ok.

$$F_{bolt} \leq F_{tillatt,bolt} \quad \text{OK! Fortsett prosedyren}$$

$$F_{bolt} \geq F_{tillatt,bolt} \quad \text{STOPP! Bruk flere eller sterkere bolter}$$

$$F_{bolt}(50 \text{ kN}) < F_{tillatt,bolt}(113 \text{ kN}) \quad \text{OK!}$$

Bestem avstandene a og b der

$$a = \frac{c - w}{2} = \frac{220 \text{ mm} - 120 \text{ mm}}{2} = 50 \text{ mm}$$

Og

$$b = \frac{w - s}{2} = \frac{120 \text{ mm} - 9,5 \text{ mm}}{2} = 55,25 \text{ mm}$$

NB! Husk kravet $a \leq 1,25b$

$$a(50 \text{ mm}) < 1,25b(69 \text{ mm}) \quad \text{OK!}$$

Trinn 3

Bestem de modifiserte avstandene a' og b' ved hjelp av ligningene (2.5) og (2.6), og forholdstallet δ fra ligning (2.7).

$$a' = a + \frac{d_{\text{bolt}}}{2} = 50 \text{ mm} + \frac{24 \text{ mm}}{2} = 62 \text{ mm}$$

$$b' = b - \frac{d_{\text{bolt}}}{2} = 55,25 \text{ mm} - \frac{24 \text{ mm}}{2} = 43,25 \text{ mm}$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{\text{hull}}}{p} = 1 - \frac{25 \text{ mm}}{110 \text{ mm}} = 0,773$$

Trinn 4

For å bestemme forholdstallet α innføres en faktor β . Denne faktoren brukes for å finne en midlertidig verdi for α som kalles α' . Denne midlertidige verdien for α brukes for å finne minimum flenstykkelse.

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{F_{\text{tillatt,bolt}}}{F_{\text{bolt}}} - 1 \right)$$

$$\text{Der } \rho = \frac{b'}{a'} = \frac{43,25 \text{ mm}}{62 \text{ mm}} = 0,693$$

$$\beta = \frac{1}{0,698} \left(\frac{113 \text{ kN}}{50 \text{ kN}} - 1 \right) = 1,8$$

Hvis $\beta \geq 1$ sett $\alpha' = 1$

Hvis $0 \leq \beta < 1$ blir $\alpha' = \min \left\{ \frac{1}{\delta} \left(\frac{\beta}{1-\beta} \right), 1 \right\}$

Her er $\beta > 1$, som fører til $\alpha' = 1$.

Trinn 5

Finn minimum godkjente flenstykkelse.

$$t_{min} = \sqrt{\frac{8 \cdot F_{bolt} \cdot b'}{p \cdot R_e \cdot (1 + \delta \cdot \alpha')}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 50 \text{ kN} \cdot 43,25 \text{ mm}}{110 \text{ mm} \cdot 355 \text{ MPa} \cdot (1 + 0,773 \cdot 1)}} = 15,8 \text{ mm}$$

Kontroller at flensen holder

$$t_f \geq t_{min} \quad \text{OK! Forsett med prosedyren}$$

$$t_f < t_{min} \quad \text{STOPP! Bytt til en bjelke med større flenstykkelse}$$

$$t_f(16 \text{ mm}) > t_{min}(15,8 \text{ mm}) \quad \text{OK!}$$

Hvis $t_f > t_{min}$ må den faktiske verdien for α regnes ut. Regn først ut t_k fra ligning (2.17)

$$t_k = \sqrt{\frac{8 \cdot F_{tillatt,bolt} \cdot b'}{p \cdot R_e}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 113 \text{ kN} \cdot 43,25 \text{ mm}}{110 \text{ mm} \cdot 355 \text{ MPa}}} = 31,64 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{1}{\delta} \left(\frac{F_{bolt}/F_{tillatt,bolt}}{\left(\frac{t_f}{t_k}\right)^2} - 1 \right) = \frac{1}{0,773} \left(\frac{\frac{50 \text{ kN}}{113 \text{ kN}}}{\left(\frac{16 \text{ mm}}{31,64 \text{ mm}}\right)^2} - 1 \right) = 0,945$$

Trinn 6

Regn ut hevarmskraften ved hjelp av ligning (2.13)

$$F_{hev,bolt} = F_{tillatt,bolt} \cdot \delta \cdot \alpha \cdot \left(\frac{b'}{a'}\right) \cdot \left(\frac{t_f}{t_k}\right)^2$$

$$F_{hev,bolt} = 113 \text{ kN} \cdot 0,773 \cdot 0,945 \cdot \left(\frac{43,25 \text{ mm}}{62 \text{ mm}}\right) \cdot \left(\frac{16 \text{ mm}}{31,64 \text{ mm}}\right)^2$$

$$F_{hev,bolt} = 14,7 \text{ kN}$$

Trinn 7

Kontroller kravet om at påført last per bolt og hevarmskraften ikke overstiger den tillatte kraften per bolt (ligning (2.21)).

$$F_{tillatt,bolt} \geq F_{bolt} + F_{hev,bolt}$$

$$F_{tillatt,bolt}(113 \text{ kN}) > F_{bolt}(50 \text{ kN}) + F_{hev,bolt}(14,7 \text{ kN}) \quad \text{OK!}$$

Trinn 8

Kontroller at bøyespenningen i flensen ikke er for høy.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} = \frac{n_{bolt}/2 \cdot F_{hev,bolt} \cdot a}{\left(l_{flens} - \left(\frac{n_{bolt}}{2} \cdot d_{hull}\right)\right) \cdot t_f^2}$$

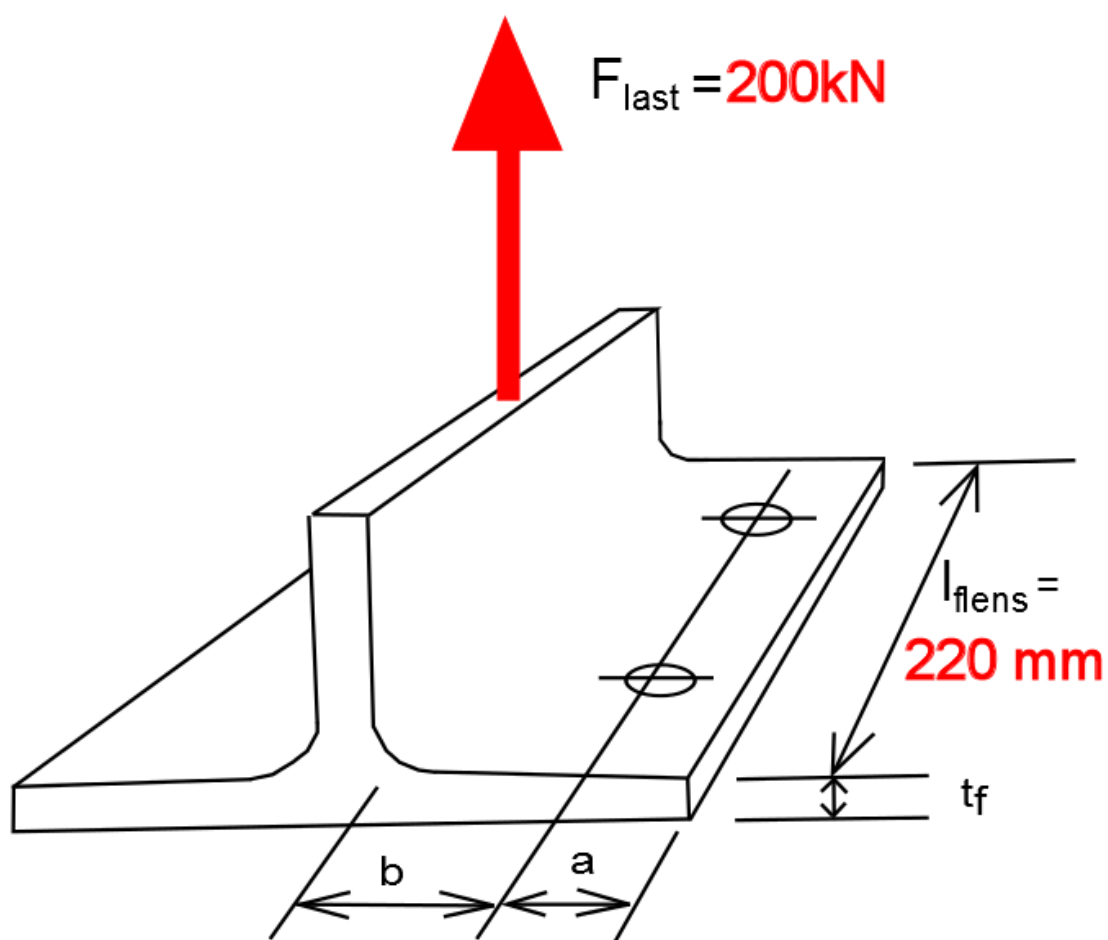
$$\sigma_b = \frac{1 \cdot 14,7 \text{ kN} \cdot 50 \text{ mm}}{\frac{85 \text{ mm} \cdot (16 \text{ mm})^2}{6}} = 203 \text{ MPa}$$

Sikkerhetsfaktor:

$$n_F = \frac{R_e}{\sigma_b} = \frac{355 \text{ MPa}}{203 \text{ MPa}} = 1,7 \quad \text{OK!}$$

3.2 Eksempel 2: HE220B - 220mm

For å vise bruken av prosedyren når det brukes mer enn to bolter i konstruksjon er lengden på bjelken økt til 220 mm og den er boltet til et fast underlag med fire bolter. Den totale lasten på konstruksjonen øker til 200 kN, materialet i bjelken er fremdeles S355J0 med flytegrense på 355 MPa. Som tidligere skal prosedyren brukes for å beregne kreftene i boltene, og hvor stor hevarmskraften blir. Konstruksjonen med den påførte lasten er vist i figuren under. Endringene som kan komme på grunn av endringen i antall bolter blir kommentert i hvert trinn.



Figur 3-2 Eksempel 2: HE220B - 220mm med påført last og flenslengde

Trinn 1

Bestem nødvendig antall og størrelse på boltene.

Hulldiameteren og krav til klaring mellom hull og bolt er avgjørende for valg av størrelsen på boltene. Hulldiameteren er angitt i tabeller for bjelketyper.

Da det vanligvis brukes bolter med normal klaring i denne type konstruksjoner, tar også denne prosedyren utgangspunkt i det. Hvis det er krav om bruk av passbolter eller nagler regnes hulldiameteren også som bolt diameter.

Kravene som blir gitt til normal klaring er gitt av NS 3462 og et utdrag er gjengitt under.

Krav til normal klaring (NS 3462)[10]:

$$M12-M14: \quad d_{hull} \leq d_{bolt} + 1 \text{ [mm]}$$

$$M16-M24: \quad d_{hull} \leq d_{bolt} + 2 \text{ [mm]}$$

$$M27-: \quad d_{hull} \leq d_{bolt} + 3 \text{ [mm]}$$

Fra tabell 1.3 i Formler og tabeller [11] finner vi følgende dimensjoner til HE220B-bjelken.

$$w = 120 \text{ mm}$$

$$t_f = 16 \text{ mm}$$

$$c = 220 \text{ mm}$$

$$d_{hull} = 25 \text{ mm}$$

$$s = 9,5 \text{ mm}$$

Hulldiameteren tilsier at bolter av type M24 kan brukes. Dataene for bolter hentes ut fra tabeller, i dette eksempelet er de hentet fra Skrueforbindelser – Repetisjon [12].

For M24 har vi: $A_{sp} = 353 \text{ mm}^2$

Når størrelsen på bolten er bestemt, finn tillatt kraft per bolt ved hjelp av ligning (2.20)

$$F_{tillatt,bolt} = \frac{A_{sp} \cdot \sigma_{bolt}}{n_B} = \frac{353 \text{ mm}^2 \cdot 640 \text{ MPa}}{2,0} = 112960 \text{ N} = 113 \text{ kN}$$

Det nødvendige antall bolter bestemmes ved å dele den totale påførte lasten på tillatt kraft per bolt

$$n_{bolt} = \frac{F_{last}}{F_{tillatt,bolt}} = \frac{200 \text{ kN}}{113 \text{ kN}} = 1,8$$

Det vil si at minimum antall bolter er 2 (runder alltid av oppover til nærmeste par), og at de fire som er i dette eksempelet skal være mer enn nok.

Bestem lengden p ved hjelp av ligning (2.1).

$$p = \frac{2 \cdot l_{flens}}{n_{bolt}} = \frac{2 \cdot 220 \text{ mm}}{4} = 110 \text{ mm}$$

Trinn 2

Bestem påført last per bolt ved å dele den totale påførte lasten på antall bolter. (Ligning (2.20))

$$F_{bolt} = \frac{F_{last}}{n_{bolt}} = \frac{200 \text{ kN}}{4} = 50 \text{ kN}$$

Kontroller om forholdet mellom påført last og tillatt last per bolt er ok.

$$F_{bolt} \leq F_{tillatt,bolt} \quad \text{OK! Fortsett prosedyren}$$

$$F_{bolt} \geq F_{tillatt,bolt} \quad \text{STOPP! Bruk flere eller sterkere bolter}$$

$$F_{bolt} (50 \text{ kN}) < F_{tillatt,bolt} (113 \text{ kN}) \quad \text{OK!}$$

Bestem avstandene a og b der

$$a = \frac{c - w}{2} = \frac{220 \text{ mm} - 120 \text{ mm}}{2} = 50 \text{ mm}$$

Og

$$b = \frac{w - s}{2} = \frac{120 \text{ mm} - 9,5 \text{ mm}}{2} = 55,25 \text{ mm}$$

NB! Husk kravet $a \leq 1,25b$

$$a(50 \text{ mm}) < 1,25b(69 \text{ mm}) \quad \text{OK!}$$

Trinn 3

Bestem de modifiserte avstandene a' og b' ved hjelp av ligningene (2.5) og (2.6), og forholdstallet δ fra ligning (2.7).

$$a' = a + \frac{d_{\text{bolt}}}{2} = 50 \text{ mm} + \frac{24 \text{ mm}}{2} = 62 \text{ mm}$$

$$b' = b - \frac{d_{\text{bolt}}}{2} = 55,25 \text{ mm} - \frac{24 \text{ mm}}{2} = 43,25 \text{ mm}$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{\text{hull}}}{p} = 1 - \frac{25 \text{ mm}}{110 \text{ mm}} = 0,773$$

Trinn 4

For å bestemme forholdstallet α innføres en faktor β . Denne faktoren brukes for å finne en midlertidig verdi for α som kalles α' . Denne midlertidige verdien for α brukes for å finne minimum flenstykkelse.

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{F_{\text{tillatt, bolt}}}{F_{\text{bolt}}} - 1 \right)$$

$$\text{Der } \rho = \frac{b'}{a'} = \frac{43,25 \text{ mm}}{62 \text{ mm}} = 0,698$$

$$\beta = \frac{1}{0,698} \left(\frac{113 \text{ kN}}{50 \text{ kN}} - 1 \right) = 1,8$$

Hvis $\beta \geq 1$ sett $\alpha' = 1$

Hvis $0 \leq \beta < 1$ blir $\alpha' = \min \left\{ \frac{1}{\delta} \left(\frac{\beta}{1-\beta} \right), 1 \right\}$

Her er $\beta > 1$, som fører til $\alpha' = 1$.

Trinn 5

Finn minimum godkjente flenstykkelse.

$$t_{min} = \sqrt{\frac{8 \cdot F_{bolt} \cdot b'}{p \cdot R_e \cdot (1 + \delta \cdot \alpha')}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 50 \text{ kN} \cdot 43,25 \text{ mm}}{110 \text{ mm} \cdot 355 \text{ MPa} \cdot (1 + 0,773 \cdot 1)}} = 15,8 \text{ mm}$$

Kontroller at flensen holder

$$t_f \geq t_{min} \quad \text{OK! Forsett med prosedyren}$$

$$t_f \leq t_{min} \quad \text{STOPP! Bytt til en bjelke med større flenstykkelse}$$

$$t_f(16 \text{ mm}) > t_{min}(15,8 \text{ mm}) \quad \text{OK!}$$

Hvis $t_f > t_{min}$ må den faktiske verdien for α regnes ut. Begynn med å finne t_k .

$$t_k = \sqrt{\frac{8 \cdot F_{tillatt,bolt} \cdot b'}{p \cdot R_e}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 113 \text{ kN} \cdot 43,25 \text{ mm}}{110 \text{ mm} \cdot 355 \text{ MPa}}} = 31,64 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{1}{\delta} \left(\frac{F_{bolt}/F_{tillatt,bolt}}{\left(\frac{t_f}{t_k}\right)^2} - 1 \right) = \frac{1}{0,773} \left(\frac{\frac{50 \text{ kN}}{113 \text{ kN}}}{\left(\frac{16 \text{ mm}}{31,64 \text{ mm}}\right)^2} - 1 \right) = 0,945$$

Trinn 6

Regn ut hevarmskraften ved hjelp av ligning (2.13)

$$F_{hev,bolt} = F_{tillatt,bolt} \cdot \delta \cdot \alpha \cdot \left(\frac{b'}{a'}\right) \cdot \left(\frac{t_f}{t_k}\right)^2$$

$$F_{hev,bolt} = 113 \text{ kN} \cdot 0,773 \cdot 0,945 \cdot \left(\frac{43,25 \text{ mm}}{62 \text{ mm}}\right) \cdot \left(\frac{16 \text{ mm}}{31,64 \text{ mm}}\right)^2$$

$$F_{hev,bolt} = 14,7 \text{ kN}$$

Trinn 7

Kontroller kravet om at påført last per bolt og hevarmskraften ikke overstiger den tillatte kraften per bolt (ligning (2.21)).

$$F_{tillatt,bolt} \geq F_{bolt} + F_{hev,bolt}$$

$$F_{tillatt,bolt}(113 \text{ kN}) > F_{bolt}(50 \text{ kN}) + F_{hev,bolt}(14,7 \text{ kN}) \quad \text{OK!}$$

Trinn 8

Kontroller at bøyespenningen i flensen ikke er for høy.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} = \frac{n_{bolt}/2 \cdot F_{hev,bolt} \cdot a}{\left(l_{flens} - \left(\frac{n_{bolt}}{2} \cdot d_{hull}\right)\right) \cdot t_f^2}$$

$$\sigma_b = \frac{2 \cdot 14,7 \text{ kN} \cdot 50 \text{ mm}}{\frac{170 \text{ mm} \cdot (16 \text{ mm})^2}{6}} = 203 \text{ MPa}$$

Sikkerhetsfaktor:

$$n_F = \frac{R_e}{\sigma_b} = \frac{355 \text{ MPa}}{203 \text{ MPa}} = 1,7 \quad \text{OK!}$$

4 KONTROLL AV KONSTRUKSJON

Den foregående prosedyren er basert på arbeidet gjort av William A. Thornton [3] og er en god metode å bruke når det er viktig å kunne beregne hevarmskreftene. Ulempen med den prosedyren er at den er repetitiv på den måten at om boltene ikke er sterke nok, eller flensen er for tynn, må man gjøre nødvendige endringer og begynne helt på nytt.

For å unngå repetisjonen har Abolhassan Astaneh i sin artikkel «*Procedure for Design and Analysis of Hanger-type Connections*» [2] laget en fremgangsmåte for å bestemme om det er flensen eller boltene som er dimensjonerende faktor for konstruksjonen. Denne fremgangsmåten gjør det raskere å avgjøre om en konstruksjon er sterk nok til å tåle lastene den blir utsatt for. Fremgangsmåten fjerner behovet for å prøve-og-feile når det kommer til valg av bolter og bjelketyper. Det blir dermed mulig å avgjøre om en T-stykkekobling tåler de lastene den blir utsatt for, eller om konstruksjonen må endres, uten at hevarmskreftene må regnes ut på forhånd.

4.1 Fremgangsmåte for kontroll av konstruksjon (oversatt og tilpasset fra «*Procedure for Design and Analysis of Hanger-type Connections*» [2])

Trinn 1

Bestem antall bolter og størrelsen på disse. Hvis bolt- eller bjelketype er kjent fra før er det disse som skal brukes for å bestemme boltstørrelsen, hvis det ikke er gitt kan boltstørrelsen estimeres. Når størrelsen på bolten er bestemt, finn tillatt kraft per bolt ved hjelp av ligning (2.20)

$$F_{tillatt,bolt} = \frac{A_{sp} \cdot \sigma_{bolt}}{n_B}$$

Det nødvendige antall bolter bestemmes ved å dele den totale påførte lasten på tillatt kraft per bolt

$$n_{bolt} = \frac{F_{last}}{F_{tillatt,bolt}}$$

Bestem lengden p ved hjelp av ligning (2.1).

$$p = \frac{2 \cdot l_{lens}}{n_{bolt}}$$

Trinn 2

Beregn den påførte lasten per bolt ved å dele den totale lasten på antall bolter. (Ligning (2.20))

$$F_{bolt} = \frac{F_{last}}{n_{bolt}}$$

Estimer en verdi for avstanden b der minstekravet er den nødvendige klaringen for bruk av skiftenøkkel ved montering.

Sett en verdi for a som ikke overskrider kravet $a \leq 1,25b$.

Hvis bjelketypen er kjent brukes tabellverdiene for å bestemme a og b .

$$a = \frac{c - w}{2}$$

Og

$$b = \frac{w - s}{2}$$

Trinn 3

Beregn de modifiserte avstandene a' og b' ved hjelp av ligningene (2.5) og (2.6), og forholdstallet δ fra ligning (2.7).

$$a' = a + \frac{d_{bolt}}{2}$$

$$b' = b - \frac{d_{bolt}}{2}$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{hull}}{p}$$

Boltdiameteren og krav til klaring mellom hull og bolt er avgjørende for valg av størrelsen på bolthullet. Hvis bjelketypen er kjent fra før er hulldiameteren angitt i tabeller for bjelketyper.

Da det vanligvis brukes bolter med normal klaring i denne type konstruksjoner, tar også denne prosedyren utgangspunkt i det. Hvis det er krav om bruk av passbolter eller nagler regnes boltdiameteren også som hulldiameter.

Kravene som blir gitt til normal klaring er gitt av NS 3462 og et utdrag er gjengitt under.

Krav til normal klaring (NS 3462)[10]:

$$\text{M12-M14: } d_{hull} \leq d_{bolt} + 1 \text{ [mm]}$$

$$\text{M16-M24: } d_{hull} \leq d_{bolt} + 2 \text{ [mm]}$$

$$\text{M27-: } d_{hull} \leq d_{bolt} + 3 \text{ [mm]}$$

Trinn 4

Beregne grenselasten F_0 gitt i ligning (2.18) (med tillatt kraft per bolt)

$$F_0 = \frac{F_{tillatt,bolt}}{1 + \left(\frac{\delta}{1 + \delta}\right) \left(\frac{b'}{a'}\right)}$$

Trinn 5

Hvis $F_{bolt} \leq F_0$ vil styrken til flensen være den dimensjonerende faktoren og minste flenstykke beregnes med følgende ligning

$$t_{f,min} = \sqrt{\frac{8 \cdot F_{bolt} \cdot b'}{p \cdot R_e \cdot (1 + \delta)}}$$

Trinn 6

Kontroller om steget og eventuell sveis mellom steg og flens holder.

Hvis $F_{bolt} > F_0$ vil styrken til bolten være den dimensjonerende faktoren og minste flenstykke beregnes med følgende ligning

$$t_{f,min} = \sqrt{\frac{8[F_{bolt}(a' + b') - F_{tillatt,bolt} \cdot a']}{p \cdot R_e}}$$

Verdien for $t_{f,min}$ angir den minste flenstykkelsen bjelken kan ha. For å sjekke om den valgte bjelketypen holder sammenlignes t_f og $t_{f,min}$.

