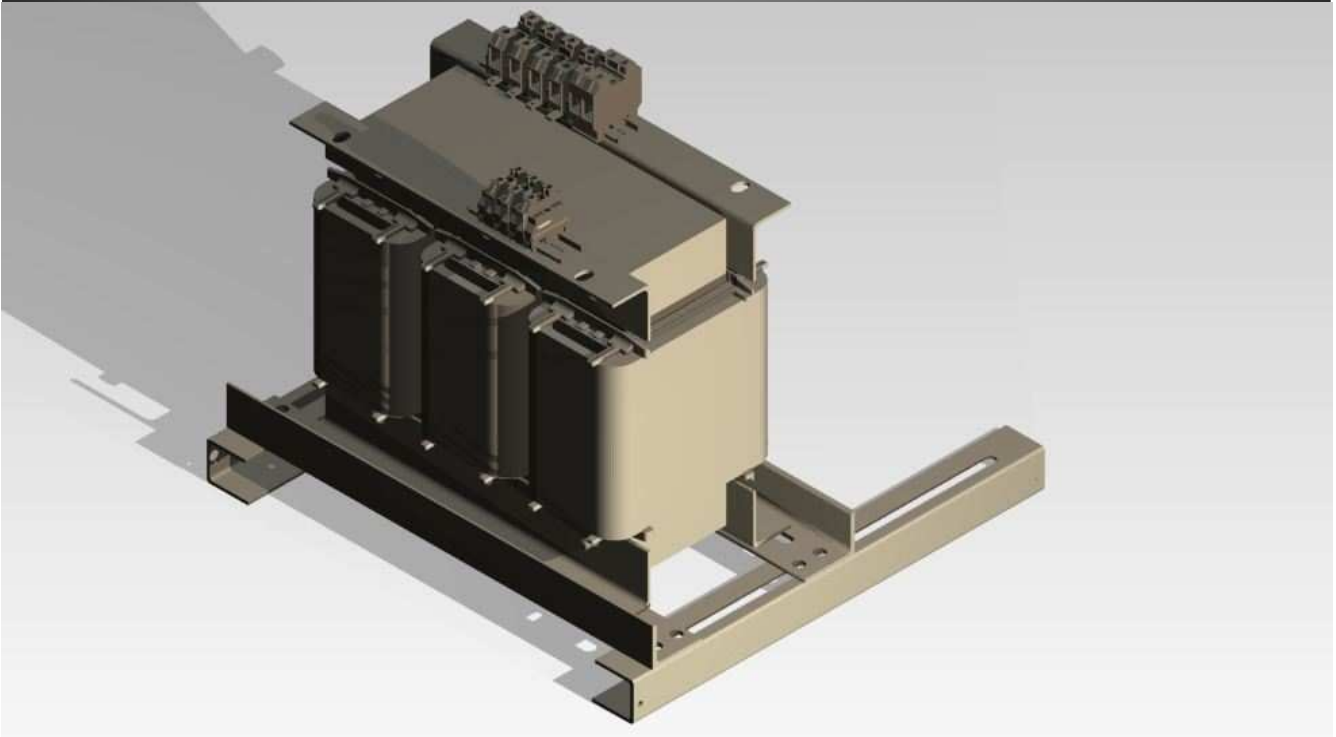


Design af universale transformator beslag



Bachelorprojekt

Peter Francis Mwamoto



Wind
Solutions®

AALBORG UNIVERSITET

ESBJERG

Titelblad

TITEL: Design af universale beslag til transformator
GRUPPE: M7d-10-E14
VEJLEDERE: Anders Schmidt Kristensen
PROJEKT PERIODE: 20/09/2014 til 7/01/2015
SIDE ANTAL: 68
FORFATTER:

Peter Francis Mwamoto

Synopsis

In cooperation with KK Wind Solutions, it is decided to design a universal bracket for mounting the transformers used in their control systems. Today, different brackets are used for this purpose, usually each of them designed for a specific project. The design of a universal bracket will result in a reduced inventory, and will optimize the design work. As control systems are subjected to vibration tests before approval for production, it will not be necessary to test the system according to the new the brackets. The analysis of an existing bracket, affected by the largest used transformer at KK Wind Solutions, will form the basis for the design of a universal bracket. The analyses are performed according to vibrations test criteria. These analyses conclude that a universal bracket can be used in material DX51X, but steel S235 is preferred. In addition, a parameter-driven computation sheet to calculate the corresponding bolted joints is developed.

Forord

Denne rapport tager udgangspunkt i et eksisterende trafo beslag fra KK Wind Solutions. KK Wind Solution har siden 1978 producerede kontrolsystemer til vindmølle branchen, og er i dag en af de førende i branchen. Med de tekniske informationer omkring det eksisterende beslag er formålet at designe et universalt beslag iht. test krav der stilles til produktet. Opgaven er udarbejdet i samarbejde med Jørgen Dahl Vestergaard, teamleder for mekanisk afdeling hos KK Wind Solutions.

Rapportens indhold har relevans og rødder i den undervisning, der foregår på uddannelsen som maskiningeniør på Aalborg Universitet Esbjerg. Udarbejdelse af rapporten er sket i perioden 20/09/2014 til 6/01/2015.

Der er i projektet arbejdet ud fra følgende Initierende problem:

”Hvordan designes universale beslag til ophæng af transformator”?

Læsevejledning

Til rapporten findes en cd indeholdende rapport, Mathcad filer, hvor beregninger er udført samt appendiks.

I rapporten anvendes der følgende forkortelser:

- KK (KK Wind Solutions)
- DS/EN (DS/EN 1993-2-8 + AC 2007)
- SW (SolidWorks 2011)
- ANSYS (ANSYS Workbench 15.0)
- TB (x) (Tabel (nr))
- Trafo (Transformator)
- TS (Teknisk Ståbi 21 udgave 2011) [1]

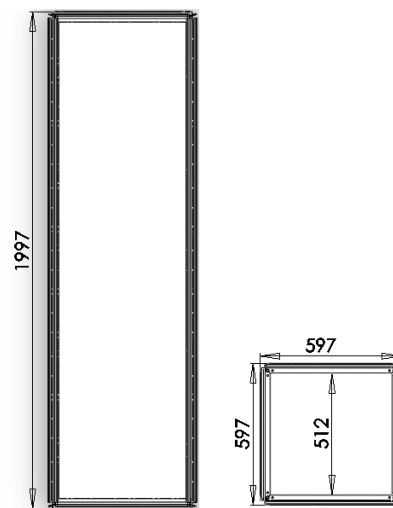
Indholdsfortegnelse

1	Indledning	1
1.1	Bjælkeprofil.....	1
1.2	Bærende konstruktion	3
1.3	Samlinger	5
1.4	Trafo og beslag	7
1.5	Krav.....	9
1.6	Projektafgrænsning	10
2	Analytisk analyse af de statiske laster	11
2.1	Analytiske beregninger	12
2.2	ANSYS linebody analyse.....	17
2.3	Solidworks frame simulering	19
2.4	Validering.....	22
3	Design af beslag	23
3.1	Bærende beslag.....	23
3.2	Trafo beslag	27
3.3	Montering af trafo.....	28
4	Bolt samling	33
4.1	Beregning af boltsamlingen mellem trafo og trafo beslag	33
4.1.1	Bolt data	33
4.1.2	Data for plade materiale	33
4.1.3	Koefficienter for samlingen.....	34
4.2	Laster i samlingen.....	34
4.2.1	Egenlasten	34
4.2.2	Forskydningskraften	34
4.2.3	Trækkraft.....	35
	Momentet der virker i bolten.	35
4.3	Kriterier for boltsamlingen.....	36
4.3.1	Tilspændingskraft	36
4.3.2	Overklipningsbæreevne	37
4.3.3	Hulrandsbæreevnen	37
4.3.4	Trækbæreevne	39

4.3.5	Friktionsbæreevnen.....	39
4.3.6	Gennemlokningsbæreevne	40
4.4	Kontrol af samlingens bæreevne	41
4.4.1	Kontrol af de resterende bæreevner.....	43
4.5	Beregning af boltsamlingen mellem trafo beslag og det bærende beslag.....	44
4.5.1	Laster i samlingen.....	44
4.5.2	Dimensionering af bolt.....	45
4.5.3	Kontrol af minimale afstande	46
4.5.4	Hulrandsbæreevne	47
4.5.5	Trækbæreevne	48
4.5.6	Kontrol af samlingen.....	48
4.6	Beregning af boltsamlingen mellem det bærende beslag og hjørnestolpe.....	50
5	Optimering af design.....	53
6	FEM.....	56
6.1	Laster.....	56
6.2	Geometri.....	57
6.3	Kontaktflader.....	57
6.4	Randbetingelser	58
6.5	FEM resultater	59
6.5.1	Y-retning	59
6.5.2	X-retning	63
6.5.3	Z-retning.....	64
7	Materiale valg	65
8	Vurdering.....	66
9	Konklusion.....	67
10	Kilde list	68

1 Indledning

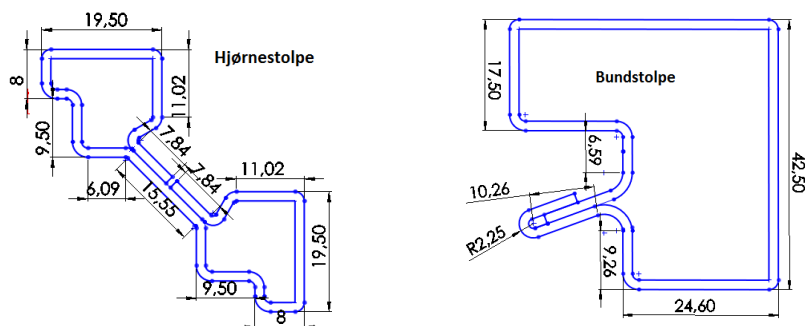
KK Wind Solutions producerer kontrolsystemer til vindmølle industrien. Skabene, der benyttes til KK's kontrolsystemer, er standard produceret skabe fra Rittal. Skabene er produceret i H240LA (bærende konstruktion) og DC01AM (låge). Skabene er ikke bygget til store belastninger, idet de generelt benyttes til indkapsling af forskelligt software. Dette projekt tager udgangspunkt i et TS 8606500 skab, med følgende dimensioner, vist på Figur 1.



Figur 1. Viser Rittal skabet der benyttes i projektet, med tilhørende dimensioner.

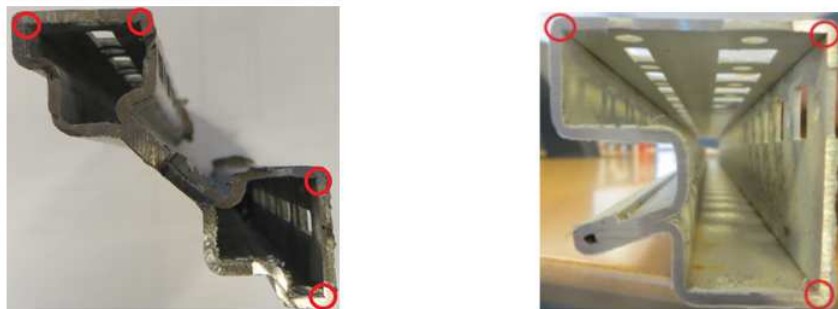
1.1 Bjælkeprofil

Alle skabe er opbygget af valset bjælker, som er bearbejdet med udstansning. Bjælkerne har følgende tværsnit vist på Figur 2, Figur 3

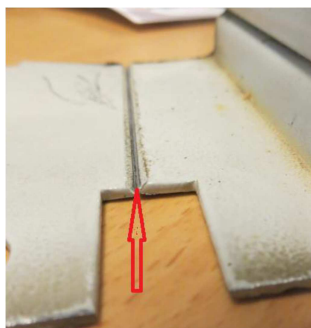


Figur 2 viser de valsed tværsnitsprofiler. Tværsnittene er valset med godstykkels 1,5 mm.

Tværsnitsprofilen i bundrammen og hjørnestolperne er valset således, at der opnås 90 graders vinkler indvendig af profilet. For at opnå dette er der udført materiale reducering i de hjørner, der ønskes valset med 90 grader. Se Figur 3 og Figur 4.



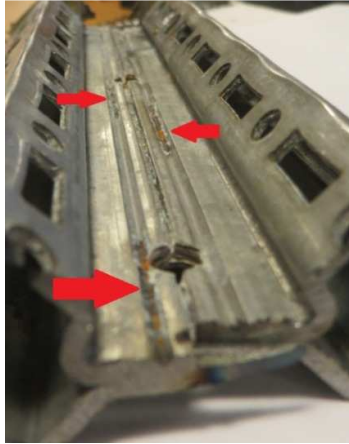
Figur 3 viser til venstre det fysiske tværsnitte for hjørnestolpen og til højre for bundrammen. Røde cirkler indikerer materiale reducering, hvor det visuelt ses som en revne efter valsning.



Figur 4 viser en del af bundstolpen udfoldet. Pilen indikerer materiale reduktionen.

Denne reducering resulterer i svækkelse af profilet. Eftersom valsningen dannes ved plastisk deformation af materialet, vil profilet indeholde egenspændinger, som reducerer profilets bæreevne. Idet der er udført materiale reducering i hjørnerne, vil disse områder være kritiske for profilet.

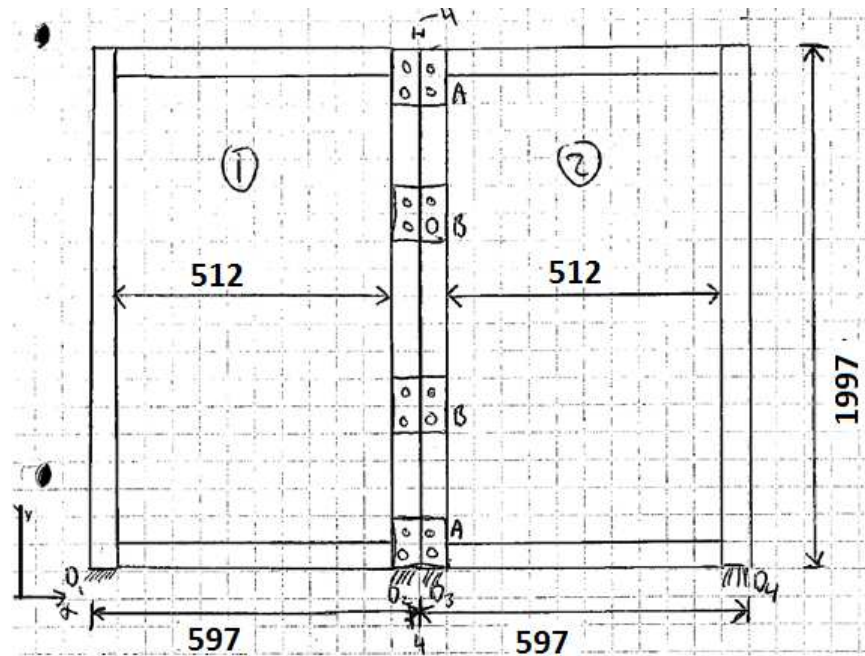
Ved afslutning af valsningen for bundstolpen er der udført materiale reducering, som vist på Figur 4, og derefter er der udført svejsning for at sammenslutte valsningen, se Figur 5



Figur 5 viser afslutningen af valsningen. De røde pile indikerer svejsningerne.

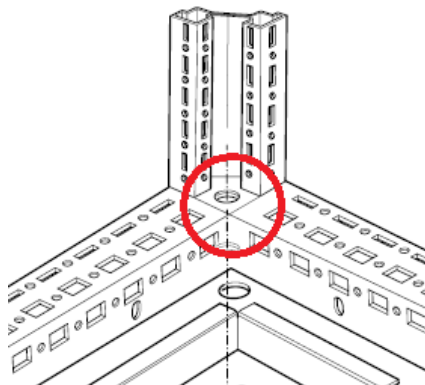
1.2 Bærende konstruktion

Skabene placeres ofte to og to, de benævnes hhv. CO-section og PO-section. Der vil i dette projekt analyseres på PO – section, idet trafo placeres i denne og der ønskes optimering på beslagene som traoen monteres på. På Figur 6 ses 2D tegning af to TS 8606500 skabe side om side.



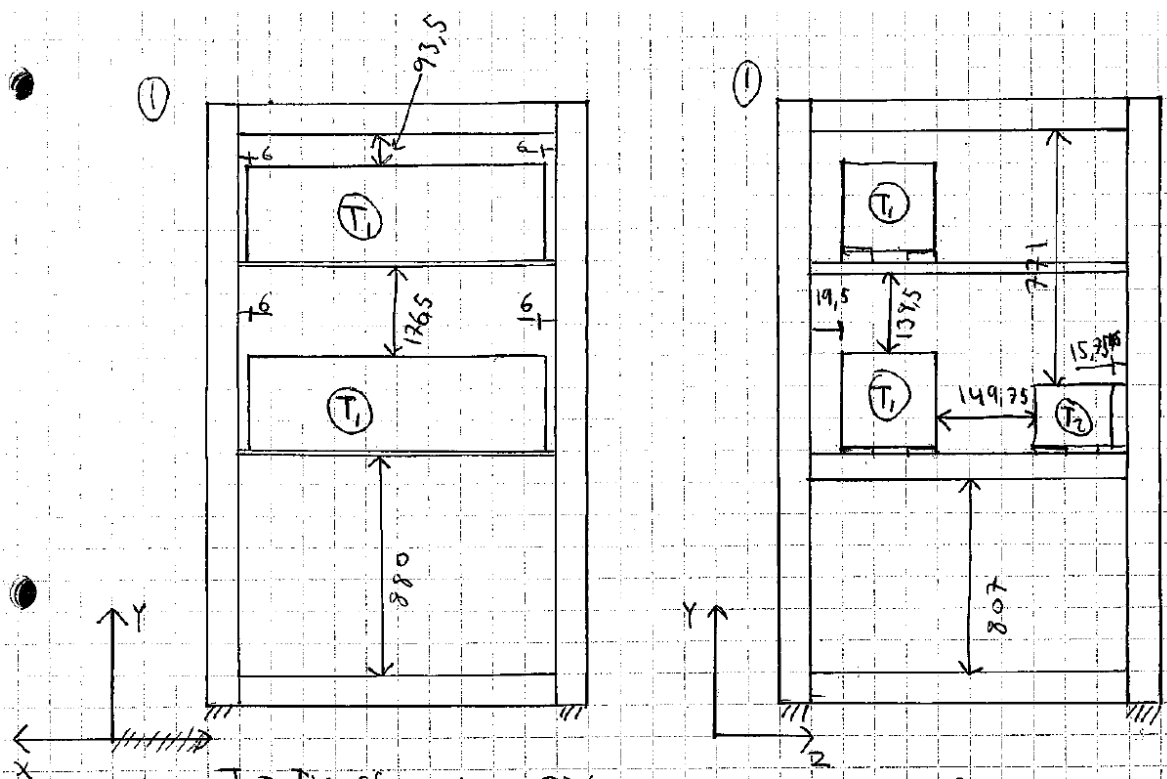
Figur 6 viser 2D tegning af to TS 8 skabe der er forbundet, A er vinkel beslag, B er plade beslag, begge typer beslag er monteret på indvendig side, D_{1-4} indikerer M12 bolt til befæstelse af skabene, 1 indikerer PO-section og 2 CO-section.

Skabene monteres i vindmøller vha. en M12 bolt i hvert hjørne, se Figur 7.



