

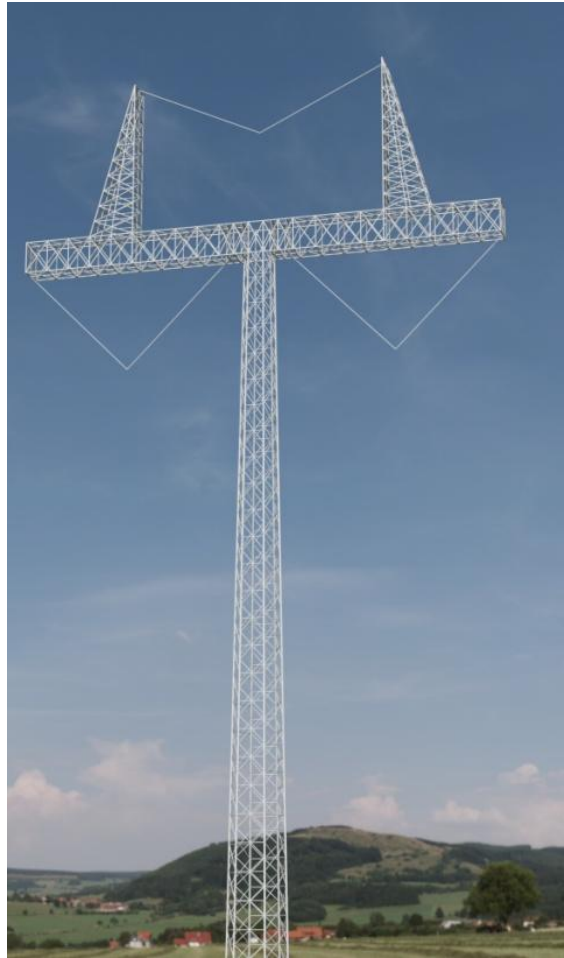
UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



UTVIKLING OG DESIGN AV NY HØYSPENTMAST

av

Johannes Fure Hoff & Magnus Fure Kristensen



omega elkraft as

Gradsoppgave

Maskin- prosess og produktutvikling

IMT/UMB, 2013

FORORD

Dette er en masteroppgave skrevet ved institutt for matematiske realfag og teknologi på Universitetet for miljø- og biovitenskap, våren 2013. Oppgaven er gitt fra Omega Elkraft AS. Hensikten med masteroppgaven er å utvikle en ny høyspentmast. Oppgaven er en fortsettelse av et forprosjekt som ble skrevet av oss i faget TIP300, høsten 2012.

Vi var motiverte til å fortsette fra forprosjektet da vi fant det interessant og var nysgjerrige på å lære mer. Vi hadde også fått et godt inntrykk av Omega Elkraft AS og samarbeidet godt med dem. Vi ville gjerne komme lenger i utviklingen av RSB-masten. Det har vært en stor læringsprosess gjennom arbeidet med oppgaven. Forprosjektet ga oss et godt innblikk i temaet, men det å gå i dybden på det har vært en utfordring.

Vi mener et sterkt og stabilt strømnett er veldig viktig for samfunnet. Det at strømmen alltid er der er noe som er essensielt i hverdagen.

For at fornybare energikilder skal kunne bli utnyttet på samme nivå som fossile energikilder, så må energien kunne fraktes i strømnettet uten store tap. Høyspentmaster vil ikke alene sørge for at strømnettet blir bedre, men de er en viktig del av løsningen.

Vi valgte å samarbeide på masteroppgaven da vi gjorde dette i forprosjektet var det naturlig for oss og oppdragsgiver at vi fortsatte på samme måte. Vi har samarbeidet godt i løpet av oppgaven.

Vi takker Tor Anders Nygaard, vår veileder ved UMB, som har vært til god hjelp i løpet av masteroppgaven.

Vi takker også Omega Elkraft for at vi fikk fortsette med forprosjektet og utføre en større oppgave. Takker Ola Torgrim Eide og Lars Anders Røen som har vært kontaktpersonene våre hos bedriften. Vi retter også en stor takk til Arne Madsen og Gudmund Madsen som har gitt oss mye hjelp innen alt om høyspentmaster og modellering.

Ås, den 15. mai 2013.

Johannes Fure Hoff

Magnus Fure Kristensen

SAMMENDRAG

Bakgrunnen for denne masteroppgaven er forprosjektet RSB Høyspenningmast: 6/8-Kantete Seksjoner. Der det ble utviklet seksjoner til en sekskantet og en åttekantet RSB-mast. Det var ønskelig å fortsette å utvikle sekskantmasten videre. Forprosjektet danner grunnlaget for denne oppgaven.

Det å dimensjonere en ferdig høyspentmast er en veldig stor oppgave, målet ble hovedsakelig å få seksjonene i masten til å fungere. Det ble også bestemt at en tilhørende travers skulle utvikles. Masten skulle holde alle krav fra oppdragsgiver. Masten skal holde en kraftlinje med en spenning på 420 kilovolt, hver seksjon skal være seks meter høy, masten skal bestå av fire seksjoner og blir totalt 24 meter høy pluss høyden til traversen.

Store deler av prosjektet ble brukt til en litteraturstudie for å lære mer om strømmettet, forskjellige master, hvordan de blir utviklet og forskjellige måter å utføre beregninger rundt dette. Det ble gjort en konseptanalyse for å se på forskjellige alternativer for komponenter i masten. På bakgrunn av våre beregninger og FEM-analyser, og erfaringer fra oppdragsgiver ble valgene for masten tatt. Det endte opp med fire konsepter for masten, en analyse ble gjort for å finne ut hvilken som passet kravene best.

Det ble gjort dimensjonerende beregninger og FEM-analyser for å finne dimensjoner som var så lave som mulig samtidig som de ga masten den styrken og stabiliteten som krevdes. Den ferdige strukturen ble testet ut med flere forskjellige lasttilfeller. Det ble brukt returtider på 150 år for islast og 500 år for vindlast, og materialfaktorer i tillegg til dette ga masten en god sikkerhet.

Resultatet ble en mast med tilhørende travers. Masten fikk en bredde på 2 meter i bunn og 1 meter i toppen. Med traversen er masten 30,3 meter høy. Traversen ble 16 meter bred. Fra toppen av masten og til toppen av spirene er den 6,3 meter høy. Totalt med travers veier masten 11,1 tonn. Diameter i stavene som holdt mot både flyt og knekking ble 70 mm for vanger og 20 mm for gitter i seksjon 1, 70 mm for vanger og 20 mm for gitter i seksjon 2, 60 mm for vanger og 20 mm for gitter i seksjon 3, og 50 mm for vanger og 25 mm for gitter i seksjon 4. Dimensjonene for diameterne til traversen ble 40 mm på gurtene, og 32 mm på gitteret.

Bolter ble i dimensjon M36 for alle seksjonene, platetykkelsen for platene mellom seksjonene ble 35 mm. Sveisens a-mål for gitteret i seksjonene ble 4 mm for alle seksjonene, unntatt den øverste som ble 3 mm. Sveisens a-mål for vangerene ble 6 mm for alle seksjonene. Sveisens a-mål for hele traversen ble 7 mm.

Det ble laget konstruksjonsgrunnlag med 3D-modell, enkle konstruksjonstegninger og en omfattende prosjektrapport.

ABSTRACT

The background for this thesis is the pilot project RSB: Høyspenningmast: 6/8-Kantete Seksjoner in which there was developed sections of a hexagonal and octagonal RSB high-voltage tower. The group and the company behind the RSB high-voltage tower wanted to develop more of this mast. The pilot project provides a foundation for this project.

The development of a high-voltage tower is a big task, so the main goal was to get the sections of the tower to work. The goal of this project is to design a hexagonal high-voltage tower. It was also decided to make a concept for the traverse in the top of the tower. The tower should comply with all requirements from the client. The tower shall maintain a power line with a voltage of 420 kilovolts, each section shall be 6 meters and the tower height will be 24 meters plus the height of the traverse.

A large portion of the project was used on a literature study to learn more about the power grid, different towers and how towers are being developed and different ways to perform calculations on them. A concept analysis was made and used to look at different options for the elements of the tower. Choices were made based on calculations and the finite element method analysis, and past experiences from Omega Elkraft AS. In the end there were four concepts for the tower, an analysis was performed on these to determine which tower would be the best fit for the requirements of this project.

Then different design calculations and more FEM-analysis's were performed to find the best dimensions. The dimensions were supposed to be as low as possible, while at the same time give the most strength and stability to the tower. The resulting structure was then tested with several different load cases. A return time of 150 years for ice loads and 500 years for wind loads, and a material factor gave the mast good safety.

The result was a tower with all four sections and a traverse. The tower had a width of two meters on the ground and one meter in the top. The combined height of tower and traverse was 30.3 meters. The traverse was 15 meters wide and 6.3 meters high. The total weight of the mast is 11.1 tons. The steel bars in the construction got these diameters to hold against yield stress and fracture: 70 mm in the vertical rods and 20 mm in the horizontal and diagonal rods for section 1, 70 mm in the vertical rods and 20 mm in the horizontal and diagonal rods for section 2, 60 mm in the vertical rods and 20 mm in the horizontal and diagonal rods for section 3, and 50 mm in the vertical rods and 25 mm in the horizontal and diagonal rods for section 4. The steel bars in the traverse had the diameters 40 mm and 32 mm.

Bolts was designed to M36 for all sections, plate thickness for plates between the sections was 35 mm. The throat thickness for the weld in the vertical and diagonal roads was 4 mm for all sections, except the top section where the throat thickness was set to 3 mm. The throat thickness for the weld in the vertical rods was 6 mm in all sections. The throat thickness for all welds in the traverse was 7 mm.

A basis for construction was made with a 3D-model, simple construction drawings and a comprehensive project report.

INNHALDSFORTEGNELSE

	SIDE:
FORORD.....	3
SAMMENDRAG	5
ABSTRACT	6
INNHALDSFORTEGNELSE	7
1. INNLEDNING	11
1.1 Bakgrunn.....	11
1.2 Oppgradering av sentralnettet.....	12
1.3 Idé/oppdrag	12
1.4 Problemstillinger/teknologiske utfordringer	13
1.4.1 Problemstillinger	13
1.4.2 Teknologiske utfordringer	13
1.5 Markedsbehov og potensial.....	13
1.6 Kvalitetssikring	14
1.6.1 Kvalitetssikring rapport.....	14
1.6.2 Kvalitetssikring produkt	14
2. BESKRIVELSE	15
2.1 Historisk.....	15
2.2 Det norske strømnettet	17
2.2.1 Sentralnettet	18
2.2.3 Regionalnettet.....	19
2.2.4 Distribusjonsnettet	19
2.2.5 Utnyttelse av strømnettet.....	19
2.3 Master	20
2.4 Elektromagnetisk felt	23
2.5 Omega Elkraft	25
3. TERMONOLOGI	26
3.1 Begreper	26
3.2 Symboler og enheter	28
3.3 Formler	29
4. PROSJEKT	30
4.1 Hovedmål.....	30