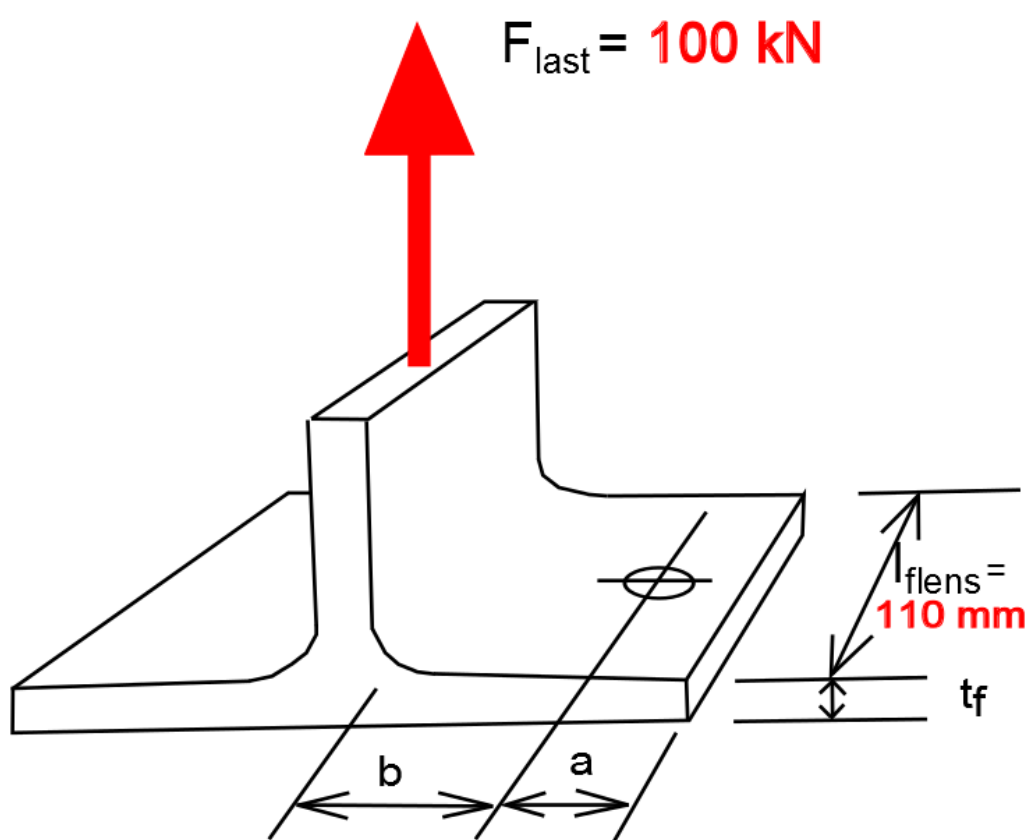
Kravet for flenstykkelse er:

$$t_f \geq t_{f,min}$$

4.2 Eksempel fremgangsmåte for kontroll

For å vise fremgangsmåten i praksis følger et eksempel der T-koblingen i Eksempel 1 blir påført en kraft på 200 kN. Målet er å finne ut om T-koblingen er sterk nok til denne lasten eller om konstruksjonen må endres.

I eksempelet er det en halv HE220B-bjelke med en lengde på 110 mm. Denne bjelken er boltet til et fast underlag med to bolter. Materialet i bjelken er S355J0 som har en flytegrense, R_e , på 355 MPa. Bjelken blir påført en last på 200 kN. Bruk prosedyren for å beregne hvor store kreftene blir i boltene, og hvor stor hevarmskraften blir. Konstruksjonen med den påførte lasten er vist i figuren under.



Figur 4-1 HE220B - 110mm med påført last og lengde

Fra tabell 1.3 i Formler og tabeller [11] finner vi følgende dimensjoner til HE220B-bjelken.

$$\begin{aligned}w &= 120 \text{ mm} \\t_f &= 16 \text{ mm} \\c &= 220 \text{ mm} \\d_{hull} &= 25 \text{ mm} \\s &= 9,5 \text{ mm}\end{aligned}$$

Trinn 1

Hulldiameteren tilsier at bolter av type M24 kan brukes. Dataene for bolter hentes ut fra tabeller, i dette eksempelet er de hentet fra Skrueforbindelser – Repetisjon [12].

For M24 har vi: $A_{sp} = 353 \text{ mm}^2$

Antall bolter er gitt i oppgaveteksten og to bolter skal brukes.

Finner tillatt kraft per bolt ved hjelp av ligning (2.20)

$$F_{tillatt,bolt} = \frac{A_{sp} \cdot \sigma_{bolt}}{n_B} = \frac{353 \text{ mm}^2 \cdot 640 \text{ MPa}}{2} = 113 \text{ kN}$$

Finner nødvendig antall bolter ved å dele den totale påførte lasten på tillatt kraft per bolt

$$n_{bolt} = \frac{F_{last}}{F_{tillatt,bolt}} = \frac{200 \text{ kN}}{113 \text{ kN}} = 1,7$$

De to boltene som er gitt av oppgaveteksten vil altså være nok for å holde lasten.

Bestemmer lengden p ved hjelp av ligning (2.1)

$$p = \frac{2 \cdot l_{flens}}{n_{bolt}} = \frac{2 \cdot 110 \text{ mm}}{2} = 110 \text{ mm}$$

Trinn 2

Finner den påførte lasten per bolt ved å dele den totale lasten på antall bolter. (Ligning (2.20))

$$F_{bolt} = \frac{F_{last}}{n_{bolt}} = \frac{200 \text{ kN}}{2} = 100 \text{ kN}$$

Finner avstandene a og b ved utregning da bjelketypen er kjent.

$$a = \frac{c - w}{2} = \frac{220 \text{ mm} - 120 \text{ mm}}{2} = 50 \text{ mm}$$

Og

$$b = \frac{w - s}{2} = \frac{120 \text{ mm} - 9,5 \text{ mm}}{2} = 55,25 \text{ mm}$$

Trinn 3

Beregner de modifiserte avstandene a' og b' ved hjelp av ligningene (2.5) og (2.6), og forholdstallet δ fra ligning (2.7).

$$a' = a + \frac{d_{bolt}}{2} = 50 \text{ mm} + \frac{24 \text{ mm}}{2} = 62 \text{ mm}$$

$$b' = b - \frac{d_{bolt}}{2} = 55,25 \text{ mm} - \frac{24 \text{ mm}}{2} = 43,25 \text{ mm}$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{hull}}{p} = 1 - \frac{25 \text{ mm}}{110 \text{ mm}} = 0,733$$

Trinn 4

Beregner grenselasten F_0 ved hjelp av ligning (2.18) (med tillatt kraft per bolt)

$$F_0 = \frac{F_{tillatt,bolt}}{1 + \left(\frac{\delta}{1 + \delta}\right) \left(\frac{b'}{a'}\right)} = \frac{113 \text{ kN}}{1 + \left(\frac{0,733}{1 + 0,733}\right) \cdot \left(\frac{43,25 \text{ mm}}{62 \text{ mm}}\right)} = 87,2 \text{ kN}$$

Trinn 5

Kontrollerer $F_{bolt} \leq F_0$

$$F_{bolt}(100 \text{ kN}) > F_0(87,2 \text{ kN})$$

Ettersom $F_{bolt} > F_0$ faller Trinn 5 bort og Trinn 6 blir gjeldene.

Trinn 6

$F_{bolt} > F_0$, fører til at det er styrken til bolten som er den dimensjonerende faktoren. Minste flenstykkelse beregnes med følgende ligning

$$t_{f,min} = \sqrt{\frac{8[F_{bolt}(a' + b') - F_{tillatt,bolt} \cdot a']}{p \cdot R_e}}$$
$$t_{f,min} = \sqrt{\frac{8[100kN(62mm + 43,25mm) - 113kN \cdot 62mm]}{110mm \cdot 355MPa}} = 26,8 \text{ mm}$$

Kontrollerer minimumstykkelsen opp mot bjelken gitt i oppgaven

$$t_f(16 \text{ mm}) < t_{f,min}(26,8 \text{ mm})$$

Tykkelsen på flensen til bjelken i oppgaven er ikke stor nok i forhold til den påførte lasten og må byttes med en bjelke som har over 26,8 mm flenstykkelse.

Ved hjelp av denne fremgangsmåten kan man si at konstruksjonen ikke tåler en last på 200 kN, helt uten å ha beregnet hevarmskreftene på forhånd.

5 FEM-ANALYSER

I denne oppgaven har ANSYS WorkBench 14 (ANSYS) vært brukt til gjennomføringen av FEM-analyser. For å få et sammenligningsgrunnlag ble Eksempel 1: HE220B – 110mm brukt i analysen.

Målet med FEM-analysen har vært å sjekke om det er samsvar mellom verdiene vi finner ved hjelp av prosedyren og ANSYS. Dette er viktig for å finne ut om verdiene fra prosedyren virker sannsynlige, og om verdiene fra prosedyren trygt kan brukes til dimensjonering av et T-koblingsstykke.

5.1 Modellering og opplagring

Til oppsettet for analysene gjort i ANSYS ble CAD-modellene laget i SolidWorks. Dataene er hentet fra Eksempel 1: HE220B – 110mm og dimensjonene er hentet fra Formler og tabeller[11].

I analysen settes det opp til at bjelken er fri til å bevege seg, men blir holdt fast av boltene til et fast underlag (se «Figur 6-5 Rendering av montert oppsett brukt i analyse» i kapittel 6 CAD-presentasjon for oppsett). Dette oppsettet blir mest likt det idealiserte tilfellet der bjelken er boltet til et uendelig fast underlag som prosedyren er basert på.

Forenklinger: Boltene er forenklet med hensyn på detaljene i det gjengede området. Spenningsarealet er korrekt men gjengene i seg selv er ikke modellert. Dette for å gjøre analysene raskere å gjennomføre.

5.2 Oppsett av forsøk

Modellen ble utformet og satt sammen i SolidWorks og så importert til ANSYS. I ANSYS endres kontaktypen mellom flatene i modellen fra «Bonded» (fastlimt/-holdt) som er standardinnstillingen til «Frictional» (friksjon). Dette angir at det er kontakt mellom flatene, men at de ikke er festet sammen. Ved å velge friksjonskobling og en liten friksjonskoeffisient (i dette tilfellet 0,1) i stedet for friksjonsfri kobling, unngås problemer som kan oppstå i ANSYS når flatene er helt frie til å bevege seg i forhold til hverandre. Samtidig blir beregningene mer likt virkeligheten da det i virkeligheten alltid vil være noe friksjon mellom flatene.

Boltene har en forenklet utformingen av tre hovedårsaker. Den ene er at det ikke er behov for nøyaktige gjenger for å få et akseptabelt resultat fra analysen. Den andre er at analysen går vesentlig fortere med en enklere geometri. Og den tredje årsaken er at oppsettet for analysen blir vesentlig enklere når boltarealet er utformet som en overflate i stedet for mange små gjengeflater, der hver enkelt flate i virkeligheten er festet til underlaget.

For å angi fastholdingene mellom boltene og basen markeres den overflaten som representerer det gjengede området på boltene, og overflaten på innsiden av bolthullet i basen. Ettersom det er en avstand mellom disse overflatene (der gjengene i virkeligheten ville vært), brukes «Pinball Region» i ANSYS. Ved å endre «Pinball Region» fra «Programmed Controlled» til «Radius» og sette denne radiusen større enn avstanden mellom bolt og bolthull, fortelles ANSYS at disse overflatene sitter sammen selv om det er en fysisk avstand mellom dem.

Basen som representerer det uendelig faste underlaget blir festet ved å brukes «Joints»-funksjonen i ANSYS. Ved å bruke denne funksjonen oppfatter programmet at basen ikke skal kunne bevege seg i noen retning.

Den påførte lasten blir lagt til flaten på toppen av steget og blir automatisk lagt på som en jevnt fordelt last.

I ANSYS er det mulig å legge inn forspenning i boltene. Ettersom prosedyren tar utgangspunkt i at boltene er korrekt forspent gjøres analysen med denne funksjonen aktivert. Forspenningen ble satt til 70 % av den tillatte kraften i boltene, noe som er en tommelfingerregel når det kommer til forspenning, og gir en forspenning på 79 100 N per bolt. Det ble også gjort en analyse av konstruksjonen uten forspenning i boltene for å sammenligne de to. Ved å legge inn funksjonen for forspenningen under resultatmappen i ANSYS blir det enkelt å identifisere og hente ut resultatene på kreftene som virker i boltene.

En detaljert veiledning av oppsettet brukt i denne analysen ligger som vedlegg til oppgaven. Denne veilederen beskriver oppsettet trinn for trinn og er laget for å lette jobben for de som ønsker å gjøre tilsvarende analyser i ettertid.

5.3 Resultater

Resultatene kan leses direkte i ANSYS under «Solution». I tillegg er det mulig å be ANSYS WorkBench 14 å generere en ferdig rapport av analysen. Rapportene fra analysene med og uten forspenning ligger som vedlegg til denne oppgaven.

Rapporten inneholder hele oppsettet til analysen sammen med alle resultatene. Da det ikke virker å være mulig å hente ut hevarmskreftene isolert, blir de resultatene som er mest interessante for denne oppgaven de totale kreftene i boltene. Disse er gjengitt i tabellen under.

Tabell 5-1 Resultater fra forsøk i ANSYS WorkBench 14 - HE220B - 110mm

Bolt	Totale krefter i bolten	
	Uten forspenning	Med forspenning
1	61 873 N	91 358 N
2	61 889 N	91 538 N

Hevarmskraften i analysen uten forspenning i boltene kan estimeres ved å dele den påførte lasten på antall bolter, i dette tilfellet 100 kN delt på to bolter, og trekke fra de totale kreftene i boltene.

Tabell 5-2 Estimering av hevarmskrefter i ANSYS-forsøket

Bolt	Totale krefter i bolten	Påført last per bolt	Hevarmskraft
1 u/forspenning	61 873 N	50 000 N	11 873 N
2 u/forspenning	61 889 N	50 000 N	11 889 N

For analysen der boltene er forspent kan hevarmskraften beregnes ved hjelp av ligningene (2.22), (2.23) og (2.24)

For bolt 1:

$$\Delta F'_b = 0,2 \cdot F_{bolt} = 0,2 \cdot 50 \text{ kN} = 10 \text{ kN}$$

$$\Delta F_b = F_{total,bolt} - F_i = 91 358 \text{ N} - 79 100 \text{ N} = 12 258 \text{ N}$$

$$F_{hev,bolt} = \Delta F_b - \Delta F'_b = 12\,258\,N - 10\,000\,N = 2\,258\,N$$

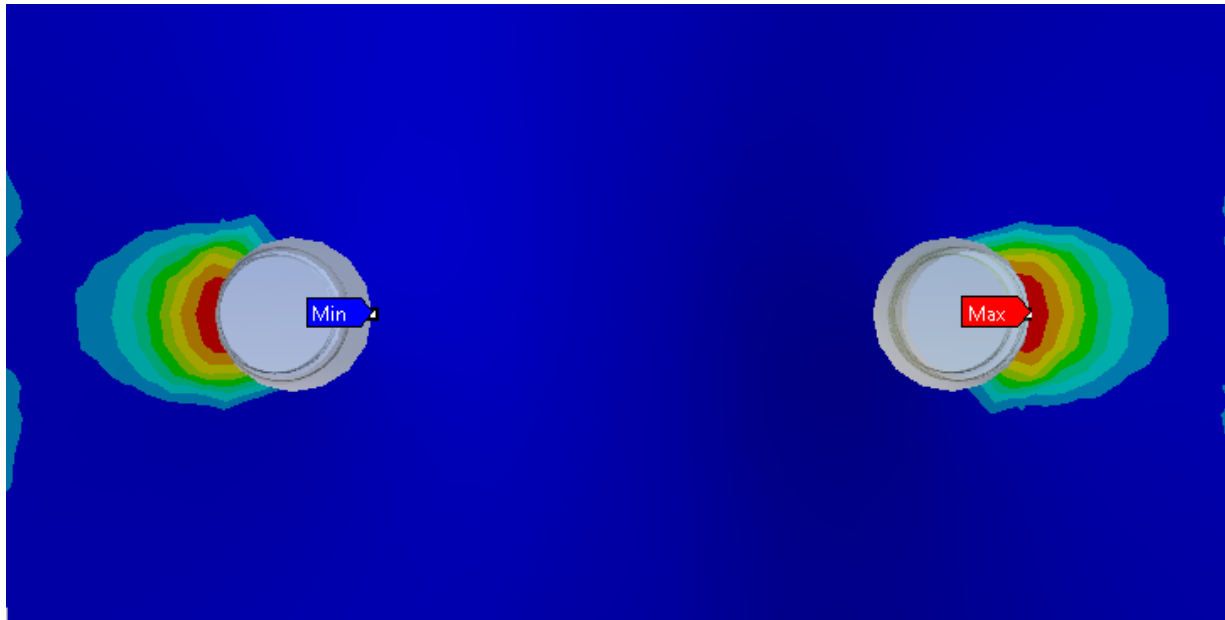
For bolt 2:

$$\Delta F'_b = 0,2 \cdot F_{bolt} = 0,2 \cdot 50\,kN = 10\,kN$$

$$\Delta F_b = F_{total,bolt} - F_i = 91\,538\,N - 79\,100\,N = 12\,438\,N$$

$$F_{hev,bolt} = \Delta F_b - \Delta F'_b = 12\,438\,N - 10\,000\,N = 2\,438\,N$$

I tillegg til kreftene er det interessant å se hvordan spenningene fordeles på undersiden av flensen, mellom flensen og underlaget. Dette fordi formelverket for prosedyren ser på hevarmskreftene som punktlaster, og ved å se på spenningsfordelingen får man et inntrykk av om denne forenklingen i formelverket virker sannsynlig. Bildet under viser denne spenningsfordelingen.



Figur 5-1 Spenningsfordeling på undersiden av flens, mellom flens og underlag

5.4 Sammenligning mot håndberegninger

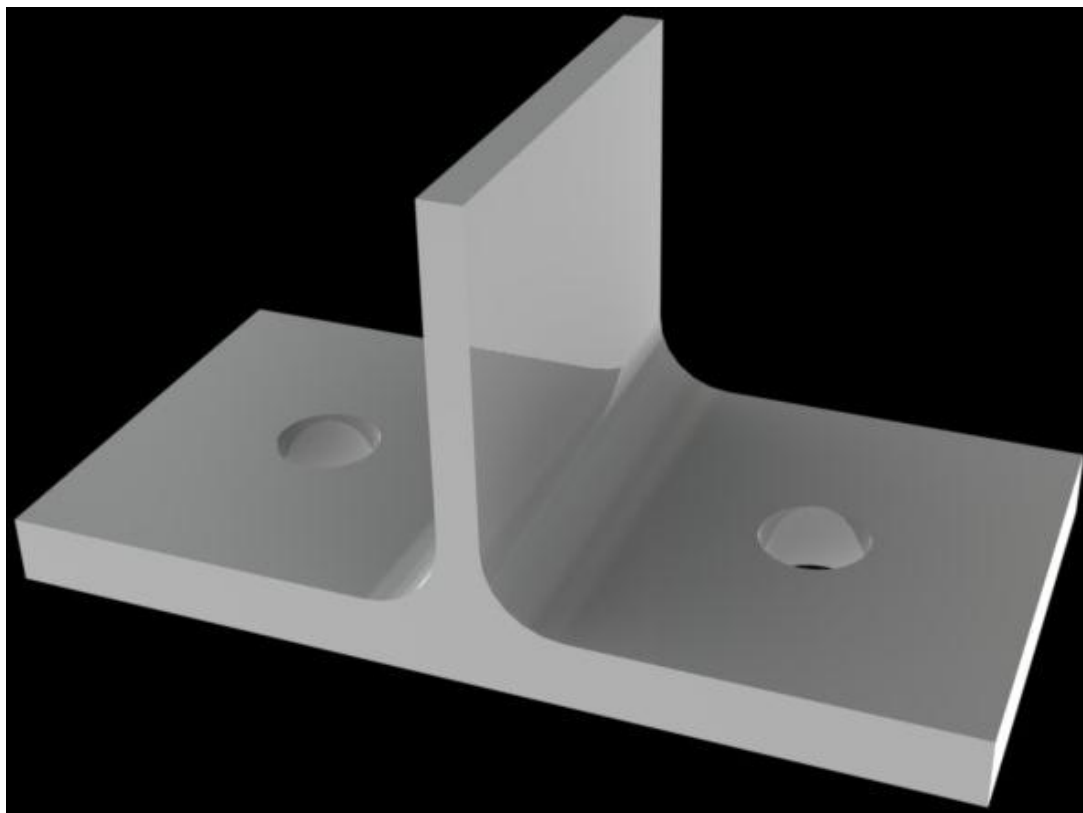
Tabell 5-3 Sammenligning mellom håndberegninger og ANSYS

Håndberegninger (Prosedyren)			ANSYS		Avvik Hevarmskraft	
			Uten forspenning			
Bolt	Total kraft [N]	Hevarmskraft [N]	Total kraft [N]	Hevarmskraft [N]	Avvik [N]	Avvik [%]
1	64 725	14 725	61 873	11 873	2 852	19,4 %
2	64 725	14 725	61 889	11 889	2 836	19,3 %
Snitt	64 725	14 725	61 881	11 881	2 844	19,3 %
			Med forspenning			
1	64 725	14 725	91 358	2 258	12 467	84,7 %
2	64 725	14 725	91 538	2 438	12 287	83,4 %
Snitt	64 725	14 725	91 448	2 348	12 377	84,1 %

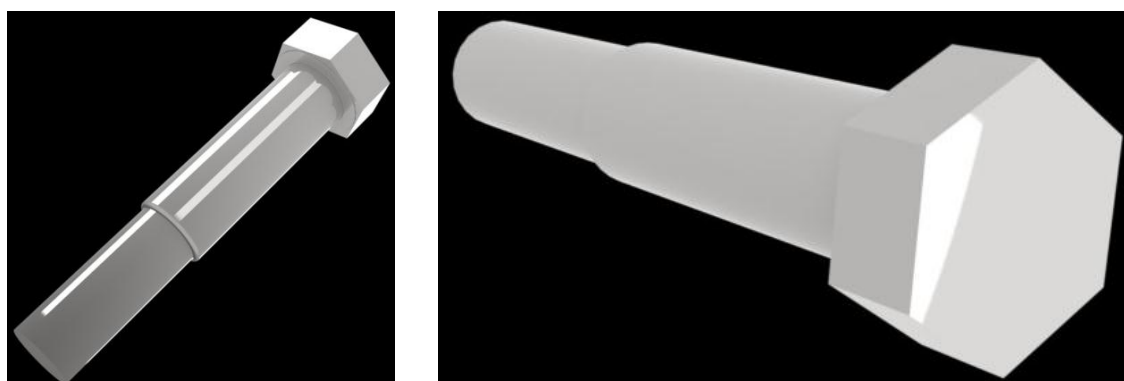
Fra sammenligningen ser man at resultatene fra ANSYS ligger nærmest resultatene fra prosedyren når man regner uten forspenning i boltene. Avviket øker kraftig når man sammenligner verdiene fra prosedyren med resultatene fra ANSYS med forspenning i boltene.