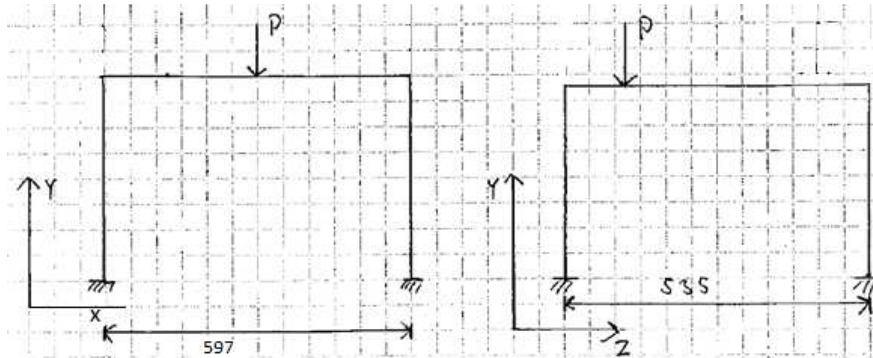
Figur 7 viser skabes hjørne hvori der monteres M12 bolte, til fastgørelse af skabet i vindmøllerne.

Den bærende rammekonstruktion vil blive analyseret for at fastsætte betingelserne for analyse og optimeringen af de bærende beslag for trafoerne. Der installeres ofte en eller flere trafo i skabene. Disse varierer i vægt fra 1,5 kg til 130 kg. Til fastgørelse af disse benyttes forskellige beslag, som oftest designes fra projekt til projekt. Figur 8 viser 2D tegning af PO-section med tre trafo og tilhørende beslag.



Figur 8 viser PO-section med to typer trafo (T_1 og T_2) og tilhørende bærende beslag.

Til analyse og FEM beregninger af skabet benyttes analytisk beregning samt computer baserede beregninger. Der tages udgangspunkt i en bjælke model, svarende til Figur 9, hvor lasten fra trafo indikeres med enkeltlasten (P).



Figur 9 Forenklet rammekonstruktion af PO-section, P indikerer lasten fra Trafo T₁.

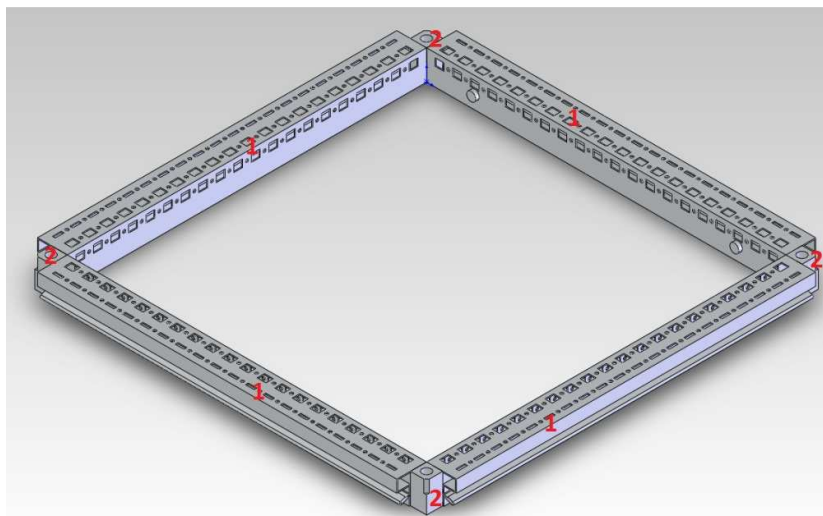
Den forenklede model er den nederste del af PO-section, lastet med den tungeste trafo (130kg).

1.3 Samlinger

Skabene er samlet vha. svejsninger. Disse svejsninger er bestående af tre elementer

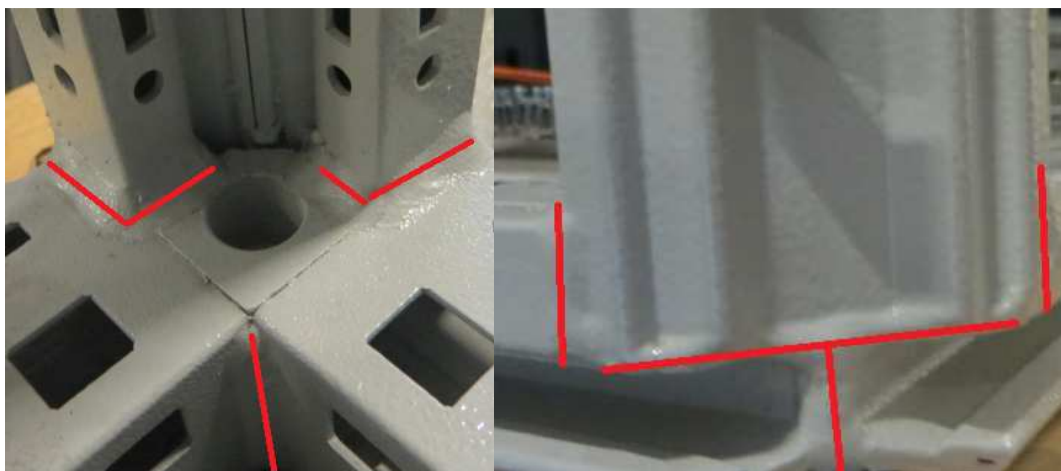
1. Bundstolpe
2. Gevindblok til M12 bolte
3. Hjørnestolper

Fire bundstolper svejses sammen med fire gevindblokke, der derved danner bundrammen, Figur 10.



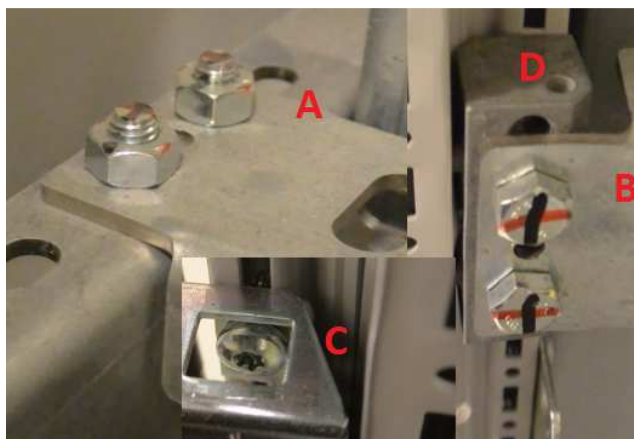
Figur 10 viser bundrammen, der benyttes svejsning i samlingerne, 1 er bundstolpe og 2 er gevindblok til M12 bolte.

Bundrammen svejses sammen med fire hjørnestolper. I toppen af hjørnestolperne svejses endnu en bundramme sammen. På Figur 11 ses samlingen, der benyttes i alle otte hjørner.



Figur 11 viser samlingen, der benyttes for at fast holde konstruktionen. Til venstre ses indvendige side af skabet. De røde linjer indikerer svejsninger.

Beslagene der benyttes til montering af de forskellige trafo, monteres med bolte eller selvskærende skruer. På Figur 12 ses eksempler på disse skruer/boltsamlinger.



Figur 12 viser eksempler af de samlings typer, der benyttes ved montering af trafo. A er samling af to beslag, B og C er samling af beslag og hjørnestolpe. D er gevind blok, der fastspændes med to selvskærende skruer.

For at kunne opnå validitet af resultaterne ved undersøgelse af spændinger der optræder i beslagene, er det nødvendigt at analysere disse samlinger, for at bestemme følgende:

- Samlingens styrke
- Bolt størrelse
- Randbetingelser

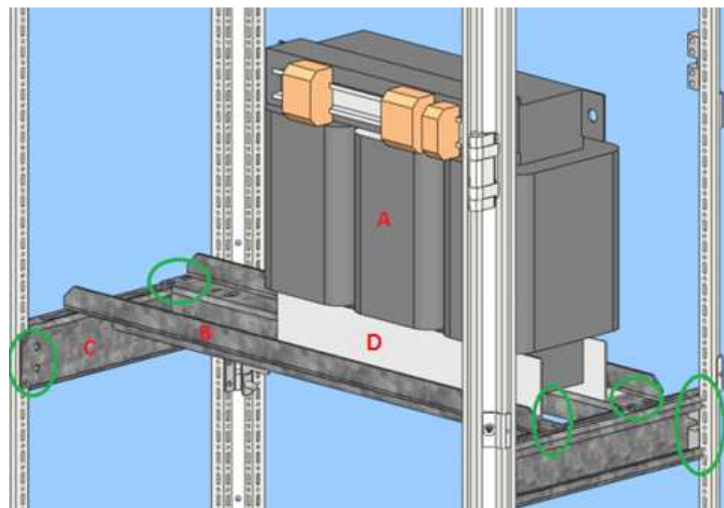
Idet der anvendes forsimplede modeller til analyse af beslagene og deres samlinger, stilles der krav til forståelse af de anvendte randbetingelser. Eftersom der anvendes SW og ANSYS til analyserne, vil der blive udført validering af de analytiske beregninger og de computerbaserede analyseværktøjer.

1.4 Trafo og beslag

I dag benytter KK mere end 70 forskellige trafo. Til montering af en trafo anvendes der tre forskellige beslag, disse er som følgende og er skitseret på Figur 13:

- Trafo beslag (B)
- Bærende beslag (C)
- Trafo monteringsbeslag (D)

Disse benævnelser vil blive anvendt gennem hele rapporten. På Figur 13 ses et eksempel på en trafo, der er monteret på tre eksisterende beslag.



Figur 13 viser eksempel på en samling med beslag og trafo. A: trafo, B: Beslag hvorpå trafo er monteret, C: de bærende beslag for hele samlingen. Hele samlingen er samlet vha. bolte, indikeret med grønne cirkler.

Trafo monteringsbeslag er pre-monteret af producenten der fremstiller trafoer. KK kan her specificere monteringshuller til samlingen med trafo beslag. Disse beslag er oftest fremstillet i L-profiler

De bærende beslag designs af KK. Disse monteres vertikal mellem hjørnestolperne vha. boltsamlinger. Det er disse beslag som skal optage lasten fra trafo og overføre denne til hjørnestolperne.

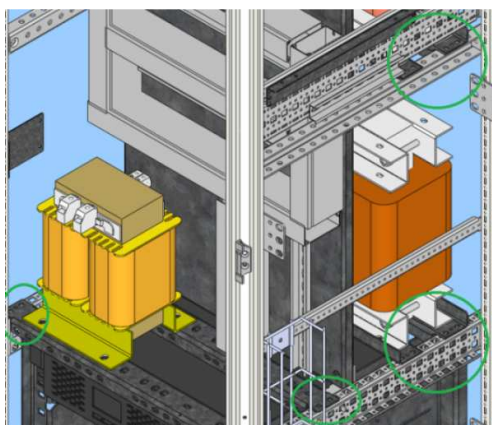
Trafo beslag udvikles også af KK. Disse monteres vinkelret mellem de to bærende beslag. På disse beslag påmonteres den anvendte trafo.

Idet beslagene designes fra projekt til projekt, er der ikke defineret standardbeslag eller retningslinjer for, hvorledes de skal designes. Dette har resulteret i et stort varelager, som KK ønsker reduceret.

På Figur 14 ses et eksempel på anvendelse af forskellige beslag i et skab. Beslagene fremstilles i stål DX51D.

TB 1 viser materiale parameter for DX51D.

Materiale	Flydespænding f_y (MPa)	Trækstyrke f_u (MPa)
DX51D	140	270 - 500



Figur 14 viser anvendelse af forskellige beslag i et skab med tre trafoer, hvor af to er ens. De mærkede områder er bolt samlinger.

For at mindske varelaget, kan de forskellige trafo inddeles i forskellige vægt grupper med dertil tilhørende beslag, som eksempelvis kan være inddelt i vægtklasser. Dertil skal der designes tilhørende beslag. Dette skal resultere i, at det ikke længere vil være nødvendigt at designe beslag fra projekt til projekt.

1.5 Krav

Skabene installeres i vindmøller, som udsættes for forskellige belastninger. Der stilles derfor mekaniske krav til skabene, iform af en vibrations test med følgende belastninger:

IEC 60068-2-64, Test Fh, Random vibration

2½ hour per axis at 0.51 g_{rms}, with PSD:

10 - 100 Hz: 0.002 g²/Hz

100 - 150 Hz: -3 dB/octave

IEC 60068-2-27, Test Ea, Shock

3000 repetitive shocks (bumps)

3 directions with 1000 applications per direction.

Pulse: 10g, 6ms, half-sine

Disse belastninger er således også et krav til de beslag, der anvendes i skabene. Begge test udføres vha. en Shaker, en membran der udsender vibrationer, vist på Figur 15.



Figur 15 viser Shaker til anvendelse ved vibration og choktest.

Den udførte test udgør en accelereret livstidstest. De 2½ timer og 3000 bump er derfor svarende til 20 år. Testen udføres i alle tre aksel retninger. Test opstillingen ses på Figur 16.



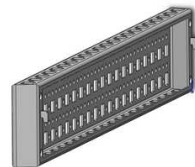
Figur 16 viser test opstilling til vibration og chok test.

1.6 Projektafgrænsning

Projektet vil koncentrere sig om design af et universalt trafo beslag og bærende beslag, der skal kunne overkomme de belastninger, skabet tilføres under test. Der afgrænses fra at analysere lasterne der forekommer, ved den randomiserede vibrationstesten. Det vurderes at disse ikke er de kritiske, samt afgrænses der fra at analysere hjørnestolpernes bæreevne, da det vurderes at dette udgør et helt studie i sig selv. Til design af de universale beslag skal følgende undersøges:

1. Statisk last
2. Laster fra choktest
3. Boltesamlinger
4. Materiale (DX51D vs S235)
5. Standard tværsnitsprofiler

Den tungeste trafo anvendes til beregning af de kritiske laster, som beslagene skal overkomme. Det vurderes at lasterne, der fremkommer ved chok testen (afsnit 1.5), er de kritiske og derfor de dimensions bestemmende. Der tages udgangspunkt i beslaget vist på Figur 17.



Figur 17 viser beslaget, projektet tager udgangspunkt i.

Idet det ikke har været muligt at analysere de reelle kræfter der optræder ved beslagene, anvendes følgende last betragtning.

Ved statisk analyse og validering afsnit 2.

$$P = m \cdot g \quad (1.1)$$

Ved bolt beregning afsnit 4 og FEM analyse 6.

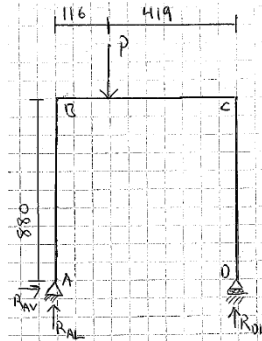
$$P = m \cdot 10g \quad (1.2)$$

Hvor

- $m = \text{massen af trafo (130 kg)}$
- $g = \text{tyngdeacceleration (9,81 } \frac{m}{s^2} \text{)}$

2 Analytisk analyse af de statiske laster

Til analyse af den bæredygtige konstruktion samt beslag vil der blive anvendt analytiske metoder samt computerbaserede værktøjer. Disse metoder er baseret på Euler Bernouli's bjælke teori. Til validitet af de forskellige værktøjer simplificeres konstruktionen til, som vist på Figur 18. Efter den simple validering øges detaljeringsgraden, således at der opnås resultater der er svarende til den virkelige konstruktion.

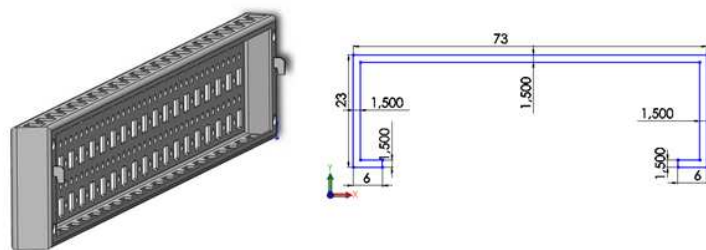


Figur 18 viser den simplificerede rammekonstruktion til validering af de anvendte værktøjer.

Derudover forenkles profilerne således, at der ses bort fra geometriske udformninger som huller og udformning til montering af trafo beslagene. Idet bjælke modellen er en forsimplet model, medtages bundrammen ikke. Det vurderes, at bundrammen ikke vil medvirke til nogen stivheder og dermed ikke optager betydende laster, idet lasten er placeret 880 mm over bundrammens øverste flade, se Figur 8. Den forsimplede model består af elementerne, som vist på Figur 18.

- To hjørnestolpe (AB og CD)
- Bærerene beslag (BC), C-profil

Tværsnittet for beslag BC har følgende dimensioner, som vist på Figur 19.



Figur 19 viser tværsnittet af det bærende beslag BC

Validering vil forekomme mellem SW som anvendes hos KK, ANSYS, som anvendes på uddannelsesinstitutionen Aalborg Universitet Esbjerg, samt analytiske håndberegninger.

2.1 Analytiske beregninger

For at bestemme den maksimale spænding i konstruktionen, er det nødvendigt at bestemme det maksimale bøjningsmoment, idet det er denne faktor, der vil danne grundlaget for den maksimale spænding. Alle beregninger i dette afsnit findes i appendiks 1.

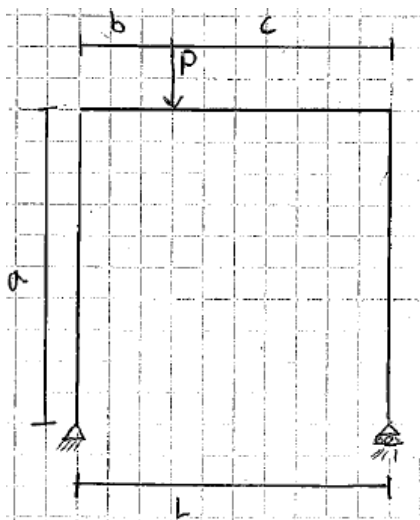
Ved benyttelse af TS bestemmes de største bøjningsspændinger σ_{max} der optræder i rammekonstruktionen, med ligning (2.1)

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot y}{I} = \frac{M_{max}}{W} \quad (2.1) \quad [1]$$

Hvor

- $y =$ flytningbidrag
- $M_{max} =$ maksimale bøjningsmoment
- $I =$ inertimoment
- $W =$ modstandsmoment

Bøjningsmomentet iht. Figur 18 bestemmes vha. analytiske beregnings metoder. Følgende parameter er kendt, se TB 2.



Figur 20 viser benævnelsen af de forskellige parameter på konstruktionen.

TB 2 viser de anvendte værdier.

Navn	Størrelse	Enhed
a	880	mm
b	116	mm
c	419	mm
L	535	mm
P	1529,84	N

Ved moment om punkt D jf. Figur 18, bestemmes reaktionen R_{AL} , hvor-efter der beregnes lodretligevægt for bestemmelse af reaktion R_{DL} .

$$R_{AL} = \frac{P \cdot b}{L} \quad (2.2)$$

$$R_{AL} = 1198,13 \text{ N}$$

$$R_{DL} = -R_{AL} + P \quad (2.3)$$

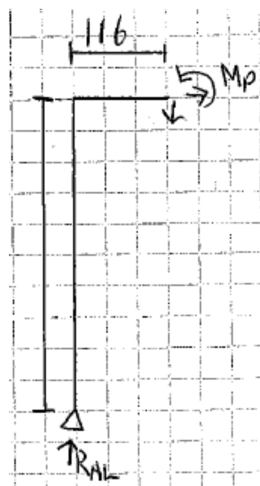
$$R_{AL} = 331,7 \text{ N}$$

Idet der ikke optræder lodrette laster, bliver reaktionen $R_{AV} = 0$. De fundne reaktioner skal danne ligevægt i konstruktionen.

$$\sum F = 0 \quad (2.4)$$

$$R_{AL} + R_{DL} - P = 0$$

Det maksimale optrædende bøjningsmoment beregnes ved at snitte ved lasten P og derefter beregne momentet ved lasten.