.....	.....	SIDE:
4.2 Delmål .....	.....	30
4.3 Arbeidsplan .....	.....	32
4.4 Milepæler .....	.....	33
4.5 Begrensinger .....	.....	33
5. SAMMENLIGNING AV EKSISTERENDE LØSNINGER.....	.....	34
5.1 Tremaster/Limtremaster .....	.....	34
5.2 Stålmaster.....	.....	35
5.3 Komposittmast.....	.....	37
5.4 Jord- / sjøkabel.....	.....	38
5.5 RSB-master .....	.....	38
5.6 Sammenligning.....	.....	39
6. PRODUKTBEKRIVELSE.....	.....	41
6.1. Kravspesifikasjoner.....	.....	41
6.2. Rangering av viktige egenskaper.....	.....	42
6.3. Metriske grovspesifikasjoner .....	.....	42
6.4. Tidlig økonomisk analyse.....	.....	43
6.5. Formgivning og design.....	.....	43
7. KONSEPT.....	.....	45
7.1 Funksjonsanalyse .....	.....	45
7.2 Funksjonsalternativer .....	.....	45
7.2.1 Seksjon.....	.....	45
7.2.2 Travers .....	.....	54
7.2.3 Fester .....	.....	57
7.3 Brukspåkjenninger, materialer og tverrsnittvalg .....	.....	58
7.3.1 Brukspåkjenninger.....	.....	58
7.3.2 Materialer .....	.....	58
7.3.3 Tverrsnittvalg.....	.....	58
7.4 Konstruksjonsforslag .....	.....	59
8. BEREGNINGER.....	.....	60
8.1 Beregninger for vridningen til mastestammen .....	.....	60
8.2 Skjev islast.....	.....	64
8.3 Bolter.....	.....	66
8.4 Sveiseberegninger .....	.....	67
8.4.1 Vangen .....	.....	67

.....	.....	SIDE:
8.4.2 Sveis på staver .....	.....	67
8.4.3 Sveis på gitteret i masten .....	.....	67
8.4.4 Sveising i traversen .....	.....	67
8.5. Platene til vangene .....	.....	67
8.6 Bøyemomentberegninger for over og undergurter i traversen .....	.....	69
9. ELEMENT OG LØSNINGSVALG .....	.....	70
9.1 Hovedelementer .....	.....	70
9.1.1 Sammenstilling .....	.....	70
9.1.2 Design av hovedelementer .....	.....	71
9.2 Komponenter .....	.....	74
9.2.1 Bolter, skiver og muttere .....	.....	74
9.2.2 V-kjeder med isolatorer .....	.....	74
9.2.3 Line .....	.....	76
9.3 Modularisering .....	.....	77
10. STRUKTUROPTIMERING/FEM-ANALYSE .....	.....	78
10.1 Første analyse .....	.....	79
10.2 Hovedanalyse .....	.....	82
10.3 Dimensjonering mot knekking ved skjev islast .....	.....	84
10.3.1 Dimensjoner i masten .....	.....	84
10.3.2 Dimensjoner i traversen .....	.....	86
10.4 Kontroll av modell mot knekking .....	.....	87
10.4.1 Maks islast .....	.....	87
10.4.2 Linebrudd ytterfase .....	.....	88
10.4.3 Vind på is .....	.....	91
10.5 Resultater med kommentar til lasttilfellene .....	.....	92
10.5.1 Skjev islast .....	.....	93
10.5.2 Linebrudd ytterfase .....	.....	94
10.5.3 Vind på is .....	.....	95
10.6 Egenfrekvens .....	.....	97
11. VEDLIKEHOLD OG RESIRKULERING .....	.....	98
11.1 Vedlikehold .....	.....	98
11.2 Resirkulering .....	.....	98
12. PRODUKSJON, MONTERING OG KOSTNADSKALKYLE .....	.....	99
12.1 Produksjon .....	.....	99

.....	SIDE:
12.1.1 Plater.....	99
12.1.2 Sveising av vanger og plater	100
12.1.3 Kapping og sveising av gitterstaver.....	101
12.1.4 Traversen	104
12.1.5 Om sveisemetoden	104
12.2 Overflatebehandling.....	105
12.3 Montering.....	109
12.3.1 Fundamenter	109
12.3.2 Seksjonene og traversen	111
12.3.3 V-kjeder og isolatorer	111
12.3.4 Linen	111
12.4 Kostnads kalkyle for en prototype	112
12.5 Kostnads kalkyle ved serieproduksjon.....	113
12.6 Konkurrentanalyse	115
13. MARKEDSPRESENTASJON	116
13.1 Renderte fremstillinger.....	116
13.2 Tekniske beskrivelser.....	118
13.3 Varemerke og emballasje	119
14. DISKUSJON OG PROSESSEVALUERING.....	120
14.1 Forbedringspotensial.....	120
14.2 Design-, produksjons- og kostnadsrevisjon.....	120
15. KONKLUSJON OG ANBEFALINGER	121
15.1 Konklusjon	121
15.2 Anbefalinger.....	121
15.3 Videre arbeid.....	122
16. LITTERATURREFERANSER.....	123
16.1 Skriftlige kilder	123
16.2 Nettkilder	124
16.3 Illustrasjoner	127
17. VEDLEGG.....	129

1. INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN

Bakgrunnen for dette prosjektet er et oppdrag fra bedriften Omega Elkraft AS. Det ble i faget TIP300 Konsept- og produktrealisering ved UMB utført et forprosjekt med "RSB Høyspenningmast: 6/8-Kantete Seksjoner"(1). Dette forprosjektet la et godt grunnlag for videre arbeid på en masteroppgave.

Etter fullført forprosjekt var det enighet med bedriften å fortsette på samme prosjekt.

I forprosjektet ble det utviklet en modell for 6- og 8-kantet seksjoner til en høyspenningmast i RSB (round steel bar) design. En mast består av fire slike seksjoner og alle disse ble modellert. Det ble sett på flere elementer av en høyspentmast, men fokuset var hovedsakelig på seksjonene.



FIGUR 1: ØVERSTE SEKSJON PÅ EN SEKSKANTMAST (1).

Begge sett med seksjoner var 4 meter brede i bunn, 2 meter i toppen, og 24 meter høye til sammen. Sekskanten veide 4,6 tonn og åttekanten veide 5,8 tonn. Kostnaden for utvikling av prototype ble ca. 580 000 NOK for sekskant og 640 000 NOK for åttekant.

Det ble også utført en liten FEM-analyse av de seks- og åttekantete mastene. Det ble konkludert med at de åttekantete seksjonene sto imot knekking, det gjorde ikke de sekskantete seksjonene. Det var en del feilkilder rundt FEM-analysen. De åttekantete seksjonene fikk en vangediameter på 90 mm og 16 mm i gitteret for å hindre knekking.

Det ble konkludert med at RSB-master har mange gode egenskaper og at det var verdt å fortsette med utviklingen av master med en spenning på 420 kV.

Forprosjektet ble sett på som en liten start i prosessen med å få utviklet en ferdig høyspentmast. Resultatene fra det prosjektet har blitt brukt som grunnlag.

1.2 OPPGRADERING AV SENTRALNETTET

Sentralnett i Norge er under oppgradering, mange nye master skal settes opp og eldre master skal oppgraderes. Dette nettet ligger på spenninger mellom 300-420 kV, mye skal oppgraderes fra 300 kV til 420 kV. 3000 km av sentralnett skal oppgraderes slik. Mange eldre master kan ikke oppgraderes og de må da rives ned og nye master må settes opp. (3), (4)

Utbyggingen av nettet er et sentralt klimatiltak, Norges klimapolitiske mål krever både utbygging av innenlandsk nett og utenlandsforbindelser. Fornybar energi er sjeldent plassert nært der det skal forbrukes, og det er ofte uregulert og uforutsigbar. For eksempel vindkraft der utbyttet varierer etter vindhastigheten og vannkraft som varierer etter hvor mye nedbør det er i sesongen. Dette gir et behov for å ha et sterkt nett og god styring av systemdriften. Om det blir en stor satsing på fornybar energi i Norge/Norden vil dette gi et stort kraftoverskudd, dette kan også oppstå om det satses stort på energieffektivisering. Dette kan føre til stor eksport av energi til resten av Europa, Norge kan tjene godt på eksportering av overskuddsenergi. For å få til dette trengs det et sterkt sentralnett og gode utenlandsforbindelser. (2)

1.3 IDÉ/OPPDRAG

Oppdraget slik det var definert fra Omega Elkraft var å utvikle en ny type høyspentmast som skulle kunne levere 420 kilovolt spenning. Denne skulle være lett å montere, materialbesparende, og være mindre synlig ute i naturen enn tradisjonelle høyspentmaster.

RSB-master fyller disse kravene og det finnes allerede flere ferdig utviklete master av denne typen på lavere spenninger. På grunn av det høyere spenningsnivået blir det en større mast enn de eksisterende, og det skapes da mange nye problemstillinger.

I forprosjektet ble det konkludert med at åttekantete seksjoner var det eneste som holdt mot knekking. På grunn av økonomiske hensyn og for å holde strukturen enkel har Omega Elkraft bestemt at sekskant er det som skal være mastetverrsnittet. Så det vil derfor bli sett på endringer i designen av seksjonene for å få en sekskantet konstruksjon til å tåle knekking. En mer omfattende FEM-analyse vil bli utført for å finne ut av dette.

Dette betyr at noe av produktutviklingen som ble utført i forprosjektet må gjøres pånytt. Det vil som i forprosjektet ikke dreie seg om en komplett design av en mast, dette er det ikke nok tid til. Seksjonene vil først bli sett på, og det vil også bli utviklet en alternativ traversdesign.

1.4 PROBLEMSTILLINGER/TEKNOLOGISKE UTFORDRINGER

Det blir flere problemstillinger og teknologiske utfordringer i dette prosjektet:

1.4.1 PROBLEMSTILLINGER

- Utvikle sekskantseksjoner som holder mot knekking under forskjellige miljølaster.
- Utvikle en traversdesign som følger alle krav rundt dette.

1.4.2 TEKNOLOGISKE UTFORDRINGER

- Alle stålmaster overflatebehandles med varmforsinking, det er begrensning på størrelsen av sinkbad som eksisterer i dag. En mast av en viss størrelse, vil ikke kunne dyppes helt under i disse. Masten må da muligens deles opp.
- Om masten deles opp må det sees på hvordan disse delene skal kobles sammen etter overflatebehandling uten at dette øker synligheten på masten betraktelig.
- I traverser må designen ta hensyn til isolasjonsavstander for å fungere optimalt.
- Mye av det elektriske utstyret som brukes i en mast for å koble en mast til strømmettet er standardisert, konstruksjonen må da være tilpasset designet slik at utstyret passer.
- RSB-master er en ny mastetype og det finnes ikke mye kunnskap på det feltet ennå.
- Norske forhold gir store miljølaster, en høyspentmast må være dimensjonert til å tåle alle slike laster.

1.5 MARKEDSBEHOV OG POTENSIAL

På grunn av Statnett sine planer om oppgraderinger av sentralnettet er det et stort behov for master som kan levere spenningene som sentralnettet bruker. Med fordeler som lite synlighet, lave kostnader og lite inngrep i naturen har RSB-master et stort markedspotensial. Det diskuteres mye om såkalte "monstermaster", RSB-master kan være både store nok for 420kV og ha liten synlighet. De har da store fordeler over andre eldre mastetyper.

Det er ingen andre leverandører av RSB-master i Norge i dag enn Omega Elkraft i samarbeid med Brødrene Berntsen. De konkurrerer derfor heller mot andre mastetyper enn lignende produkter.

At RSB-master ikke har blitt så stort i Norge ennå kan skyldes at nettmiljøet er konservativt og bruker helst godt utprøvde løsninger. RSB er nytt, og har aldri vært brukt i sentralnettet før. RSB-master har ikke blitt prøvd ut i så stor skala ennå.

Om man kan vise til godt utprøvde og fungerende RSB-master på 420 kV nivå så har dette potensial til å bli en mye brukt mastetype.

RSB-master kan også brukes i andre markeder enn elektrisitet, mastene kan bli brukt til kommunikasjon, belysning, nett over søppelfyllinger og mye annet.(66)

1.6 KVALITETSSIKRING

Kvalitetssikring er viktig i alle typer prosjekter og det har også blitt tatt hensyn til det i denne oppgaven. Det har vært kvalitetssikring rundt rapport og produkt.