6 CAD-PRESENTASJON

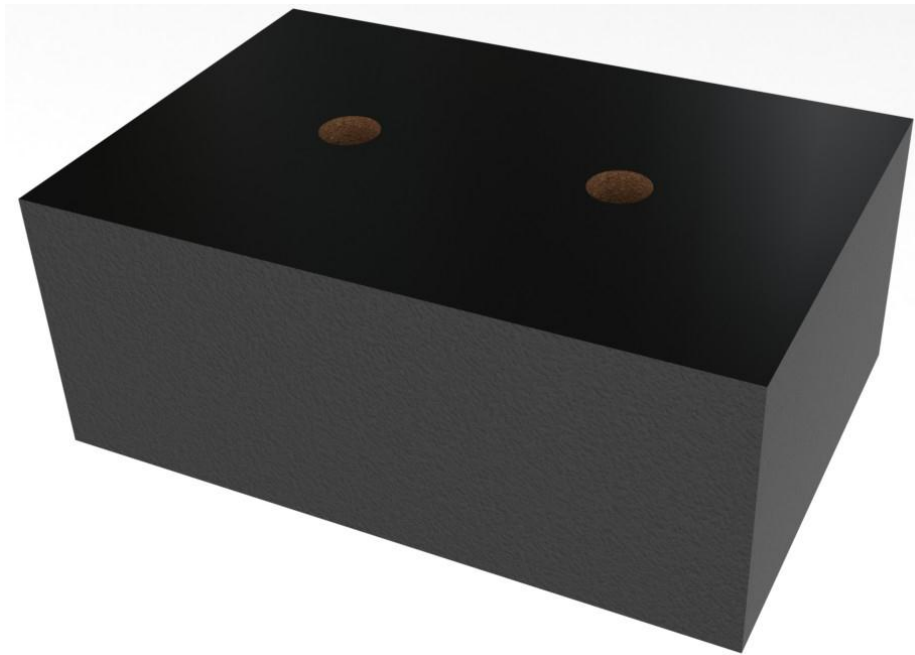
6.1 Visualisering i 3D



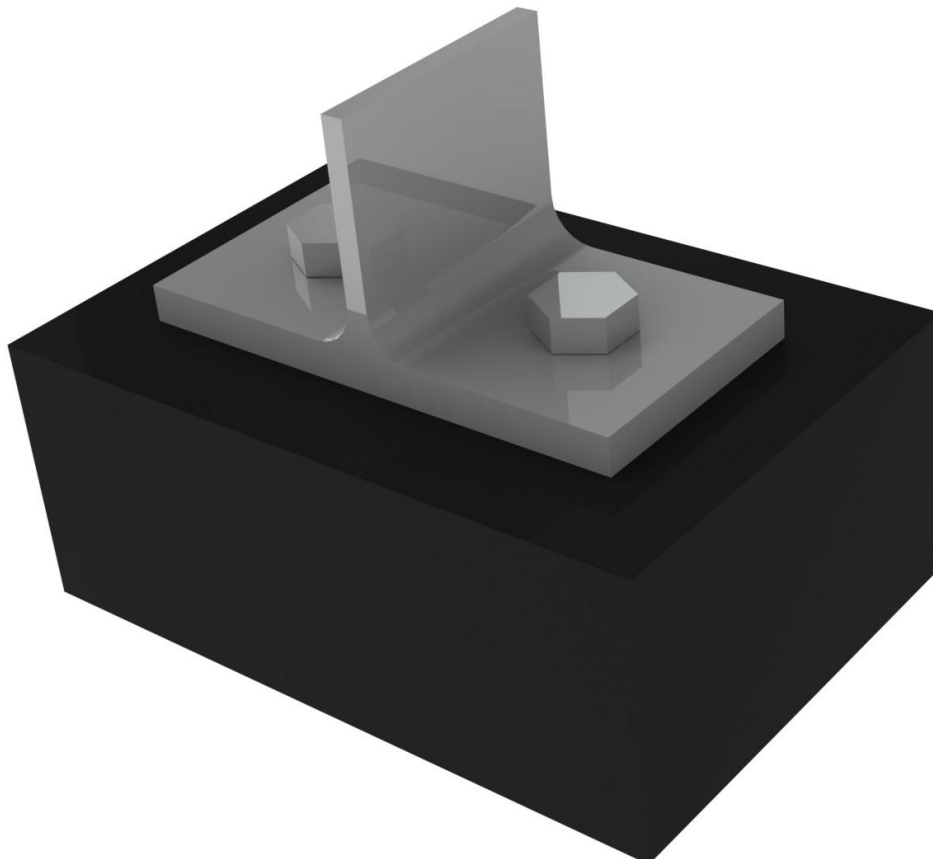
Figur 6-1 Rending av HE220B - 110mm



Figur 6-2 Rending av M24 bolt - forenklet gjenget område



Figur 6-3 Rending av base



Figur 6-4 Rending av montert oppsett brukt i ANSYS-analyse

6.2 Forbedringer

Om ønskelig er det mulig å designe delene i konstruksjonen, og da spesielt boltene, med enda større nøyaktighet. I tillegg kan det legges til både skiver og muttere for å komme enda nærmere en virkelig konstruksjon.

7 DISKUSJON

Sammenligningen av resultatene mellom håndberegningene i prosedyren og analysen i ANSYS, viser ganske store avvik mellom de to.

Det største avviket er mellom håndberegningene og analysen av boltene med forspenning. På grunn av det store avviket kommer håndberegningene ut på veldig konservativ side.

Tabell 7-1 Utdrag av sammenligning mellom håndberegninger og ANSYS m/forspenning

Bolt	Total kraft [N]	Hevarmskraft [N]	Total kraft [N]	Hevarmskraft [N]	Avvik [N]	Avvik [%]
			Med forspenning			
1	64 725	14 725	91 358	2 258	12 467	84,7 %
2	64 725	14 725	91 538	2 438	12 287	83,4 %
Snitt	64 725	14 725	91 448	2 348	12 377	84,1 %

I teorien som ligger bak prosedyren blir det satt som forutsetning at boltene er forspent, men denne forspenningen er ikke definert i størrelse eller som en faktor i formelverket. Som tidligere nevnt fører forspenningen av boltene til at de påførte kreftene fordeles mellom boltene og underlaget. Dette tilsvarer at boltens kapasitet øker drastisk. I tillegg er dette et krav i Eurokode 3 når det skal konstrueres strekkforbindelser som utsettes for varierende strekkpåkjenninger.

Ettersom forspenning av boltene er satt som en forutsetning i den amerikanske teorien, men ikke brukes i beregningene, ble analysen av T-koblingen gjennomført i ANSYS uten forspenning i boltene.

Sammenligningen mellom disse resultatene og håndberegningen viser at forskjellen i dette tilfellet blir mye mindre. Også her kommer håndberegningene ut på konservativ side.

Tabell 7-2 Utdrag av sammenligning mellom håndberegninger og ANSYS u/forspenning

Bolt	Total kraft [N]	Hevarmskraft [N]	Total kraft [N]	Hevarmskraft [N]	Avvik [N]	Avvik [%]
1	64 725	14 725	61 873	11 873	2 852	19,4 %
2	64 725	14 725	61 889	11 889	2 836	19,3 %
Snitt	64 725	14 725	61 881	11 881	2 844	19,3 %

Det at håndberegningene kommer ut på konservativ side, altså gir høyere verdier for kreftene enn ANSYS, er positivt for prosedyren sin del. Det gjør det mulig å bruke prosedyren for beregninger og være sikker på at resultatene gir trygge verdier for konstruksjonen.

Det at avviket er minst, og på konservativ side, når vi sammenligner prosedyren og analysen i ANSYS uten forspenning i boltene viser tydelig at prosedyren er utviklet med hensyn på strekkforbindelser som ikke utsettes for varierende strekkpåkjenning. Altså er prosedyren laget for statisk beregning, og ikke utmattingsberegninger.

Fordelen når man ser på verdiene fra ANSYS uten forspenning i boltene er at avviket er såpass lite som det er. Ettersom fremgangsmåten i ANSYS er lik både med og uten forspenning i boltene, sett bort fra verdien for forspenning, fungerer analysen som en sjekk av veilederen for oppsett i ANSYS. Man kan med andre ord være ganske sikker på at oppsettet i ANSYS er korrekt, og at verdiene for analysen med forspenning i boltene stemmer.

I tillegg er forskjellen mellom håndberegningene og ANSYS mindre enn det som er praksis for mange i dag. Det vanlige i dag er å legge til en faktor på 30 % for å dekke kreftene som oppstår på grunn av hevarmseffekten. Til sammenligning gir prosedyren et tillegg på ca. 20 %. Denne forskjellen kan være nok til å spare mye materialer ved større konstruksjoner, som igjen fører til store økonomiske besparelser.

Avviket mellom prosedyren og analysen i ANSYS med forspenning i boltene tydeliggjør hvor mye forspenningen har å si for kreftene som virker i bolten. Eksempelet som er analysert i

denne oppgaven viser at prosedyren fremdeles er trygg å bruke, men bruk av denne prosedyren gir samtidig en så stor sikkerhetsfaktor at verdien forsvinner.

De resultatene man får for hevarmskreftene ved å bruke prosedyren er så langt unna sannheten at det ikke er noe poeng i å bruke disse i utmattingsberegninger.

Det er flere årsaker til at verdiene fra prosedyren ikke stemmer med dem man får fra analysen i ANSYS.

Hovedårsaken til forskjellen i verdiene fra prosedyren og verdiene fra analysen i ANSYS når boltene ikke er forspent kommer av sikkerhetsfaktoren som ligger i formelverket til prosedyren. I tillegg idealiseres hevarmskreftene som punktlaster som virker på enden av flensen, mens de i virkeligheten er fordelt over hele flensens lengde. Sammen med forenklingene som gjøres når det kommer til de modifiserte avstandene a' og b' fører dette til avvikene.

Når det kommer til avvikene mellom prosedyren og analysene i ANSYS med forspenning i boltene er årsaken veldig klar. Prosedyren er utviklet for å kunne gjøre statiske beregninger i bruddgrensetilstand og tar dermed ikke høyde for den effekten forspenning av boltene har.

8 KONKLUSJON OG ANBEFALINGER

8.1 Konklusjon

Problemstilling 1:

Hvordan kan man identifisere og beregne kreftene/spenningene som oppstår i boltene på grunn av hevarmseffekten?

Prosedyren som blir foreslått i denne oppgaven gjør det mulig å gjøre beregninger for å fastslå både om det oppstår hevarmskrefter i boltene i strekkpåkjennte T-koblingsstykker, og hvor store disse er.

Ettersom prosedyren kun gir gode resultater når det gjøres statiske beregninger er resultatene herfra ikke egnet i utmattingsberegninger.

Fremgangsmåten for kontroll av konstruksjoner unngår gjentakelser, og gjør arbeidet med utforming og valg av dimensjoner enda enklere enn det å bruke prosedyren alene. Men heller ikke denne fremgangsmåten tar forspenningen med i beregningene og vil dermed ikke være aktuell for forbindelser som blir utsatt for varierende strekkpåkjenning.

Problemstilling 2:

Hvordan samsvarer resultatene fra denne beregningsmetoden med dem man får fra FEM-analyseprogrammer (f.eks. ANSYS)?

Resultatene samsvarer godt mellom verdiene fra analysen i ANSYS uten forspenning i boltene og verdiene fra prosedyren, noe som underbygger oppsettet i ANSYS. Det vil si at veilederen som er laget til ANSYS gir et oppsett som gir korrekte verdier. Og disse verdiene vil det være mulig å bruke i utmattingsberegninger.

Selv om det er forskjell i verdiene man får fra prosedyren og verdiene fra ANSYS er verdiene fra prosedyren forholdsvis enkle å komme frem til i forhold til det å gjennomføre forsøk i ANSYS. I tillegg er verdiene fra prosedyren konservative og kan dermed trygt brukes for å

kontrollere og finne de nødvendige dimensjonene på konstruksjonen lenge før noen modell er laget, eller deler produsert.

Fordelene med prosedyren er flere:

- Man kan enkelt gjøre beregninger for å finne ut hvor grensen for T-koblingen går.
- Beregninger kan gjøres før konstruksjonen eksisterer. Det er ikke behov for å designe en modell i et CAD-program før man gjør beregningene.

Det finnes også ulemper med prosedyren:

- Ved store konstruksjoner med forskjellig bjelke- og bolttyper kan det bli tungvint og uoversiktlig å gjøre mange beregninger for hånd.
- Resultatene fra prosedyren kan ikke brukes i utmattingsberegninger

8.2 Anbefalinger

Ved statiske beregninger av mindre konstruksjoner eller kritiske deler i en konstruksjon, kan bruk av både prosedyren og fremgangsmåten for kontroll anbefales.

For utmattingsberegninger kan verdiene fra ANSYS brukes.

8.3 Videre arbeid

Begrensningene i denne oppgaven sammen med konklusjonen danner grunnlaget for videre arbeid. Det videre arbeidet kan oppsummeres i følgende punkter:

- Lange flenser/bjelker
- Et stort antall bolter
- Flens mot flens (eller annet ikke uendelig stivt underlag)
- Påført last i flere retninger
- Kontrollere og kvalitetssikre oppsettet i ANSYS
- Gjennomføre utmattingsberegninger
- Videreutvikle prosedyren så den tar med forspenningen i beregningene

9 REFERANSER

9.1 Litteraturreferanser

1. Disque, R.O., *The 9th Edition, Manual-of-Steel-Construction*. 1989 National Steel Construction Conference, 1989: p. 99-+.
2. Astaneh, A., *Procedure for Design and Analysis of Hanger-Type Connections*. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc, 1985. **22**(2): p. 63-66.
3. Thornton, W.A., *Prying Action - a General Treatment*. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction Inc, 1985. **22**(2): p. 67-75.
4. Swanson, J.A. *Ultimate Strength Prying Models for Bolted T-stub Connections*. 2002; Available from:
<http://structureshandouts.unomaha.edu/AISC/ProgramFilesFolder/AISC/Companion/bin/pdf/ej/swanson2002Q3.pdf>.
5. Douty, R.T. and W. McGuire, *High Strength Bolted Moment Connections*. Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers, 1965. **ST2**.
6. Agerskov, H., *High-Strength Bolted Connections Subject to Prying*. Journal of the Structural Division-Asce, 1976. **102**(1): p. 161-175.
7. Kulak, G.L., J.W. Fisher, and J.H.A. Struik, *Guide to design criteria for bolted and riveted joints*. Second ed. 1987.
8. Struik, J.H.A. and J. de Back, *Tests on Bolted T-stubs with Respect to Bolted Beam-to-Column Connections*, 1969, Delft University of Technology.
9. Standard, N., *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner, Del 1-8, Knutepunkter og forbindelser*. 2009, Lysaker: Standard Norge. 134, 2 s. : ill.
10. Terjesen, G., *Utdrag fra NS-EN 1993-1-1:2005+NA:2008, NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009 Prosjektering av stålkonstruksjoner Tema: Skrueforbindelser*, 2011, Institutt for realfag og teknologi: Universitetet for miljø- og biovitenskap.
11. Terjesen, G., *Formler og tabeller*, 2011, Institutt for matematiske realfag og teknologi: Universitet for miljø- og bioteknologi.
12. Terjesen, G., *Skrueforbindelser - Repetisjon*, 2011, Institutt for Matematiske realfag og teknologi - IMT: Universitetet for Miljø- og Biovitenskap.

9.2 Internettreferanser

- i) Bilde av løpekran festet i vegg:

<https://www.maynards.com/media/components/ams/consignments/AAKQK106155/items/AAKQK460546/YVR2590.jpg>

- ii) Bilde av et utsnitt av en stålbro:

<http://bridgehunter.com/photos/21/81/218179%1-L.jpg>

- iii) Bilde av bjelkesammenkobling i et CAD-program:

<http://jpwriggers.com/images/Structural/Detailing/Conn.%20Pic.jpg>

iv) Bilde av en T-stykkekobling:

<http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0143974X08002812-gr3.jpg>

10 VEDLEGG

Fremdriftsplan

Veileder til oppsett av analyse i ANSYS WorkBench 14

Utdrag av rapport fra analyse i ANSYS WorkBench 14 med forspenning

Utdrag av rapport fra analyse i ANSYS WorkBench 14 uten forspenning

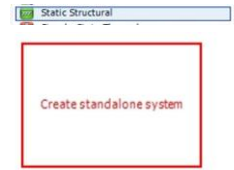
Fremdriftsplan – Utmattingsbelastning av bolter i strekkpåkjennte T-stykke forbindelser			
Uke	Dato	Emne	Arbeidsoppgave
22 – 30	01.06 – 29.07	Bakgrunnsmateriale og sommerferie	Lese artiklene utlevert med oppgaven + finn mer materiale
31	30.07 – 05.08	Fremdriftsplan	Utarbeide fremdriftsplan for oppgaven
32	06.08 – 12.08	Lage prosedyre	Lag prosedyre med utgangspunkt i amerikansk teori. «Norske» benevnelser – TMP301
33	13.08 – 19.08	Eksempler	Lag regneeksempler der prosedyren brukes (beskrevet under)
34	20.08 – 26.08	Eksempler forts.	-Eksempel med to bolter og kort flens -Eksempel med fire bolter og lenger flens
35	27.08 – 02.09	Beskriv prosedyren	Beskriv bakgrunnen for prosedyren og hvordan man har kommet frem til denne
36	03.09 – 09.09	Kontrollprosedyre	Lag prosedyre med utgangspunkt i «Astaneh».
37	10.09 – 16.09	Eksempel kontrollprosedyre	Lag regneeksempel for kontrollprosedyren
38	17.09 – 23.09	Oppgaveskriving	Skriv utfyllende om teorien
39	24.09 – 30.09	Oppgaveskriving	Skriv utfyllende om eksempler
40	01.10 – 07.10	Oppgaveskriving	Lag figurer til bruk i oppgaven
41	08.10 – 14.10	Oppgaveskriving	Lag figurer til bruk i oppgaven
42	15.10 – 21.10	Gjennomlesing av andre	
43	22.10 – 28.10	Oppgaveskriving	Sette sammen data og skrevet materiale til en ferdig masteroppgave
44	29.10 – 04.11	FEM-analyse	Bruk regneeksempelet fra prosedyren og kjør FEM-analyse vha. Ansys WorkBench
45	05.11 – 11.11	FEM-analyser forts.	Avslutt FEM-analysene og samle dataen
46	12.11 – 18.11	Sammenligne data	Sammenligne dataene fra prosedyren og FEM-analysen.
47	19.11 – 25.11	Sammenligne data forts.	Forklar eventuelle avvik og hvorfor de oppstår
48	26.11 – 02.12	Levere førsteutkast	
49	03.12 – 09.12	Finpuss av oppgave	
50	10.12 – 16.12	Levere masteroppgave	Endelig frist 15. desember

Veileder for ANSYS WorkBench 14

- Oppsett av forsøk av strekkpåkjent T-kobling med forspenning i boltene

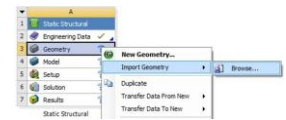
Åpne ANSYS WB 14

Klikk og dra «Static Structural» fra menyen til venstre til ruten «Create Standalone System»

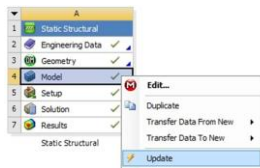


Høyreklikk «Geometry», velg «Import Geometry» og «Browse».

Finn plasseringen til CAD-filen med modellen og trykk «Open»

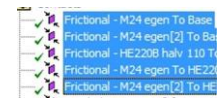


Høyreklikk «Model» og klikk «Update»



Utvid mappene «Connections» og «Contacts» ved å klikke på dem. Standard kontakttipe i ANSYS er at flater som er tett på hverandre er «Bonded» (sammenkoblet). Marker de kontaktene som står som «Bonded» og endre «Type» til «Frictional»

Legg også inn friksjonskoeffisienten under «Friction Coefficient»

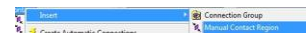


Definition	
Type	Frictional
Friction Coefficient	0.1

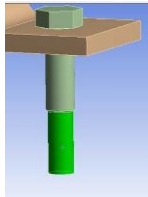
Høyreklikk «Setup» og klikk «Edit» - ANSYS Mechanical åpnes



Høyreklikk «Contacts», velg «Insert» og «Manual Contact Region»



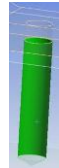
Marker overflaten til den gjengede delen av bolten.



Contact	Apply	Cancel
Target	No Selection	
Contact Bodies	No Selection	
Target Bodies	No Selection	

Klikk «Contact – No Selection» og «Apply»

Marker overflaten inne i bolthullet i basen.



Target	Apply	Cancel
Contact Bodies	M24 egen(2)	
Target Bodies	No Selection	

Klikk «Target – No Selection» og «Apply»

Klikk fanen «Pinball Region» og velg «Radius»

Update Stiffness	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
	Program Controlled
	Radius

Sett en radius som er større enn avstanden mellom gjenget del på bolten, og bolthullets overflate.

Gjenta Trinn 7 til 10 for alle boltene i konstruksjonen

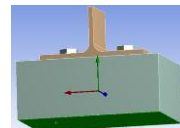
Høyreklikk på «Joints», velg «Insert» og «Joint»



Klikk fanen «Connection Type» og velg «Body-Ground»

Definition	Body-Body
Connection Type	Body-Body
Type	Body-Body
Suppressed	Body-Ground

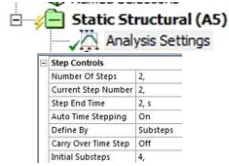
Marker undersiden av basen.



Klikk «Scope – No Selection» og «Apply»

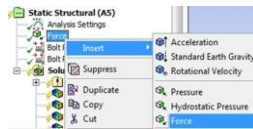
Scoping Method	Geometry Selection	Apply	Cancel
Scope			

Klikk «Analysis Settings»



Under «Step Controls» endres «Number Of Steps» til 2 og «Initial Substeps» til 4.

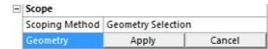
Høyreklikk «Force», velg «Insert» og «Force»



Marker overflaten der kraften virker på konstruksjonen.



Trykk «Apply» ved «Geometry»



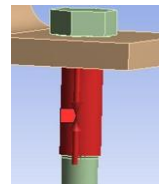
Klikk i ruten til høyre for «Magnitude» og sett inn kraften i Newton.



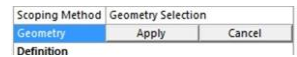
Under «Tabular Data» nede på høyre siden settes kraften inn i «Steps 2»

Tabular Data			
Steps	Time [s]	Force [N]	
1	0,	0,	
2	1,	0	
3	2,	2,e+005	
*			

Marker overflaten til den ugjengede delen av bolten.