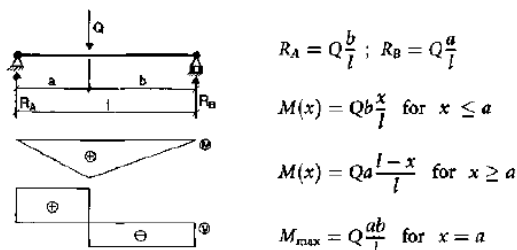


Figur 21 viser snittet foretaget ved lasten P.

$$M_P = R_{AL} \cdot a \quad (2.5)$$

$$M_P = 138,8 \text{ Nm}$$

De opnåede resultater efter regnes vha. Figur 22. Idet konstruktionen er simplificeret med de anvendte understøtninger, vil der ikke opstå moment overførelse til hjørnestolperne og derved kan konstruktionen beregnes som en simpel understøttet bjælke.



Figur 22 viser elementært tilfælde af en simpel understøttet bjælke med tilhørende moment og forskydningsfordeling [1].

Ved benyttelse af momentformlerne, vist i Figur 22 fra TS, opnås følgende resultater:

$$R_A = 1196,84 \text{ N}$$

$$R_B = 331,27 \text{ N}$$

$$M_{\max} = 138,80 \text{ Nm}$$

Idet resultaterne er sammenfaldende for de to anvendte metoder, konkluderes det, at de opnåede resultater er acceptable.

For at kunne bestemme den maksimale spænding, er det nødvendigt at have kendskab til modstandsmomentet i det pågældende punkt. Eftersom de benyttede profiler ikke er standard profiler, beregnes inertimomentet. Der beregnes på det bærende beslag, da det maksimale moment befinder sig her.

Til dette bestemmes bøjningscentret og derefter inertimomentet om bøjnings-akslen. Til bestemmelse af bøjningscenteret bestemmes de forskellige statiske momenter (S_z og S_y) som optræder i profilet for det bærende beslag.

$$y_B = \frac{S_z}{A} \quad (2.6)$$

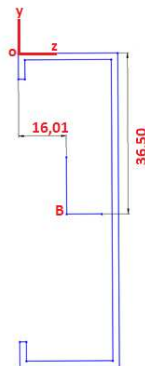
$$z_B = \frac{S_y}{A} \quad (2.7)$$

Vha. Mathcad, appendiks 2, er bøjningscenteret ift. origiet for det bærende beslag, beregnet til følgende:

$$y_B = 36,50 \text{ mm}$$

$$z_B = 16,01 \text{ mm}$$

De forskellige inertimomenter beregnes nu ud fra bøjningscenteret, se Figur 23.



Figur 23 viser placering af bøjningscenter B.

Inertimomenter er beregnet efter ligning (2.8) og (2.9):

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + A \cdot d^2 \quad (2.8)$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3 + A \cdot d^2 \quad (2.9)$$

Ved beregning af tværsnittes inertimoment inddeles tværsnittet i del elementer, hvor-efter de enkelte elementers inertimomenter beregnes. Tværsnittes inertimoment findes derved ved ligning (2.10) og (2.11):

$$I_x = \sum_{i=1}^n I_{xi} \quad (2.10)$$

$$I_y = \sum_{i=1}^n I_{yi} \quad (2.11)$$

Beregning af de forskellige inertimomenter findes i appendiks 2.

$$I_z = 1,541 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

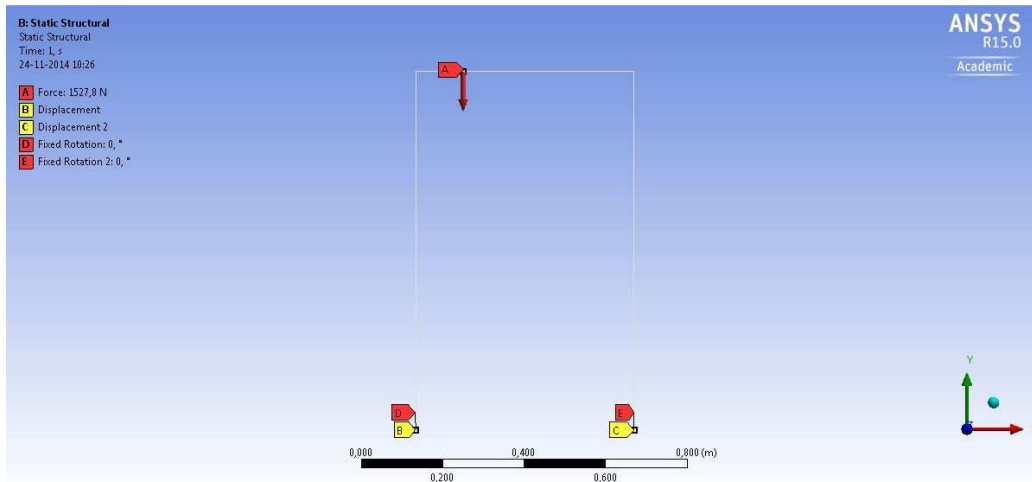
$$I_y = 1,379 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Det er nu muligt at bestemme den maksimale bøjningsspænding i det bærende beslag, iht. Ligning (2.1)

$$\sigma_{max} = 32,88 \text{ MPa}$$

2.2 ANSYS linebody analyse

Det forventes, at resultaterne fra denne analyse vil være i overensstemmelse med tidligere resultater beregnet i afsnit 2.1, idet programmet anvender samme teori. På Figur 24 ses, hvordan randbetingelserne og kræfterne er pålagt linebodyen.



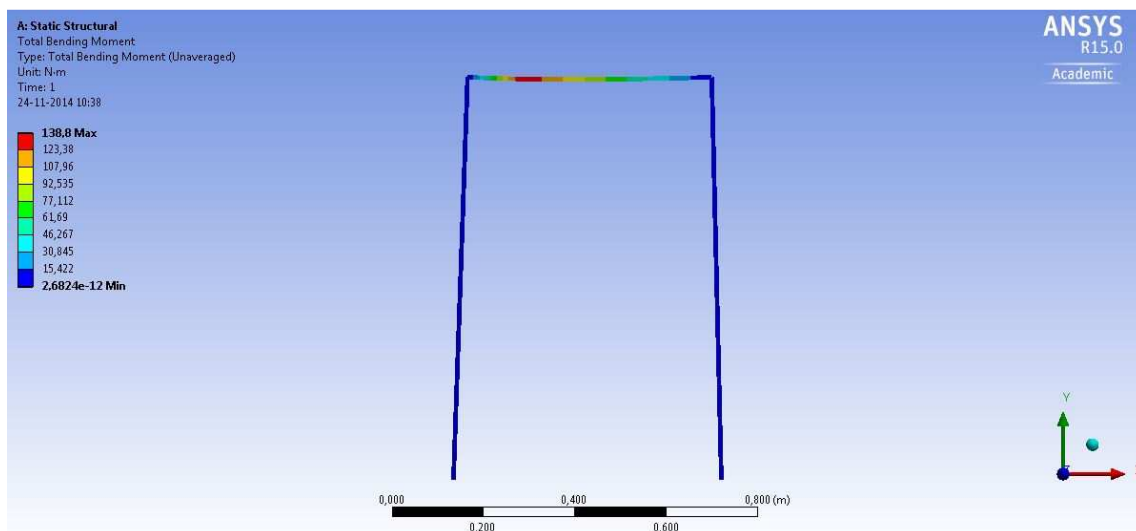
Figur 24 viser randbetingelserne anvendt i ANSYS linebody model. Hvor A er lasten, B simpel understøtning, C simpel understøtning med fri bevægelse i x-retning, D og E er fastholdelse af rotation om y og x akse.

Ved simuleringen af opstillet linebody i ANSYS Workbench, opnås følgende resultater:

$$R_A = 1196,84 \text{ N}$$

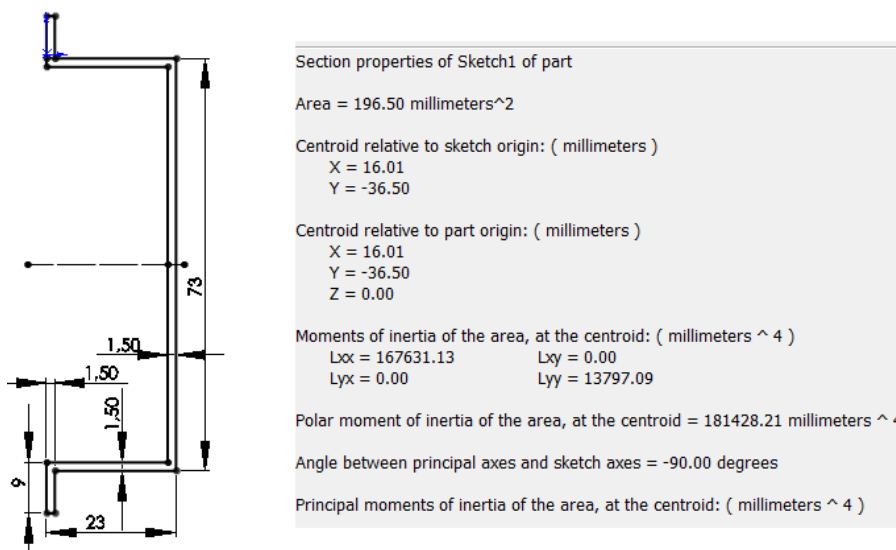
$$R_B = 331,27 \text{ N}$$

$$M_{max} = 138,80 \text{ Nm}$$



Figur 25 viser moment beregning foretaget i ANSYS.

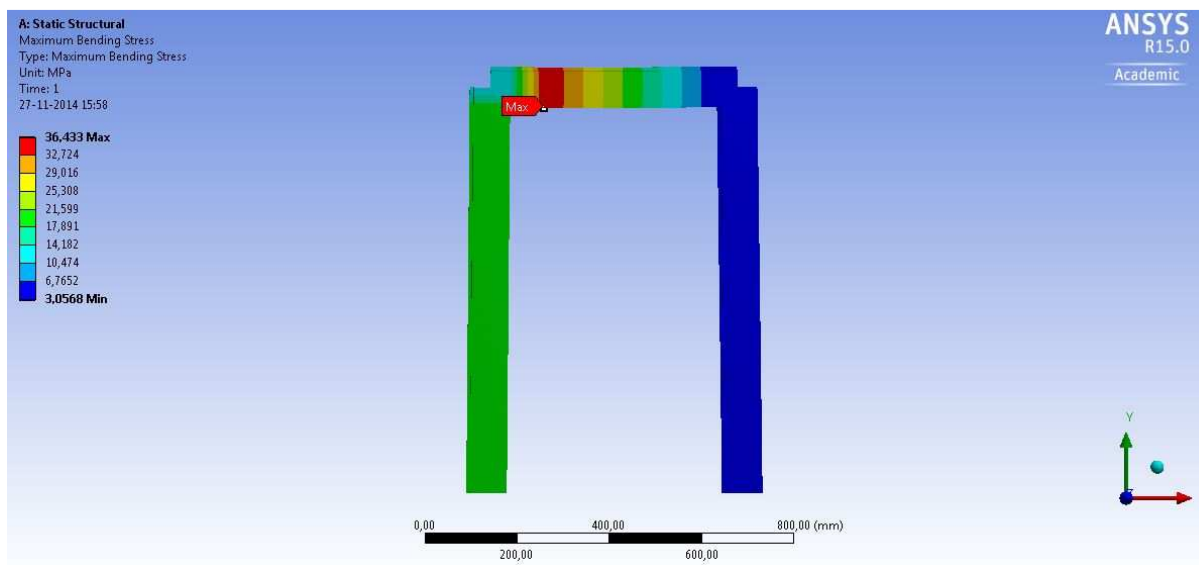
Ved at definere et cross sections (tværsnit) til linebody modellen, er det muligt at beregne spændingerne i konstruktionen. Det anvendte tværsnit er ikke defineret som en standard i ANSYS, det er imidlertid muligt at definere et bruger defineret tværsnit, dog kan dette ikke benyttes til en spændings analyse. I ANSYS er et hatteprofil defineret og dette anvendes, idet tværsnittets parameter er identisk. se Figur 26.



Figur 26 viser hat profil med tilhørende mål, til højre ses det tilhørende tværsnits parameter. Orgie er placeret iht. Figur 18.

Ved analyse af konstruktionen vha. ANSYS. fås en max bøjningsspænding på.

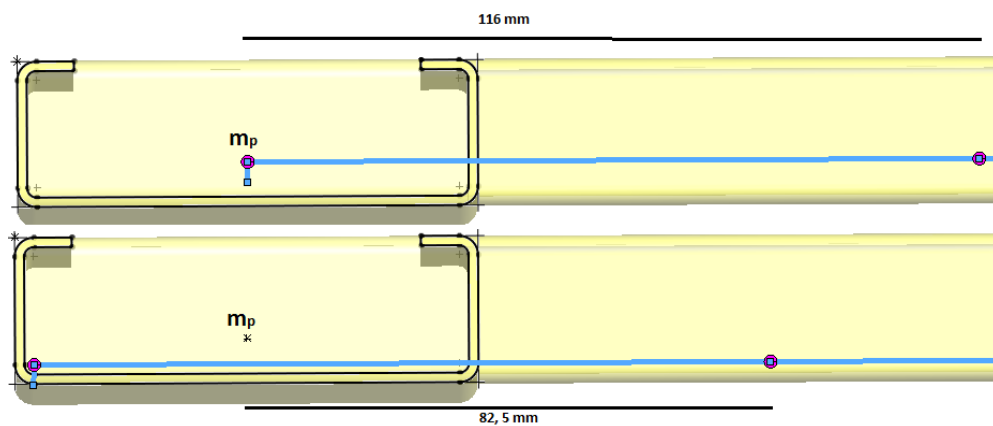
$$\sigma_{max} = 36,43 \text{ MPa}$$



Figur 27 viser max bøjningsspændingen. Analyse udført vha. ANSYS

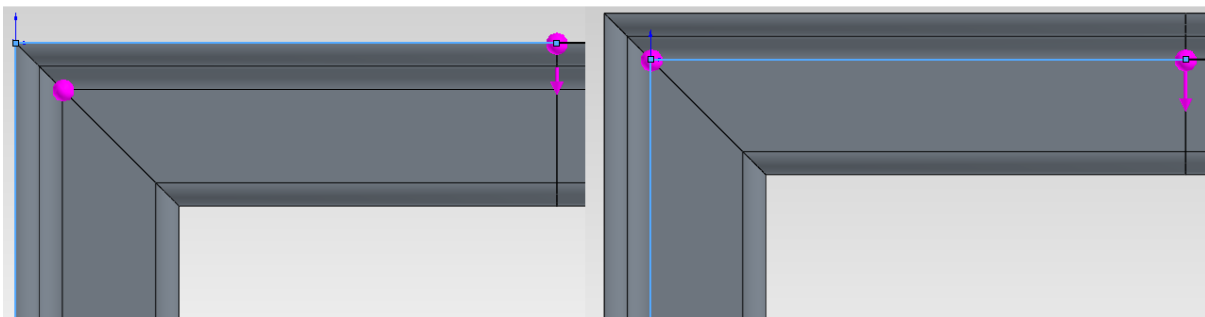
2.3 Solidworks frame simulering

Ved anvendelse af SW simulering er set nødvendigt at definere konstruktionens profiler. Idet profilet er betydende for beregning af de optrædende spændinger, benyttes profilet for det bærende beslag. Ved opsætning af denne simulering defineres en sketch (linjer), hvorefter profilet påføres. Idet SW definerer joints (punkter) ud fra profilets massemidtpunkt, og disse joints beskriver konstruktionens samlinger samt, benyttes til at påføre randbetingelser og laster, er det vigtigt at definere konstruktionens sketch ud fra profilets massemidtpunkt. Dette er en betydende faktor, idet der er tale om en ændring af momentarmen, se Figur 28.



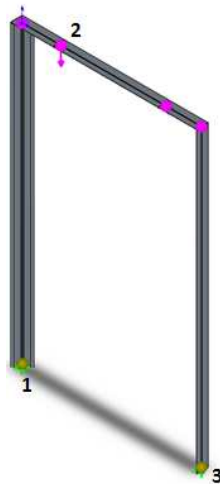
Figur 28 viser konstruktionen set fra oven, profilet til venstre indikerer søjlen. Øverst er konstruktionens sketch placeret i profilets massemidtpunkt, nedrest er sketchen placeret i profilets hjørne. Dette resulteree i forskellige momentarme.

På Figur 29 ses hvorledes joints bliver defineret i SW.



Figur 29 viser forskellen af placering af sketchen. Ved analyse i SW vil de to lyserøde punkter blive anvendt som reference.

Den anvendte opstilling i SW ses på Figur 30.



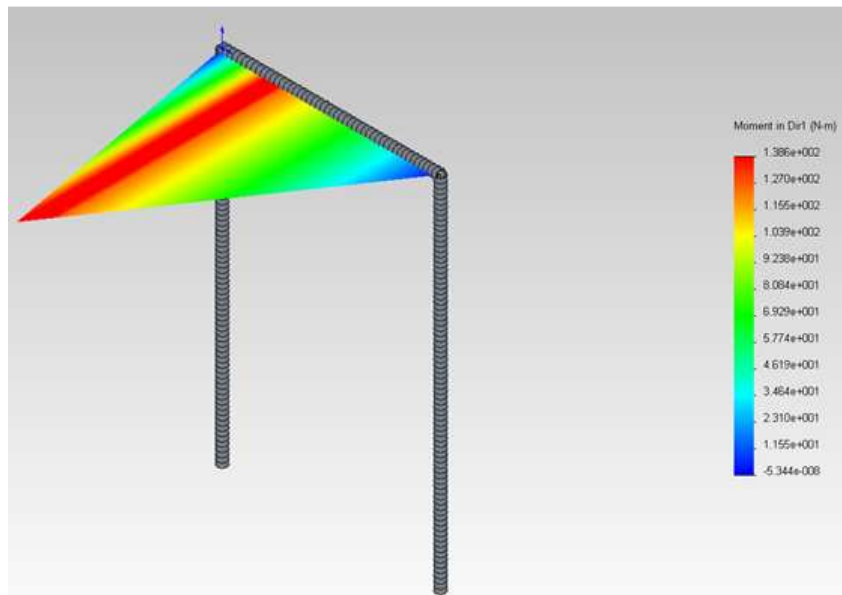
Figur 30 viser bjælke modellen i SW, hvor 1 er simpel understøtning, 2 er lasten og 3 er simpel understøtning med fri bevægelse i planet.

Følgende resultater opnås i SW. På Figur 31 ses moment kurven.

$$R_1 = 1196,6 \text{ N}$$

$$R_3 = 331,27 \text{ N}$$

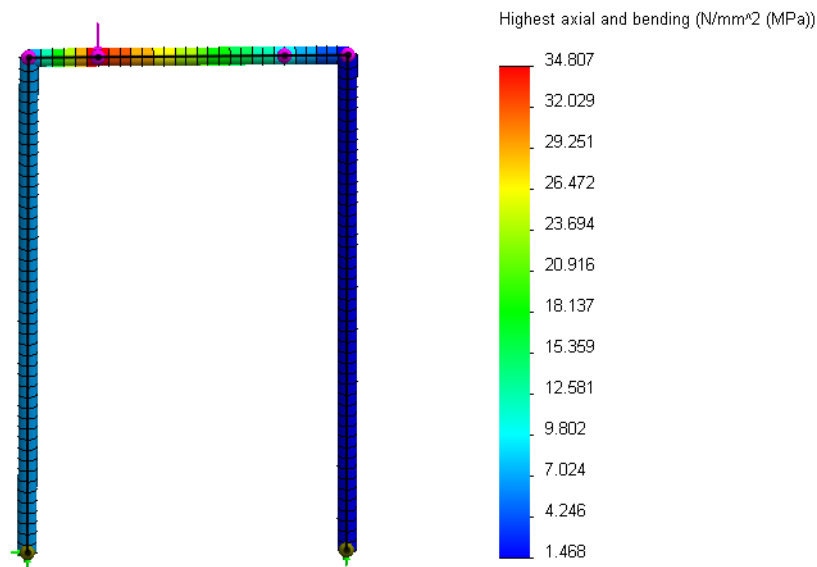
$$M_{max} = 138,80 \text{ Nm}$$



Figur 31 viser moment kurven af øverste bjælke i SW, med tilhørende værdier.