1.6.1 KVALITETSSIKRING RAPPORT

Rapporten har blitt gjennomgått av prosjektgruppen flere ganger for å sjekke etter skrivefeil, referanser, figurnummer, tabellnummer, og at sidetall stemmer. Mal fra rapport ble gitt av biveileder og det ble gjort endringer på denne for at den skulle passe prosjektet best mulig. Utregninger har blitt kontrollert og det har blitt sjekket at alle formler og symboler er i sine respektive lister.

1.6.2 KVALITETSSIKRING PRODUKT

Produktkrav og prosjektkrav har blitt diskutert og bestemt sammen med veiledere fra bedrift og UMB flere ganger. Sikkerhetsfaktorer inngår i dimensjonerende lasttilfeller. Det ble gjort håndberegninger for å se at FEM-analysen stemte. Oppdragsgiver har blitt konsulert gjennom hele prosjektperioden. Gruppen har jevnlig jobbet på oppdragsgivers kontor.

2. BESKRIVELSE

2.1 HISTORISK

I tidligere tider i Norge var det kinetisk energi fra rennende vann som ble brukt til drift av forskjellige ting som vannhjul til møller. Den kinetiske energien ble omgjort til mekanisk energi og brukt til det som er forløperen for dagens turbiner.

På 1. oktober 1885 forandret alt seg, da ble det første elektrisitetsverket i Norge for salg av elektrisk kraft åpnet. Det var på Laugstol Bruk i Skien. Bruket hadde to generatorer som kunne forsyne 240 lamper. Dette var begynnelsen av utbygging og utnyttning av vannkraftpotensialet i Norge. (5)

Fram til starten av 1880-årene var de fleste elektriske anlegg bedriftsinterne. Altså var både produksjon og forbruk av strøm gjort innenfor et ytterst begrenset geografisk område, gjerne bare koblet til et par bygninger i et bedriftsområde. Dette gjaldt også den tidlige elektrifiseringen i hjemmene. Dampanlegg ble installert direkte i større boligbygg i byene og forsynte dem med strøm til belysning. Disse anleggene var basert på likestrøm, på grunn av store overføringstap kunne ikke likestrømmen bli overført over lengre avstander. Det var ikke før på 1890-tallet, da vekselstrømsystemet ble utviklet, at elektrisitet kunne overføres over lengre avstander i Norge.

I begynnelsen var det mange små vannkraftverk og elektrisiteten kunne som oftest produseres lokalt, og man brukte ikke lange kraftoverføringer. I Norge er det veldig jevn spredning på hvor det er muligheter for vannkraftverk. Dermed var det heller ikke behov for høye overføringsspenninger for å hindre overføringstap over større avstander. Fram til 1928 var de normale overføringsspenningene på 50-60 kilovolt. Til sammenligning hadde flere land i Europa og USA på denne tiden allerede tatt i bruk spenninger på 200 kV. I 1928 ble 132 kV for første gang brukt i Norge, og dette var den høyeste spenningen fram til 1949 da Oslo Lysverker bygde en kraftoverføring med spenning på 220 kV. 300 kV ble tatt i bruk i større skala i Norge først i 1960-årene. Det er først i det siste tiåret at 420 kV har begynt å bli tatt i bruk.



FIGUR 2: VANNKRAFTVERK I NORGE. (6)

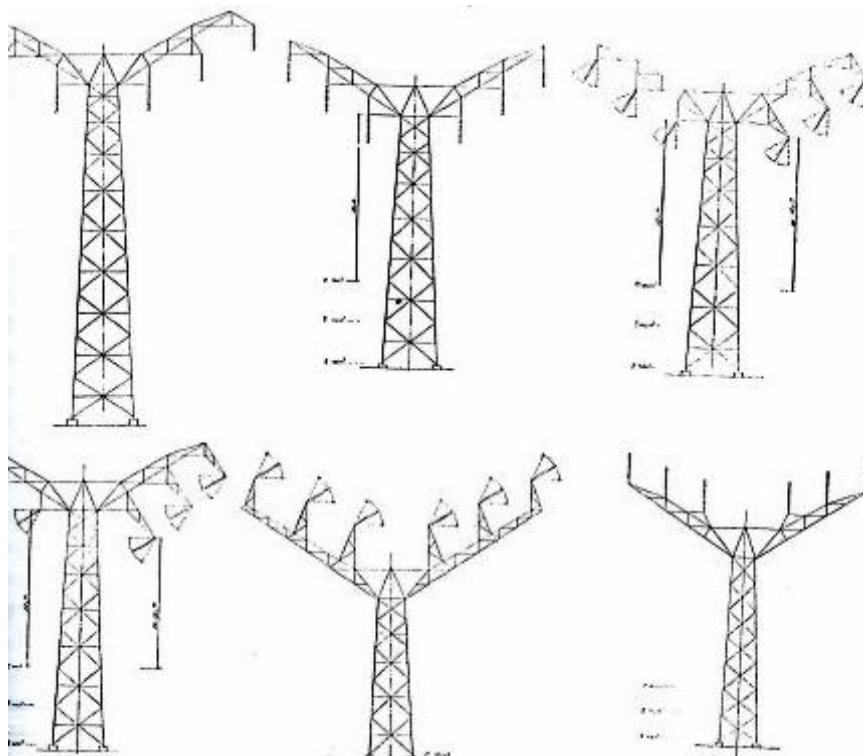
På det elektrotekniske området har norske kraftutbyggere fra første stund brukt utenlandsk teknologi. På dette området var det sjeldent at det trengtes noe utstyr for særnorske utfordringer. Land som USA, Tyskland, og Sverige var og er store på dette og mye av utviklingen kommer fra disse landene.

Utfordringene på det bygningstekniske området har derimot vært større. Norske forhold med store snø- og isdannelse på liner og master, snøras, sterk vind og andre forhold har gitt mange utfordringer. Det kan være vanskelig å vite nøyaktig hvordan slike krefter vil virke inn, da det kan være helt spesielle lokale klimaforhold som gjør seg gjeldende. Dette kan være topografiske utfordringer, i Norge er det en sterkt vekslende topografi. Mens andre "flate" land kan operere med store avstander mellom kraftmastene, er dette vanskeligere i Norge.

For å løse norske utfordringer måtte et empirisk grunnlag for fastsettelse av liners tåleevne under ulike klimatiske og topografiske forhold skapes. Dette arbeidet ble startet av avdelingsingeniør Olav Strand. Etter et pilotprosjekt med Rjukan-ledningen som gikk fra Rjukan via Drammen til Oslo, der det oppsto flere rykninger bortetter linjen og flere mastebrudd ble det i et nytt prosjekt, Nore-overføringene, tatt initiativ til å utvikle et system for beregning av masters og liners tåleevne under forskjellige klimatiske forhold.

Olav Strand fikk bygd et forsøkslaboratorium i Oslo Elektrisitetsverks driftssentral på Smestad. Der ble det konstruert et apparat som gjorde det mulig å utføre belastningsprøver av liner. Strand testet der mange liner av ulik størrelse og materiale. Ut fra resultatene fikk Strand utviklet en generell modell for fastsettelse av ulike linetyper styrke og belastningsevne. Resultatene førte til at en kraftigere linetype ble tatt i bruk (aluminiumline med stålkjerne) og at det ble mulig å gå betraktelig opp i masteavstand.

Arbeidet dannet grunnlaget for de første moderne offentlige normer for kraftledninger, som ble utarbeidet og vedtatt av NVE.



FIGUR 3: NORSKE MASTER PÅ 1920-TALLET (7).

Etter at Nore-overføringene ble ferdigstilt i 1928, skjedde det lite kraftutbygging i Norge. Denne stillstandsperioden varte hele 1930- og 1940-tallet igjennom. Det var sviktende kraftetterspørsel og store kraftoverskudd i 1930-årene som forårsaket dette. Under krigen og i de første etterkrigsårene skjedde det også lite da det var en sterk mangel på bygningsmateriell. I perioden etter 1945 gikk staten inn for et omfattende engasjement i kraftutbyggingen. Dette førte til en periode på 40 år med mye statlig kraftverksutbygging. Dette ble parallelt med en storoffensiv for å bygge ut kraftoverføringssystemet. Mellom 1950 og 1990 bygde staten godt over 7800 kilometer med høyspente kraftoverføringer. Dette tilsvarte cirka 90 % av det høyspente norske overføringssystemet. (7)

Etter innføringen av energiloven i 1991 gikk Norge fra å være svært utbyggingsrettet til å gå mer i retning av bedret utnyttelse av etablert infrastruktur og utnyttelse av utbygd system. Sentralnettet som var dominert av 300 kV, med innslag av 420 kV ble til langt ut på 2000-tallet bedre og bedre utnyttet, uten noe særlig utbygging. Dette har ført til at Norge i dag har et veldig godt utnyttet sentralnett, men for å tilpasse nettet til forbruket i dag og i fremtiden kreves det nye investeringer. (8), (9)

2.2 DET NORSKE STRØMNETTET

Et strømmnett eller overføringsnett består av flere kraftledninger som går fra en region til en annen eller mellom land. I Norge er strømmettet delt opp i tre nett: sentralnettet, regionalnettet og distribusjonsnettet. Både sentralnettet og regionalnettet overfører elektrisk energi med spenninger over 1 kV og er dermed høyspent. Distribusjonsnettet kan også være høyspent, men strømmen blir transformert til en spenning på under 1kV når

det skal til sluttbrukeren og er da lavspent. Den høyeste spenningen som blir brukt i strømmettet i Norge er på 420 kV.

Strømnettet har blitt et monopol av naturlige grunner, det ville ikke vært hensiktsmessig å bygge to ledningsnett til samme hus. Dette ville blitt veldig kostbart. Da det ikke er flere nett, kan ikke kundene velge nettselskap selv. Dette har ført til at alle nettselskaper er strengt regulert. Staten bestemmer hvor store inntekter nettselskapene kan ha, hvor stort overskudd de kan ha, hvordan nettet skal vedlikeholdes, hvordan kunden skal kompenseres ved strømbrydd og hvordan nett-tariffen skal lages. Dette sørger for at man betaler lik nettleie uansett hvem man kjøper strøm fra. Det er Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) som er ansvarlige for reguleringen. (10)

2.2.1 SENTRALNETTET



FIGUR 4: KART OVER SENTRALNETTET I NORGE (8)

Sentralnettet er ca. 11.000 km i lengde. Det eies blant annet av Statnett (90 %), BKK Nett AS, SKL Nett AS, Lyse Elnett AS og Hafslund Nett AS. Statnett har hovedansvaret og eier, drifter og utvikler hovedparten av sentralnettet, mens de andre selskapene styrer lokale ledninger og stasjoner. (10)

Sentralnettet dekker hele landet og overfører strøm fra landsdel til landsdel i Norge og over landegrensene til naboland. Det binder sammen produksjon og forbruk over hele landet.

Sentralnettet består hovedsakelig av kraftledninger med en spenning på 300 kV eller 420 kV, men noen steder i Nord-Norge inngår det også noen kraftledninger med 132 kV spenning.



FIGUR 5: UTVIKLING AV SENTRALNETTET OG SAMKJØRING. ORANGE ER SREDNINGEN AV NETTET. (8)

2.2.3 REGIONALNETTET

Regionalnettet binder sentralnettet og distribusjonsnettet sammen. Det dekker større områder som regioner og fylker. Ofte blir strømmen overført fra sentralnett og til en kommunes lokale distribusjonsnett via regionalnettet. Det har hovedsakelig kraftledninger med 66 kV og 132 kV spenning. Dette nettet er på rundt 19 000 km. Det er flere selskaper som eier regionalnettet.