Klikk «Apply» ved «Geometry»



Høyreklikk «Static Structural (A5)», velg «Insert» og «Bolt Pretension»



Under «Tabular Data» settes «Steps 1» til «Load» og forspenningskraften inn i «Preload»
«Steps 2» settes til «Lock»

Tabular Data				
Steps	Define By	Preload [N]	Adjustment [m]	
1	Load	1,58e+005	N/A	
2	Lock	N/A	N/A	

Gjenta trinn 20 og 21 for alle boltene i konstruksjonen

Høyreklikk «Solution (A6)», klikk
«Insert» og «Deformation»
Velg «Total»
Gjenta og velg «Directional»



Marker alle «Bolt Pretension»
under «Static Structural (A5)»



Klikk og dra de markerte «Bolt
Pretension» ned til «Solution (A6)»

Høyreklikk «Solution (A6)» og klikk «Solve»

Når analysen er ferdig ligger resultatene under «Solution»

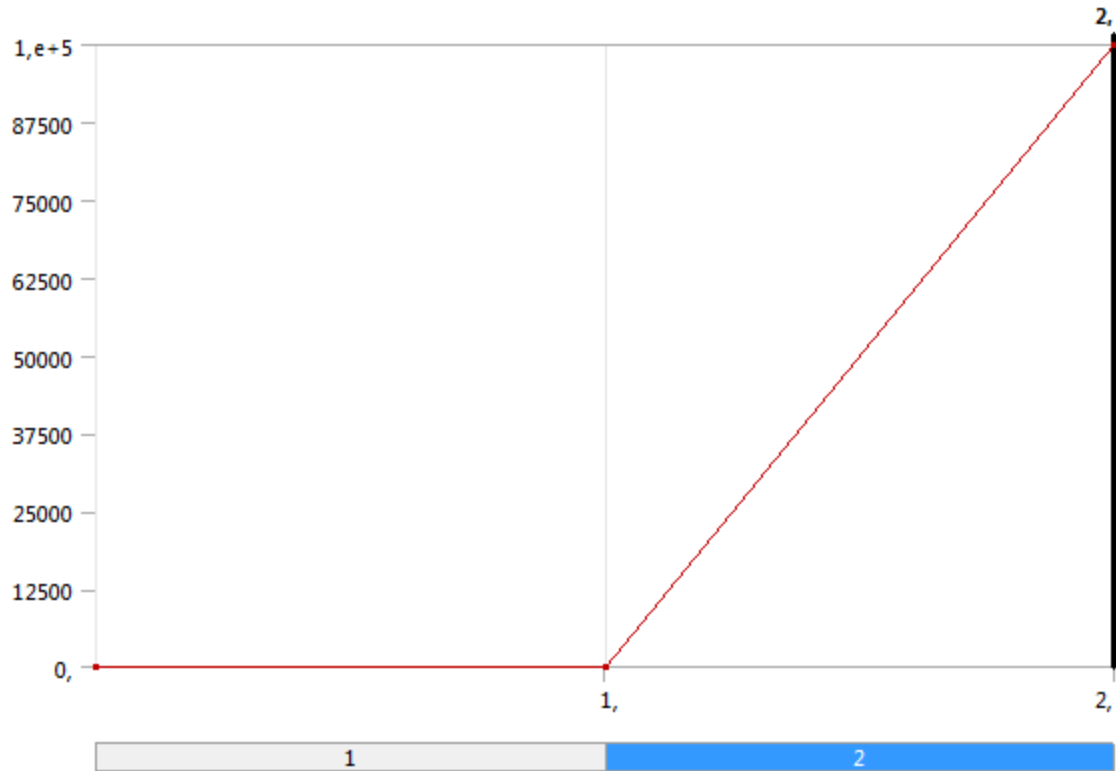


TABLE 21
Model (A4) > Static Structural (A5) > Force

Steps	Time [s]	Force [N]
1	0,	0,
	1,	
2	2,	1,e+005

TABLE 22
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension

Object Name	<i>Bolt Pretension</i>	<i>Bolt Pretension 2</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Face	
Definition		
Type	Bolt Pretension	
Suppressed	No	
Define By	Lock	

FIGURE 2
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension

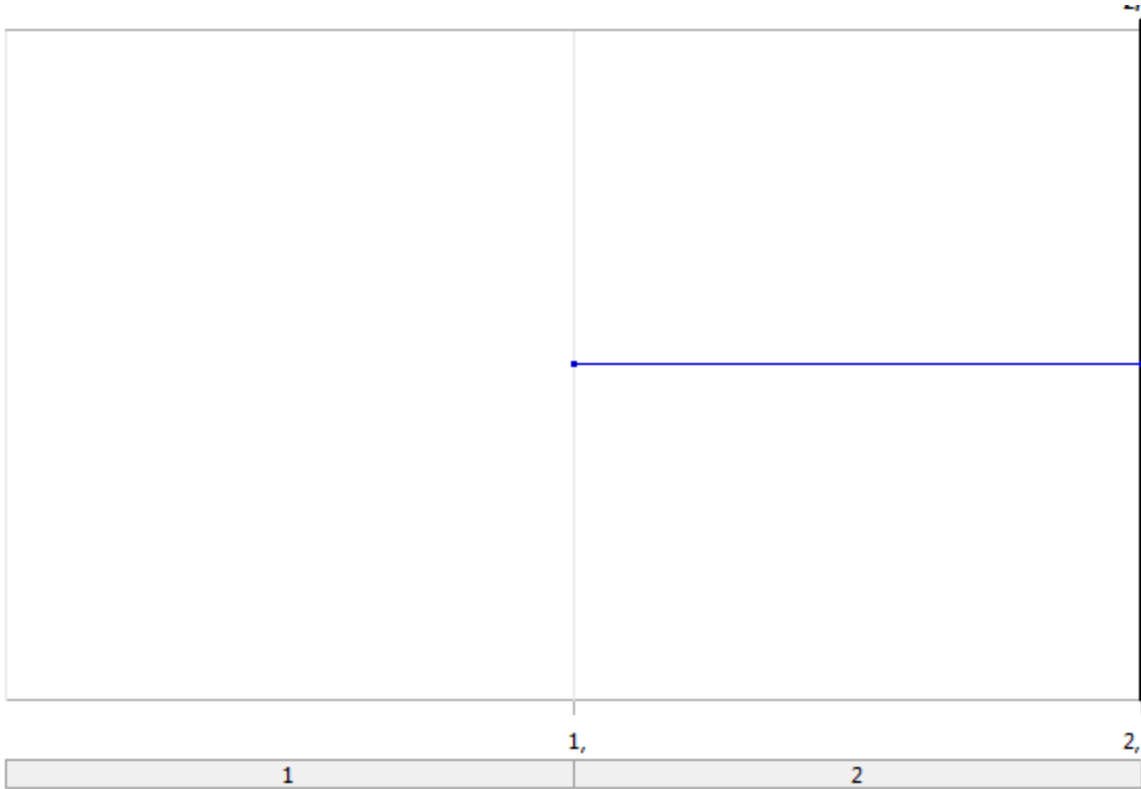


TABLE 23
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension

Steps	Define By	Preload [N]	Adjustment [mm]
1,	Load	79100	N/A
2,	Lock	N/A	

FIGURE 3
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension 2

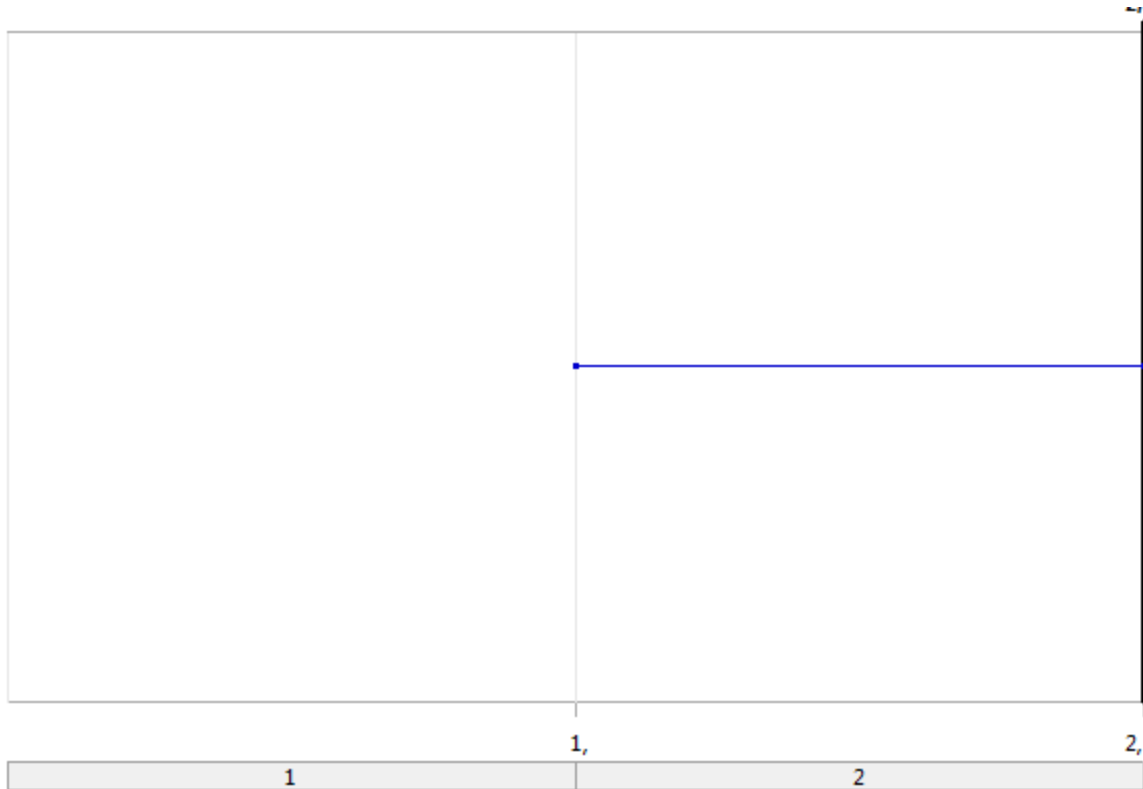


TABLE 24
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension 2

Steps	Define By	Preload [N]	Adjustment [mm]
1,	Load	79100	N/A
2,	Lock	N/A	

Solution (A6)

TABLE 25
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done

TABLE 26
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Force Convergence
Newton-Raphson Residuals	0

Update Interval	2,5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

FIGURE 4
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

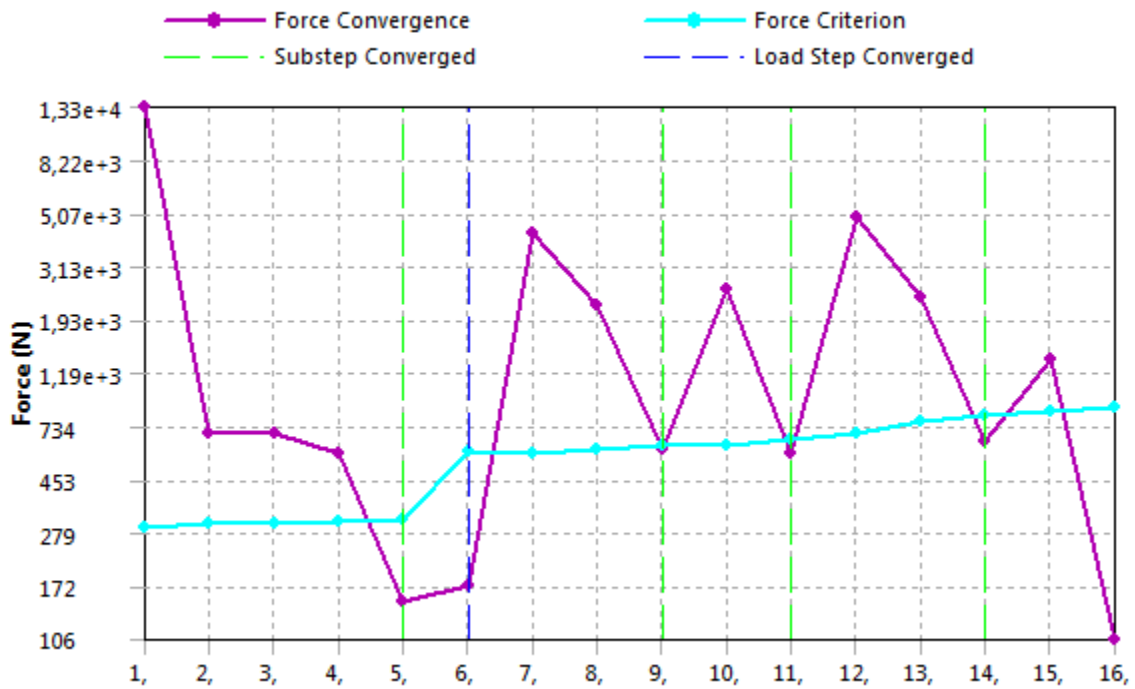


FIGURE 5
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

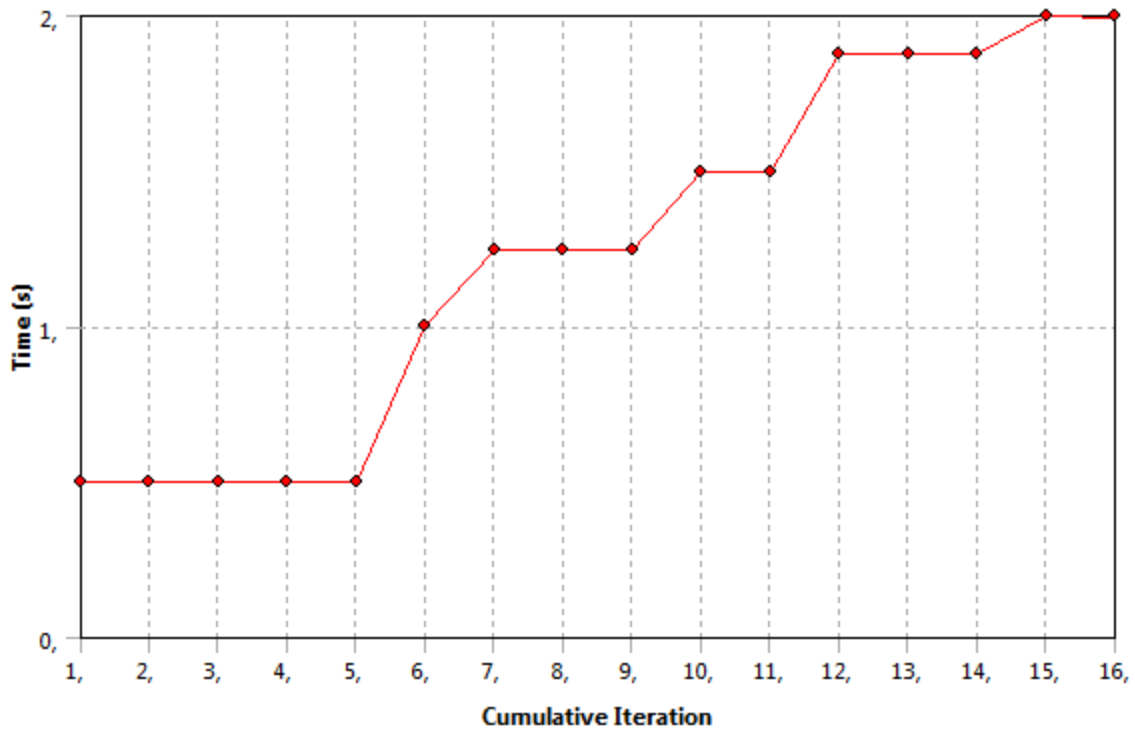


TABLE 27
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Result Charts

Object Name	<i>Directional Deformation</i>	<i>Directional Deformation 2</i>	<i>Number Contacting</i>	<i>Pressure</i>
State	Solved			
Scope				
Geometry	1 Vertex			
Contact Region			Frictional - HE220B halv 110 To Base	
Definition				
Type	Directional Deformation		Number Contacting	Pressure
Orientation	X Axis	Y Axis		
Suppressed	No			
Results				
Minimum	-3,1624e-004 mm	1,6874e-003 mm	75,	49,658 MPa
Maximum	7,6113e-004 mm	0,20897 mm	103,	139,02 MPa

FIGURE 6
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Directional Deformation

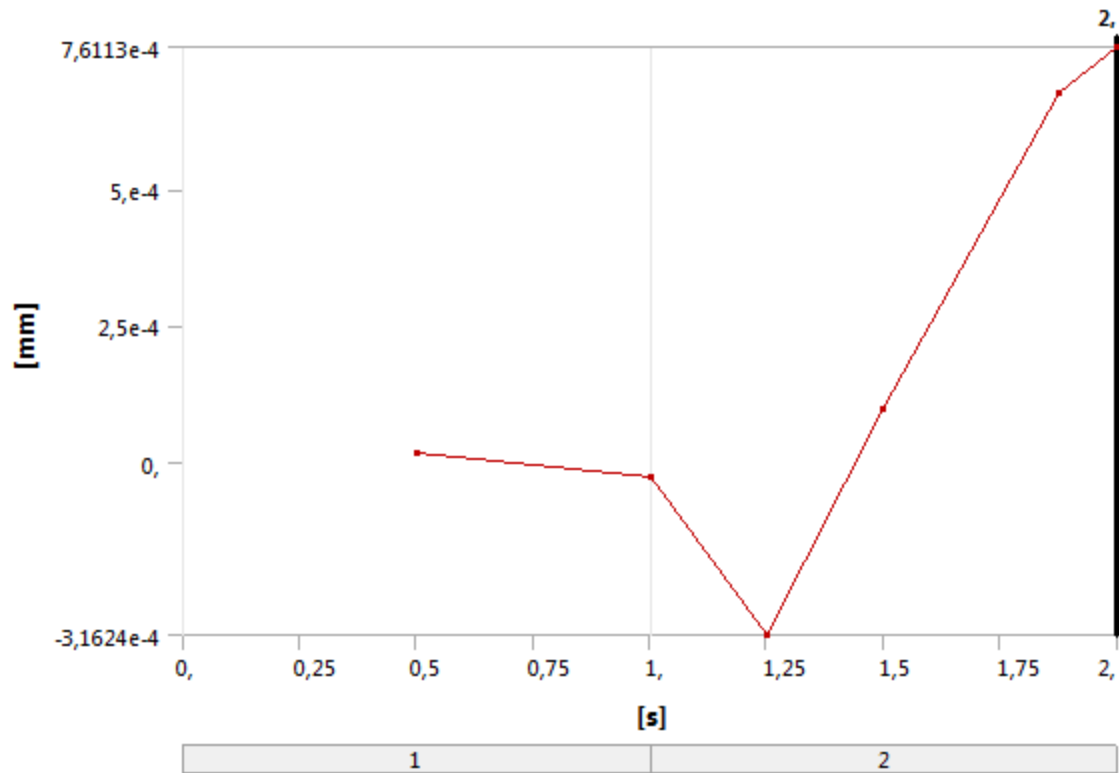


FIGURE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Directional Deformation 2

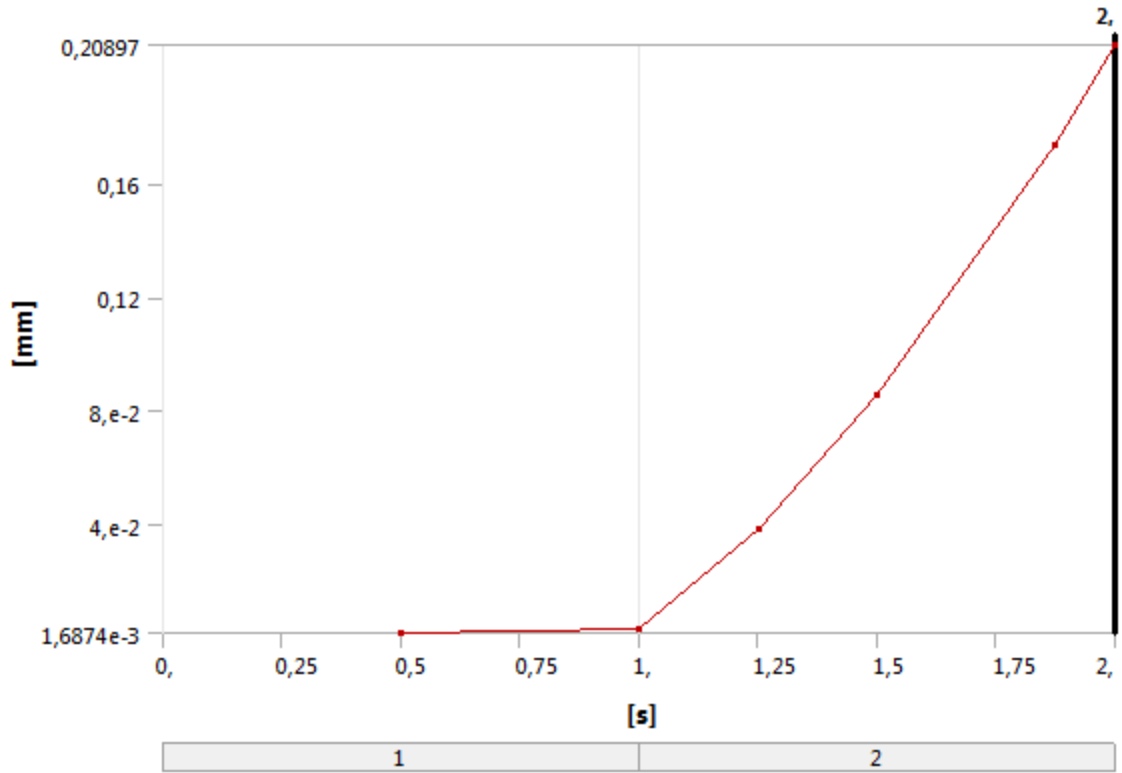


FIGURE 8

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Number Contacting

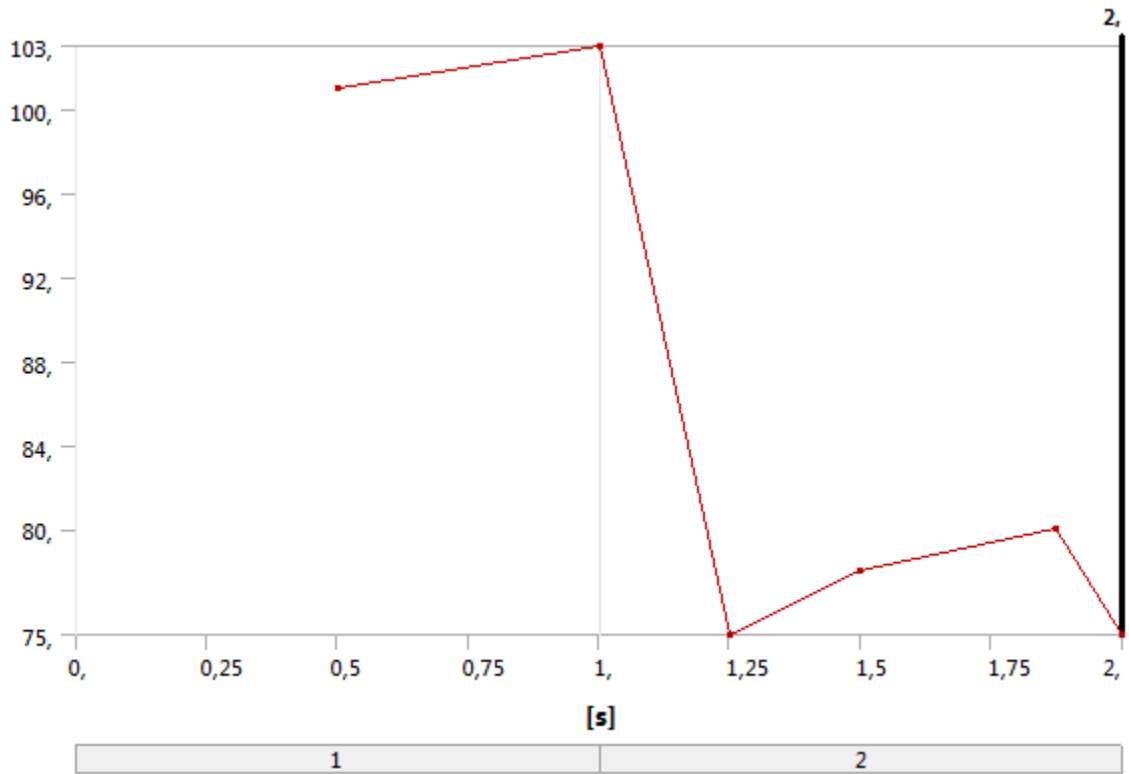


FIGURE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Pressure

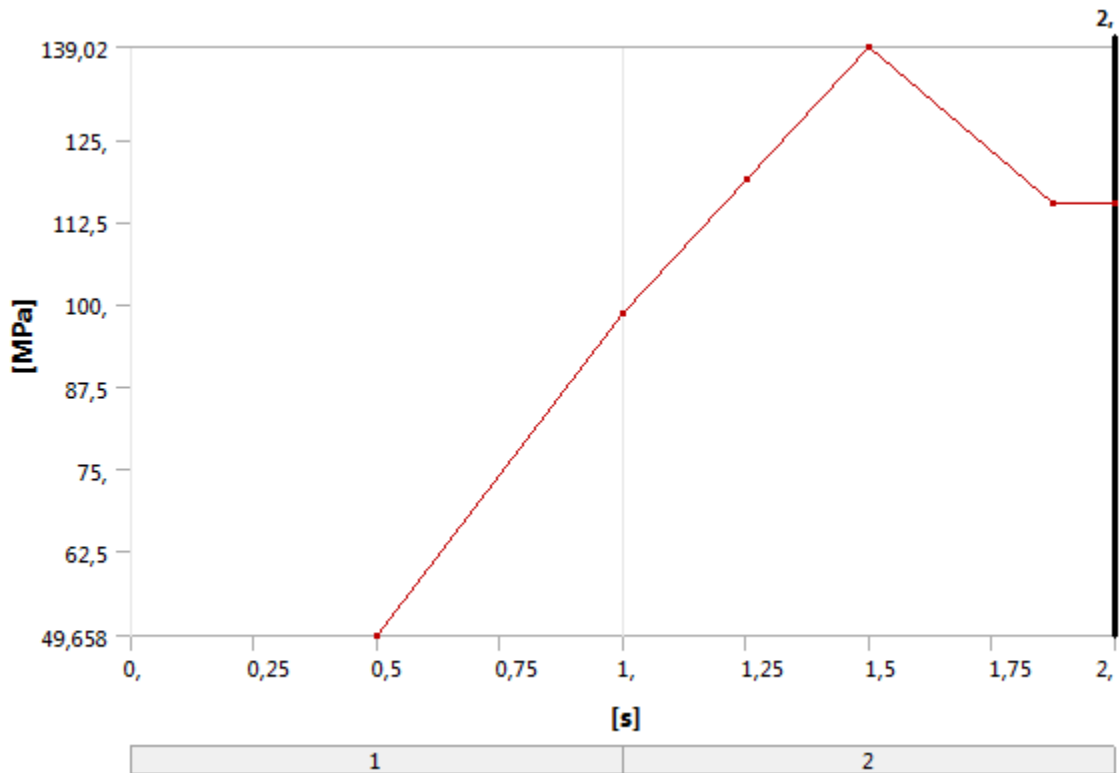


TABLE 28
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	Total Deformation	Total Deformation 2	Directional Deformation	Total Deformation 3	Equivalent Elastic Strain
State	Solved				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	All Bodies	1 Body		2 Bodies	All Bodies
Definition					
Type	Total Deformation		Directional Deformation	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain
By	Time				
Display Time	2, s	Last			0,5 s
Calculate Time History	Yes				
Identifier					
Suppressed	No				
Orientation			Y Axis		
Coordinate System			Global Coordinate System		
Results					
Minimum	0, mm	5,9354e-004 mm	-1,5047e-002 mm	2,8892e-003 mm	3,7217e-008 mm/mm
Maximum	0,20916 mm		0,20897 mm	5,9362e-002	3,084e-003