Ved analyse af spændingsfordelingen vha. SW er det som i ANSYS nødvendigt at benytte det virkelige profil. Som tidligere nævnt, benyttes joints til at definere konstruktionens randbetingelser og laster og disse joints genereres i profilet's masse midtpunkt. Ved at definere massemidtpunktet i sketchen af profilet er det muligt at konstruere konstruktionen efter massemidtpunktet. Derved opnås de korrekte betingelser for beregningen. Den maksimale optrædende bøjningsspænding er:

$$\sigma_{max} = 34,80 \text{ MPa}$$



Figur 32 viser spændingens fordeling i konstruktionen, analyseret vha. SW. Med maks. bøjningsspænding på 34,80 MPa.

2.4 Validering

De to computer baserede analyser vurderes nu ift. den analytiske metode, hvor efter det kan konkluderes om der opnås validitet i de computer baserede resultater.

TB 3 viser resultaterne, som anvendes til validering.

Værktøj	M_{maks} (Nm)	Afvigelse (%)	σ_{maks} (Mpa)	Afvigelse (%)
Analytisk	138,8	0	32,88	0
SolidWorks	138,8	0	34,80	-5,84
ANSYS linebody	138,8	0	36,43	-10,80

Det konkluderes, at der er validitet i resultaterne ved momenterne, idet disse stemmer overens med hinanden. Afvigelsen fra den maksimale spænding skyldes, at der i ANSYS er benyttet et profil, som resulterer i et større flytnings bidrag til bøjningscenteret, se ligning (2.1) og Figur 26, og dermed den større spænding. Afvigelsen mellem ANSYS og SW er på 4,47 %. I og med profilernes parametre er sammenfaldende og afvigelsen er acceptabel, kan det konkluderes, at der er opnået validitet med de anvendte værktøjer.

3 Design af beslag

De opnåede resultater i afsnit 2 vil blive anvendt til design af de universale beslag, samt opstilles der krav til design af disse, således at der dannes retnings linjer til design processen. Følgende krav opstilles for design af beslagene.

- Partialkoefficient iht. DS/EN anvendes
- Begrænset bearbejdelse af materialet
- Modstandsmoment anvendes som design parameter
- Anvendelse af materiale DX51D

Det besluttes at beregne efter normalkontrolkasse iht. DS/EN. Derved anvendes følgende partialkoefficient:

$$\gamma_{M0} = 1,1 \cdot \gamma_3 \quad (3.1)$$

Hvor

[2]

- γ_{M0} = partialkoefficient ved beregning af tværsnit
- γ_3 = kontrolkasse normal, med værdien 1

$$\gamma_{M0} = 1,1$$

3.1 Bærenderende beslag

De opnåede resultater i afsnit 2 benyttes nu til at vurdere det valgte design for det bærende beslag. Idet beslaget skal kunne overkomme statiske laster på 10g iht. afsnit 1.5 og det anvendte materiale har en fyldespænding på 140 MPa, konkluderes det, at det anvendte profil ikke er stærkt nok til at overkomme de statiske laster på 10g. Her tages de ligeledes hensyn til, at de opnåede resultater er beregnet som en solid bjælke. Det virkelige beslag er perforeret, se Figur 19, og derved har den nedsat styrke, dvs. at der skal regnes med et reduceret tværsnits areal.

Efter som KK ønsker at standardisere beslagene, undersøges det om et standard profil kan anvendes. Ved beregning af det krævede modstandsmoment, efter ligning(3.2) vælges et standardprofil. Efter DS/EN besluttes det at regne efter tværsnits klasse 3, hvor det tillades, at der sker flydning i de yderste fibre.

$$M_{Ed} = W_{el} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.2)$$

[1]

Hvor

- $M_{Ed} = M_{max}$
- $W_{el} = \text{elastisk modstandsmoment}$
- $f_y = \text{flydespænding for DX51D}$

Det krævede modstandsmoment fås til følgende:

$$W_{el} = 784,3 \text{ mm}^3$$

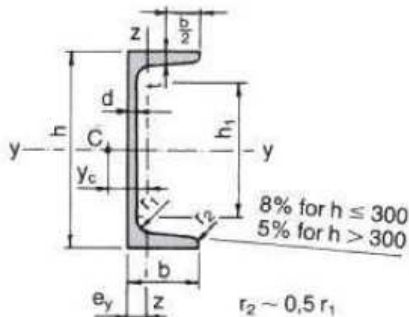
Idet lasten skal optages af to beslag, kan modstandsmomentet halveres.

$$\frac{W_{el}}{2} = 392,15 \text{ mm}^3$$

Efter som det anvendte moment er en faktor 10 af den reelle, findes et profil efter følgende modstandsmoment:

$$W_{el} = 3921,5 \text{ mm}^3$$

Ved tabel opslag i TS vælges et UPN-profil med følgende dimensioner:



Figur 33 viser symboler for værdierne for et UPN-profil

TB 4 viser værdierne for UPN 30x33x5.

Profil, a x b x d	r ₁	r ₂	A	g	I _y	I _z	W _{el,y}	W _{el,z}
mm	mm	mm	mm ²	kg/m	mm ⁴	mm ⁴	mm ³	mm ³
30 x 33 x 5	7	3,5	544	4,27	0,639 x 10 ⁶	0,0533 x 10 ⁶	4,26 x 10 ³	2,68 x 10 ³

Eftersom skabet er boltet i dets fire hjørne, vil der opnås mere reelle resultater ved at anvende randbetingelser med begge hjørnestolper fast indspændt. Dette vil resultere i momentoverførelse til hjørnestolperne og dermed mindske bøjningsmomentet i det bærende beslag, som vil resultere i mindre spændinger i beslaget. Idet lasterne fra afsnit 1.5 er de dimensions bestemmende, benyttes disse nu, til analyse af det valgte profil.

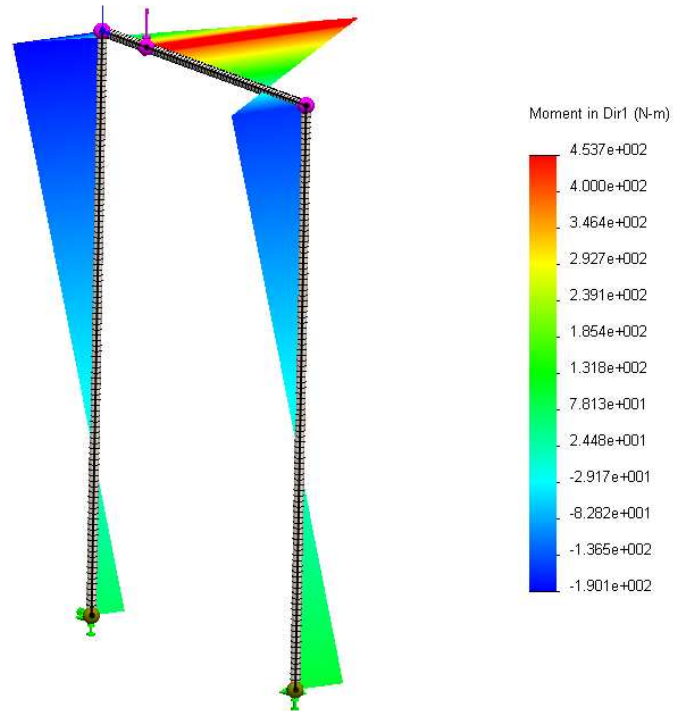
$$P = \frac{m \cdot 11g}{2} \quad (3.3)$$

$$P = 7,02 \text{ kN}$$

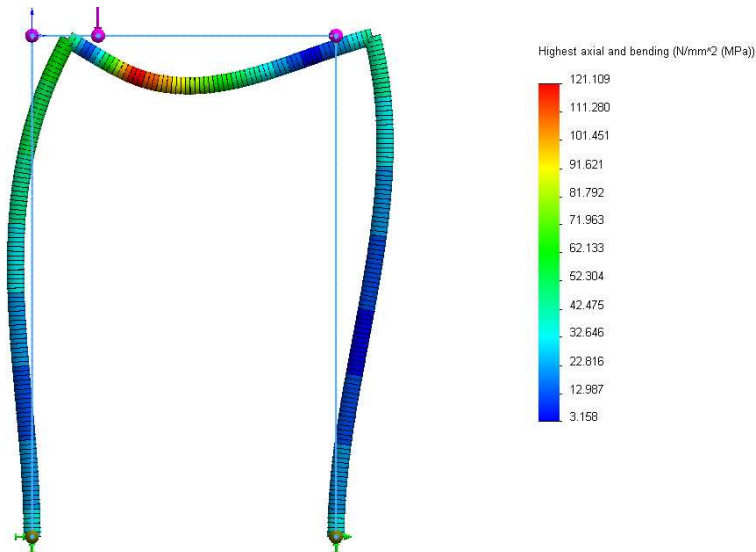
Ved anvendelse af disse betragtninger opnås følgende resultater, se Figur 34 og Figur 35.

$$M_{max} = 453,7 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{max} = 121,11 \text{ MPa}$$



Figur 34 vise momentfordelingen ved en dobbelt fast indspændt ramme.

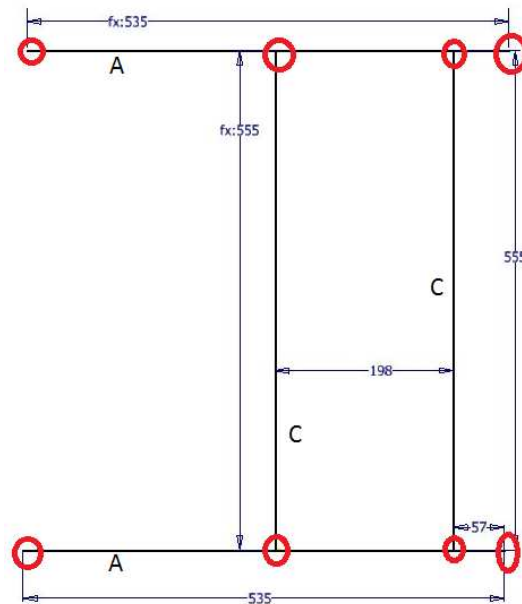


Figur 35 viser spændingsfordelingen ved anvendelse af nye randbetingelser.

Det vurderes efterfølgende at det valgte profil er anvendeligt i materialet DX51D.

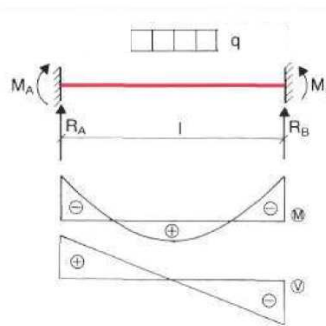
3.2 Trafo beslag

Eftersom det er konkluderet, at det bærende beslag kan optage lasten, designes trafo beslaget. For at lette beregningerne, simplificeres konstruktionen således, at der kun beregnes på den bærende konstruktion for trafo, se Figur 36. Dvs. at hjørnestolper undlades, laster fra trafo og randbetingelserne udnyttes.



Figur 36 viser en bjælke model af den forsimplede model, der er bærende for trafo. A bærende beslag, C trafo beslag. I de røde cirkler ses konstruktionen, som fast indspændt, idet der her benyttes bolte til samlingen.

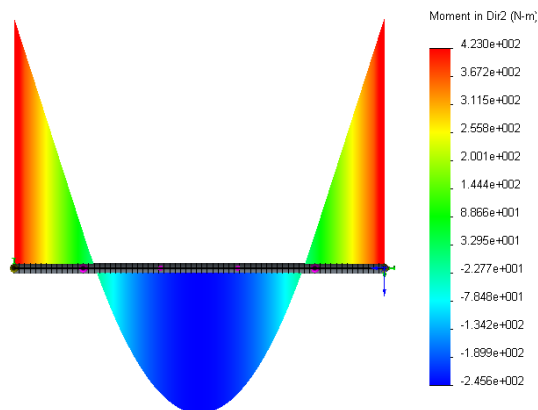
Det ene trafo beslag isoleres og momentet analyseres vha. SW. Se Figur 37.



Figur 37 viser bjælke model af trafo beslag, med tilhørende last.

Idet lasten er jævnt fordelt på beslaget, vil det største optrædende moment opstå ved de to indspændninger. Lasten der benyttes er iht. afsnit 1.5

$$M_{max2} = 423 \text{ Nm}$$



Figur 38 viser beregning af bøjningsmoment vha. SW.

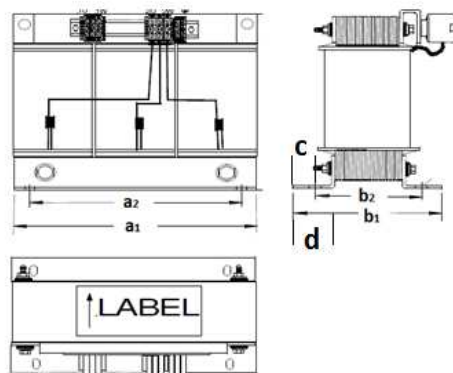
Det krævende modstandsmoment for trafo beslag beregnes vha. ligning (3.2) . Momentet deles med to, idet der benyttes to beslag til at optage lasten.

$$W_{el2} = \frac{M_{max2} \gamma_{M0}}{f_y}$$

$$W_{el2} = 1661,79 \text{ mm}^2$$

3.3 Montering af trafo

For at opnå det bedst mulige resultat ved design af et universalt trafo beslag til KK, undersøges de forskellige trafo der benyttes i KK regi. Det vælges at designe beslaget efter 12 af de mest anvendte trafo i 2014. På Figur 39 ses et eksempel på en trafo og i TB 5 ses de forskellige mål, der benyttes som reference til design af monterings anordning.



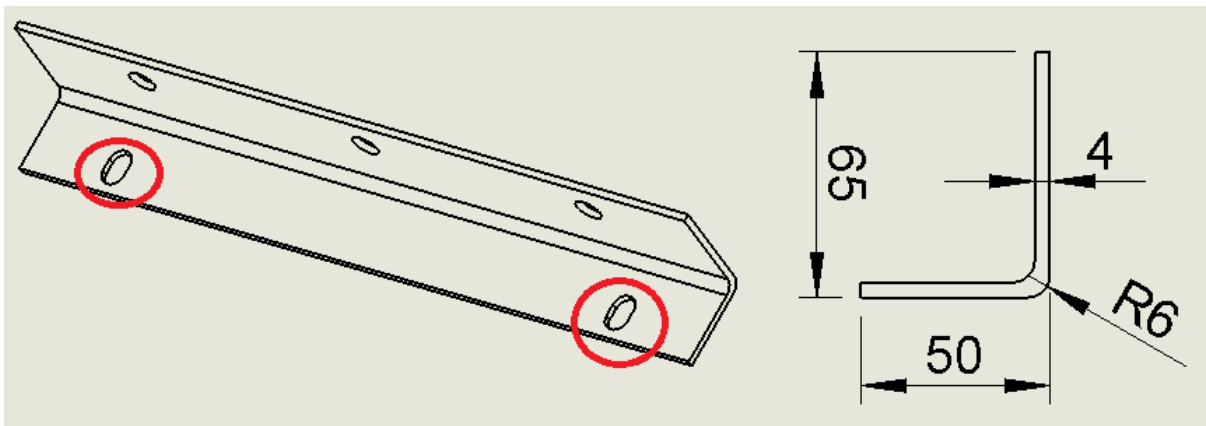
Figur 39 viser et eksempel på en trafo samt hvorledes målsætningen er defineret.

TB 5 viser data for trafo, som danner reference for design af monterings metode.

Nr.	b_1 (mm)	b_2 (mm)	a_1 (mm)	a_2 (mm)	c (mm)	d (mm)	vægt (kg)
1	172	140	240	144	16	50	40
2	173	143	280	176	15	50	48
3	84	58		170	13		6,5
4	177	145	200	140	16		26
5	171	203	200	140	16		33
6	142	102	500	414	20		100
7	142	102	500	414	20		115
8	175	143	420	316	16	37,5	100
9	201	169	200	140	16		29
10		203		316		50	130

Idet det ikke har været muligt at fremskaffe alle data, anvendes det størst funden d mål. Data som \emptyset - mål på bolt samlingens hul medtages ikke, efter som dette kan specificeres efter ønske. Der udføres beregninger på disse samlinger for derved at bestemme \emptyset - målet i afsnit 4.

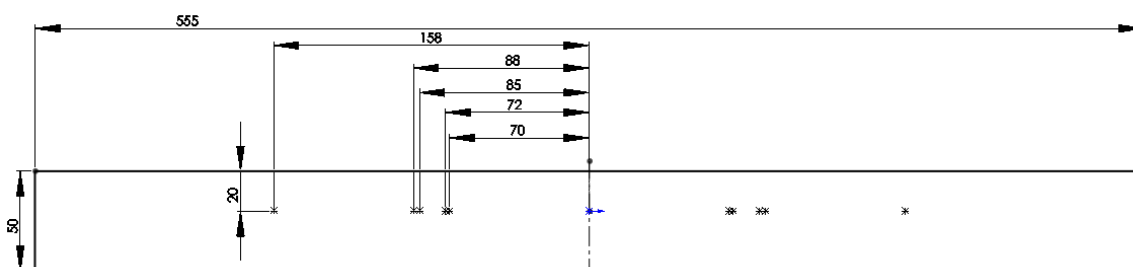
Udformning af traforens monteringsbeslag undersøges for derved at bestemme det optimale profil til trafo beslaget. Se Figur 40.



Figur 40 viser monterings beslag til trafo, røde cikler indikerer boltsamlingen mellem trafo beslag og monterings beslag for trafo.

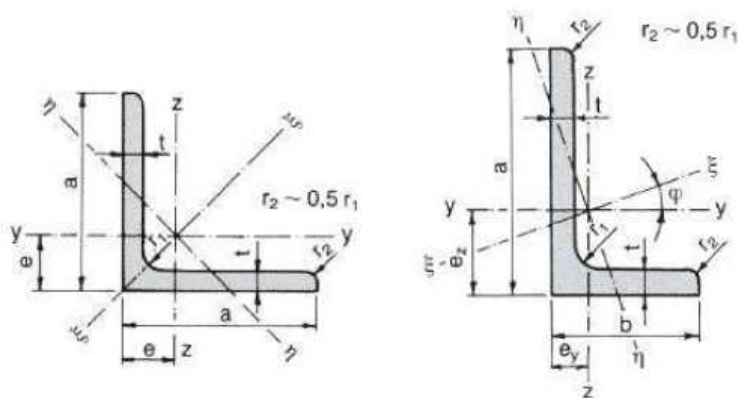
For at undgå vridning i trafo beslaget ønskes lasten fra trafoen placeret nærmest trafo beslagets forskydningscenter. Det vurderes at et vinkelprofil vil være at fortrække, idet bearbejdning af denne vil være begrænset til udformning af bolthuller og længdeafskæring. For at opnå mindst vridningsmoment i trafo beslaget, ønskes en anlægsflade på minimum 50 mm, for derved at placere lasten nærmest forskydningscenteret.

De forskellige a_2 mål fra TB 5, placeres på en plan flade for at identificere spredningen på disse, derefter benyttes det største c mål TB 5 til bestemmelse af midtakserne for hullerne, dette er skitseret på Figur 41.