2.2.4 DISTRIBUTJONSNETTET

Distribusjonsnettet er det lokale nettet som sørger for distribusjon av strøm til strømkundene, som for eksempel husholdninger og industri. Nettet har vanligvis en spenning på opptil 22kV, men denne transformeres ned til 230 V for å kunne bli levert til vanlige strømbrukere. Distribusjonsnettet er ofte lokalt til en kommune eller tettsted. (11), (12)

2.2.5 UTNYTTELSE AV STRØMNETTET

Hvor mye strøm som et nett kan overføre, kan økes ved mer effektiv utnyttelse av den eksisterende infrastrukturen, forbedring av den eksisterende infrastrukturen og nye overføringsforbindelser.

Statnett har i mange år hatt en strategi på å gjennomføre tiltak som oppgraderer strømmettet uten at investeringene blir for store. Slike tiltak fører til en god utnyttelse av nettet og reduserer behovet for store investeringer.

Et eksempel på slike tiltak er å utføre spenningsoppgraderinger. Da økes overføringskapasitet ved at eksisterende liner, master eller stasjoner blir forsterket eller utskiftet. En strategisk satsing Statnett har er å øke spenningene fra 300 kV til 420 kV på sentralnettet. Det jobbes slikt at på sikt skal hele sentralnettet ligge på 420 kV. (8)

2.3 MASTER

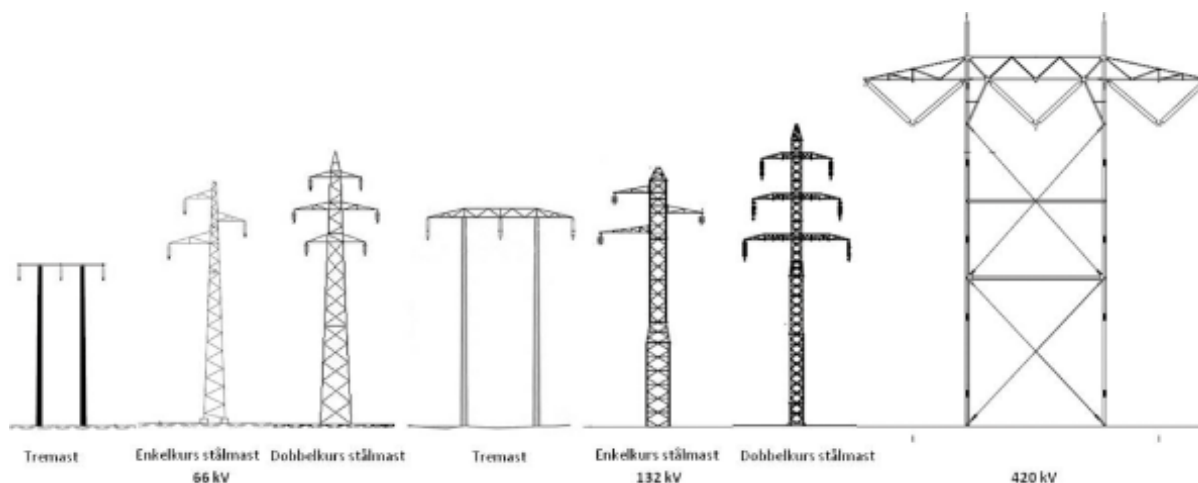
Kraftledninger er ledninger som overfører elektrisk energi. De blir som oftest brukt i et trefasesystem med tre strømførende ledere for et ledningssett, og det er gjerne to eller tre ledningssett som er montert i hver masterekke. I tillegg er det vanlig med to eller tre jordliner på mastetoppen for å beskytte linene mot lynnedslag og for å jorde masten(1), (84)

Mange strukturer blir brukt for å støtte kraftliner, blant annet selvbærende stålmaster, bardunavstivete stålmaster, selvbærende aluminiummaster, bardunavstivete aluminiummaster, selvbærende stålpåler, fleksible og semifleksible stålmaster og stålpåler, trepåler, tre H-rammer og sementpåler. Hvilken type som blir brukt i hvert enkelt tilfelle kan variere etter faktorer som hvor linen skal plasseres, viktigheten til linen, ønsket levetid, økonomiske forhold, vedlikeholdskostnader og tilgang til materiale. (13)

En linje bygd med selvbærende stålmaster vil i de aller fleste tilfeller gi best resultat. Den krever mindre inspeksjoner, og har lang levetid, selv med minimalt vedlikehold. Det eksisterer også høystyrke aluminiumlegeringsmaster, disse har blitt brukt i USA, men har ikke blitt brukt noe særlig i Norge eller Norden, i hvert fall ikke innenfor elkraft. Aluminium har fordelen ved å ha høyere korrosjonsresistans enn stål. På grunn av en lavere E-modul er det større risiko for deformasjoner.

Selvbærende stålpåler blir ofte brukt i trafikkerte områder der man ikke får en rett pålerekke og det blir korte avstander mellom hver påle. Trepåler blir brukt ved visse kraftlinjer ved middels og lav spenning. Gjerne i områder der det er lett tilgang til tre. En tre H-ramme består av to trepåler som er festet med enten en tre- eller stålpåle på tvers i toppen. Disse kan også ha et gitter mellom pålene for å skape en høyere stivhet. Betongpåler blir brukt steder i verden hvor det er lite treverk og materialene for å lage betong er lett tilgjengelig. De har fordeler mot trepåler i tropiske strøk da de ikke blir ødelagt av insekter og klima. Betongpålene må ha stålarming for å tåle linekrefter og vindkrefter.

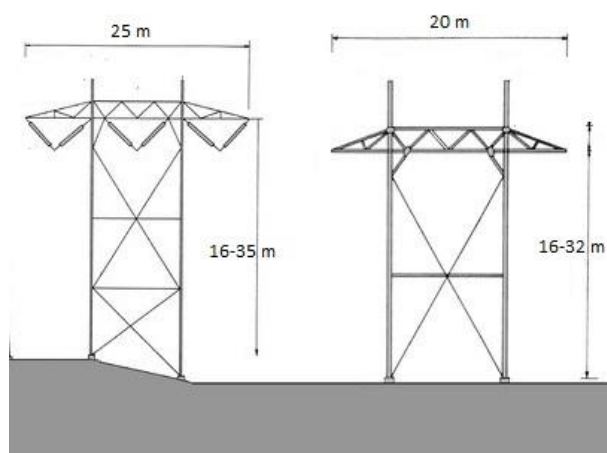
I sentralnettet er det store avstander da dette skal koble sammen nett mellom forskjellige regioner eller land. Det blir derfor store spennvidder, avstand fra mast til mast, og en kraftledning vil få et spenn som bøyer seg nedover. En kraftledning skal ikke strammes for mye, men heller ikke treffe bakken. Mastene må derfor ha en viss høyde. Dettet vises i figur 6 og tabell 1.



FIGUR 6: ILLUSTRASJON AV MASTER I REGIONAL- OG SENTRALNETTET (8)

Tabell 1: Karakteristikk for kraftledninger på ulike spenningsnivå (8).

Mastetype	Mastehøyde	Ryde- og byggeforbudsbelte	Antall master pr. km
22 kV	8-13 m	24 m	6-16
66 kV – tremast	12-15 m	22 m	5-8
66 kV – enkeltkurs stålmast	16-22 m	16-21 m	5-8
66 kV – dobbelkurs stålmast	20-25 m	22 m	5-8
132 kV – tremast	15-20 m	30 m	4-10
132 kV – enkeltkurs stålmast	18-23 m	28 m	3-7
132 kV – dobbelkurs stålmast	21-28 m	32 m	4-6
300 kV	25-40 m	40 m	3-4
420 kV	25-40 m	40 m	3-4

**FIGUR 7: BÆREMAST TIL VENSTRE, FORANKRINGSMAST TIL HØYRE(14)**

Det skilles mellom bæremast, vinkelmast og forankringsmast. Forankringsmasten er den som holder linen fast, den ligger gjerne på start og slutt av en lengre masterekke. Den er en del kraftigere enn bæremasten, for å hindre at ledningen faller ned på grunn av klimalaster som snø, is og vind. Vinkelmaster brukes til å vinkle kraftledningen om den skal endre retning. Vinkelmaster og forankringsmaster har ofte lik struktur. Bæremasten fungerer som støttemast og sørger for at kraftledningen ikke kommer for nært bakken. Det er vanlig at det er 10 % forankringsmaster/vinkelmaster og 90 % bæremaster i en rekke av master i et gitt terreng.

Krefter

Kreftene som brukes for å dimensjonere master og fundamenter er følgende:

- Laster, inklusive lastfaktorer, på opphengspunktet til isolatorer/line/jordliner (angitt som transversale (T), vertikale (V) og longitudinelle (L) laster)
- Vindlaster på mastene
- Lastkombinasjoner
- Bruddgrensetilstand for hver lastkombinasjon
- Bruksgrensetilstand for hver lastkombinasjon (tillatte deformasjoner)
- Foretrukket havarirekkefølge
- Laster ved bygging og vedlikehold

I beregninger og analyser blir alle disse kreftene tatt hensyn til, de blir kombinert slik at de virker samtidig(28).

Spenninger – Design

Spenninger i master kan bli analysert i flere forskjellige dataprogrammer, helst FEM-programvare. I de fleste designer blir det antatt at fundamentet er fast. I virkeligheten kan master i jorden ha ujevnt underlag som skaper spenninger som må tas med i vurderingsprosessen for å hindre svikt.

Jordskjelv

Analysen av virkningene et jordskjelv vil ha på strukturer er komplisert og krever kompetanse innen seismologi. Master som kan motstå det andre klimatiske lastene vil som oftest kunne motstå et middels kraftig jordskjelv også. Dette er uansett ikke noe som er veldig viktig å ta hensyn til i Norge, da det er ytterst sjeldent noen jordskjelv med ødeleggende krefter her. (15)

Bardunavstivet mast

Disse mastene blir holdt oppe av barduner, tau eller vaier, dette skaper støtte og stabilitet. Mastene kan være fagverksmaster med forskjellig antall kanter. De kan ha konisk eller rett utforming oppover i høyden. I tillegg finnes det bardun master som er av påler.