				mm	mm/mm
Minimum Occurs On	Base			M24 egen	HE220B halv 110
Maximum Occurs On	HE220B halv 110			M24 egen[2]	
Minimum Value Over Time					
Minimum	0, mm	4,604e-005 mm	-1,512e-002 mm	1,2483e-003 mm	3,7217e-008 mm/mm
Maximum	0, mm	5,9354e-004 mm	-7,0758e-003 mm	2,8892e-003 mm	7,3738e-006 mm/mm
Maximum Value Over Time					
Minimum	2,6111e-002 mm	7,5536e-003 mm	5,7798e-003 mm	2,6111e-002 mm	3,084e-003 mm/mm
Maximum	0,20916 mm		0,20897 mm	5,9362e-002 mm	8,4431e-003 mm/mm
Information					
Time	2, s				0,5 s
Load Step	2				1
Substep	4				1
Iteration Number	16				5
Integration Point Results					
Display Option					Averaged

FIGURE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

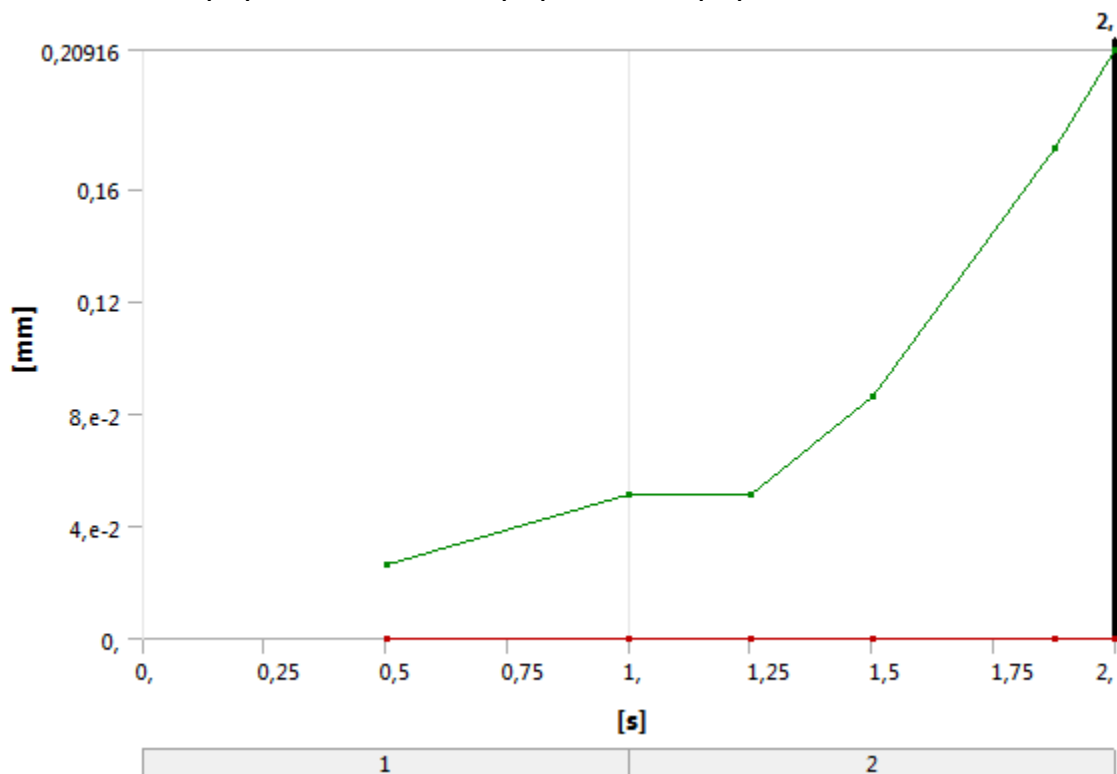


TABLE 29

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	0,	2,6111e-002
1,		5,0932e-002
1,25		5,1076e-002
1,5		8,6012e-002
1,875		0,1742
2,		0,20916

FIGURE 11

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 2

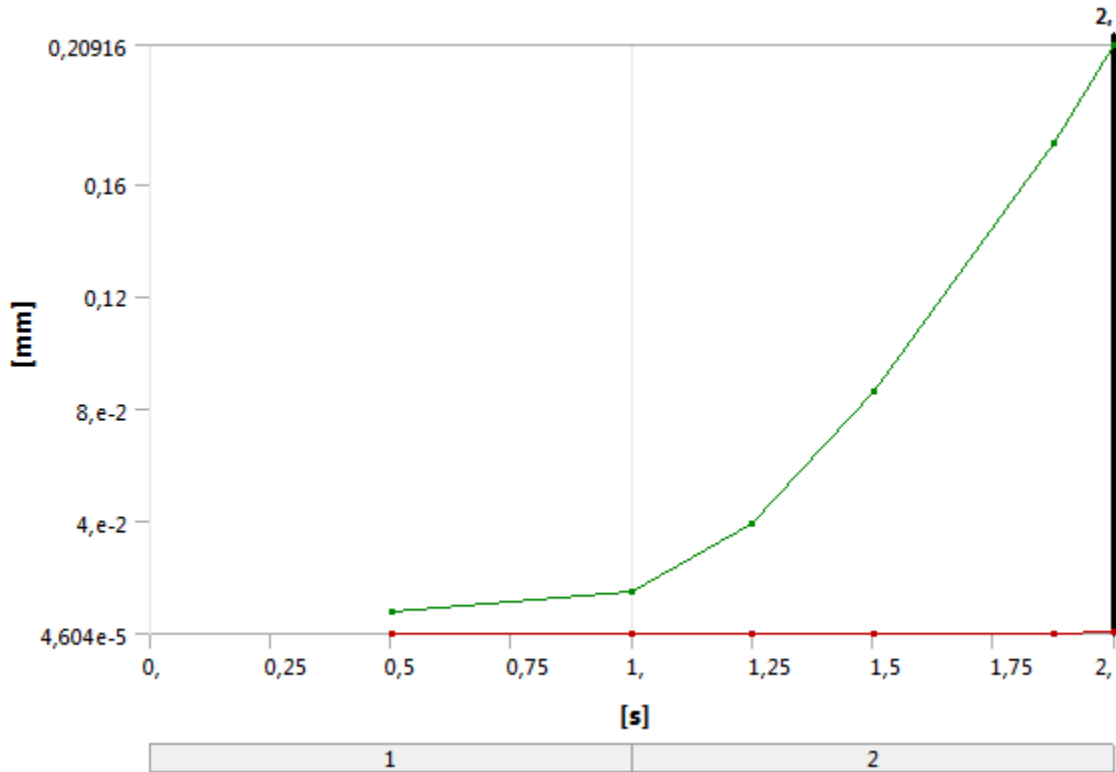


TABLE 30

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 2

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	9,7986e-005	7,5536e-003
1,	2,6954e-004	1,4882e-002
1,25	1,1327e-004	3,8963e-002
1,5	4,604e-005	8,6012e-002
1,875	3,9961e-004	0,1742
2,	5,9354e-004	0,20916

FIGURE 12

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Directional Deformation

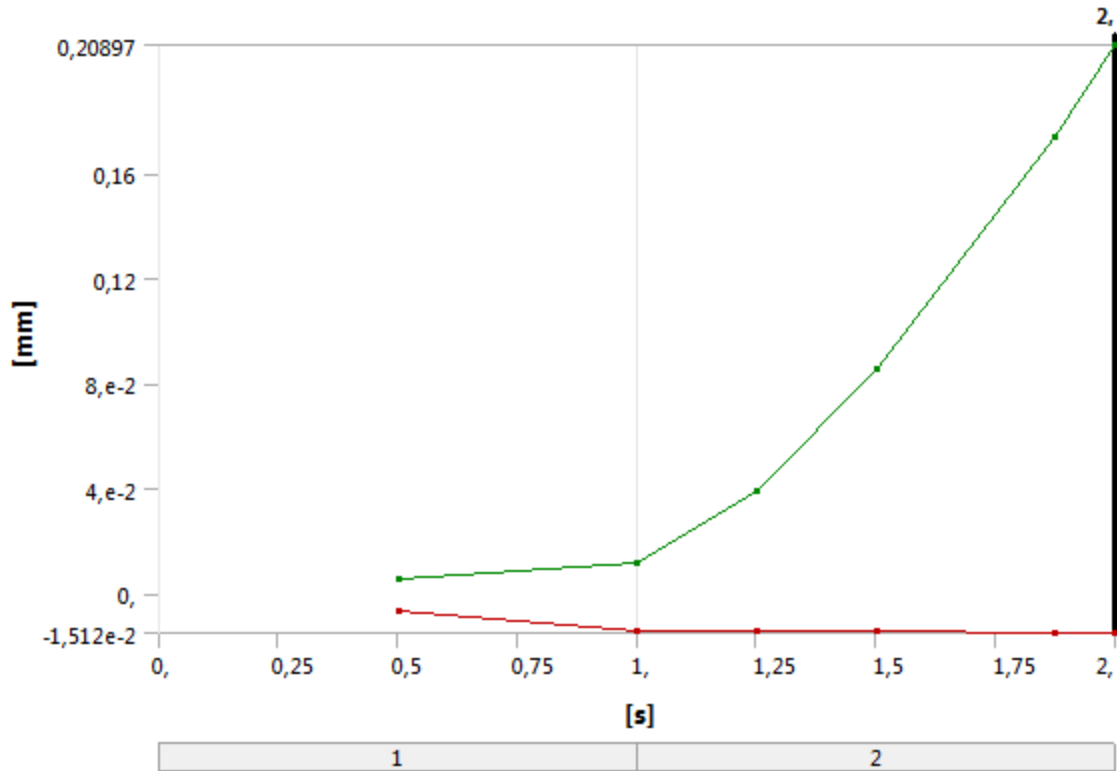


TABLE 31
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Directional Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	-7,0758e-003	5,7798e-003
1,	-1,3998e-002	1,1486e-002
1,25	-1,4679e-002	3,8881e-002
1,5	-1,4464e-002	8,5863e-002
1,875	-1,512e-002	0,174
2,	-1,5047e-002	0,20897

FIGURE 13
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 3

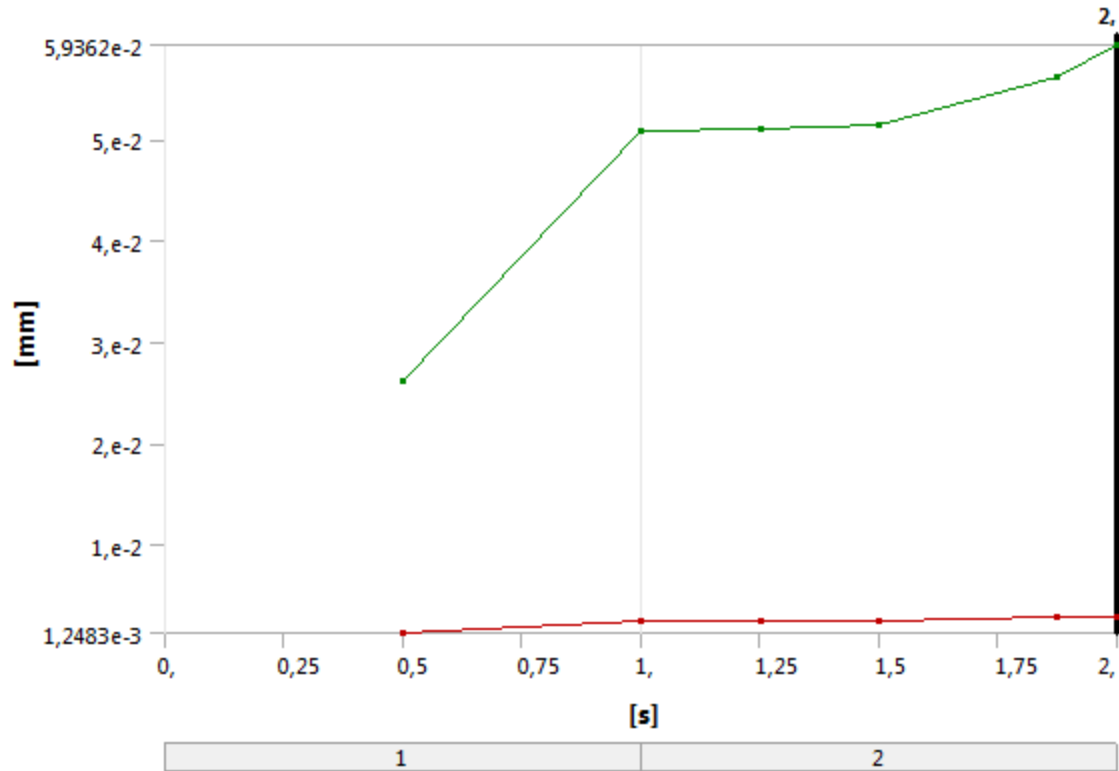


TABLE 32
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 3

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	1,2483e-03	2,6111e-02
1,	2,4967e-03	5,0932e-02
1,25	2,4916e-03	5,1076e-02
1,5	2,5222e-03	5,1389e-02
1,875	2,7441e-03	5,6222e-02
2,	2,8892e-03	5,9362e-02

FIGURE 14
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain

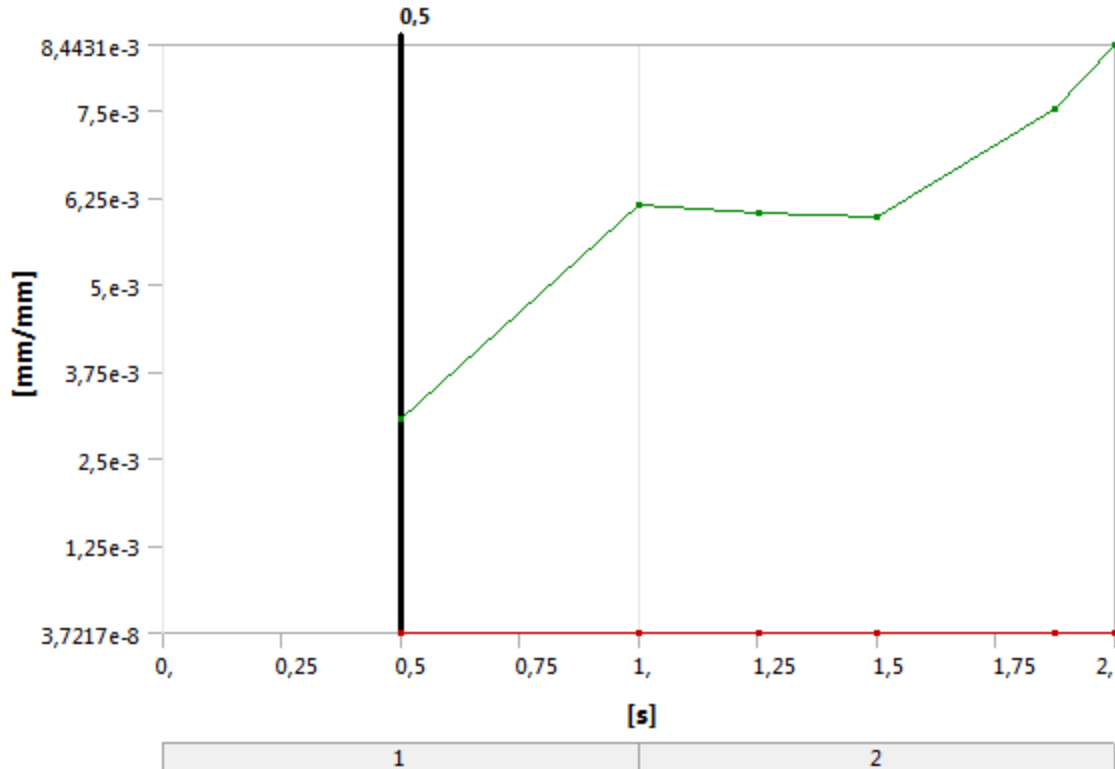


TABLE 33

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]
0,5	3,7217e-008	3,084e-003
1,	7,5011e-008	6,1378e-003
1,25	8,6592e-007	6,0203e-003
1,5	1,714e-006	5,9672e-003
1,875	5,4397e-006	7,5195e-003
2,	7,3738e-006	8,4431e-003

TABLE 34

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tools

Object Name	Contact Tool
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Worksheet

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool

Name	Contact Side
Frictional - HE220B halv 110 To Base	Both

TABLE 35

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Results

Object Name	Status	Pressure	Gap
State	Solved		

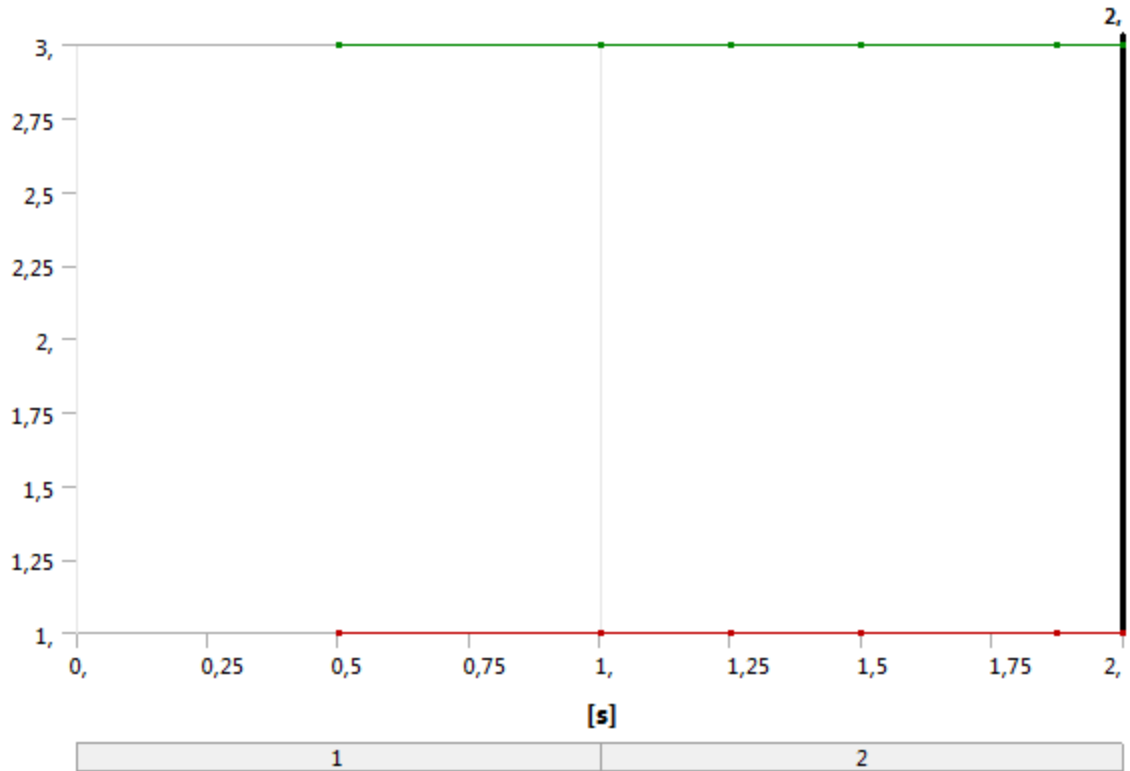


TABLE 36
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Status

Time [s]	Minimum	Maximum
0,5	1,	3,
1,		
1,25		
1,5		
1,875		
2,		

FIGURE 16
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Pressure

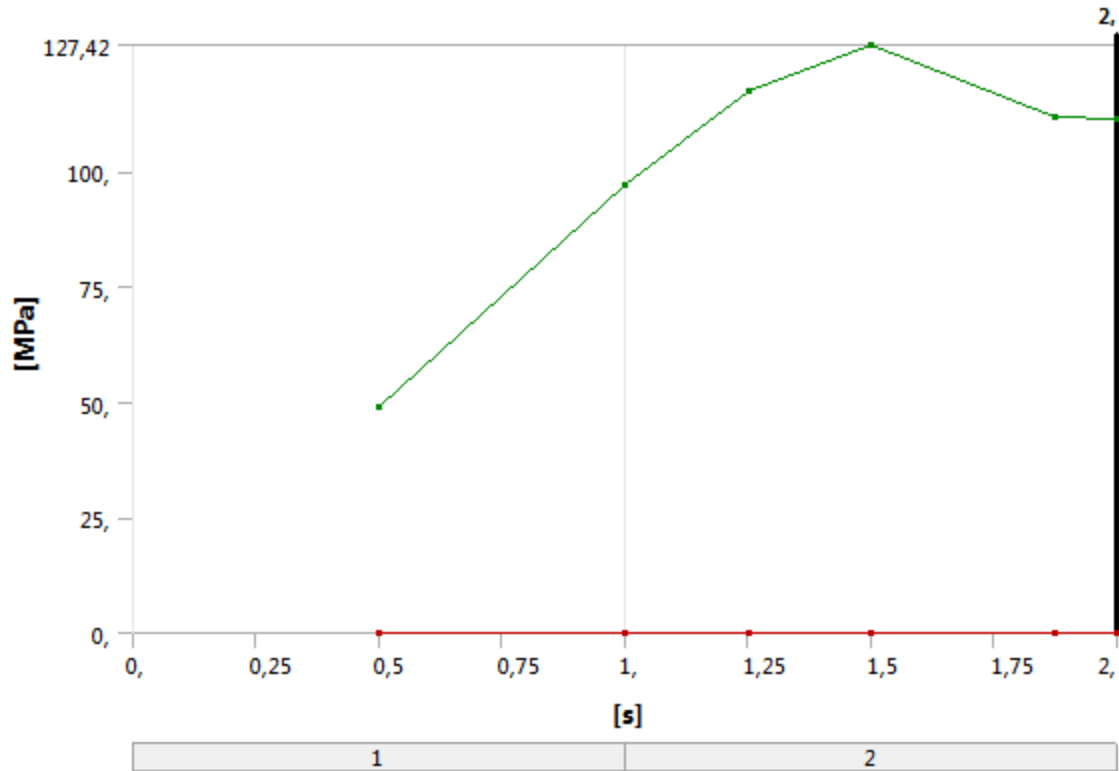


TABLE 37

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Pressure

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
0,5	0,	49,014
1,		97,123
1,25		117,61
1,5		127,42
1,875		111,71
2,		111,3