Figur 41 viser placering af de forskellige trafos monteringshuller. Alle huller er placeret på en linje 20 mm fra yderste kant.

Vha. det elastiske modstandsmoment og ovenstående betragtninger, er to L - profiler valgt til nærmere analyse. På Figur 42 ses profilerne og TB 6 indeholder data for profilerne. I valget indgår også areal størrelsen, idet denne har betydning for vægten, hvilket ønskes mindst mulig. Samtidig er der inddraget overvejelser omkring monterings muligheder. For at lette produktionen skal monteringen holdes på et simpelt niveau.



Figur 42 viser de valgte L –profiler. Til venstre ligeflgede og til højre uligeflgede. [1].

TB 6 viser data for det valgte L – profil. [1]

Profil, a x b x t	r ₁	r ₂	A	g	I _y	I _z	W _{el,y}	W _{el,z}
mm	mm	mm	mm ²	kg/m	mm ⁴	mm ⁴	mm ³	mm ³
50 x 50 x 6	7	3,5	569	4,47	0,128 x 10 ⁶	0,128 x 10 ⁶	3,61 x 10 ³	3,61 x 10 ³
65 x 50 x 5	6,5	3,25	554	4,35	0,231 x 10 ⁶	0,119 x 10 ⁶	5,11 x 10 ³	3,18 x 10 ³

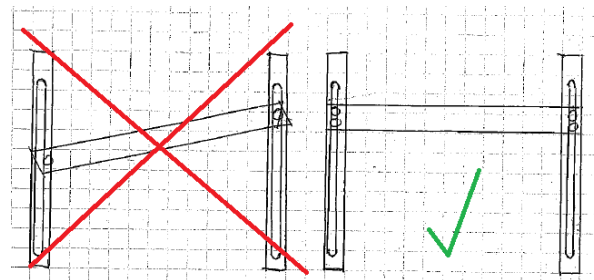
Med de valgte profiler opnås maksimale bøjningsspændinger om den stærke akse på følgende, udført vha. ligning (2.1). Beregninger findes i appendiks 3 resultaterne findes TB 7.

TB 7 viser resultatet opnået ved beregning af bøjning om den stærke akse.

Profil (mm)	W _{el,y} (mm ³)	M _{max} (Nm)	σ _{max} (MPa)
50 x 50 x 6	3,61 x 10 ³	423	117,17
65 x 50 x 5	5,11 x 10 ³	423	82,78

Det vurderes, at det uligeformede, rundkantede vinkelprofil, 65 x 50 x 6 mm, er bedst egnet, idet profilet har det største modstandsmoment, og derfor kan optage den største last. Derudover har profilet det mindste tværsnitsareal, som vil resultere i materiale besparelse.

Det besluttes at udforme trafo beslaget med et aflangt hul. Dette fordi beslaget skal fungere som et universalt beslag, og trafo ikke altid placeres i centeret af beslaget. I hver ende af beslaget konstrueres to bolthuller til samlingen mellem trafo beslag og det bærende beslag, for derved at modvirke rotation og skæve monteringer af beslagene, se Figur 43.



Figur 43 viser et trafo beslag monteret på to bærende beslag, Til venstre kan rotation opstå og til højre er trafo beslaget fastholdt mod rotation.

Det aflange hul resulterer i en friktionssamling, som beregnes i afsnit 4. På Figur 44 ses det universale trafo beslag, som analyseret vha. ANSYS.

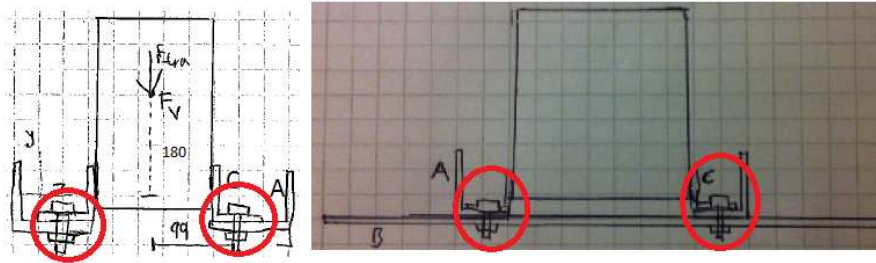


Figur 44 viser det universale trafo beslag. Denne er designet ud fra en standard vinkelprofil.

Ø – mål for det aflange hul samt hul til boltsamling mellem trafo beslaget og det bærende beslag, bestemmes i afsnit 4.

4 Bolt samling

Alle trafore hos KK bliver monteret vha. bolte. Der udføres herunder beregninger iht. DS/EN og DS/EN 1993-1-1 DK NA:2014, for at bestemme bolt størrelser. Samlingerne der beregnes for, er mellem trafo monterings beslag og trafo beslag, trafo beslag og det bærende beslag samt samlingen for det bærende beslag og hjørnestolpe Se Figur 45.



Figur 45 viser de to boltsamlinger der beregnes. A: trafo beslag, B: bærerene beslag, C: trafo monterings beslag.

4.1 Beregning af boltsamlingen mellem trafo og trafo beslag

Der benyttes M10 bolt med rullet gevind. Materiale for tilspændte plade er DX51D, boltens forspændes efter DS/EN. Samlingen beregnes som en friktionssamling, kategori C.

4.1.1 Bolt data

TB 8 viser data for bolt M10 8.8. [2]

Trækstyrke f_{ub} (MPa)	Spændings areal A_s (mm ²)	Bolt diameter d (mm)	Antal bolte n_b	Bolt hoved diamet d_m (mm)
800	58	10	4	17

4.1.2 Data for plade materiale

TB 9 viser data for trafo beslag.

Trækstyrke f_u (MPa)	Pladde tykkelse t (mm)	Hul diameter d_0 (mm)
270	5	11

4.1.3 Koefficienter for samlingen

TB 10 viser koefficienter anvendt til beregning af samlingen [2].

Friktionskoefficient μ	Friktionsflader n	korrektionsfaktoren for hul udformning k_s	korrektionsfaktoren for kærsvirkning rullet gevind k_2	Koefficienten for snit gennem gevind α_v
0,1	1	0,63	0,9	0,6

TB 11 viser partialkoefficienter for samlingen [2].

hulrand og gennemlokning γ_{M2}	Friktionssamling γ_{M3}	forspændt bolt γ_{M7}	Kontrolkasse γ
1,35* γ	1,35* γ	1,2* γ	1

4.2 Laster i samlingen

Laster, der benyttes i samlingen, er iht. afsnit 1.5. Disse laster vurderes til at være de kritiske og dermed dimensionsbestemmende.

4.2.1 Egenlasten

$$F_{trafo} = m \cdot g \quad (4.1)$$

Hvor

- $m = \text{massen af trafo (130kg)}$
- $g = \text{tyndeacceleration}$

$$F_{trafo} = 1,27 \text{ kN}$$

Under chok testen belastes skabene med 10g. Denne last optages som en forskydningskraft i bolten.

4.2.2 Forskydningskraften

Forskydningskraften pr. bolt F_{vEd}

$$F_{vEd} = \frac{F_v}{n_b} \quad (4.2)$$

Hvor

- $F_v = \text{forskydningslast}$
- $n_b = \text{antal bolte}$

$$F_v = m \cdot 10g \quad (4.3)$$

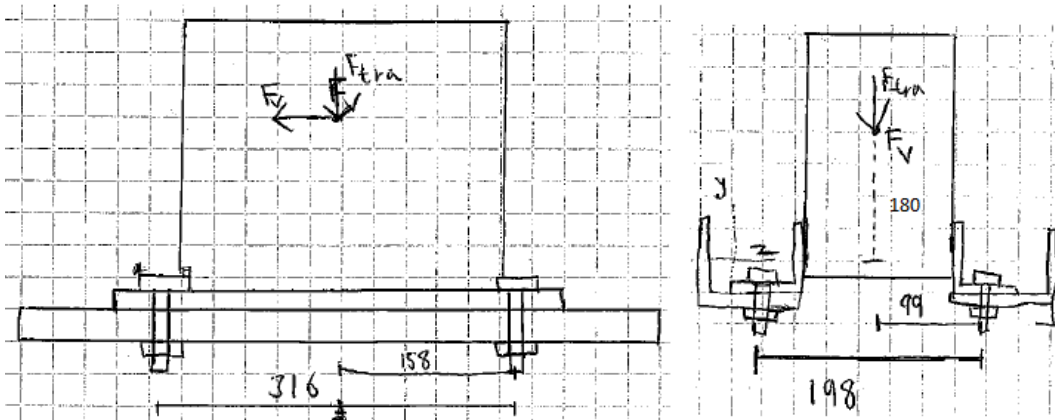
$$F_v = 12,75 \text{ kN}$$

Forskydningskraften pr. bolt findes ved at lade alle bolte optage forskydningslasten F_v , ved ligning (4.2)

$$F_{vEd} = 3,19 \text{ kN}$$

4.2.3 Trækraft

Idet forskydningskraften er placeret i massemidtpunktet af traforen, dannes der et moment i boltsamlingen. Dette moment vil virke som en træk – trykkraft. Vha. Figur 46 bestemmes disse kræfter.



Figur 46 viser boltsamlingen og placering af F_v og F_{trafo} .

Momentet der virker i boltene.

$$M_v = \frac{F_v \cdot 180 \text{ mm}}{4} \quad (4.4)$$

$$M_v = 573,69 \text{ Nm}$$

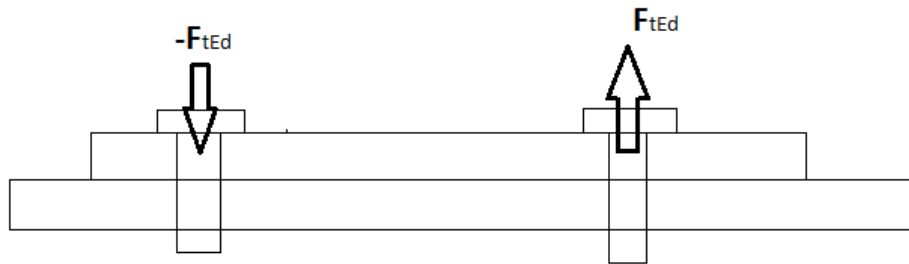
Egenlasten vil give et bidrag til træk-trykkraften. Dette bidrag er fundet vha. analyserne fortaget i SW.

$$F_{ttrafo} = 320 \text{ N}$$

Den virkende trækraft F_{tEd} i boltene bestemmes.

$$F_{tEd} = \frac{M_v}{316 \text{ mm}} + F_{ttrafo} \quad (4.5)$$

$$F_{tEd} = 2,14 \text{ kN}$$



Figur 47 viser fordelingen af momentet som træk-trykkrafter.

4.3 Kriterier for boltsamlingen

Idet boltsamlingen dannes ved et aflangt hul, defineres samlingen som en friktionssamling kategori C (kilde). Følgende gælder for at samlingen kan bære lasten. Forskydningskraften F_{vEd} pr. bolt må ikke overstige:

- Friktionsbæreevnen F_sR_d
- Hulrandsbæreevne F_bR_d

I de sammenspændte pladder må der ikke forekomme flydning, idet flydning vil mindske forspændingskraften, og resultere i en reduceret friktionsbæreevne.

Der vil i beregningerne også eftervises, at overlappingsbæreevnen og træk-bæreevne for bolten er overholdt samt, at der ikke opstår gennemlokning og bæreevnen ved træk- og forskydnings påvirkning af bolten samtidigt er overholdt.

4.3.1 Tilspændingskraft

Den maksimale tilladelige forspændingskraft F_{pCd} beregnes efter DS/EN. Der tillades en forspændning på 70 % af boltens trækstyrke.

$$F_{pCd} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_s}{\gamma_{M7}} \quad (4.6)$$

[2]

Værdier findes i TB 8 og TB 11

$$F_{pCd} = 27,07 \text{ kN}$$

4.3.2 Overklipningsbæreevne

Boltens overklipningsbæreevne beregnes efter DS/EN TB 3.4.

$$F_{vRd} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_s}{\gamma_{M2}} \quad (4.7)$$

[2]

Værdier findes i TB 8, TB 10 og TB 11 .

$$F_{pCd} = 20,62 \text{ kN}$$

Idet friktionssamlinger vil forskydningskraften ikke give anledning til overklipping af boltene, hvis friktionskraften kan optage forskydningskraften F_{vEd} .

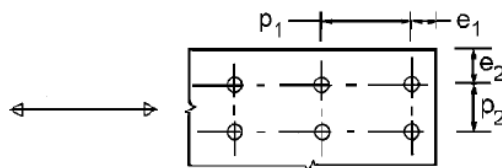
4.3.3 Hulrandsbæreevnen

Der beregnes som et normalt hul, og derefter reduceres der for det aflange hul, efter DS/EN TB 3.4.

$$F_{bRd} = 2,5 \cdot d \cdot \frac{f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (4.8)$$

[2]

Til formelen gælder de optimale minimumsafstandsbetænelser, TB 12 efter DS/EN.



Figur 48 viser symboler for indbyrdes afstand mellem samlingselementer [2]

Længderne beregnes efter TB 12.

TB 12 viser beregning af minimale bolte afstande. [2]

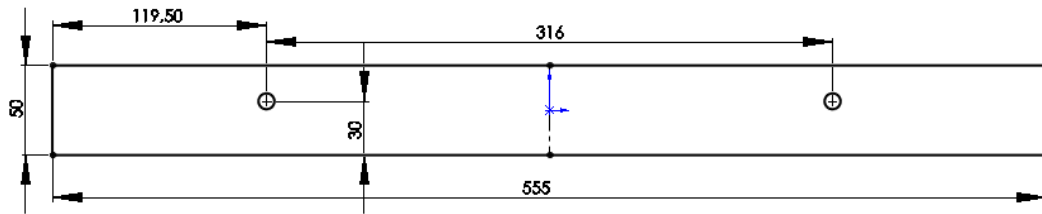
	Absolutte minimumsafstande	Optimale minimumsafstande
e_1	$1,2 d_0$	$3,0 d_0$
p_1	$2,2 d_0$	$3,75 d_0$
e_2	$1,2 d_0$	$1,5 d_0$
p_2	$2,4 d_0$	$3,0 d_0$

I TB 13 er de optimale minimumsafstande beregnet.

TB 13 viser de optimale minimale afstande.

	Optimale minimumsafstande (mm)
e_1	33
p_1	41,25
e_2	16,5
p_2	33

Placeringen af hullerne ses på Figur 49 og det konkluderes, at afstandene er overholdt. Hulrandsbæreevne beregnes efter ligning (4.8).



Figur 49 viser hullernes placering på trafo beslag.

$$F_{bRd} = 25 \text{ kN}$$

4.3.4 Trækbæreevne

Boltens trækbæreevne beregnes efter TB 3.4 DS/EN

$$F_{tRd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (4.9)$$

[2]

$$F_{tRd} = 30,93 \text{ kN}$$

4.3.5 Friktionsbæreevnen

Friktionsbæreevnen F_{sRd} opstår mellem de sammenspændte pladder og afhænger derfor af hullets udformning og friktionen i kontaktfladen. Dette korrigeres vha. korrektionsfaktoren k_s og friktionskoefficient μ TB 10.

$$F_{sRd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M2}} \cdot F_{pC} \quad (4.10)$$

[2]

Hvor

- $F_{pC} = \text{forspændingskraften uden reduktion}$

$$F_{pC} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s \quad (4.11)$$

[2]

Det vurderes, at 1/4 af egenlasten F_{trafo} vil give et bidrag til forspændingskraften pr. bolt. Derved fås en forspændingskraft på:

$$F_{pC} = 32,48 \text{ kN}$$

Efter DS/EN afsnit 3.92, skal forspændingskraften F_{pC} , der benyttes til at bestemme friktionsbæreevnen, reduceres med 80% af trækraften F_{tEd} . Dette gælder dog ikke, hvis forspændingskraften opvejer trækraften [2]. Der foretages kontrol af dette vha. Mathcad.

$$\text{Reduktion} := \begin{cases} \text{"IKKE NØDVENDIG"} & \text{if } F_{tEd} \leq F_{pCd} \\ \text{"NØDVENDIGT"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Reduktion} = \text{"IKKE NØDVENDIG"}$$

Friktionsbæreevnen bliver derfor:

$$F_{sRd} = 1,58 \text{ kN}$$

4.3.6 Gennemlokningsbæreevne

Gennemlokningsbæreevnen F_{pRd} kan i nogle tilfælde være den bestemmende bæreevne, hvis denne er mindre end trækbæreevne F_{tRd} . F_{pRd} beregnes efter DS/EN TB 3.4.

$$B_{pRd} = 0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \quad (4.12)$$

[2]

$$B_{pRd} = 32,04 \text{ kN}$$

4.4 Kontrol af samlingens bæreevne

Det kontrolleres nu, om kriterierne i afsnit 4.3 for friktionssamlingen er overholdt. Dette er gjort vha. Mathcad appendiks 4.

Friktionsbæreevne

$$\text{Friktionsbæreevne} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{vEd} \leq F_{sRd} \\ \text{"IKKE OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Friktionsbæreevne} = \text{"IKKE OK"}$$

Udnyttelse af bæreevnen

$$\text{Udn}_{\text{friktionsbæreevne}} := \frac{F_{vEd}}{F_{sRd}}$$

$$\text{Udn}_{\text{friktionsbæreevne}} = 202.33\%$$

Hulrandsbæreevnen

$$\text{Hulrandsbæreevne} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{vEd} \leq F_{bRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Hulrandsbæreevne} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse af bæreevnen

$$\text{Udn}_{\text{hulrandsbæreevne}} := \frac{F_{vEd}}{F_{bRd}}$$

$$\text{Udn}_{\text{hulrandsbæreevne}} = 12.75\%$$

Idet friktionsbæreevnen ikke kan optage forskydningskraften F_{vEd} , vil samlingen ikke være bærende. Der kontrolleres nu for antal nødvendige M10 bolte for at optage forskydningskraften.

$$x := \begin{cases} F_{vEd} \leq F_{sRd} \\ F_{sRd} = \frac{F_v}{x} \end{cases} \text{ solve, } x \rightarrow \frac{1300.0 \cdot \text{g} \cdot \text{kg}}{1515.7333333333333 \cdot \text{MPa} \cdot \text{mm}^2 + 6.0666666666666667 \cdot \text{g} \cdot \text{kg}}$$

$$x = 8.09$$

Der skal således benyttes 9 M10 bolte til at optage forskydningskraften. I samarbejde med KK vurderes dette antal til ikke at være acceptabelt. Der beregnes derfor den krævede forspændingskraft på bolten for at bestemme bolt størrelsen. Vha. Mathcad appendiks 4 fås følgende.

Krævet forspændingskraft:

$$F_{pK} = 67,98 \text{ kN}$$

For at kunne opnå denne kraft, kræves der et spændings areal på:

$$A_{s2} = 163,87 \text{ mm}^2$$

Ud fra TB opslag i TS, s. 297 skal en M20 benyttes med et spændingsareal på 245 mm^2 . I samarbejde med KK vurderes denne bolt som værende for stor til samlingen. For at lette belastningen på bolten, vurderes det at 6 bolt er acceptabelt til samlingen. Yder mere vælges det, at benytte en styrkeklasse 10.9. Ved anvendelse af denne samt ved at lade forskydningskræften optages af 6 bolte, er en M12 bolt vurderet acceptabel til samlingen, med følgende resultater, Kontrol beregning af M12 bolt er foretaget i appendiks 5.