Vaier som brukes skal være laget av stål, som blir strukket på forhånd før masten settes opp. Den minste styrken til vaieren skal være den største spenningen som oppstår i masten under det verste lasttilfellet. (15)

Selvbærende mast

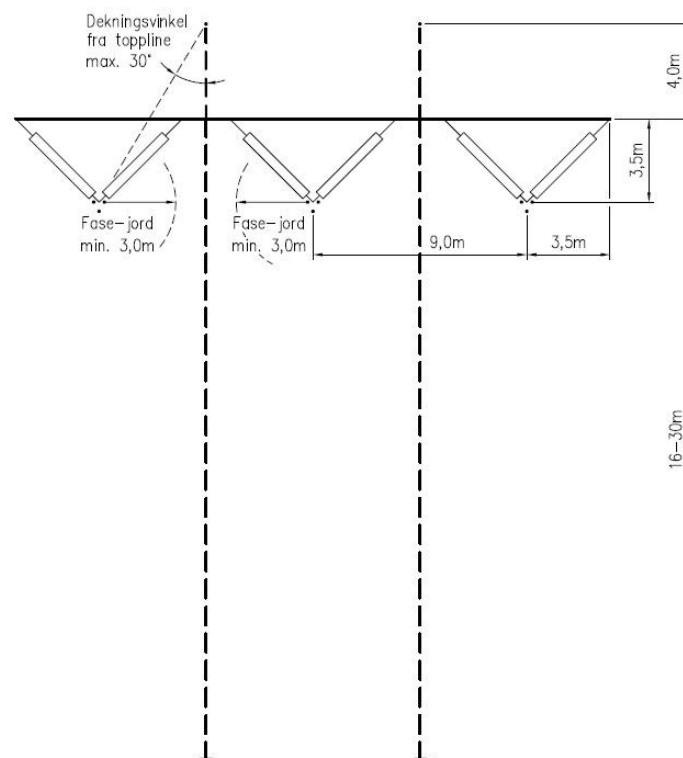
Selvbærende master er frittstående fagverkstrukturer. De har fasader som varierer etter høyde og lastekapasitet. Disse mastene har vanligvis tre eller fire sider. Fagverkene kan variere veldig i form, vinkelstål og rundstål brukes. Seksjonene står enten vinkelrett oppover eller at de skrår innover i høyden. Det skal være

plattformer for montører hver 20 meter i høyden. Som støtte blir det brukt gitterben, vinkelbein eller rør/solid rundt ben. Den mest brukte selvbærende masten bruker innvendig bardunering og finnes i 420 kV. (15) (84)

Linekonfigurasjon

Kraftledningene(linene) i festes til en mast i isolatorkjeder som henger ned fra traversen. Isolatorene skal sørge for at masten ikke blir strømførende. Det finnes tre typer kjeder: I-kjeder, doble I-kjeder og V-kjeder. Det skilles mellom tre ledninger som skal henges i kjedene: simplex med en line per fase, duplex med to liner per faser og triplex med tre liner per faser. I dag er det vanlig å dimensjonere en mast slik at den kan oppgraderes til duplex/triplex selv om den skal bruke simplex. (9), (69)

Normene har krav som må følges når det gjelder avstand mellom faser, mellom fase og mast og mellom fase og bakkeplan. Se figur 8 for eksempel på disse i en 420 kV bæremast.



FIGUR 8: LINEKONFIGURASJON OG ELEKTRISKE AVSTANDER FOR EN 420 KV MAST. (FIGUR: OMEGA ELKRAFT)

2.4 ELEKTROMAGNETISK FELT

Det har vært mye diskusjon rundt skadeligheten av elektromagnetiske felt fra forskjellig teknologiske komponenter. En arbeidsgruppe i Statens strålevern avga i 2005 en rapport om elektromagnetiske felt og helse til Helse- og omsorgsdepartementet og Olje- og energidepartementet(70).

De gjennomgikk situasjonen vedrørende høyspentanlegg nær boliger med hensyn på kunnskap, ny lovgivning, forvaltningspraksis og tiltak for å forebygge negative helseeffekter grunnet magnetfelt. Det ble konkludert med at det er en risiko for utvikling av leukemi hos barn om magnetfeltet i boligen er over $0,4 \mu\text{T}$, men kreftrisikoen generelt vurderes som meget lav. Risikoen for kreft er på 1: 10 000 per år blant barn eksponert for magnetfelt fra høyspentledninger. Denne grenseverdien samsvarer med vurderingen til Verdens helseorganisasjon og fra andre land.

Arbeidsgruppen til Statens strålevern anbefalte at:

«(...) nåværende praksis videreføres ved at man velger alternativer som gir lavest mulig magnetfelt når dette kan forsvares i forhold til merkostnader eller andre ulemper av betydning.» (70)

I dette prosjektet er det logisk å følge disse anbefalingene og grenseverdien. Dette er slik Statnett opererer og Omega Elkraft følger dette.

Høyspentmaster med spenninger på 420 kV og strøm på 800 A gir en feltstyrke på $5,0 \mu\text{T}$ på 10 meters avstand. Man må opp i en avstand på 70 meter før feltet kommer ned i $0,4 \mu\text{T}$ og 145 meter før feltet er nede i $0,1 \mu\text{T}$. Disse tallene vil variere noe da strømmen ikke er konstant.

Mastehøyden kan også ha noe å si for magnetfeltet, men ved avstander på 20 meter eller mer fra nærmeste line vil ikke mastehøyden påvirke noe nevneverdig. Ved trekantoppheng vil feltene bli dempet av hverandre. Feltet kan bli redusert med ca. 25-30 %.



FIGUR 9: EKSEMPEL PÅ TREKANTOPPHENG(70).

I Norge er det 6345 adresser som er i nærheten magnetfelt på $0,4 \mu\text{T}$ på grunn av høyspentlinjer med spenningsnivå 45-420 kV.

All bygging av høyspentanlegg og høyspentledninger med spenning over 22 kV i Norge krever anleggskonsesjon godkjent fra NVE. Da skal alle beslutninger i prosjektet være innen rammen av gjeldende forvaltningsstrategi, og magnetfelt vil være et av kravene innenfor dette. Grenseverdien på $0,4 \mu\text{T}$ i magnetfelt vil da bli tatt hensyn til i konsekvensutredninger for nybygging.

I dette prosjektet utvikles det en mast med en spenning på 420 kV, den vil mest sannsynlig kunne bli brukt i sentralnettet. Sentralnettet frakter strøm mellom landsdelene i Norge og vil som oftest ikke gå inn til byer eller tettsteder der et distribusjonsnett vil ta over. Det er derfor sannsynligvis ikke noen bolighus i en nærhet på 145 meter. Men en utredning rundt dette må uansett utføres ved planlegging av en ny kraftlinje, og da vil det bli undersøkt hvor bolighus ligger og hvor linen vil gå i forhold til dem. Dette ligger utenfor denne oppgaven.

2.5 OMEGA ELKRAFT

Omega Elkraft AS ble stiftet i april 2002 og har hatt jevn vekst siden det. I dag har selskapet over 30 ansatte og de fleste har en form for elkraftteknisk bakgrunn (71).

Omega Elkraft har som mål å være en profesjonell tjenestetilbyder til eiere av elkraftteknisk infrastruktur. Selskapet leverer tjenester til store netteiere som blant annet Statnett, Hafslund og Skagerak Nett. Tjenestene de utfører er utredningsarbeid for nettplanlegging, prosjektering av stasjons- og overføringsanlegg, ettersyn og feilsøking på spesielle komponenter, prosjektledelse, deltagelse i utprøving og tester samt ajourføring av ledningskart. De holder også på med dimensjonering og design av forskjellige typer høyspentmaster. Selskapet kan deles i fire avdelinger: Nett, Stasjoner, GisNis – dokumentasjon, og Master (65).

Omega Elkrafts hovedkontor ligger på Helsefyr i Oslo. De har også et regionskontor på Grålum i Sarpsborg.

3. TERMOLOGI

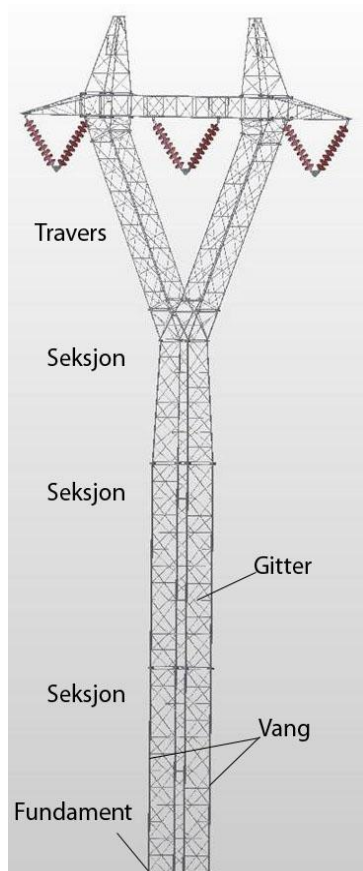
3.1. BEGREPER

TABELL 2: VIKTIGE BEGREPER

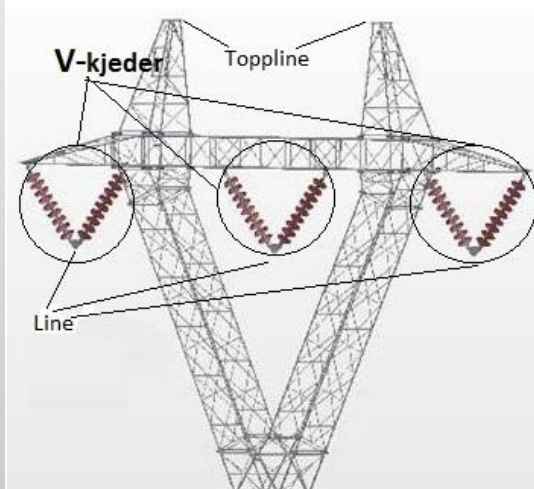
Begrep	Betydning
Høyspenning	Spenning over 1 kV.
Høyspenningsmast	En mast som holder en høyspent kraftledning.
SB500	Stål med flytegrense på 500 MPa
Isolasjonsavstand	Avstander mellom faser.
Miljølaster	Laster som skyldes klimatiske forhold som vind og is.
Elektromagnetisk felt	Energi som overføres gjennom tomme rom kan akselerere, den kan da forstyrre elektromagnetiske felt.
Line	Liner kan være strømførende kraftledninger eller toppliner som skal jorde masten og være lynavleder.
Iam-fil	Assembly-fil. Dette er en sammenstillingsfil som viser en 3D-modell. (85)
Dwg-fil	Drawing-fil. Dette er en tegnefil som inneholder 2D og 3D designdata. (86)
Step-fil.	3D modellerings fil som brukes til å distribuere CAD filer mellom programmer. (87)
Projisering	Overføring av linjer fra en sketsj til en annen i Inventor. (88)

TABELL 3: FORKORTELSER

Forkortelse	Betydning
kV	Kilo Volt (1000 Volt)
RSB	Round Steel Bar
CAD	Computer-aided design. Modellering i dataprogrammer.
FEM	Finite element method. Elementmetoden, beregner spenninger og deformasjoner i dataprogram.
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
KILE-risiko	Kvalitetsjusterte inntektsrammer ved ikke levert energi (25).



FIGUR 10: HØYSPENTMAST (1)



FIGUR 11: TOPPEN AV HØYSPENTMAST, TRAVERS (1)

TABELL 4: MASTEBEGREPER.

Begrep	Betydning
Seksjon	Selve stammen til en mast består av en eller flere seksjoner. Disse strekker seg fra fundamentet i bunn og til traversen i topp.
Vang	Vang er søylene/bjeldene som er i hvert hjørne av hver seksjon. De er bærebjeldene til seksjonen.
Gitter	Gitteret er stavene som er mellom vangene horisontalt og diagonalt. De holder vangene sammen og kan ha forskjellige mønster.
Travers	Toppen til en mast kalles travers, den er festet til øverste seksjon. Det er her linene kommer inn både kraftliner og toppliner.
Gurter (traversvanger)	De lengste horisontale stavene i traversen.
Isolator kjeder	I isolator kjedene henger de strømførende linene, kjedene kan være i I-form eller V-form. Isolator kjedene sørger for at masten ikke blir strømførende.