FIGURE 17

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Gap

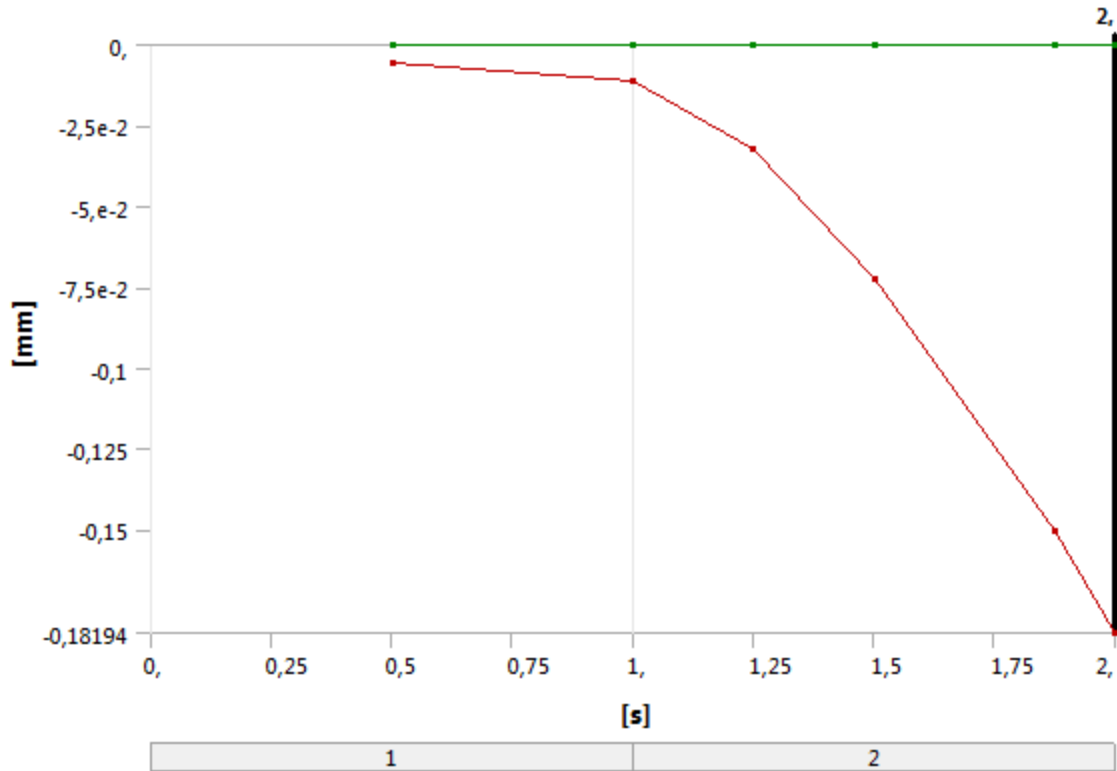


TABLE 38
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Gap

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	-5,4556e-003	0,
1,	-1,0839e-002	
1,25	-3,2379e-002	
1,5	-7,2274e-002	
1,875	-0,15008	
2,	-0,18194	

TABLE 39
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Probes

Object Name	<i>Bolt Pretension</i>	<i>Bolt Pretension 2</i>
State	Solved	
Definition		
Type	Bolt Pretension	
Boundary Condition	Bolt Pretension	Bolt Pretension 2
Suppressed	No	
Options		
Display Time	2, s	End Time
Results		
Adjustment	0,10154 mm	0,10169 mm
Working Load	91358 N	91538 N
Minimum Value Over Time		
Adjustment	5,1459e-002 mm	5,1493e-002 mm

Working Load	0, N	
Maximum Value Over Time		
Adjustment	0,10154 mm	0,10169 mm
Working Load	91358 N	91538 N
Information		
Time	2, s	
Load Step	2	
Substep	4	
Iteration Number	16	

FIGURE 18
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Bolt Pretension

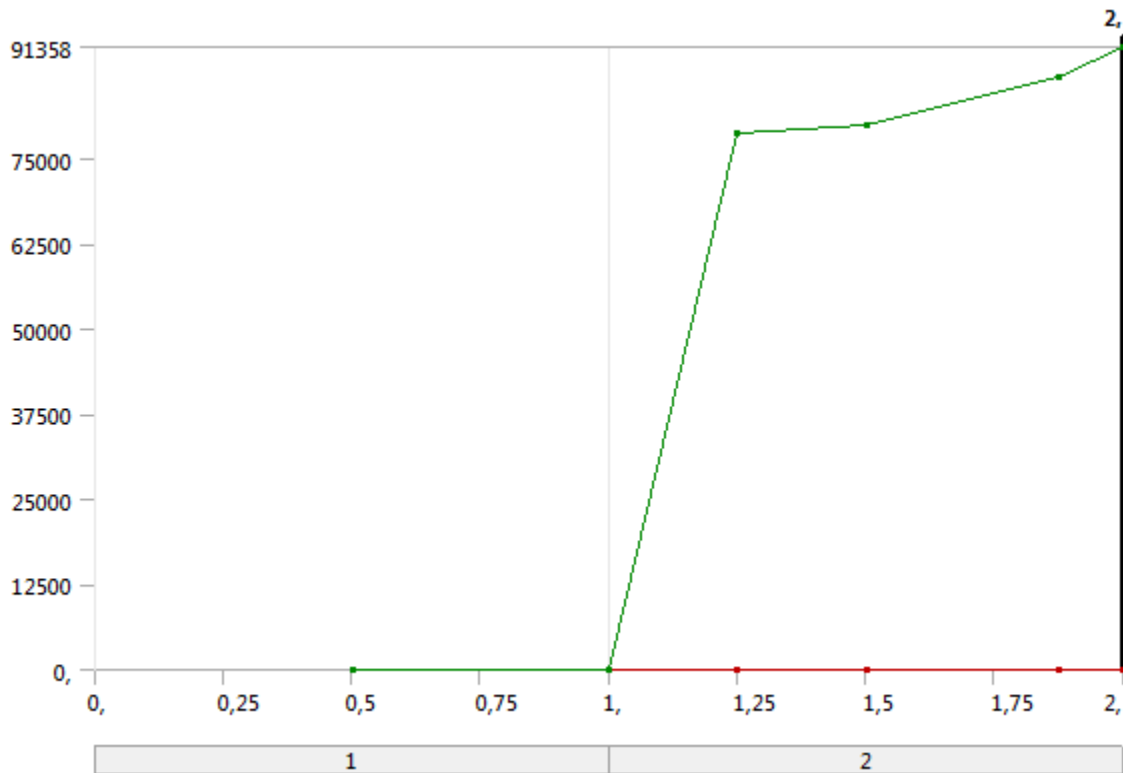
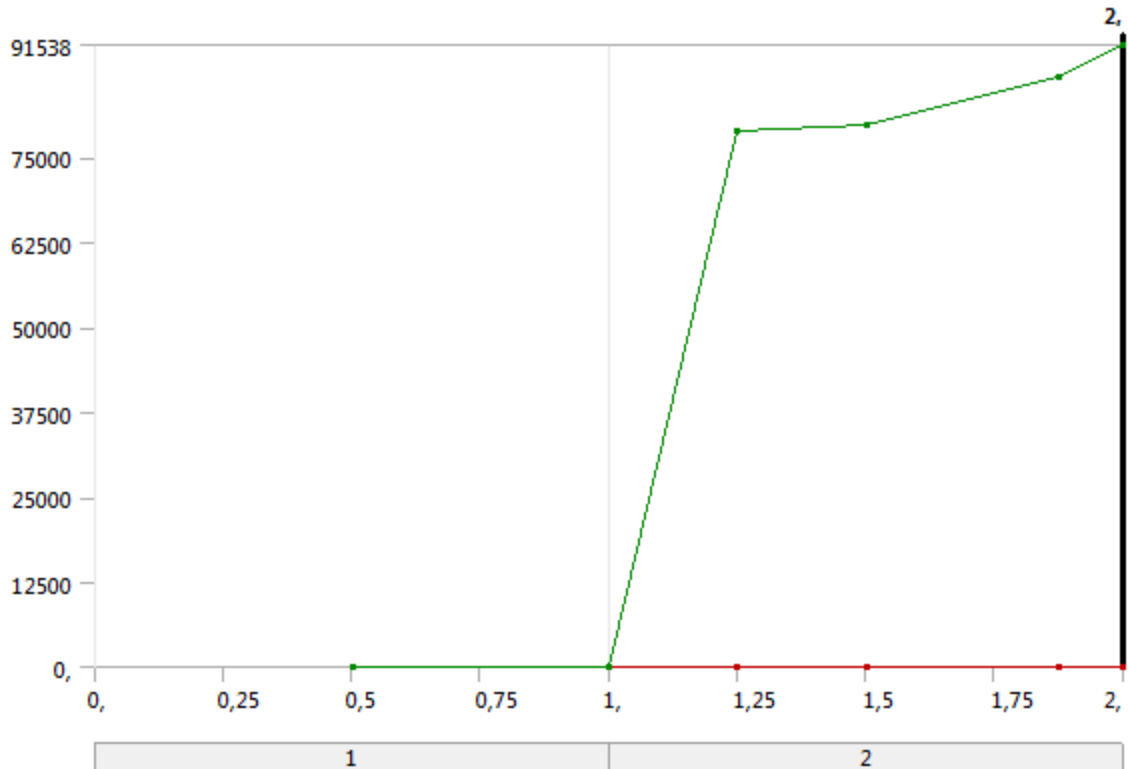


FIGURE 19
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Bolt Pretension 2



Material Data

Structural Steel 2

TABLE 40
Structural Steel 2 > Constants

Density	7,85e-006 kg mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	4,34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	6,05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1,7e-004 ohm mm

TABLE 41
Structural Steel 2 > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa	0,
-----------------------------------	----

TABLE 42
Structural Steel 2 > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa	640,
--------------------------------	------

TABLE 43
Structural Steel 2 > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa	
----------------------------	--

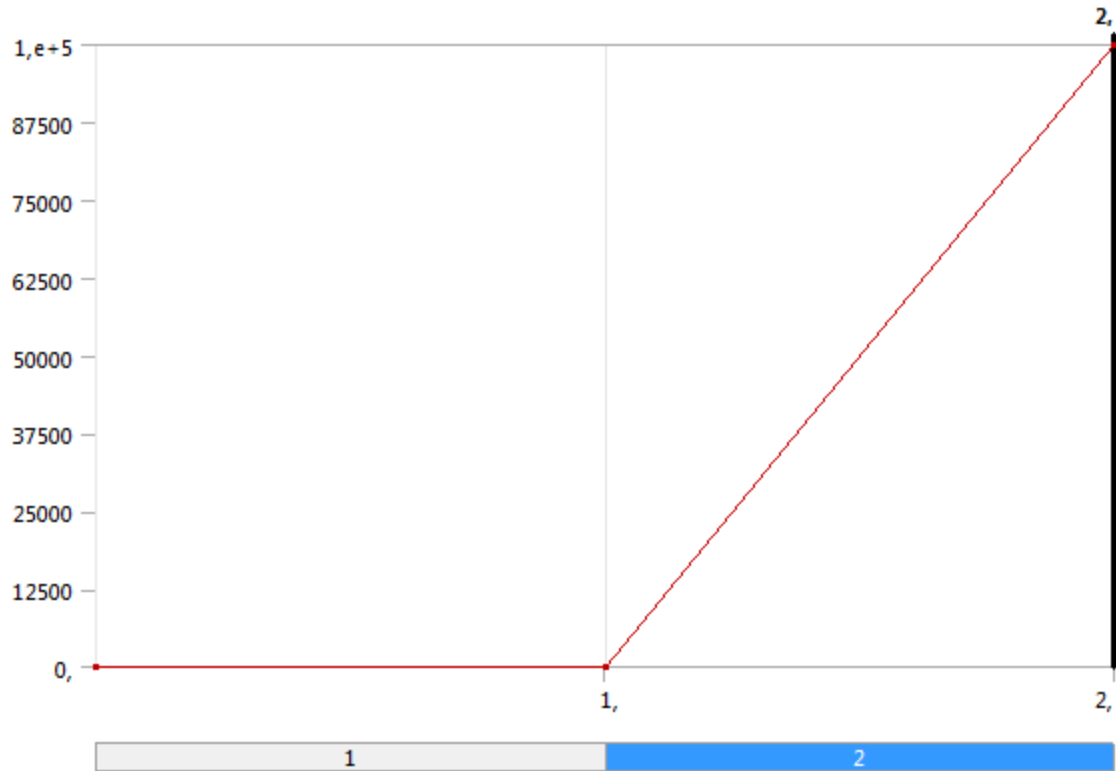


TABLE 21
Model (A4) > Static Structural (A5) > Force

Steps	Time [s]	Force [N]
1	0,	0,
	1,	
2	2,	1,e+005

TABLE 22
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension

Object Name	<i>Bolt Pretension</i>	<i>Bolt Pretension 2</i>
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Face	
Definition		
Type	Bolt Pretension	
Suppressed	No	
Define By	Lock	

FIGURE 2
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension

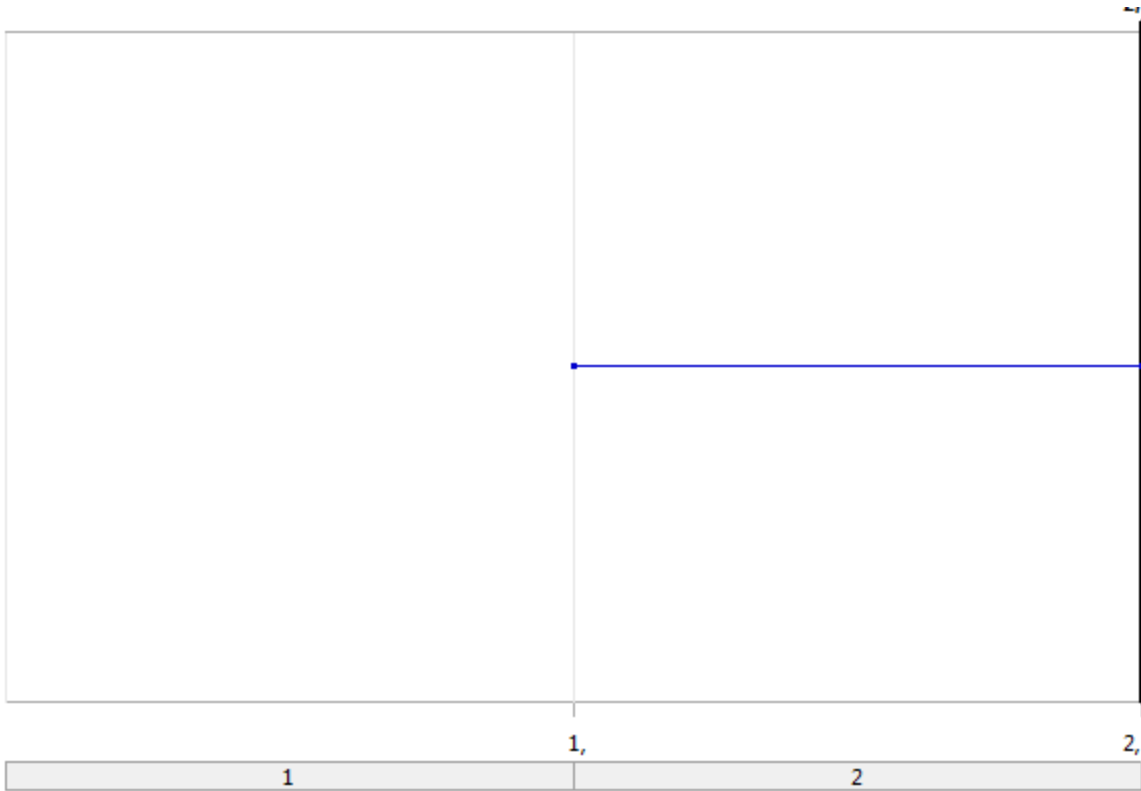


TABLE 23
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension

Steps	Define By	Preload [N]	Adjustment [mm]
1,	Load	0,	N/A
2,	Lock	N/A	

FIGURE 3
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension 2

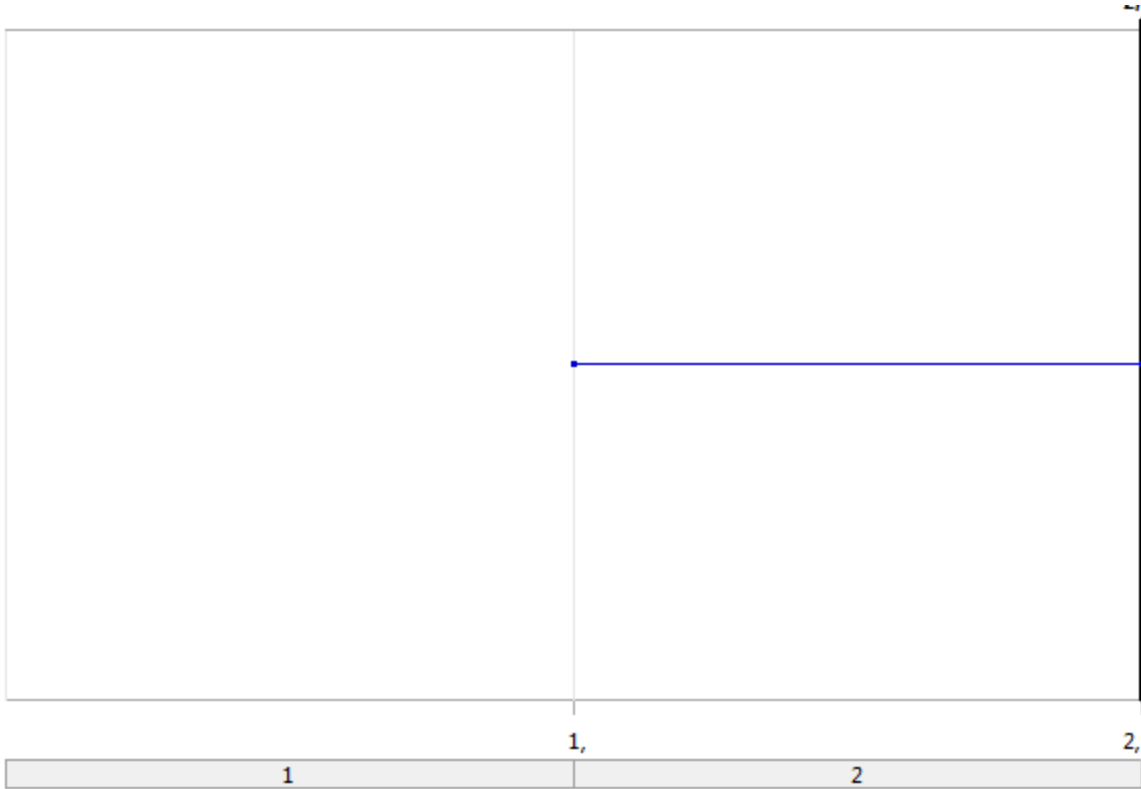


TABLE 24
Model (A4) > Static Structural (A5) > Bolt Pretension 2

Steps	Define By	Preload [N]	Adjustment [mm]
1,	Load	0,	N/A
2,	Lock	N/A	

Solution (A6)

TABLE 25
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done

TABLE 26
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Force Convergence
Newton-Raphson Residuals	0