Friktionsbæreevne

$$\text{Friktionsbæreevne} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{vEd} \leq F_{sRd} \\ \text{"IKKE OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Friktionsbæreevne} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse af bæreevnen

$$U_{dn, \text{friktionsbæreevne}} := \frac{F_{vEd}}{F_{sRd}}$$

$$U_{dn, \text{friktionsbæreevne}} = 75.53\%$$

Hulrandsbæreevnen

$$\text{Hulrandsbæreevne} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{vEd} \leq F_{bRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Hulrandsbæreevne} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse af bæreevnen

$$U_{dn, \text{hulrandsbæreevne}} := \frac{F_{vEd}}{F_{bRd}}$$

$$U_{dn, \text{hulrandsbæreevne}} = 7.08\%$$

4.4.1 Kontrol af de resterende bæreevner

Kombineret last

$$K_{b\text{æreevnen}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{F_{vEd}}{F_{vRd}} + \frac{F_{tEd}}{1.4F_{tRd}} \leq 1 \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$K_{b\text{æreevnen}} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse

$$U_{d\text{kombineret}} := \left(\frac{F_{vEd}}{F_{vRd}} + \frac{F_{tEd}}{1.4F_{tRd}} \right)$$

$$U_{d\text{kombineret}} = 8.4\%$$

Gennemlokningsbæreevne

$$G_{l\text{bæreevne}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{tEd} \leq B_{pRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$G_{l\text{bæreevne}} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse

$$U_{d\text{gennemlok}} := \frac{F_{tEd}}{B_{pRd}}$$

$$U_{d\text{gennemlok}} = 5.963\%$$

Trækbæreevne

$$T_{r\text{ækbæreevne}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{tEd} \leq F_{tRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$T_{r\text{ækbæreevne}} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse

$$U_{d\text{træk}} := \frac{F_{tEd}}{B_{pRd}}$$

$$U_{d\text{træk}} = 5.963\%$$

Overklipningsbæreevne

$$O_{k\text{bæreevne}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{vEd} \leq F_{vRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$O_{k\text{bæreevne}} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse

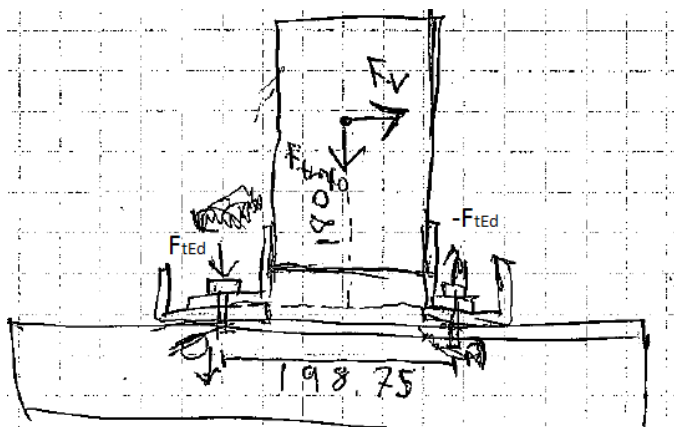
$$U_{d\text{overklip}} := \frac{F_{tEd}}{B_{pRd}}$$

$$U_{d\text{overklip}} = 5.963\%$$

4.5 Beregning af boltsamlingen mellem trafo beslag og det bærende beslag

Ved denne bolt samling anvendes 8 bolte iht. afsnit 3.3, Figur 43. Alle beregninger foretages efter principperne anvendt i afsnit 4.1. Det ønskes at benytte en bolt med styrkeklasse 8.8

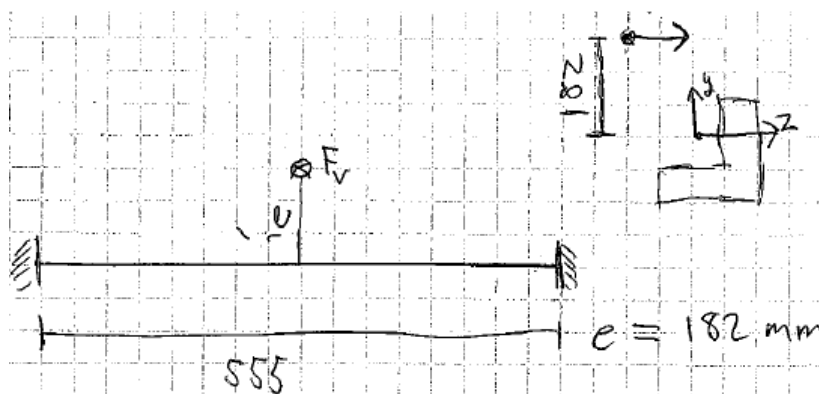
Data fra TB 8 og TB 11 benyttes til beregning af samlingen, idet der her er tale om en identisk friktionssamling. Ved denne samling vil den kritiske last være virkende i z – retning. Dette resulterer i momentpåvirkning af boltene, som ikke er identisk med snit 4.1. Denne last påvirkning beregnes vha. Figur 50.



Figur 50 viser forskydningskraften virkende i z-retning, i massemidtpunktet af traforen.

4.5.1 Laster i samlingen

Lasten F_V skaber et vridende moment, som overføres til boltene. Denne findes vha. Figur 51 bestemmes dette moment.



Figur 51 viser placering af forskydningslasten der danner et vridningsmoment.

Vridningsmomentet T_M bestemmes efter ligning(4.13):

$$T_M = F_v \cdot 182 \text{ mm} \quad (4.13)$$

$$T_M = 2,32 \text{ kNm}$$

Trækraften F_{TM} fra det vridende moment beregnes derefter til:

$$F_{TM} = \frac{T_m}{555 \text{ mm}} \quad (4.14)$$

Denne fordeles ligeligt på boltene.

$$F_{TMb} = 0,52 \text{ kN}$$

Den enkelte bolt vil blive påvirket af en trækraft F_{ED2} .

$$F_{vED2} = F_{TMb} + \frac{F_{trafo}}{4} \quad (4.15)$$

$$F_{vED2} = 0,603 \text{ kN}$$

4.5.2 Dimensionering af bolt

Efter ligning (4.10) fås en krævet tilspændingskraft på følgende, beregninger findes i appendiks 6.

$$F_{pk} = 30,19 \text{ kN}$$

Denne kraft benyttes i ligning (4.6). Det krævede spændingsareal A_s beregnes til:

$$A_{s2} = 70,44 \text{ mm}^2$$

Det er nu muligt at bestemme boltstørrelsen efter tabel opslag i TS. Bolt M12 vælges til samlingen.

Efter ligning (4.10) beregnes friktionsbæreevnen i samlingen. Boltens tilspændes med 70 % af dens trækstyrke. Friktionsbæreevnen F_{sRd2} beregnes til:

$$F_{sRd2} = 1,85 \text{ kN}$$

Kontrol af friktionsbæreevnen vha. Mathcad:

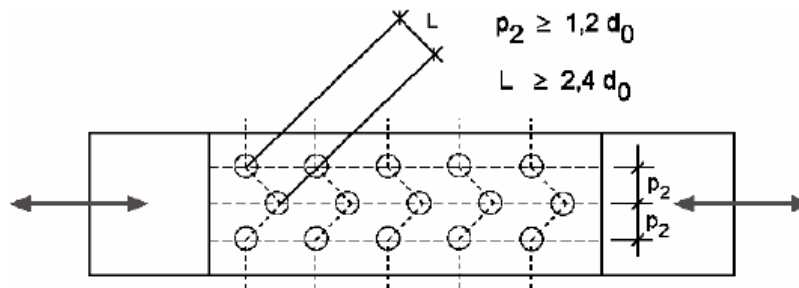
$$\text{Friktionsbæreevne} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{vEd} \leq F_{sRd} \\ \text{"IKKE OK"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Friktionsbæreevne} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse af bæreevnen

$$U_{\text{dn, friktionsbæreevne}} := \frac{F_{vEd}}{F_{sRd}} \quad U_{\text{dn, friktionsbæreevne}} = 86.22\%$$

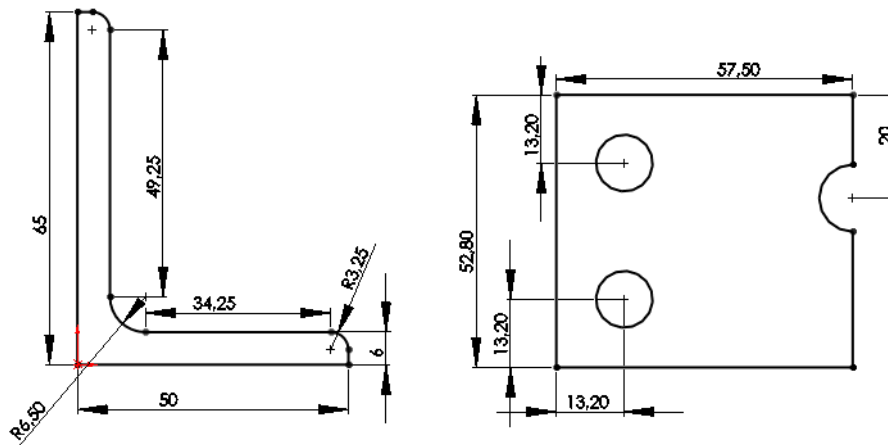
4.5.3 Kontrol af minimale afstande

Eftersom der benyttes to bolte side om side, kontrolleres de minimale afstande efter DS/EN. Beregning er foretaget efter TB 12.



Figur 52 viser symboler for forskudt indbyrdes afstand [2].

På Figur 53 ses de absolutte minimumsafstande og trafo beslagets profil.



Figur 53 viser til venstre trafo beslagets profil og til højre de absolutte minimumsafstande efter DS/EN

Det konkluderes, at beslaget ikke vil kunne opfylde betingelserne og derfor benyttes de absolutte minimumsafstande til bestemmelse af profilets længder. Ved benyttelse af de absolutte

minimumsafstande skal ligning(4.16) benyttes til beregning af hulrandsbæreevnen, iht. DS/EN. Denne ligning resulterer i en reduceret bæreevne.

$$F_{bRd2} = \frac{k_1 \cdot F_u \cdot d \cdot t \cdot \alpha_b}{\gamma_{M2}} \quad (4.16)$$

[2]

Hvor

- $\alpha_b = \text{mindste værdien af ligning (4.17), } \frac{f_{ub}}{f_u} \text{ og } 1$
- $k_1 = \text{mindste værdien af ligning (4.18) og } 2.5$

Reduktionsfaktorerne beregnes efter ligning (4.17) og (4.18)

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0} \quad (4.17)$$

[2]

$$k_1 = 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \quad (4.18)$$

[2]

Faktorerne beregnes vha. Mathcad.

$$\alpha_d := \frac{e_1}{3 \cdot d_0} \quad \alpha_d = 0,4$$

$$\alpha_b := \min \left[\alpha_d, \left(\frac{f_{ub}}{f_u} \right), 1 \right] \quad \alpha_b = 0,4$$

$$k_1 := \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right), 2,5 \right] \quad k_1 = 1,66$$

Figur 54 viser beregning af mindsteværdien for k_1 og α_d

4.5.4 Hulrandsbæreevne

Hulrandsbæreevnen beregnes efter ligning (4.16) og reduceres med en faktor 0,6 da det er et aflangt hul.

$$F_{bRd2} \cdot 0,6 = 4,78 \text{ kN}$$

4.5.5 Trækbæreevne

Boltens trækbæreevne F_{tRd2} og gennemlokningsbæreevne B_{pRd2} beregnes i appendiks 6.

$$F_{tRd2} = 44,96 \text{ kN}$$

$$B_{pRd2} = 38,45 \text{ kN}$$

4.5.6 Kontrol af samlingen

Samlingen kontrolleres for dens bæreevne vha. Mathcad, appendiks 6.

Hulrandsbæreevnen

$$\text{Hulrandsbæreevne} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{vEd} \leq F_{bRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Hulrandsbæreevne} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse af bæreevnen

$$Ud_{\text{hulrandsbæreevne}} := \frac{F_{vEd}}{F_{bRd}}$$

$$Ud_{\text{hulrandsbæreevne}} = 20. \%$$

Kombineret last

$$Kb_{\text{bæreevnen}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{F_{vEd}}{F_{vRd}} + \frac{F_{tEd}}{1.4F_{tRd}} \leq 1 \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Kb_{\text{bæreevnen}} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse

$$Ud_{\text{kombineret}} := \left(\frac{F_{vEd}}{F_{vRd}} + \frac{F_{tEd}}{1.4F_{tRd}} \right)$$

$$Ud_{\text{kombineret}} = 6.3. \%$$

Gennemlokningsbæreevne

$$Gt_{\text{bæreevne}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{tEd} \leq B_{pRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Gt_{\text{bæreevne}} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse

$$Ud_{\text{gennemlok}} := \frac{F_{tEd}}{B_{pRd}}$$

$$Ud_{\text{gennemlok}} = 1.57. \%$$

Trækbæreevne

$$\text{Træk}_{\text{bæreevne}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{tEd} \leq F_{tRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Træk}_{\text{bæreevne}} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse

$$Ud_{\text{træk}} := \frac{F_{tEd}}{F_{tRd}}$$

$$Ud_{\text{træk}} = 1.34\%$$

Overklipningsbæreevne

$$Ok_{\text{bæreevne}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{vEd} \leq F_{vRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ok_{\text{bæreevne}} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse

$$Ud_{\text{overklip}} := \frac{F_{vEd}}{F_{vRd}}$$

$$Ud_{\text{overklip}} = 5.32\%$$

Ved shock test i y-retning er den betydende bæreevne boltetens træk kraft, denne kontrolleres.

Trækbæreevne

$$\text{Trækb}_y := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_v \leq F_{tRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Trækb}_y = \text{"OK"}$$

Udnyttelse

$$Ud_y := \frac{F_v}{F_{tRd}}$$

$$Ud_y = 28.356\%$$

Idet der ved denne samling skal anvendes en M12 bolt, vælges det at benytte samme type som anvendt i afsnit 4.4.

4.6 Beregning af boltsamlingen mellem det bærende beslag og hjørnestolpe

Denne samling konstrueres som en dornsamling med pashuller. Følgende kriterier er glædende for denne samlingstype.

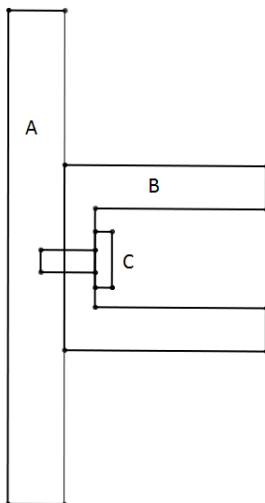
Forskydningskraften F_{vEd} pr. bolt må ikke overstige:

- Overklipningsbæreevnen F_{vRd}
- Hulrandsbæreevnen F_{bRd}

Derudover skal bæreevnen for den kombinerede last overholdes.

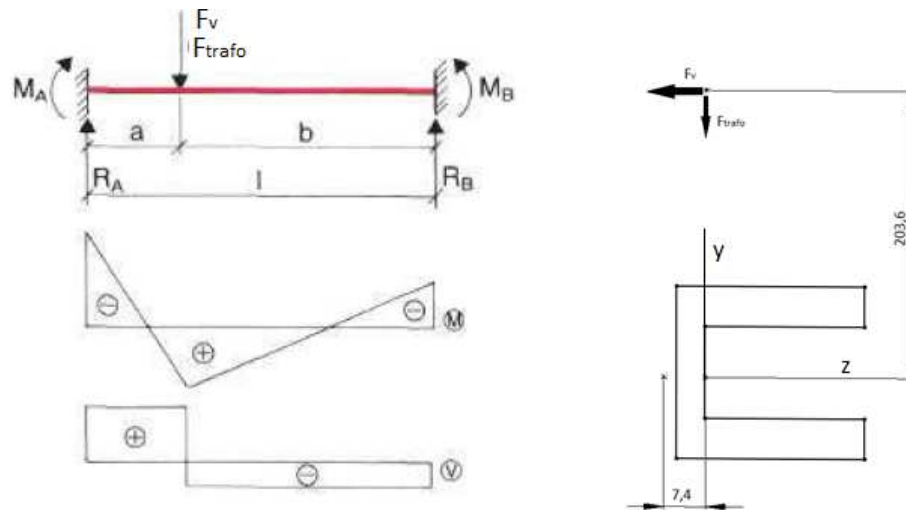
$$\frac{F_{vEd}}{F_{vRd}} + \frac{F_{tEd}}{F_{tRd}} \leq 1$$

Der regnes for to lasttilfælde, som er vurderet til at være de kritiske for samlingen. Udsnit af samlingen ses på Figur 55.



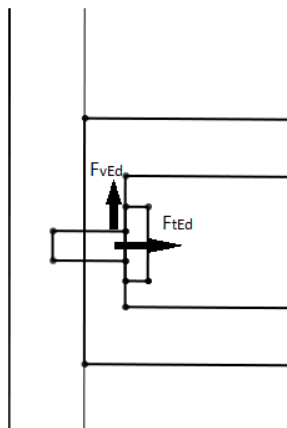
Figur 55 udsnit af samling mellem hjørnestolpe og bærende beslag. A: hjørnestolpe, B: bærende beslag, C: bolt

Lasterne der virker i denne samling, beregnes efter Figur 56.



Figur 56 viser antagelserne for det bærende beslag.

Begge laster vil påvirke bolten med et bøjningsmoment, F_v om y-aksen og F_{trafo} om z-aksen. Idet lasterne antages at virke i bøjningscenteret, vil dette medføre et vridningsmoment. Vha. disse antagelser er lasterne fordelt som vist på Figur 57. Der regnes ift. de kritiske laster. Beregninger for denne samling findes i appendiks 7.



Figur 57 viser fordelingen af kræfterne i samlingen

Til samlingen er en M6 vurderet passende til optagelse af de optrædende laster med følgende udnyttelse af bæreevnerne:

Hulrandsbæreevnen

$$\text{Hulrandsbæreevne} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } (F_{vEd}) \leq F_{bRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Hulrandsbæreevne} = \text{"OK"}$$

Udnyttelse af bæreevnen

$$U_{dn_{\text{hulrandsbæreevne}}} := \frac{F_{vEd}}{F_{bRd}}$$

$$U_{dn_{\text{hulrandsbæreevne}}} = 64.87\%$$

Overklipningsbæreevne

$$\text{Ok}_{\text{bæreevne}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } F_{vEd} \leq F_{vRd} \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ok}_{\text{bæreevne}} = \text{"OK"}$$

$$U_{d_{\text{overklip}}} := \frac{F_{vEd}}{F_{vRd}}$$

$$U_{d_{\text{overklip}}} = 70.53\%$$

Kombineretbæreevne

$$\text{Kb}_{\text{bæreevnen}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \frac{F_{vEd2}}{F_{vRd}} + \frac{F_{tEd2}}{1.4F_{tRd}} \leq 1 \\ \text{"NOT OK"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Kb}_{\text{bæreevnen}} = \text{"OK"}$$

$$U_{d_{\text{kombineret}}} := \frac{F_{vEd2}}{F_{vRd}} + \frac{F_{tEd2}}{1.4F_{tRd}}$$

$$U_{d_{\text{kombineret}}} = 59.3\%$$

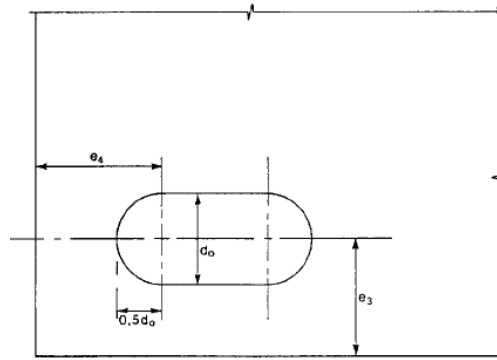
Vha. de udførte bolt beregninger er der udviklet et beregning sheet til disse typer samlinger, som er parameterstyret. Parametrene er anført i TB 14. Sheet er udviklet i Mathcad.