3.2 SYMBOLER OG ENHETER

TABELL 5: VIKTIGE SYMBOLER OG VERDIER

Symbol	Betydning	Enhet
σ	Spenning	MPa
τ	Skjærspenning	MPa
M	Moment	Nm
W	Tverrsnittsmodul	mm^3
I	Annet arealmoment	mm^4
F	Kraft	N
$F_{v,Ed}$	Dimensjonerende avskjæringskraft i skruer	N
$F_{t,Rd}$	Dimensjonerende strekkraft	N
$F_{v,Rd}$	Kapasiteten per avskjæringstverrsnitt	N
$F_{t,Ed}$	Dimensjonerende strekkraft i skruer	N
V	Vertikale krefter	N
L	Longitudinelle krefter / Krefter i lineretning	N
T	Transversal/Transversielle krefter	N
G	Tyngde	N
S1	Kraft i vange	N
S2	Kraft i vange	N
A	Tverrsnittsareal	mm^2
S	Kraft i vange	N
S_t	Trykkraft i vange	N
S_s	Strekkraft i vange	N
S_n	Kraft i vange på nøytralaksen	N
r	Radius	mm
f_y	Flytespenning	MPa
γ_m	Materialfaktor	-
i	Treghetsradius	mm
D	Diameter	mm
d	Diameter	mm
λ	Slankheten	-
σ_{\perp}	Normalspenning normalt på sveisesnittet	MPa
σ_{\parallel}	Normalspenning parallelt med sveisens akse	MPa
τ_{\perp}	Skjærspenning normalt på sveisens lengdeakse	MPa
τ_{\parallel}	Skjærspenning parallelt med sveisens lengdeakse	MPa
f_u	Strekkfasthet	MPa
f_{ub}	Strekkfasthet bolter	MPa
A_s	Spenningsareal	mm^2
β_w	Korrelasjonsfaktor	-
a_e	a-mål sveis	mm
γ_{m2}	Materialfaktor	-
$F_{w,Rd}$	Dimensjonerende kapasitet til sveis per lengdeenhet	N
σ_b	Bøyenspenning	MPa
$\sigma_{tillatt}$	Tillatt spenning	MPa
M_b	Bøyemoment	Nm
σ_{tot}	Total spenning	MPa
F_{Ed}	Dimensjonerende lastvirkning i skruen	N
σ_{vm}	Von Mises spenning	MPa

lk	Knekkelengde	mm
k	Knekkfaktor	-
a-mål	Høyden vinkelrett over sveisen	mm
$fk_{tillatt}$	Tillatt knekkspenning	MPa

3.3 FORMLER

TABELL 6: FORMLER OG FORMELNUMMER

Beskrivelse	Formel	[Nr]
Kapasitet mot avskjæring i skruene	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	1
Skruens kapasitet i strekk	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$	2
Skruer belastet i avskjæring og strekk skal tilfredsstille kravet	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0$	3
Dimensjonerende kapasitet for kilsveis oppfylles hvis	$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{fu}{\beta_w \cdot \gamma_{m2}}$	4
Dimensjonerende kapasitet for kilsveis oppfylles hvis	$\sigma_{\perp} \leq 0,9fu/\gamma_{m2}$	5
Spenninger i sveis fra aksiallast	$\sigma_{\perp} = \frac{F}{\sqrt{2}a_e \cdot d \cdot 2 \cdot \pi}$	6
Spenning	$\sigma = \frac{F}{A}$	7
Slankheten	$\lambda = \frac{lk \cdot k}{i}$	8
Tillatt spenning	$\sigma_{tillatt} = \frac{fy}{\gamma_m}$	9
Treghetsradius for sylindrisk tverrsnitt	$i = \frac{D}{4}$	10
Areal sirkel	$A = \pi \cdot r^2 \text{ eller } A = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$	11
Tverrsnittsmodul	$W = \frac{1}{6}BH^2$	12
Bøyespenning	$\sigma_b = \frac{M}{W}$	13
Annet arealmoment	$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64}$	14
Tillatt knekkspenning	$fk_{tillatt} = \frac{fk}{\gamma_m}$	15

4. PROSJEKT

4.1 HOVEDMÅL

Hovedmålet er grunnlaget for arbeidet i dette prosjektet.

Hovedmålet for prosjektet er å utvikle og designe en 420kV høyspenningsmast i RSB. Det tas grunnlag fra bedriftens krav og tidligere forprosjekt. Det vil bli lagt mest vekt på å få fungerende sekskant seksjoner, det blir også sett på et konsept for en travers i toppen av masten.

4.2 DELMÅL

Følger disse delmål i arbeidet med å nå hovedmålet.

1. Tilegne seg kunnskap rundt utvikling, beregning og design av høyspentmaster.
2. Videreutvikle seksjonene på høyspentmasten for å finne en fungerende design i sekskant.
3. Utvikle travers.
4. Utføre beregninger og en komplett FEM-analyse på masten.

TABELL 7: FASE, DELMÅL OG ARBEIDSLISTE

Fase	Delmål	Arbeidsliste
1. Kunnskapstilegning	Tilegne seg kunnskap rundt utvikling, beregning og design av høyspentmaster.	Definere mål for prosjekt. Se på konkurrerende løsninger Begrense prosjekt etter tid. Tilegne kunnskap fra litteratur og internett rundt temaet, blant annet utvikling, design og forskjellige beregningsmetoder. Se på samspill mellom master og strømnnett. Undersøke relevante standarder.
2. Utvikling av seksjon	Gå videre på design fra forprosjekt og få en sekskant konstruksjon som tåler lastene.	Dimensjonerende kriterier (sinkbasseng, økonomi, miljølast). Skissere forskjellige alternativer. Utføre enkle FEM-analyser og beregninger på hvert alternativ. Sammenligning.
3. Design av seksjon	Bruke resultater fra fase 2 til å utvikle en 3D-modell og analysere denne.	Design seksjonene i CAD med utgangspunkt i skisser fra fase 2. Utføre FEM-analyse. Dimensjonere sveiser og plater.
4. Utvikling av travers	Se på løsning for travers og utvikle denne.	Bruke skisser fra oppdragsgiver og forprosjekt som grunnlag.
5. Design av travers		Design travers i CAD.
6. Analyse	Utføre analyser på mastedesign.	Utføre FEM-analyse på sammensatt modell med seksjoner og travers Konkludere om designen holder. Undersøke og dokumentere produksjon og montering av mast. Overflatebehandling. Økonomisk kalkyle
7. Evaluering		Evaluere prosjektet.
8. Revisjon		Revidere elementer av prosjektet om nødvendig.

4.3 ARBEIDSPLAN

TABELL 8: ARBEIDSPLAN

Aktivitet/Uke	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Kunnskapstilegning																			
Definere prosjekt	■	■	■	■															
Litteraturstudie			■	■	■	■	■												
Utvikling/design																			
Seksjon																			
Dimensjonere seksjon						■	■	■	■	■									
Konsept seksjon								■	■	■									
Design av seksjon								■	■	■	■								
Utvikling/design																			
Travers																			
Dimensjonere travers											■	■	■						
Design av travers													■	■					
Analyse																			
Styrkeberegning															■	■	■	■	
Produksjon/montering																■	■	■	
Økonomisk kalkyle.																	■	■	
Fysisk modell om mulig																	■		
Rapportskriving	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Frist for rapport.																			■

4.4 MILEPÆLER

TABELL 9: MILEPÆLER

Dato	Nr	Milepæl
1.2	1	Oppdragsdefinisjon
18.3	2	Ferdig design av seksjoner.
12.4	3	Ferdig design av travers.
6.5	4	FEM-analyse utført.
15.5	5	Rapport innlevert.
	6	Presentasjon av prosjekt.

4.5 BEGRENINGER

Prosjektet ligger på 880 timer per person, dette gjør at det ikke er mulig å få tid til alt. Derfor legges det følgende begrensinger for hva som er realistisk å få gjennomført i løpet av prosjektperioden:

- Dette er en videreføring av et forprosjekt, men det vil fortsatt gjenstå mye arbeid før en komplett mast foreligger.
- I 3D-modell blir ikke komponenter som plater, skruer V-kjeder lagt på. Kun rundstålet blir designet ferdig.
- Det blir ikke utført en konsekvensanalyse for masten.
- Det blir ikke utført utmattingsberegninger.
- Det blir ikke undersøkt andre materialer enn SB500 stål for masten.
- Egenfrekvens vil ikke bli analysert.
- Komponenter som lynavleder og overspenningsbeskyttelse vil ikke bli utviklet.
- Detaljerte konstruksjonstegninger blir ikke produsert, det ble laget enkle tegninger av nederste seksjon og travers. Fester mellom seksjoner, sveiser og bolter blir ikke tatt med i disse tegningene.
- Det blir ikke dimensjonert bolter og plater for traversen.
- V-kjede blir valgt, men ikke dimensjonert.
- Det blir ikke utviklet plater som skal være mellom V-kjedet og traversen.
- Fundamentet til masten blir ikke dimensjonert.
- Toleranser på mål blir ikke tatt med.
- Leveringsfrist var 15.5.2013.

5. SAMMENLIGNING AV EKSISTERENDE LØSNINGER

Det eksisterer flere forskjellige typer høyspentmaster som blir brukt i Norge, nedover følger et utvalg av de mest brukte mastene.

5.1 TREMASTER/LIMTREMASTER

Tremaster/limtremaster er laget av barked og kvistet furu i tillegg til dette er de impregnert. Limtremaster er miljøvennlig, formstabil og lett å bearbeide. Limtremastene er hule innvendig.

Tremaster er betydelig billigere enn stål i mange forskjellige strukturer. Dette skyldes ofte at stålstrukturer blir designet mer konservativt, da det skal ha lengre levetid enn trestrukturer som uansett vil ha kortere levetid enn stål. Tre blir som oftest brukt på høyspentmaster under 69 kV, men kan bli brukt på opptil 420 kV. Det er derimot sjeldent at de blir brukt på noe høyere enn 132 kV i Norge.

Tremaster blir ofte utsatt for angrep fra hakkespetter, og det finnes ingen effektiv beskyttelse mot dette.

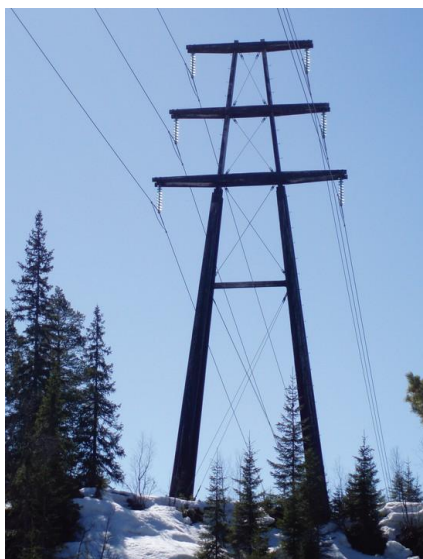
Tre kan forfalle på grunn av sopp som kommer av forhold med luft, fuktighet og varme. Soppen spiser da treet. For å få bukt med denne soppen må treet innsettes med et stoff som er giftig for soppen. Da er kreosot mye brukt, kull-tjære. Kreosot kan gi sterke allergiske reaksjoner og det er derfor forbudt å bruke eller gjenbruke tre med impregnert kreosot på lekeplasser, i hager og andre steder det er mulig å få tjæren på huden.

Av tre kan det lages pålemaster eller rammemaster.

Pålemaster er bare en hul trepåle som det er satt isolatorer på i toppen, disse brukes gjerne lokalt i et distribusjonsnett.

Rammemastene blir med trepåler innsatt med kreosot. Det kan brukes stål- eller trepåler på tvers i toppen. Tre er ofte billigere enn stål med samme styrke. Tre har derimot kortere levetid, fare for å bli knust av lyn, fare for å brenne og begrensinger i forhold til hvor høy spenning som kan brukes trygt. Som oftest vil en mast være jordet, så faren for lyn er ikke veldig stor.

(16), (13), (84)



FIGUR 12: LIMTREMAST (17).