Update Interval	2,5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

FIGURE 4
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

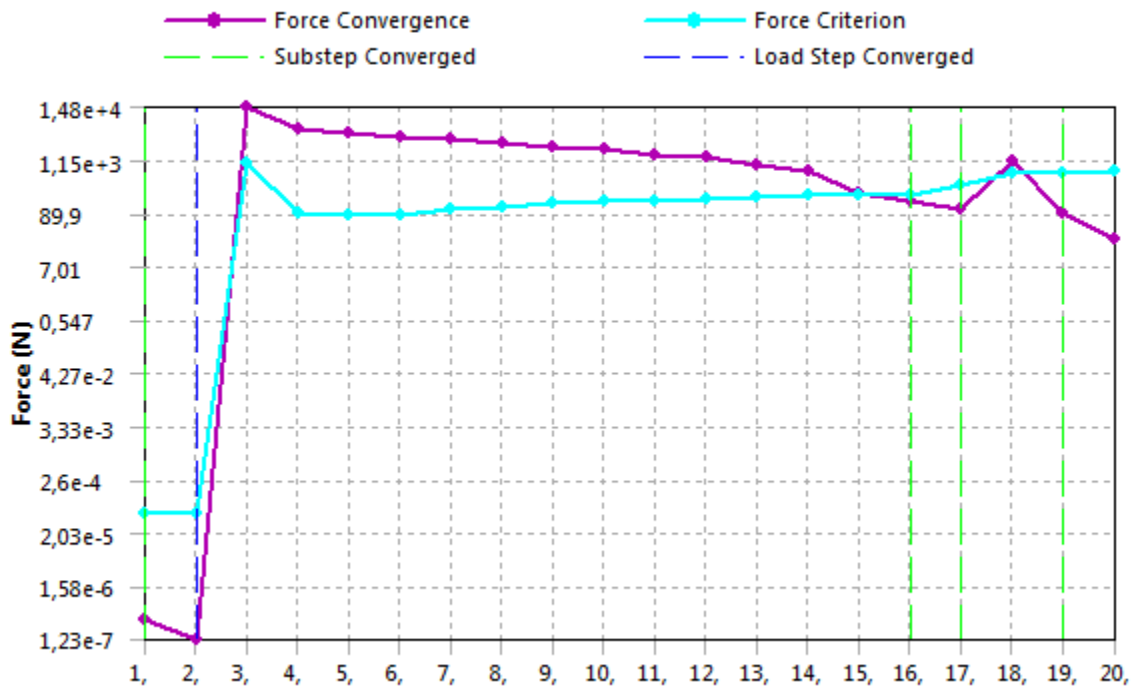


FIGURE 5
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information

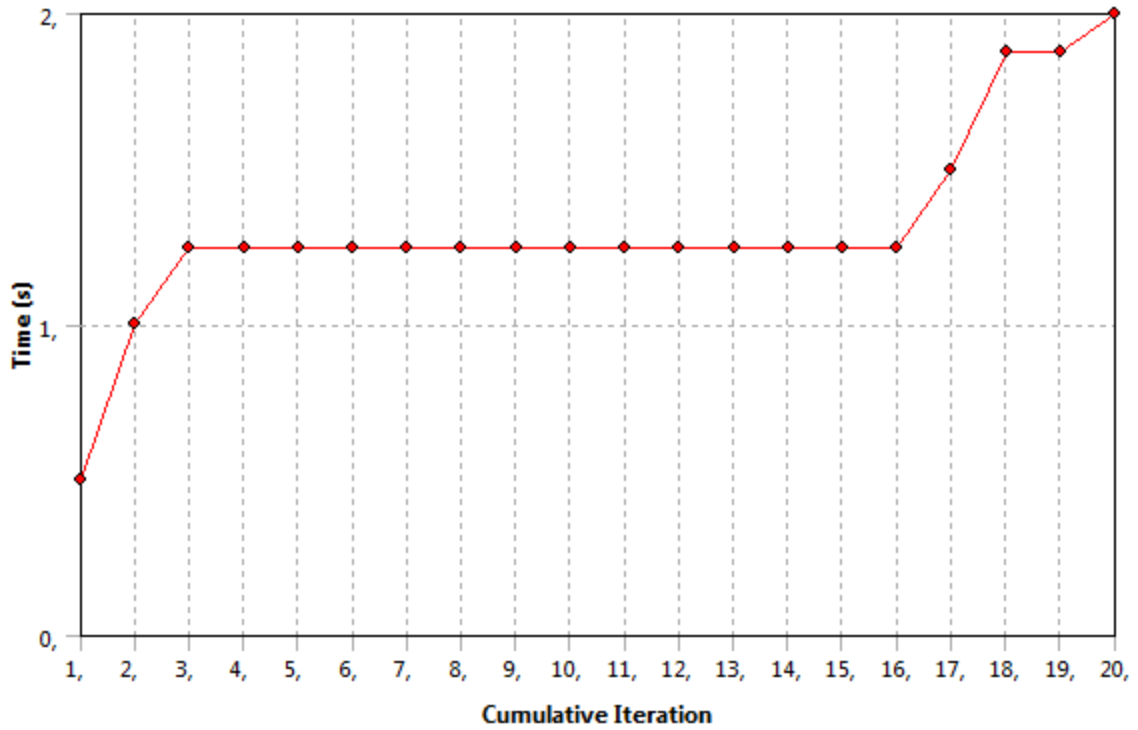


TABLE 27
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Result Charts

Object Name	<i>Directional Deformation</i>	<i>Directional Deformation 2</i>	<i>Number Contacting</i>	<i>Pressure</i>
State	Solved			
Scope				
Geometry	1 Vertex			
Contact Region			Frictional - HE220B halv 110 To Base	
Definition				
Type	Directional Deformation		Number Contacting	Pressure
Orientation	X Axis	Y Axis		
Suppressed	No			
Results				
Minimum	-2,029e-004 mm	9,2678e-015 mm	9,	4,8761e-010 MPa
Maximum	7,4629e-004 mm	0,31749 mm	420,	90,395 MPa

FIGURE 6
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Directional Deformation

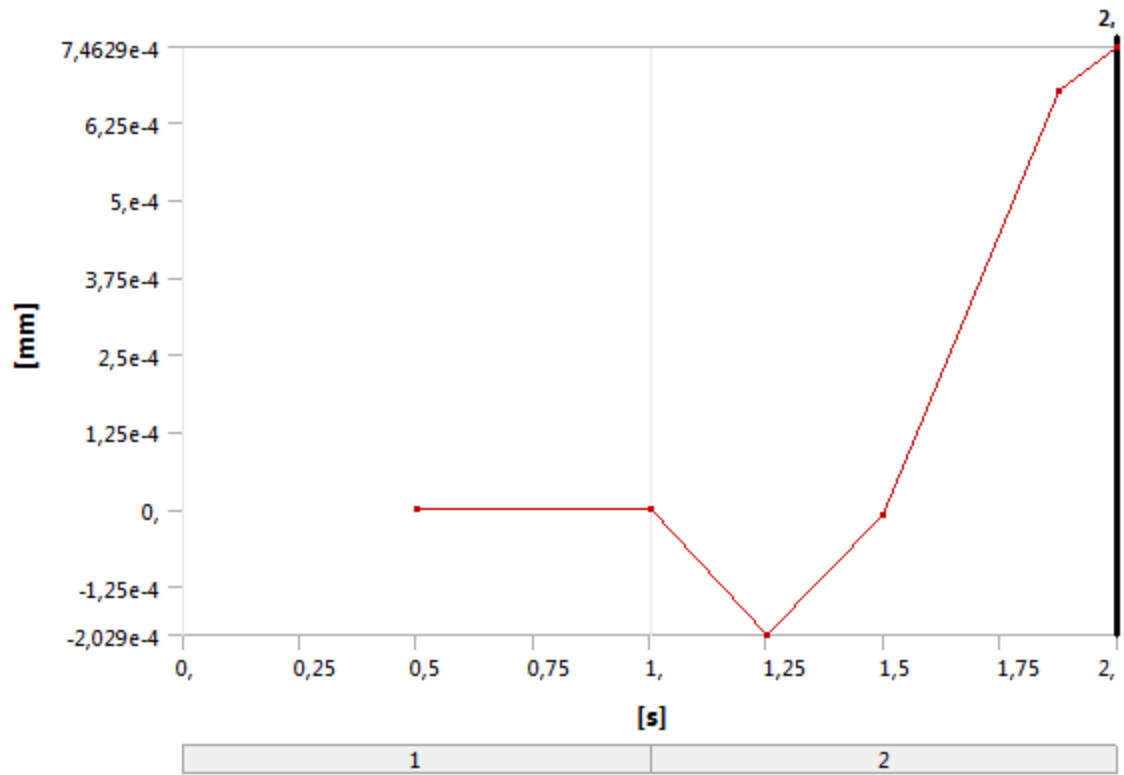


FIGURE 7
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Directional Deformation 2

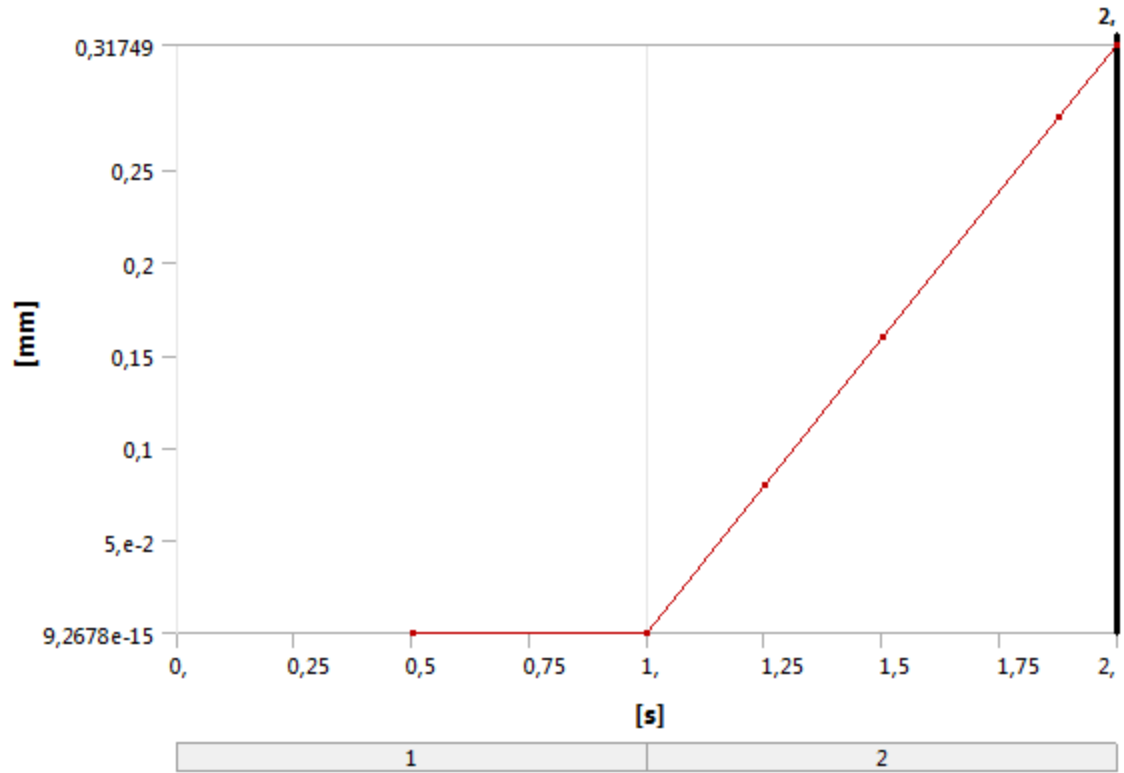


FIGURE 8

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Number Contacting

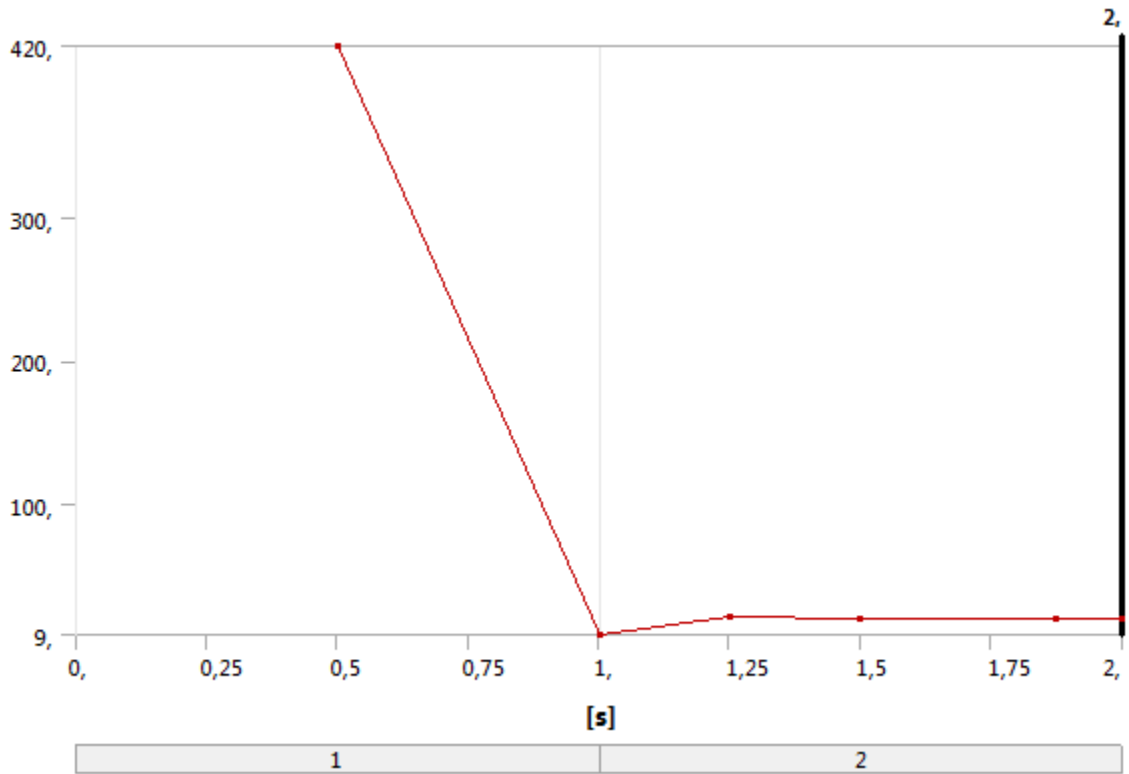


FIGURE 9
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Pressure

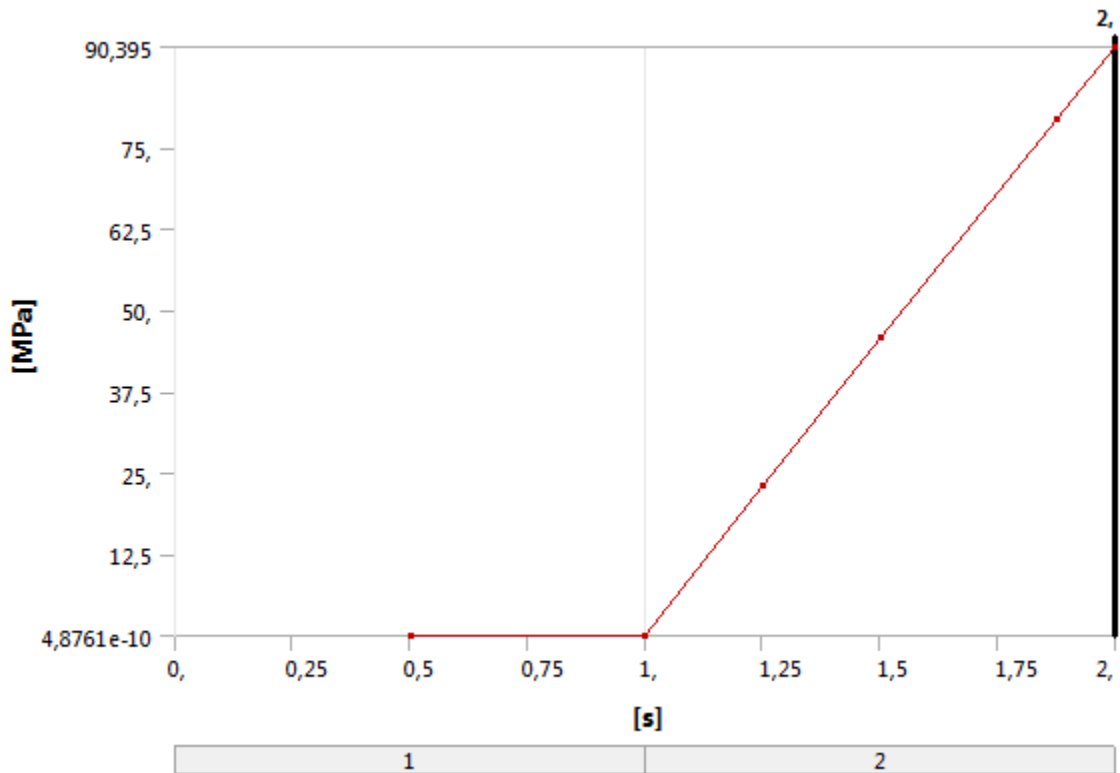


TABLE 28
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	Total Deformation	Total Deformation 2	Directional Deformation	Total Deformation 3	Equivalent Elastic Strain
State	Solved				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	All Bodies	1 Body		2 Bodies	All Bodies
Definition					
Type	Total Deformation		Directional Deformation	Total Deformation	Equivalent Elastic Strain
By	Time				
Display Time	2, s	Last			0,5 s
Calculate Time History	Yes				
Identifier					
Suppressed	No				
Orientation			Y Axis		
Coordinate System			Global Coordinate System		
Results					
Minimum	0, mm	4,4273e-004 mm	-5,3634e-003 mm	1,9534e-003 mm	1,2574e-020 mm/mm
Maximum	0,31762 mm		0,31749 mm	0,15442 mm	1,5819e-014

					mm/mm
Minimum Occurs On	Base			M24 egen	HE220B halv 110
Maximum Occurs On	HE220B halv 110			M24 egen	M24 egen[2]
Minimum Value Over Time					
Minimum	0, mm	4,2197e-015 mm	-5,3634e-003 mm	1,9553e-016 mm	1,2574e-020 mm/mm
Maximum	0, mm	4,4273e-004 mm	2,3865e-014 mm	1,9534e-003 mm	9,9643e-006 mm/mm
Maximum Value Over Time					
Minimum	2,7167e-014 mm	1,6779e-014 mm	1,6504e-014 mm	2,7167e-014 mm	2,7803e-015 mm/mm
Maximum	0,31762 mm		0,31749 mm	0,15442 mm	8,5662e-003 mm/mm
Information					
Time	2, s				0,5 s
Load Step	2				1
Substep	4				1
Iteration Number	20				1
Integration Point Results					
Display Option					Averaged

FIGURE 10
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

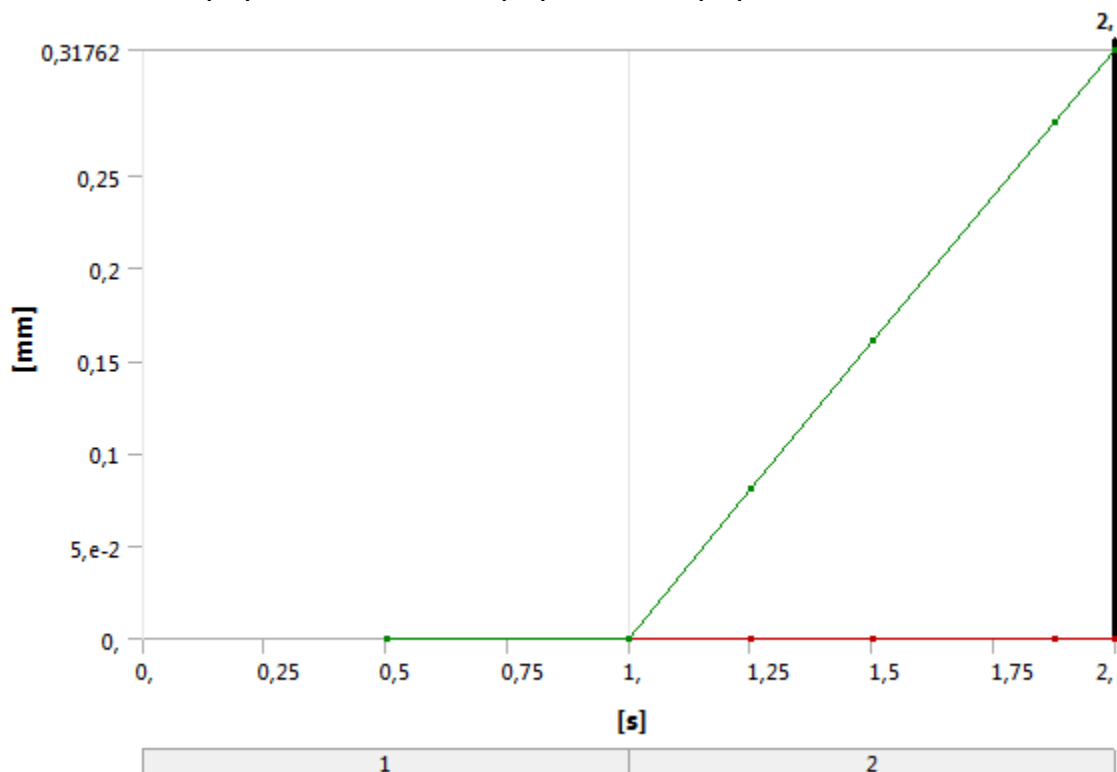


TABLE 29

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	0,	2,7167e-014
1,		3,3102e-014
1,25		8,0825e-002
1,5		0,16056
1,875		0,27819
2,		0,31762

FIGURE 11

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 2

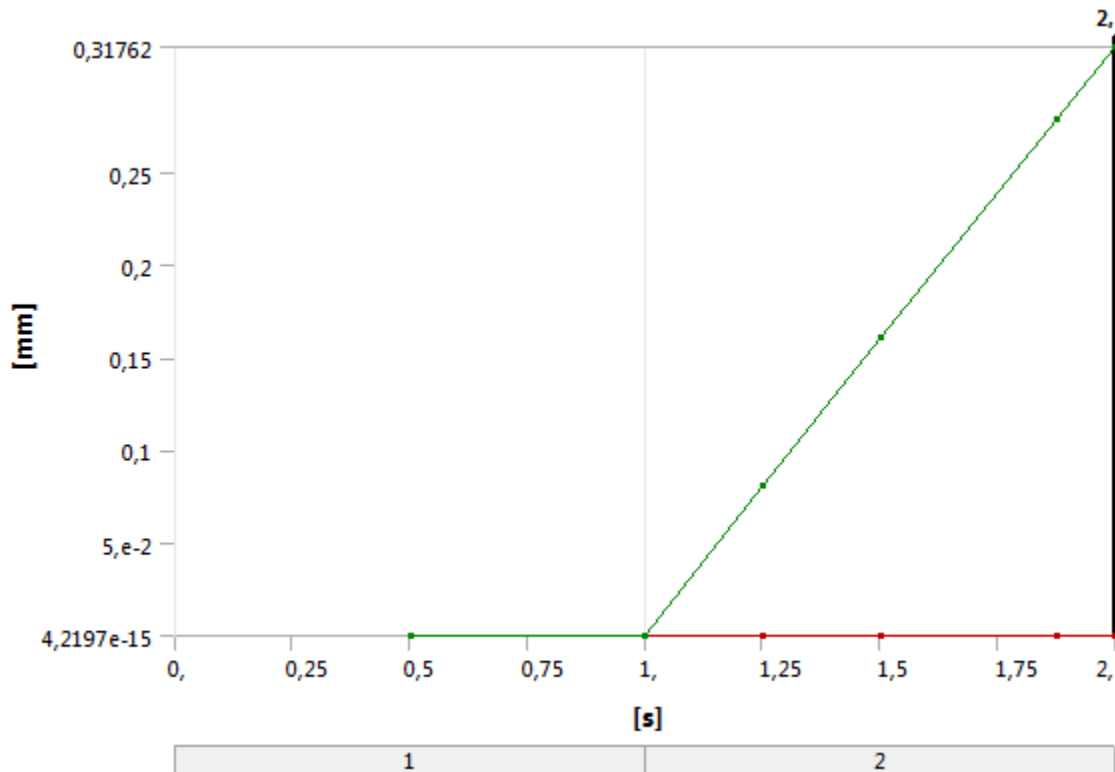


TABLE 30

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 2

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	4,2197e-015	1,6779e-014
1,	2,387e-014	3,0801e-014
1,25	2,0161e-004	8,0825e-002
1,5	3,21e-004	0,16056
1,875	3,7571e-004	0,27819
2,	4,4273e-004	0,31762

FIGURE 12

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Directional Deformation

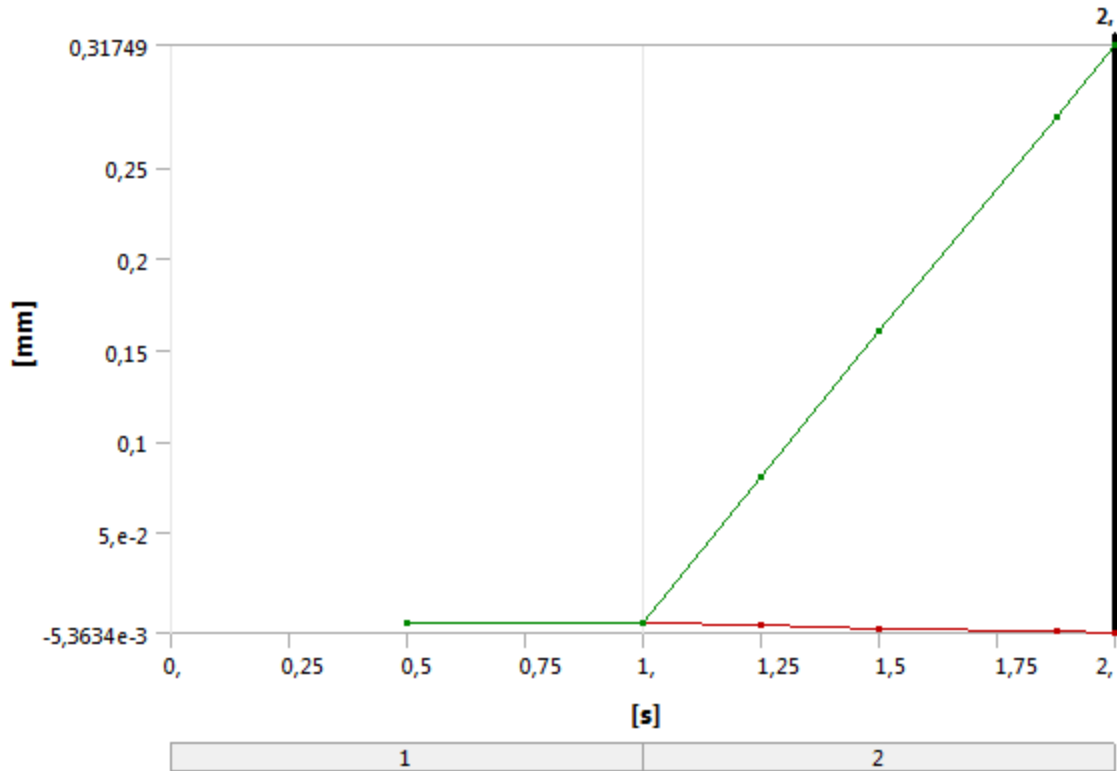


TABLE 31
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Directional Deformation