TB 14 viser de nødvendige parameter for beregning af boltsamlinger af kategori C

Parameter for bolt				
Trækstyrke f_{ub}	Spændingsareal A_s	Bolt diameter	Bolthoved diameter d_m	Antal bolt
Parameter for plade materiale				
	Trækstyrke f_u	Plade tykkelse t	Hul diameter d_0	

5 Optimering af design

Ud fra beregninger i afsnit 4.5.3 kan det konkluderes at det valgte trafo beslag ikke er dimensioneret til de minimumsafstande, der er krævet for huller. Det vurderes, at det er tilladeligt at anvende den bredde flange for derved at tilnærme sig minimumsafstandene. Ved et aflangt hul gælder der følgende minimums ende-og kantafstande efter DS/EN, se Figur 58.



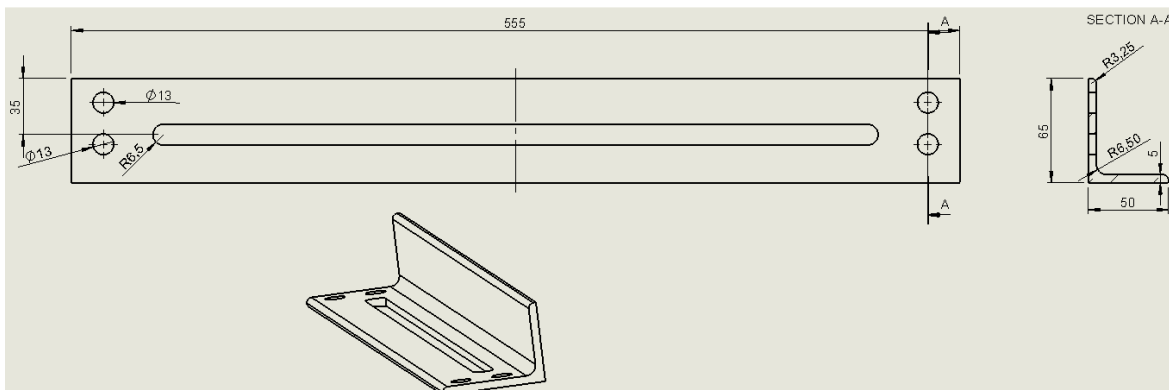
Figur 58 viser ende- og kantafstande for aflange huller [2].

Værdierne findes i TB 15.

TB 15 viser værdierne for ende-og kantafstande

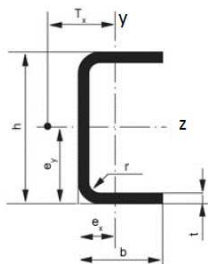
	Optimale minimumsafstande (mm)
$e_3 = 1,5d_0$	19,5
$e_4 = 1,5d_0$	19,5

Det færdige design af trafo beslaget ses på Figur 59.



Figur 59 viser arbejds tegning for trafo beslaget.

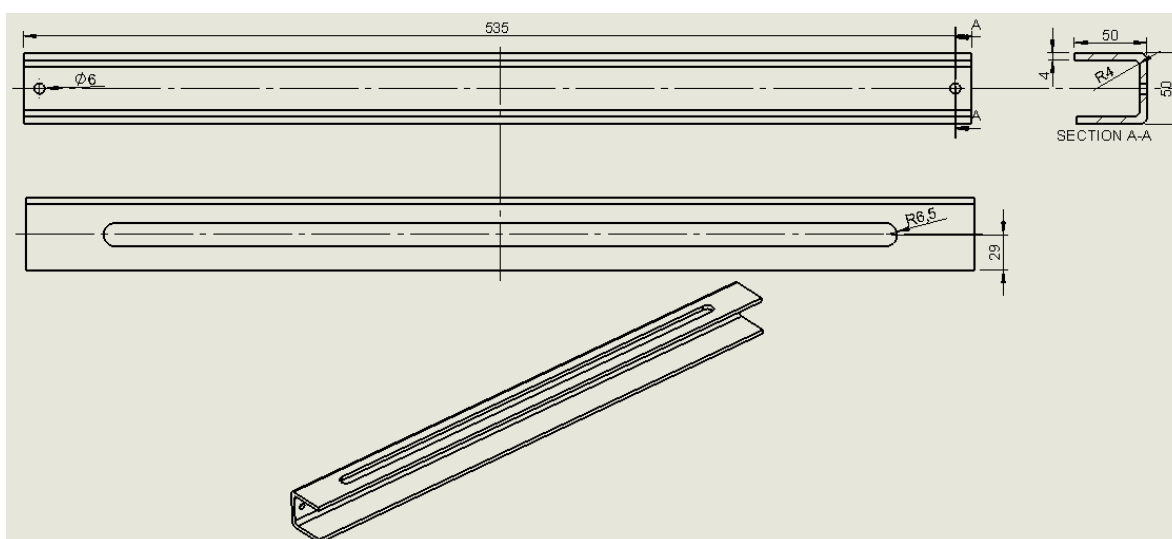
Til det bærende beslag, vælges der at anvende et koldt valset u-profil, idet der skal konstrueres huller i enderne til montering af beslagene i Rittal skabet. Dertil skal minimumsafstande for et aflangt hul kunne overholdes. Der vælges et u-profil ud fra bøjningsmomenterne beregnet i appendiks 7. Idet profilet påføres huller, reduceres dets bæreevne. Modstandsmomentet for et profil er proportionalt med arealet. Det krævede modstandsmoment tillægges en forøgelses faktor, der er proportionalt med arealreduceringen, som forekommer ved det aflange hul.



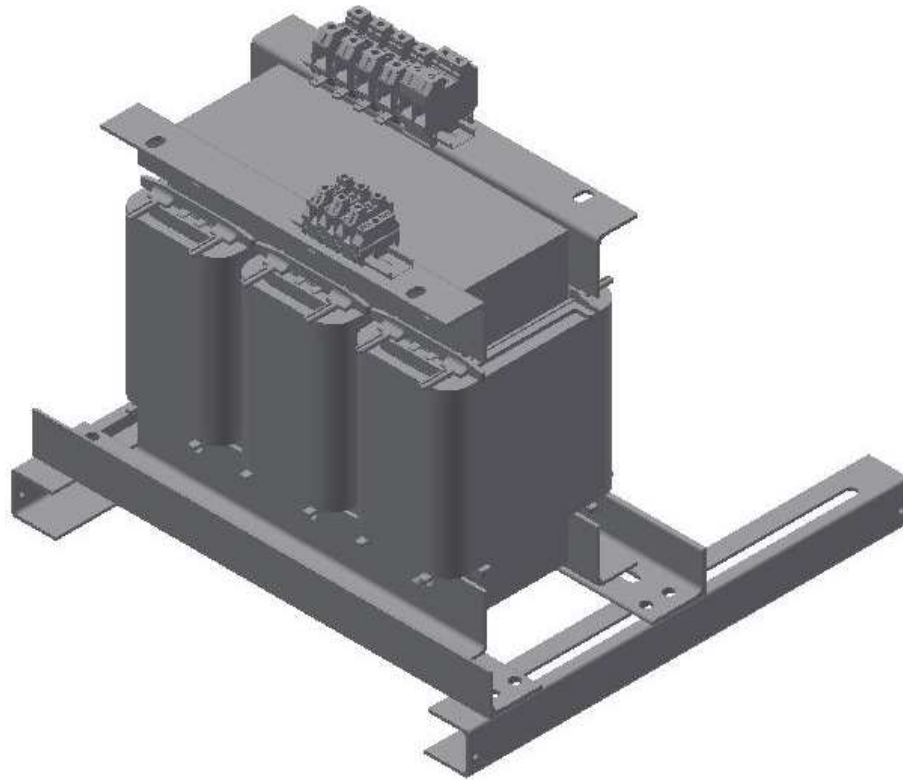
Figur 60 viser benævnelserne for de forskellige dimensioner for det valgte u-profil.

TB 16 viser dimensionerne for det valgte u-profil [3] .

Profil, h x b x t	r	A	g	I_y	I_z	$W_{el,y}$	$W_{el,z}$
mm	mm	mm ²	kg/m	mm ⁴	mm ⁴	mm ³	mm ³
50 x 50 x 4	4	547	4,3	$13,92 \times 10^4$	$22,41 \times 10^4$	$4,47 \times 10^3$	$8,96 \times 10^3$



Figur 61 viser arbejdstegning for det bærende beslag.



Figur 62 viser de universale beslag, monteret med trafo.

6 FEM

Der udføres FEM analyse af den bærende konstruktion for trafo, se Figur 62, vha. ANSYS. For at kunne fuldføre en analyse i ANSYS skal følgende parameter være bestemt:

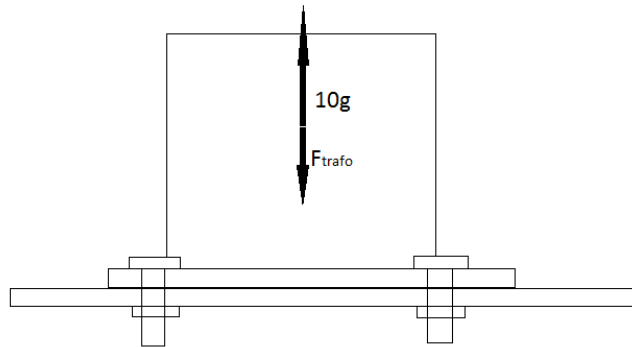
- Laster
- Geometri
- Kontaktflader
- Randbetingelser

Dertil skal der under opsætning af analysen, genereres et passende mesh.

6.1 Laster

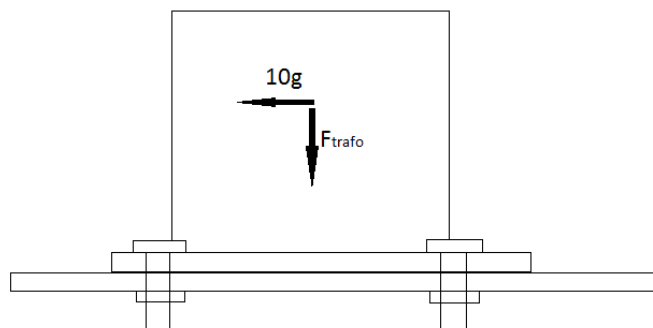
Den benyttede geometri påføres laster iht. afsnit 1.5. Idet vibrationstesten udføres i alle akser, vil der forekomme forskellige lastsituationer.

Ved test i y-retning vil der opstå følgende lastsituation, Figur 63.



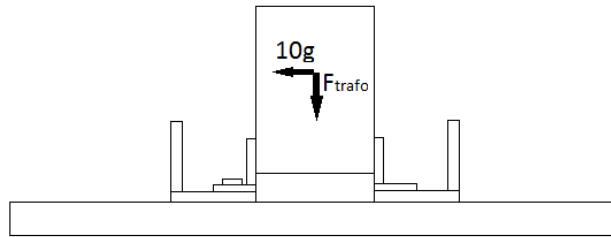
Figur 63 viser laster ved choktest i y-retning.

Laster ved test i x-retning.



Figur 64 viser laster ved choktest i x-retning.

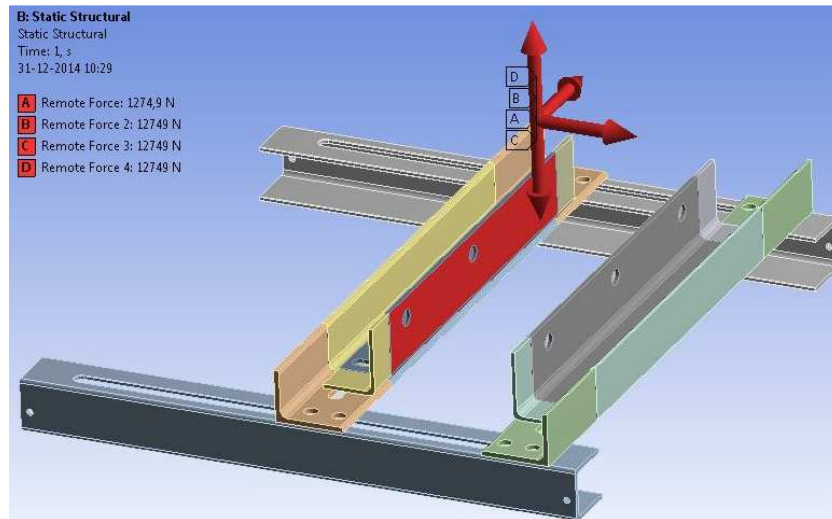
Laster ved test i z-retning.



Figur 65 viser laster ved choktest, virkende i z-retning

6.2 Geometri

Konstruktionen, som anvendes i ANSYS, er simplificeret således at trafo og boltesamlinger ikke medtages. Dette resulterer i reducerede elementer hvilket lettere beregnings processen. Lasterne placeres, for den pågældende lasttilfælde, derfor på monteringsbeslaget for trafo i trafoens massemidtpunkt. Se Figur 66.



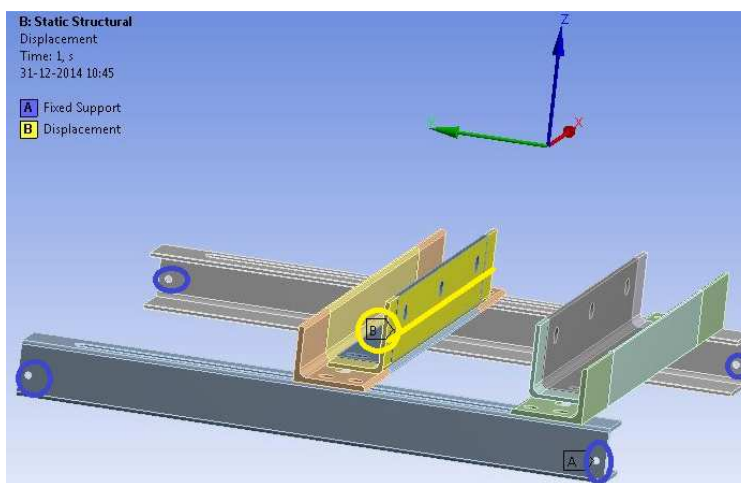
Figur 66 viser placeringen af lasterne.

6.3 Kontaktflader

I ANSYS er det muligt at anvende forskellige kontaktflader mellem de elementer, som konstruktionen er sammensat af. Dette giver mulighed for at lade modellen opføre sig som den virkelige konstruktion. Idet alle samlinger er udført med bolte, vælges det at anvende en bonded kontaktflade i alle samlinger. Denne kontaktflade indikerer, at disse flader ikke kan adskilles i hverken x,y eller z-retning.

6.4 Randbetingelser

Geometrien i ANSYS fast indspændes i de bærende beslags ender, hvor der er konstrueret huller til bolte. Denne indspænding skal indikere forspændingen, som benyttes ved montering af beslagene, se Figur 67. Idet konstruktionen er simplificeret, vil monterings beslagene for trafo kunne bevæge sig frit. Der indføres derfor en "displacement" med låst bevægelse i y-retning, ift. til koordinatsystemet anvendt i ANSYS, for derved at tilnærme sig konstruktionens virkelige opførelse. Se Figur 67.

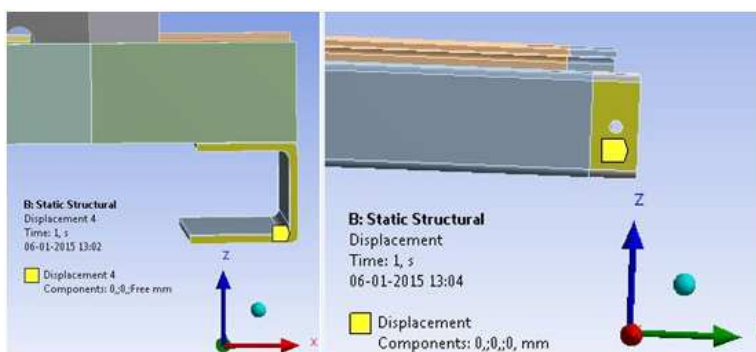


Figur 67 viser, hvor randbetingelserne er anvendt på konstruktionen.

Ved samlingen mellem de bærende beslag og hjørnestolper, indføres følgende "displacement", for at tilnærme sig den virkelige samplings opførelse.

I enderne af det bærende beslag indføres en "displacement" med nul bevægelse i x og y-retning.

Ydermere fast holdes fladen for de bærende beslag, som har kontakt med hjørnestolperne, med nul bevægelse i alle retninger. Dette er anvist med gult på Figur 68



Figur 68 viser randbetingelserne for de bærende beslags ende flader.

6.5 FEM resultater

Følgende analyser anvendes til vurdering af konstruktionen:

- Statisk analyse
- Udmattelse, levetids analyse
- Sikkerheds faktor

I analyserne indføres en maksimale grænse for flydespændingen på:

$$f_{y\max} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.1)$$

Hvor

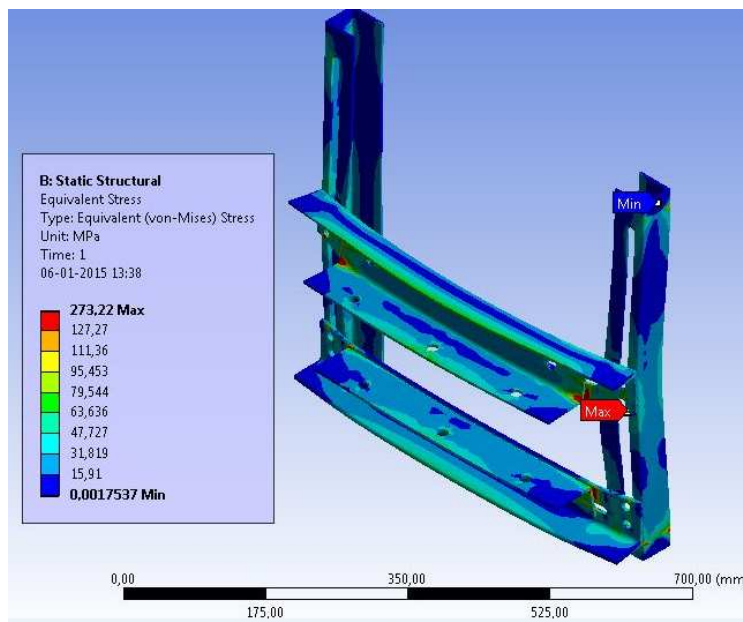
- $f_y = \text{flydespænding for materiale (140MPa)}$

$$f_{y\max} = 127,27 \text{ MPa}$$



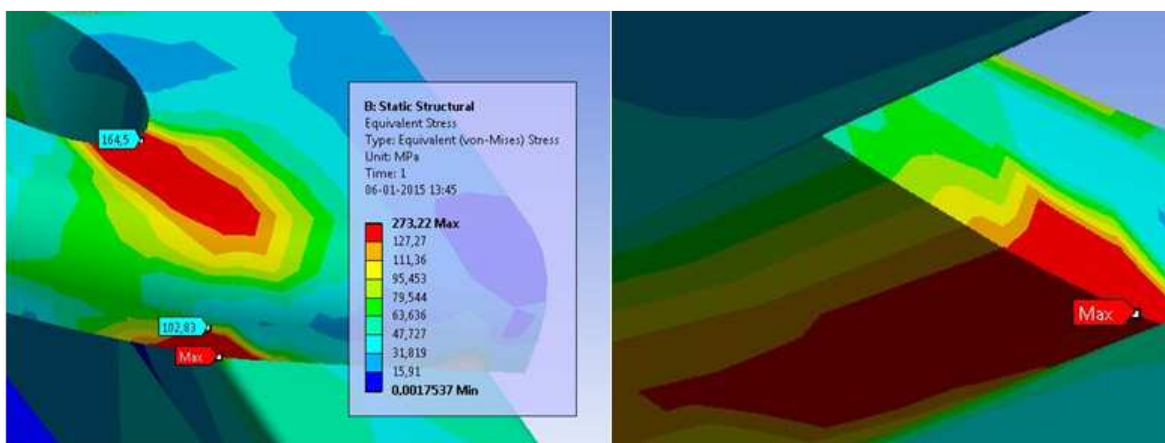
6.5.1 Y-retning

Lasterne resulterer i spændinger, som ligger over det maksimale. Disse områder er indikeret med rødt på Figur 69.