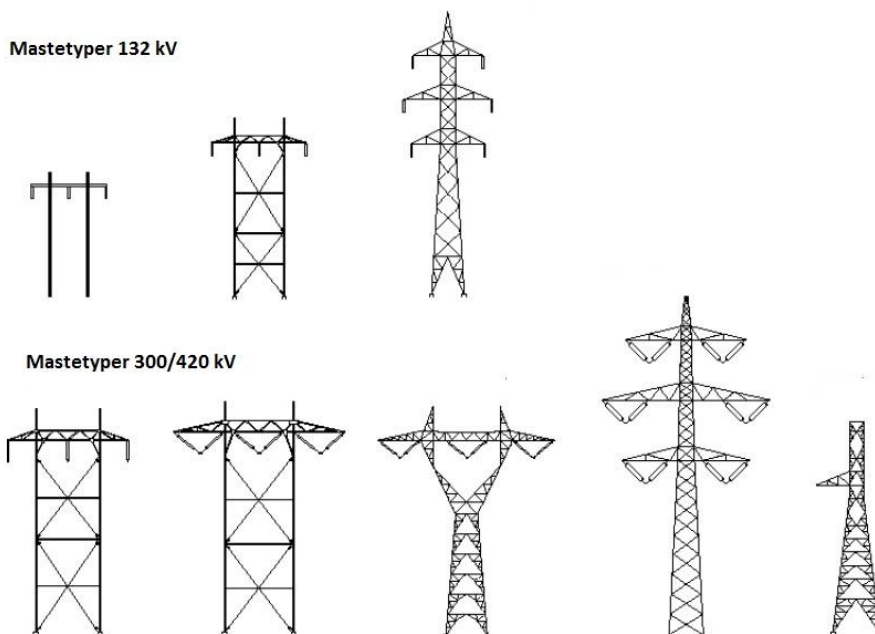
Typiske spennlengder er fra 150-200 meter. Fundamentering på fjell krever sprengning av grop til 3,5 meters dybde. Fundamentering i løsmasser som jord krever enda større grop med steinsetting og det oppstår råteproblematikk.

Når man skal bygge større tremaster blir de tunge og krever god adkomst og en kraftig kran. Det kreves da også veldig gode transportveier til plassen masten skal monteres.

Oppgradering til dobbellinje er meget vanskelig i tremaster. Helikopterbruk i montering er vanskelig på grunn av meget tunge seksjonsveker.

5.2 STÅLMASTER

Master av stål er det som er mest brukt i sentralnettet i Norge(8). De vanligste stålmastene er rammemaster og fagverksmaster. De består som oftest av vinkelstål. De to mastene kan gå under begrepet vinkelstålmaster. Også rørstål blir brukt til å lage master, da blir de ofte laget på samme måte som tremaster, i form av påler og H-rammer. Rørstålmaster er dyre, har dyrt fundament og har stor synlighet (26).



FIGUR 13: FORSKJELLIGE STÅLMASTER VED FORSKJELLIGE SPENNINGER. (18)

På figur 13 vises det under 200/420 kV mastetyper, to rammemaster til venstre og tre fagverksmaster til høyre. Alle unntatt masten helt til høyre er bæremaster.

Vinkelstålmaster

H-mastene er de Statnett vanligvis bruker. Det er en rammekonstruksjon hvor hver del er festet med skruer. Som i alle stålmaster er alle delene også her varmgalvaniserte. Stålkvaliteten som kreves av Statnett er S355J2 på disse. Mastene kan være selvbærende eller bardunavstivet. (19)

Fagverksmaster blir brukt på høye spenninger og der masten må være litt større. Disse kan være bygd opp med 4 stålvinger i en firkantform og gitter mellom disse vengene. Hvordan seksjonene og traversen er designet varierer veldig etter hvilken kraftledning som settes opp og området rundt der masten skal monteres. (68)



FIGUR 14: RAMME, H-MAST MED VINKELSTÅL (19).



FIGUR 15: VINKELSTÅLMASTER(20).

Typisk økning i spennlengde på vinkelstålmaster er 30-50 % i forhold til tremaster.

Stålmaster har rimelige fundamentering på fjell, men om den skal plasseres i jord blir det dyre fundamenter. Rask montasje gjør at lange seksjoner bygges på meget kort tid i eksisterende traseer. Mastemontasje er mye raskere og enklere enn tremaster. Oppgraderbart fra enkellinje til dobbel. Det er ikke så praktisk å bruke helikoptre ved montering av vinkelstålmaster, da de består av mange deler og er tidkrevende å sette opp(26).

5.3 KOMPOSITTMAST

Komposittmaster er laget av et komposittmateriale som består av polyuretanharpiks og E-glassfiber. Disse materialene gir disse mastene god styrke, lang levetid og liten vekt. De billige å produsere og frakte, men har høye fundamentkostnader. Disse mastene blir bygd som mørke store påler, og har dermed høy synlighet(22).



FIGUR 16: KOMPOSITTMAST TIL HØYRE OG VINKELSTÅLMAST TIL VENSTRE(21).

5.4 JORD- / SJØKABEL

Jord- og sjøkabler er lite brukt i sentralnettet. Det er begrenset med erfaring i Norge og internasjonalt på å bruke jord- og sjøkabler på mer spenning enn det som er i distribusjons- og regionalnettet(8).

NVE har i tidligere notater konkludert med at siden luftledninger har blitt billigere og kabling fører til store gravekostnader så kan det være mer hensiktsmessig å gå for luftledninger istedenfor ledninger under jord(23).

Det vil også være vanskeligere og mer tidkrevende å reparere linefeil om kraftledningen er under jord eller vann.

Jord- og sjøkabel kan dermed ikke sees på som en direkte konkurrent til luftlinjer. Derfor og på grunn av overstående grunner blir ikke jordkabler eller sjøkabler tatt med i sammenligningen.

5.5 RSB-MASTER

RSB-master blir brukt innenfor blant annet kraftledninger, stasjoner, belysning, antennemaster, og vindmåling. (66)

En RSB-mast består av seksjoner som er sveist sammen av stålstaver med høy kvalitet, SB500. Stavene er runde og tynnere enn vinkelstål, noe som gjør at det blir mindre synlighet. (24)

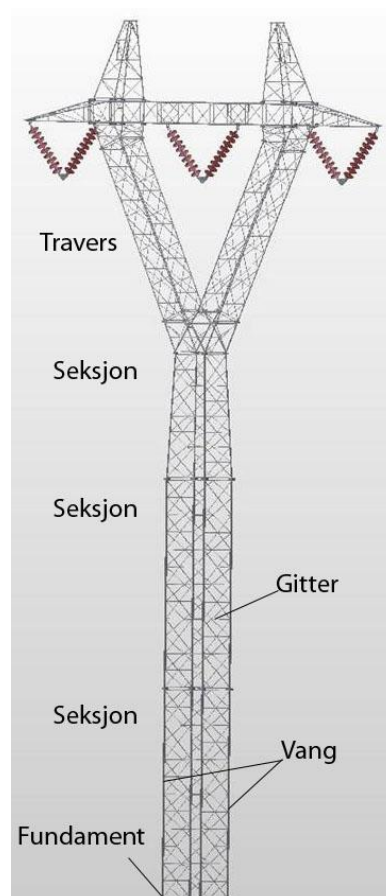
Disse seksjonene blir produsert og sveiset sammen, og bygges så sammen til komplette master på byggestedet. De monteres ved hjelp av helikopter eller kran.

RSB master blir montert på et fundament som oftest er under jorden eller festet til berg/fjell, masten består av flere seksjoner som kan ha samme bredde/diameter eller gradvis bli tynnere oppover masten, en travers som da er toppen til masten der kraftledningen skal henge. De tykkeste RSB-stavene som er i hvert hjørne av masten kalles vang. Vangene utgjør tverrsnittet til masten. De tynnere stavene mellom vangene kalles for gitter. Gitteret sørger for å holde seksjonene stive og stabile

Gitteret gjentas oppover hver seksjon, hver gang mønsteret gjentar seg kalles det for en rute.

Mastene har en modulær oppbygning og kan enkelt oppgraderes. Oppgraderinger av spenningsnivå, til dobbeltkurs eller trippelkurs og mye annet kan gjøres på grunn av måten konstruksjonen er laget. Alle seksjoner og traversen kan skrus av og byttes ut(27).

RSB-master har samme spennlengde som vinkelstål. Det er enkle fundamentering på fjell og i løsmasser, der fundamentet gjøres klart og en mast kan settes direkte på dette uten mye ekstra arbeid. Det er enkelt å montere mastene med helikopter, da det er lette seksjoner.(26)



FIGUR 17: RSB-MASTENS FORSKJELLIGE DELER (1).

Rask montasje gjør at lange seksjoner kan bygges på meget kort tid i eksisterende traseer Denne mastetypen har også minimalisering av KILE-risiko.



FIGUR 18: RSB-MAST(27)

5.6 SAMMENLIGNING

TABELL 10: SAMMENLIGNING AV FORSKJELLIGE MASTETYPER OMEGA ELKRAFT(26).

	Tremast	Limtremast	Vinkelstålmast	Rørstålmast	Komposittmast	RSB-mast
Pris mast	+	+	÷	÷	+	÷
Pris fundament	÷	÷	÷	÷	÷	+
Pris montasje	+	+	÷	+	+	+
Synlighet	÷	÷	÷	÷	÷	+
Spennlengder	÷	÷	+	+	+	+
Levetidskostnader	÷	÷	+	+	+	+

Positivt: + Negativt: ÷

Konkluderer fra opplysningene i avsnittene over at RSB-masten har mange gode egenskaper og kan konkurrere med alle de andre mastetyper som blir brukt i Norge i dag.

Mange av opplysningene rundt sammenligningen er hentet fra Omega Elkraft selv, da de er den eneste leverandøren av RSB-master og da de eneste som kan utføre en slik sammenligning. Omega Elkraft er leverandør av flere mastetyper og har dermed god erfaring på dette.

6. PRODUKTBESKRIVELSER

6.1. KRAVSPESIFIKASJONER

Kravene som settes til produktet vårt er gitt av oppdragsgiver, dette gjelder masten i sin helhet. De gitte kravene er som følger:

- Høyspentmasten skal kunne holde en driftsspenning på 420kV
- Masten skal tåle belastninger som vindlast, islast og egenvekt
- Den skal ha så lave produksjons- og monteringskostnader som mulig
- Masten skal ha en RSB struktur som gir den følgende egenskaper
 - Liten synlighet
 - Høy styrke
 - Rask montasje
 - Lav vekt og høy kvalitet
 - Enkel fundamentering
 - Lave drifts og total kostnader

- Masten skal ha en 6-kantet struktur.
- Hver seksjon skal være 6 meter og masten skal bestå av 4 seksjoner.
- Slankheter mellom 20 og 40 er å foretrekke
- Alt skal varmforsinkes, dette kan føre til at masten/seksjonene må deles opp. Bassengene for varmforsinking har gitte størrelser

- Et traveralternativ er gitt fra oppdragsgiver:
 - En enkeltkurs utgave som i dag brukes mellom Hovinmoen og Gran, den har V-kjeder på alle fasene
 - Traversen skal skisseres ut fra krav som elektriske avstander, V-kjedegeometri, dekning fra jordline, etc.

6.2. RANGERING AV VIKTIGE EGENSKAPER

Under følger en rangering av de viktigste egenskapene til høyspentmasten.

TABELL 11: RANGERING AV PRODUKTEGENSKAPENE MED HENSYN PÅ HVA KUNDEN SER ETTER. RANGERING 1-6 (HVOR 6 ER AV HØYESTE GRAD AV VIKTIGHET).