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	4,1313e-015	1,6504e-014
1,	2,3865e-014	3,0748e-014
1,25	-1,3638e-003	8,076e-002
1,5	-2,7291e-003	0,16049
1,875	-4,7048e-003	0,27808
2,	-5,3634e-003	0,31749

FIGURE 13
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 3

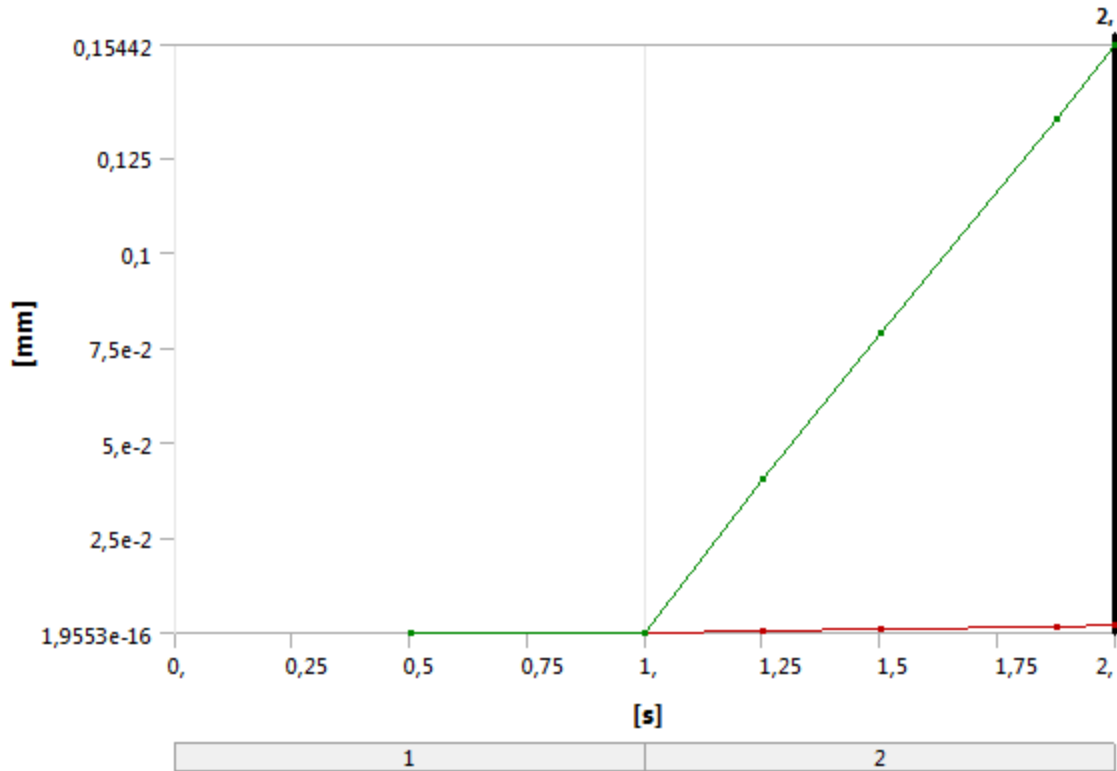


TABLE 32
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 3

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	5,3456e-016	2,7167e-014
1,	1,9553e-016	3,3102e-014
1,25	4,887e-004	4,052e-002
1,5	9,7644e-004	7,8868e-002
1,875	1,7092e-003	0,1349
2,	1,9534e-003	0,15442

FIGURE 14
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain

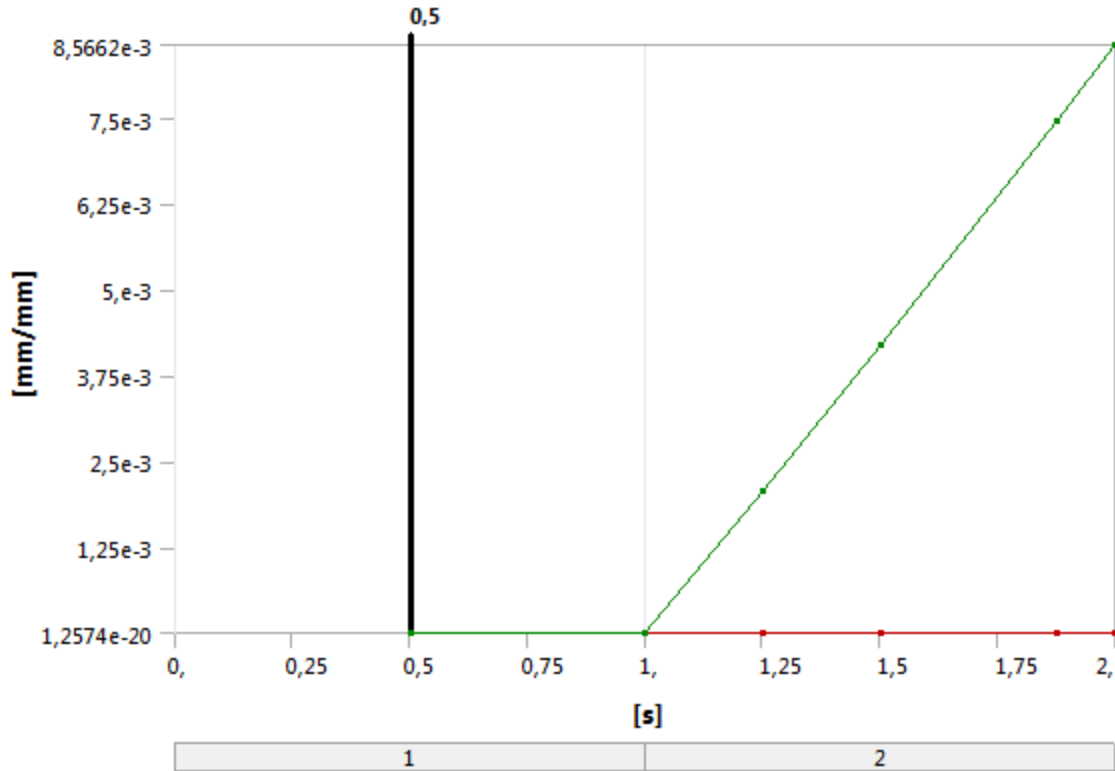


TABLE 33

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Elastic Strain

Time [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]
0,5	1,2574e-020	1,5819e-014
1,	2,7612e-020	2,7803e-015
1,25	2,455e-006	2,0765e-003
1,5	4,9329e-006	4,1999e-003
1,875	8,7054e-006	7,4643e-003
2,	9,9643e-006	8,5662e-003

TABLE 34

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tools

Object Name	Contact Tool
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Worksheet

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool

Name	Contact Side
Frictional - HE220B halv 110 To Base	Both

TABLE 35

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Results

Object Name	Status	Pressure	Gap
State	Solved		

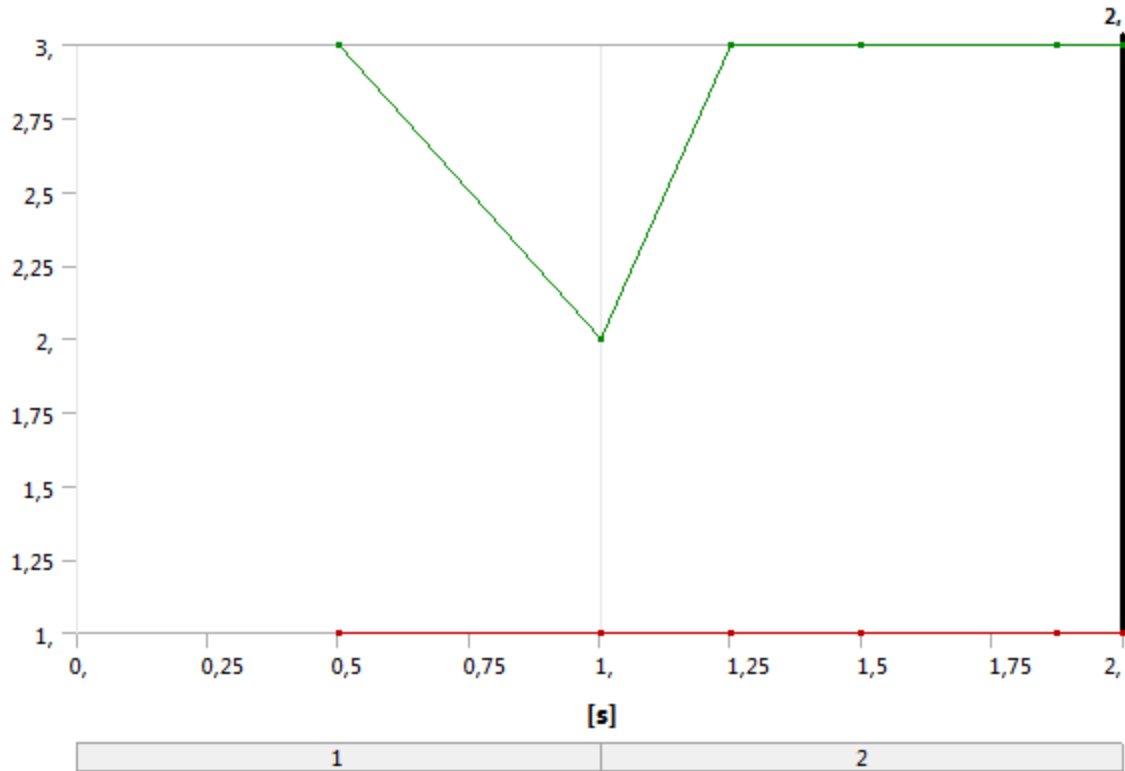


TABLE 36
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Status

Time [s]	Minimum	Maximum
0,5	1,	3,
1,		2,
1,25		3,
1,5		
1,875		
2,		

FIGURE 16
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Pressure

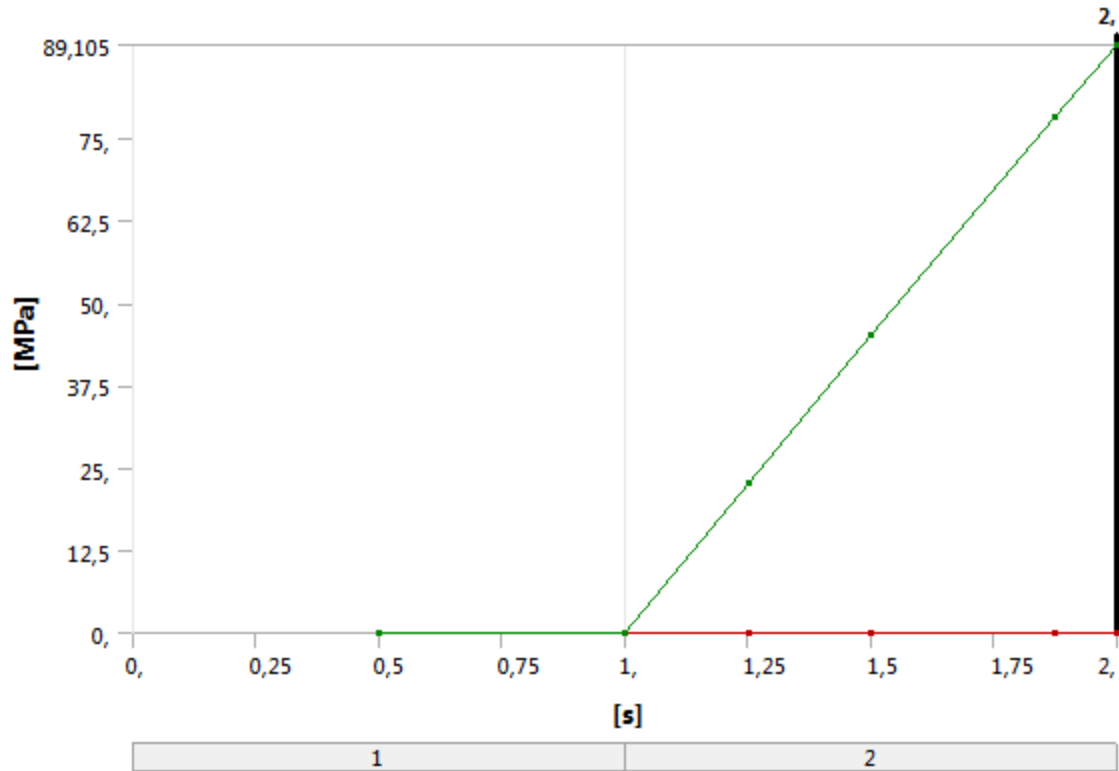


TABLE 37

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Pressure

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
0,5	0,	4,8761e-010
1,		2,4381e-010
1,25		22,607
1,5		45,205
1,875		78,112
2,		89,105

FIGURE 17

Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Gap

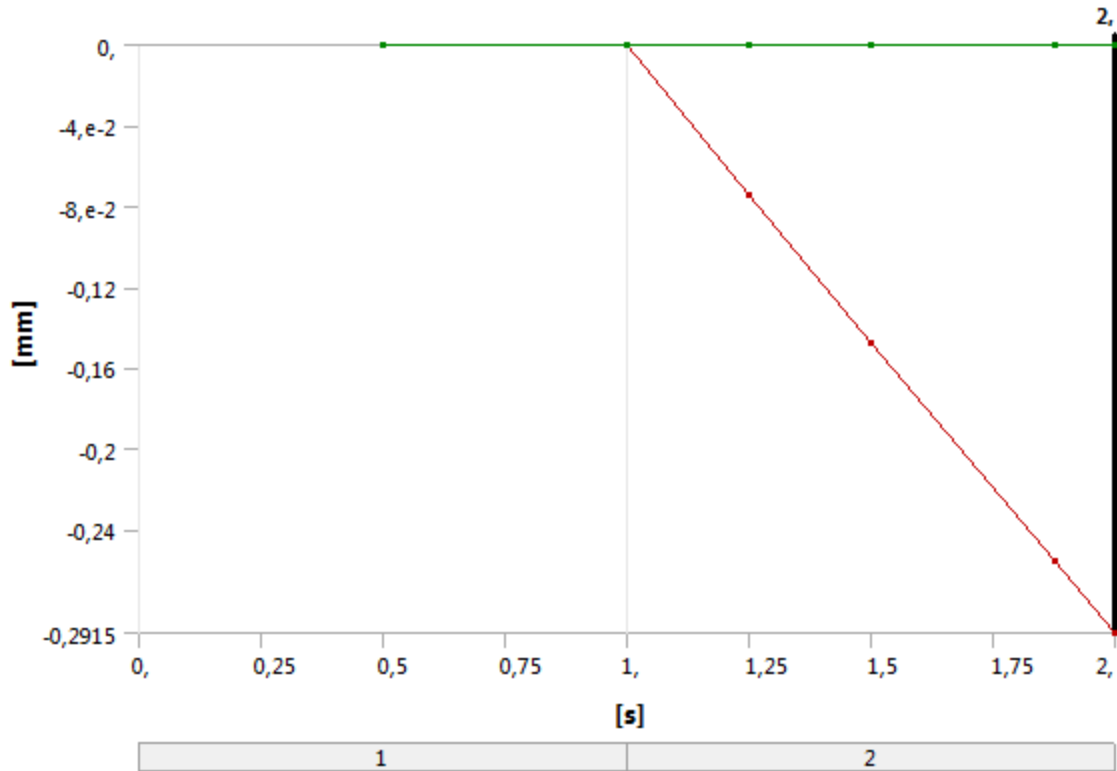


TABLE 38
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Contact Tool > Gap

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0,5	-2,3093e-014	0,
1,	-4,4409e-014	-1,6579e-014
1,25	-7,4305e-002	0,
1,5	-0,14761	
1,875	-0,25536	
2,	-0,2915	

TABLE 39
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Probes

Object Name	<i>Bolt Pretension</i>	<i>Bolt Pretension 2</i>
State	Solved	
Definition		
Type	Bolt Pretension	
Boundary Condition	Bolt Pretension	Bolt Pretension 2
Suppressed	No	
Options		
Display Time	2, s	End Time
Results		
Adjustment	-2,992e-014 mm	-2,8702e-014 mm
Working Load	61873 N	61889 N
Minimum Value Over Time		
Adjustment	-2,992e-014 mm	-2,8702e-014 mm

Working Load	0, N	
Maximum Value Over Time		
Adjustment	-6,1526e-015 mm	-5,5699e-015 mm
Working Load	61873 N	61889 N
Information		
Time	2, s	
Load Step	2	
Substep	4	
Iteration Number	20	

FIGURE 18
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Bolt Pretension

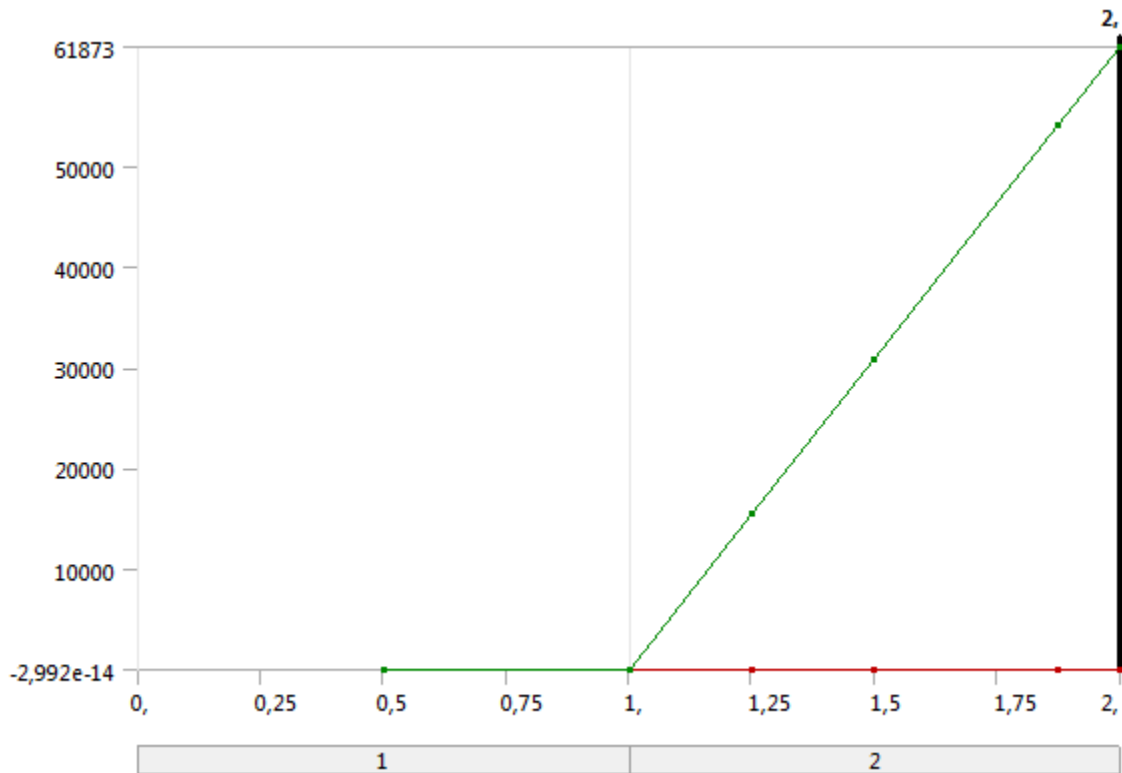
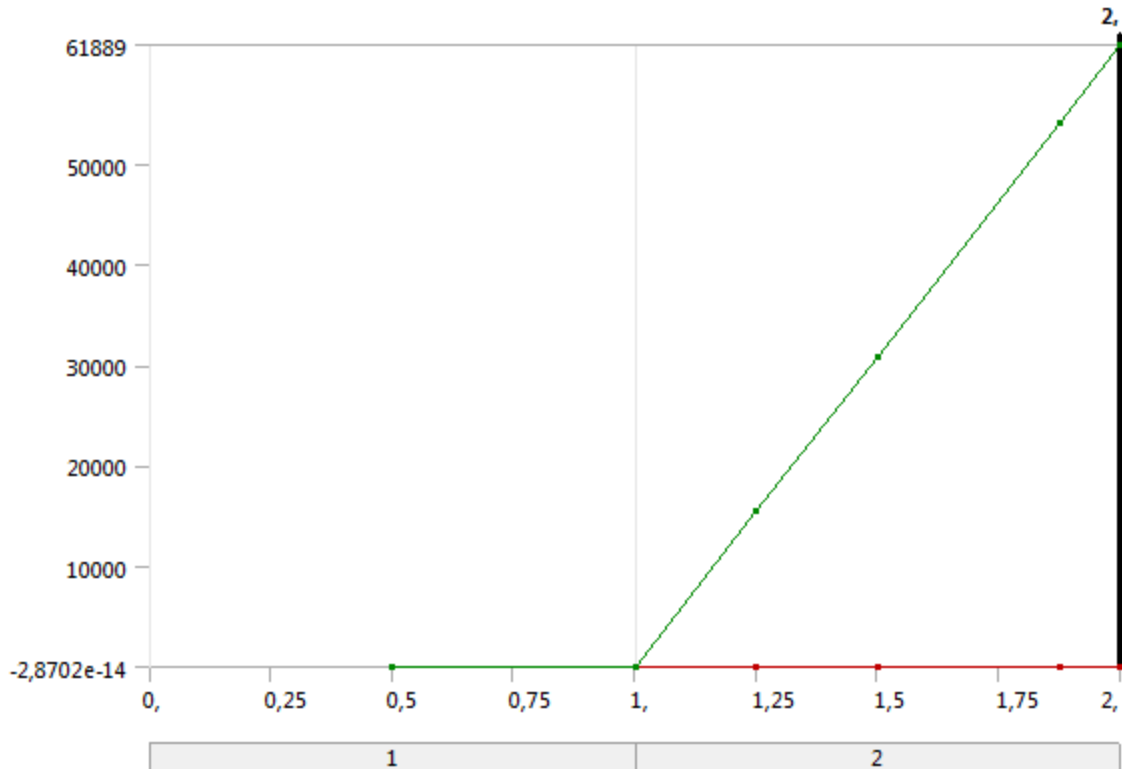


FIGURE 19
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Bolt Pretension 2



Material Data

Structural Steel 2

TABLE 40
Structural Steel 2 > Constants

Density	7,85e-006 kg mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	4,34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	6,05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1,7e-004 ohm mm

TABLE 41
Structural Steel 2 > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa	0,
-----------------------------------	----

TABLE 42
Structural Steel 2 > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa	640,
--------------------------------	------

TABLE 43
Structural Steel 2 > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa	
----------------------------	--