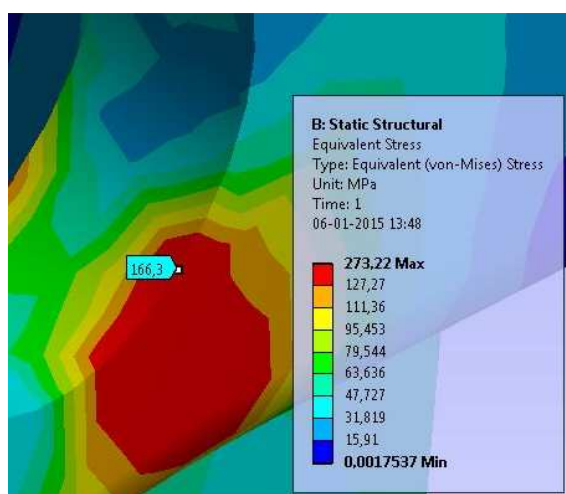


Figur 69 viser resultaterne fra analyse af laster i y-retning.

Ved nærmere undersøgelse af de kritiske områder, vurderes det, at disse høje spændinger ikke har nogen betydning for bæreevnen. Det ses, at de høje spændinger befinder sig i områder, hvor der er geometriovergange, se Figur 70, og dette resulterer i spændingskoncentrationen. Derudover optræder spændingerne i de yderste fibre, se Figur 71. Det vurderes, at det resterende materiale vil kunne medvirke til at der ikke opstår brud i beslagene.

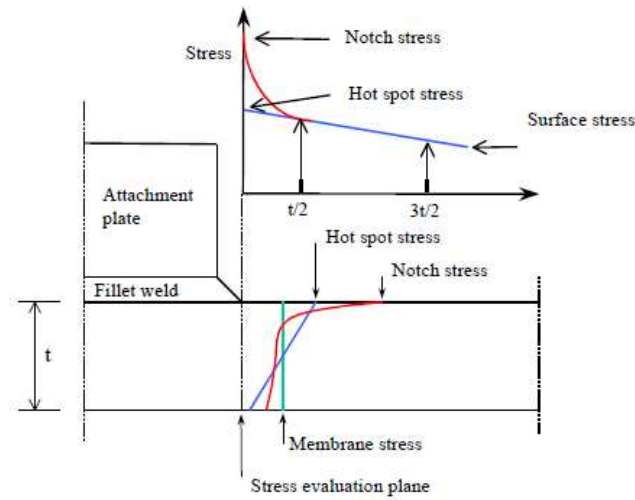


Figur 70 viser spændingerne ved geometri overgang.



Figur 71 viser de kritiske overfladespændinger.

Idet der er tale om spændingskoncentrationen, udføres en hot spot analyse, for at finde den reelle spænding. Hot spot metoden er illustreret på Figur 72.



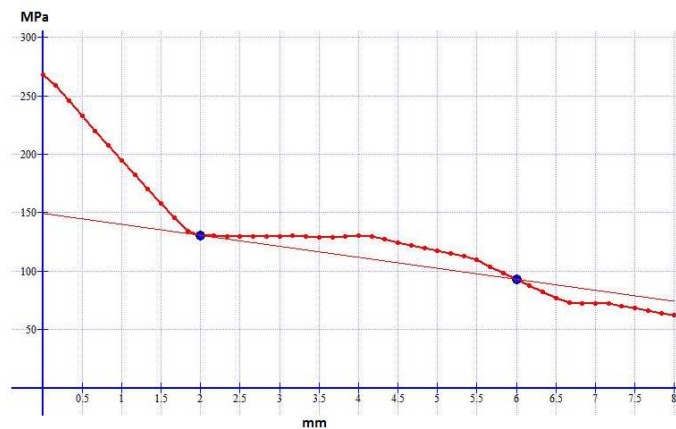
Figur 72 viser hot spot metoden, hvor $t/2$ og $3t/2$ er afstandene fra kanten. t er tykkelsen.

$$\frac{t}{2} = \frac{4 \text{ mm}}{2} = 2 \text{ mm} \quad (6.2)$$

$$\frac{3t}{2} = \frac{3 \cdot 4 \text{ mm}}{2} = 6 \text{ mm} \quad (6.3)$$

Ved hot spot analysen opnås følgende resultater:

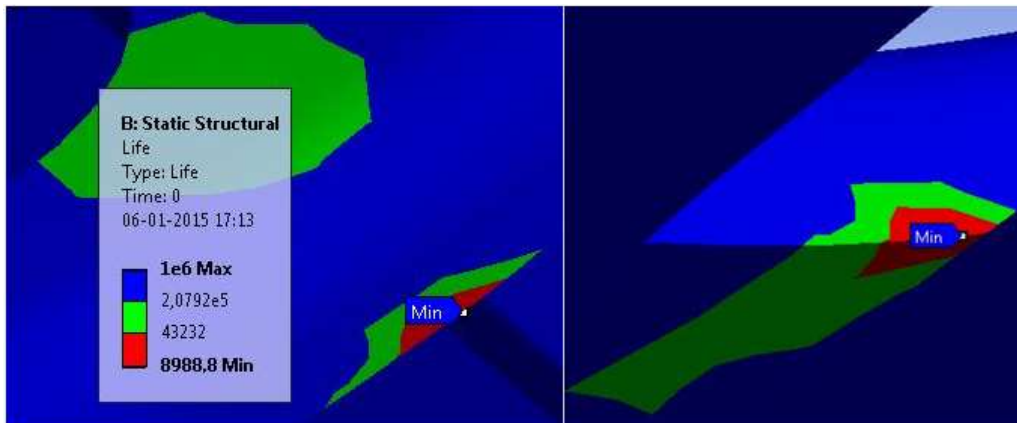
$$\sigma_{hs} = 149,40 \text{ MPa}$$



Figur 73 viser resultater fra hot spot analysen.

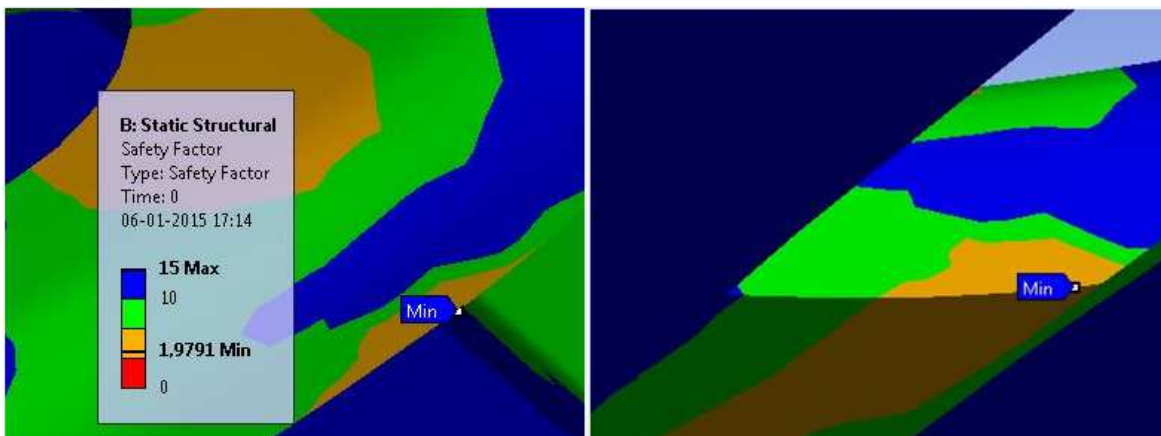
Hot spot analysen afviger med 17,39 % fra det tilladeligt. Idet der er tale om et mindre område med disse spændinger, udføres der udmattelses analyse efter afsnit 1.5, for derved at vurdere om der vil opstå udmattelsesbrud. Dette udføres vha. S-n-kurver (spændings-påvirknings-kurver).

Der anvendes spændingsvidder i form af træk og tryk af de optrædende spændinger i konstruktionen. Ved udførelse af analysen opnås der en levetid på 8988,8 cykler ved det kritiske område.



Figur 74 viser antal påvirkninger, som konstruktionen kan optage.

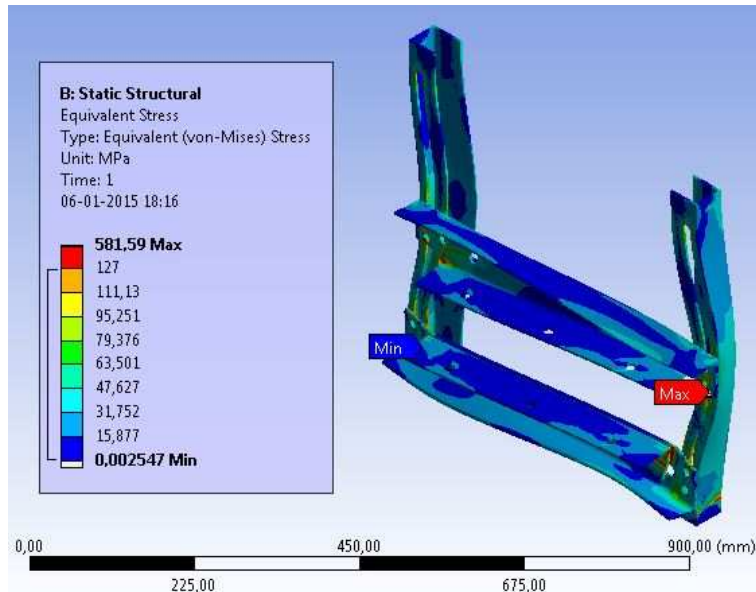
Ved analyse af sikkerhedsfaktor ift. afsnit 1.5, påvirkes konstruktionen med 1200 cykler, fremefor de 1000, som er kravet. Dette gøres for at øge sikkerheden for analysen. Der opnås således en sikkerhedsfaktor på 1,98. Dette vurderes som værende tilstrækkeligt.



Figur 75 viser sikkerhedsfaktor mod brud.

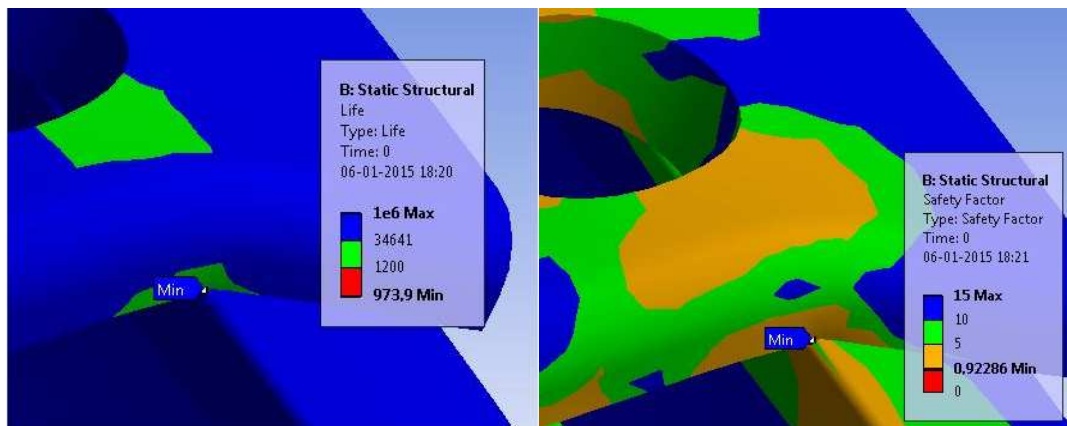
6.5.2 X-retning

Ved denne lastpåvirkning af konstruktionen, opleves samme spændingsfordelingen som i afsnit 6.5.1. Der udføres identisk vurdering. Spændingerne som optræder ved denne analyse er dog højere, se Figur 76.



Figur 76 viser spændinger ved boltsamling.

Der udføres udmattelsesanalyse til videre vurdering af disse spændinger.

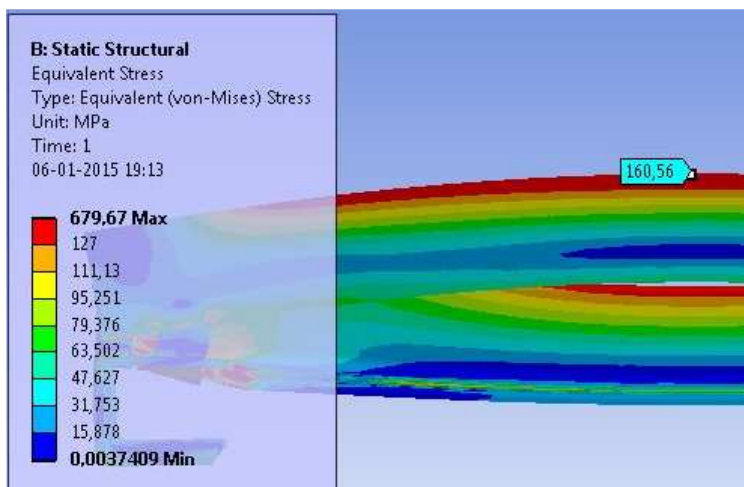


Figur 77 viser udmattelse analyse af bolt hul

Der opnås en minimums levetid på 973,9 cykler med en sikkerhedsfaktor på 0,92. Eftersom der her er tale om et meget lille område, og der analyse af sikkerhedsfaktor er anvendt 200 cykler mere end der er krævet ved den virkelige test, vurderes det at der her er tale om lokale plastiske deformationer, som ikke vil resultere i brud.

6.5.3 Z-retning

Ved disse laster, opleves optrædende spændinger som vist i afsnit 6.5.1 og 6.5.2. Ydermere optræder der en deformation ved trafo beslaget midtfor, anvist på Figur 78, som resulterer i spændinger over det tilladeligt. Disse spændinger optræder ved en skarpkant, og der er her ingen tale om en s spændingskoncentrationen. Ved undersøgelse af området ses at det er i de yderste fibre spændingerne optræder.



Figur 78 viser spændingerne ved samlingen omkring det bærende beslag og trafo beslag, samt deformationen.

Der foretages en udmattelses analyse, for derved at vurdere om det kun er overflade spændinger, der giver lokale deformationer eller om der er tale om brud. Idet der opnås en levetid på 3641 cykler ved dette område og en sikkerhedsfaktor på 3.38, vurderes det, at der her er tale om lokale deformationer, som ikke vil resultere i brud.

Analyse af de tre lasttilfælde antyder, at der i konstruktionen vil optræde lokale deformationer, som ved anvendelse iht. afsnit 1.5 ikke vil medføre brud i konstruktionen. Dertil er der ved analyse af udmattelsen anvendt spændingsvidder som tryk-træk af de optrædende spændinger. Dette vil ikke være tilfældet ved den virkelige test, idet lasten kun påføres i én retning. Den negative spænding vil derfor ikke have samme værdier som den positive, idet lasten vil fade ud. Analysen vurderes derfor acceptabel.

7 Materiale valg

Ved analyserne udført i afsnit 6, er det konkluderet at der forekommer lokale plastiske deformationer i konstruktionen. Disse deformationer resulterer dog ikke i brud for konstruktionen. Ved udførelse af testen beskrevet i afsnit 1.5, er det ikke tilladeligt at opnå synlige brud eller deformationer i konstruktionen. Det vil derfor være relevant at undersøge materialer med højere flydespænding. I samarbejde med KK besluttes det, at undersøge stål S235. Undersøgelse af dette materiale viser, at der er en flydestyrke forskel på 67,86 %. Ved anvendelse af S235 vil der opnås større sikkerhedsfaktorer for analyserne udført i afsnit 6

Det anbefales derfor at anvende materialet S235, idet der kan opnås øget sikkerhed for bæreevnen ved anvendelse af de analyserede profiler i afsnit 6.

Der vil i dette projekt ikke udføres analyser ved anvendelse af stål S2235, efter som det vil kræve en gennemgang af de anvendte analyser i rapporten, for at opnå den bedste udnyttelse af materialet.

8 Vurdering

De opnåede resultater i denne rapport er fremkommet ved anvendelse af konservative betragtninger. For at kunne opnå mere virkelighedsnære resultater, vil en vibrationstest, udført med strain gauges monteret på beslagene og trafo, kunne inficere flytninger og derved bestemme de virkelige laster. Det vurderes at dette sandsynligt vil resultere i mindre laster der skal optages af beslagene, idet der i skabene også er placeret andre elementer, som vil medvirke til optagelse af lasterne.

Eftersom det ønskes at anvende mindst muligt materiale, vil det være relevant at udføre de anvendte analyser for et materiale med højere flydestyrke. Det vurderes, at materialeændring vil optimere bæreevnen for beslagene, dertil kan der opnås materialebesparelse. Ved anvendelse af stål S235 vil der opnås materiale besparelser på op til 39,77 %.

Det er vurderet, at den randomiserede vibrationstest ikke er den kritiske last for universal beslagene. Det vil dog være givende at analysere disse, i form af egen frekvenser og resonansproblemer. Der ved kan det konkluderes om vurdering af lastens betydning, er foretaget korrekt.

Skabene fra Rittal, som anvendes til kontrolsystemerne er fundet svækkede, idet der er udført materialereducering ved valsning af disse. En tværsnitsanalyse samt analyse af de optrædende egen-spændinger, vil kunne indikere om fordeling af lasterne, forårsaget af trafo ved chok og vibrationstest er udført korrekt, og dermed ikke medføre brud i skabet.

9 Konklusion

Ved anvendelse af analytiske og computer baseret værktøjer, er momenterne der optræder i konstruktionen fundet. Ud fra disse, er standard profiler fundet til dimensionering af to universale beslag. Der er til disse beslag dimensioneret bolte til fastholdelse af trafo og de universale beslag. Til analyse af disse samlinger, er der udarbejdet et beregnings værktøj i Mathcad, som kan anvendes til fremtidige beregninger.

Analyserne er udført ved at lade lasterne, som forekommer ved choktesten, påvirke beslagene uden betragtning af last reducere. Dette i form af andre konstruktionsdele i skabet, som vil kunne optage lasterne. Det konkluderes således at de benyttede laster er større end de reelt set bør være. Med andre ord konkluderes beslagene som værende overdimensionerede

Ved de statiske analyser er der fundet høje spændinger. Disse er vha. udmattelsesanalyser, vurderet til ikke at resultere i brud. Til suppleringen af disse vurderinger anbefales det at udføre en ikke-lineær analyse, for derved at konkludere om de høje spændinger vil reduceres ved en plastisk omfordeling, som vurderet.

Ud fra 10 forskellige transformator er der designet to universale beslag til montering af transformator i Rittal skabe. Disse beslag er analyseret til at kunne overkomme lasterne ved choktest, som er vurderet til at være den kritiske test for beslagene. Det konkluderes at ved anvendelse af stål S235 kontra DX51D, vil der opnås større sikkerhedsfaktor mod brud.

Det konkluderes at beslagene er anvendelige.

10 Kilde list

- [1] B. C. Jensen, Teknisk Ståbi, Nyt Teknisk Forlag, 2011.
- [2] DS/EN, Eurocode 3: Stålkonstruktioner -Del 1-8: Samlinger, Dansk Standard, 2007.
- [3] Ruuki part of SSAB, »Cold formed steel sections,« 29 Dec. 2014. [Online]. Available: <http://www.ruukki.com/Steel/Cold-formed-steel-sections/U-sections>.