Egenskaper	Beskrivelse	Vekting	Begrunnelse
Synlighet	Synligheten til masten er minst mulig.	5	Viktig for kunden og de som eller ferdes/er i området.
Monteringsvennlighet	Monteringen av masten er så enkel som mulig.	4	Minst mulig arbeid med montering gir lavere pris.
Pris	Totalkostnadene er så lave som mulig.	5	Viktig for kunden, og for oss.
Kvalitet	Høy styrke og levetid. Så lite vedlikehold som mulig.	6	Essensielt for at det skal kunne brukes i normert tidsperiode.
Inngrep i naturen	Unødvendig inngrep i naturen skal unngås.	3	Har også sammenheng med pris, mindre inngrep gir lavere pris.
Utseende	Masten skal ikke skille seg ut i fra landskapet rundt.	4	En mast som er for iøynefallende er uheldig for nærmiljøet.
Sikkerhet	Masten skal ikke være til fare for installatører, ved ettersyn eller andre.	6	Dødsfall og skader skal ikke skje.

6.3. METRISKE GROVSPESIFIKASJONER

Spenningen på kraftlinene skal være 420kV.

Tabell 12 viser hvilke verdier som kan brukes for å utvikle masten. Verdiene er gitt fra Omega Elkraft. Da seksjonene sannsynligvis vil skrå oppover vil vanger og gitter variere i lengde.

TABELL 12: METRISKE GROVSPEKIFIKASJONER

Komponent		Min [mm]	Ønskelig [mm]	Maks [mm]
Seksjon	Høyde	-	6000	6000
	Bredde, bunn	1000		4000
	Bredde, topp	500		2000
Travers	Høyde	4000	-	8000
	Bredde	16000	-	-
Vanger	Diameter	40	60	90
Gitter	Diameter	16	16	25
Line	Dim. Lengde	100 000	-	400 000
Traversgitter	Diameter	20	32	40
Gurter	Diameter	20	32	40
Ferdig mast	Høyde	24 000	30 000	34 000
	Bredde	1000	-	4000

6.4. TIDLIG ØKONOMISK ANALYSE

Etter informasjon samlet sammen fra Omega Elkraft AS så blir det konkludert med at kostnader med montering og fundamentering vil være mindre enn ved andre tradisjonelle master.

Med RSB-master beregnes kostnader for produksjon, ofte med utkjøring også til 50 kr/kg stål. Antar her at masten vil veie rundt 12 tonn, dette gir da en pris på 600 000 NOK for selve masten. Med fundament og alt av standardkomponenter og isolatorkomponenter kan det antas en pris på rundt 800 000 NOK totalt. Med utredningsarbeidet på 880 timer blir det nærmere 1,3 millioner NOK.

6.5. FORMGIVNING OG DESIGN

Målet for estetisk design av høyspentmaster er som regel dempet dominans, det er et overordnet grep for å dempe visuelle konflikter. Positiv fremheving, som skulpturelle master og mer kreative løsninger er ikke så mye brukt. (29)

NVE har noen estetiske designkriterier for høyspentmaster som skal kunne brukes uavhengig av hvilken mast det er. Se tabell 13.

TABELL 13: ESTETISKE DESIGNKRITERIER(29)

Estetisk designkriterier	Beskrivelse
Tidløshet	Master skal gjerne stå i 60-70 år, da bør de ha et tidløst uttrykk. Nøytral og svak farge er en måte å gjøre dette på.
Familielighet	Master med ulike funksjoner i samme masterekke bør være så like at de blir oppfattet som de hører sammen.
Bestandige proporsjoner	Proporsjonene i masten bør holde selv om vegetasjonen endrer seg.
Begrense mastens størrelse	Masten bør gå i en klar hovedretning for å unngå at den virker større enn nødvendig.
Harmonisk utforming	En mast bør ha enkel utforming slik at den er lett å lese visuelt.
Ensartet linekonfigurasjon	Linekonfigurasjonen bør være ensartet i hele kraftledningen.
Ryddige elementer	Delelementer i masten bør ryddes i en helhetlig form.
Lettlest kontur	Likt som med harmonisk utforming, bare med kontur.
Helhetlig tredimensjonal form	Masten bør gi et helhetlig formuttrykk, uansett hvilken vinkel den sees fra.
Innordnes andre inngrep	Masten bør innordnes andre inngrep i nærområdet for og ikke skape visuelt kaos.
Uttrykke sin funksjon	Mastene bør uttrykke sin funksjon. En bæremast ser ut som den bærer, en forankringsmast uttrykker at den er begynnelsen/avslutningen på et strekk.
Fundamentet er en del av masten	Mastens fundament bør fremstå som en del av en helhet.
Uttrykke trygghet	Masten bør fremstå som trygg og stabil.

Estetiske designkriterier faller ut av målet til denne oppgaven. Det viktigste for denne oppgaven er mekanisk styrke. Flere av kriteriene kan heller ikke brukes når det kun er en bæremast som skal utvikles og det ikke er kjent hvor den skal plasseres.

7. KONSEPT

7.1 FUNKSJONSANALYSE

Funksjonsanalysen baserer seg på produktmålet og produktkrav. En høyspentmast består vanligvis av selve masten delt opp i seksjoner og en travers på toppen av seksjonene der linene går inn. Seksjonene består av vanger og gitter, mens traversen består av spir og midtdel.

Det ble utført en funksjonsanalyse i forprosjektet, men det ble sett på som hensiktsmessig å utføre den pånytt og la noen av funksjonsvalgene ta grunnlag i styrkeberegninger.

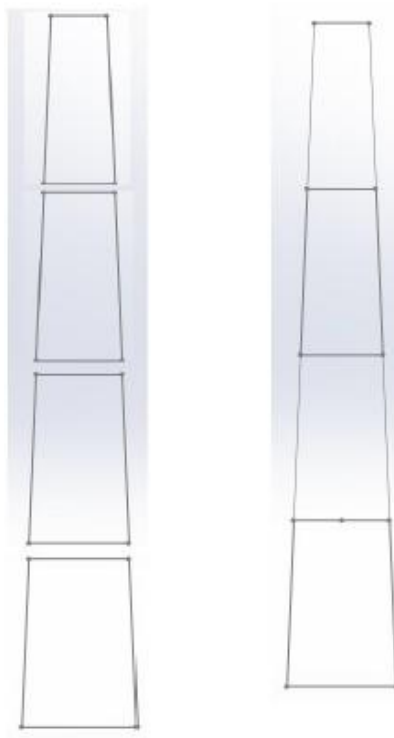
TABELL 14: FUNKSJONER TIL FORSKJELLIGE KOMPONENTER I MASTEN

Komponent	Funksjon
Seksjon	Seksjonene er stammen i masten. De skal holde masten stabil under alle forhold. De består av vangene som er bærebjelkene i strukturen og står vertikalt i hvert av hjørnene og gitteret som går horisontalt og diagonalt. De skal stive opp og holde vangene sammen.
Travers	Traversen er på toppen av masten. Den er der for å ta imot kraftlinene og topplinene. Den består gjerne av to spir og en midtdel som binder den sammen med øverste seksjon.
Fester	Det trengs fester mellom vanger, mellom vanger og travers, mellom vanger og fundament, og mellom delene til en oppdelt travers.
Fundament	Fundamentet skal feste masten i fjell eller jord og sørger for å holde masten stødig under alle forhold. Dette har det ikke blitt sett på i denne konseptanalysen.

7.2 FUNKSJONSALTERNATIVER

7.2.1 SEKSJON

Fra før var det bestemt at masten skulle bestå av fire seksjoner på 6 meter hver, dette fører til at masten blir 24 meter høy uten travers. Fra oppdragsgiver ble det bestemt at det hovedsakelig skulle undersøkes for sekskantete seksjoner.



FIGUR 19: STREKTEGNING AV SEKSJONER(1).

Seksjonstverrsnitt

Fra forprosjektet ble det konkludert at en åttekantet mast vil ha mer styrke enn en sekskant, men til gjengjeld blir det mer gitter, mer materialbruk og sveising, dette fører til at en åttekantetmast vil bli dyrere enn en sekskantmast. (1)

For å vise forskjellen mellom seksjoner med forskjellig antall vanger, ble det utført en FEM-analyse på dette. Det ble tegnet enkle seksjoner med tre, fire, seks og åtte vanger. De fikk en høyde på 6 meter. Det ble brukt 4 meter i bunn og 3,5 meter i topp på alle seksjonene. Både tegning og beregning ble utført i Autodesk Inventor. Alle figurene ble opplagret i de nederste punktene og det ble satt på en kraft i hvert av de øverste punktene, på 500 N rett ned i y-retning. Tyngdekraften ble også tatt med. Alle figurene fikk like diametre, 16 mm i gitter og 60 mm i vanger.

TABELL 15: SAMMENLIGNING AV SEKSJONSTVERRSNITT. BILDER ER TATT I AUTODESK INVENTOR. DEFORMASJONENE ER OVERDREVET.

Tverrsnitt	Spenningsbilde, Normal spenning [MPa]
<p>Trekant</p> <p>Maks spenning: 52,5 MPa</p> <p>Vekt: 435 kg.</p>	<p>Type: Normal Stress Smax Units: MPa</p> <p>52,49 Max 41,88 31,28 20,67 10,06 -0,55 Min</p> <p>FIGUR 20: SPENNINGSBILDE AV SEKSJON MED TRE VANGER</p>
<p>Firkant</p> <p>Maks spenning: 51,3 MPa</p> <p>Vekt: 580 kg.</p>	<p>Type: Normal Stress Smax Units: MPa</p> <p>51,27 Max 40,93 30,58 20,23 9,89 -0,46 Min</p> <p>FIGUR 21: SPENNINGSBILDE AV SEKSJON MED FIRE VANGER</p>

<p>Sekskant</p> <p>Maks spenning: 18,5 MPa</p> <p>Vekt: 834 kg.</p> <p>VALGT</p>	<p>Type: Normal Stress Smax Units: MPa</p> <p>FIGUR 22: SPENNINGSBILDE AV SEKSJON MED SEKS VANGER</p>
<p>Åttekant</p> <p>Maks spenning: 7,5 MPa</p> <p>Vekt: 1101 kg.</p>	<p>Type: Normal Stress Smax Units: MPa</p> <p>FIGUR 23: SPENNINGSBILDE AV SEKSJON MED ÅTTE VANGER</p>

Av spenningsbildene i tabell 15 kan det sees at spenningen går nedover jo flere staver det er, men figuren blir også mer komplisert. Sekskanten og åttekanten har betydelig mindre spenninger enn trekanten og firkanten.

Åttekanten veier nesten 300 kg mer enn sekskanten, noe som vil bli over et tonn med alle fire seksjonene. Det ble derfor valgt å gå videre med et sekskanttverrsnitt på seksjonene.

Tilpasning for galvanisering

Et nytt krav som oppstod var at hver seksjon måtte kunne passe i et galvaniseringsbad for å bli overflatebehandlet. Masten som ble utviklet i forprosjektet hadde en diameter på 4 meter i bunn av nederste seksjon og 2 meter i topp av øverste seksjon. Dette gir en forholdsvis stor bredde hele veien opp og det ble diskutert om enkelt seksjonene måtte deles opp om det ikke fantes store nok bad. De måtte da eventuelt bli delt opp i vertikal retning. Alternativet ble å redusere bredden på seksjonene eller å finne store nok bad.

Det ble gjort en undersøkelse på størrelsen til galvaniseringsbad i Europa, særlig Skandinavia. Resultatene fra undersøkelsen ligger i tabellene under:

TABELL 16: STØRRELSE PÅ VARMFORSINKINGSBAD I SKANDINAVIA

Lokasjon	Selskap	Dimensjoner [m]		
		Lengde	Bredde	Dybde
Norge	NOT Varmforzinking(30)	13	1,5	2,2
Sverige	Pohlinvest(31)	6,5	1,4	3
Sverige	Pohlinvest(32)	12,2	1,6	2,6
Sverige	JIWE Varmforzinking(33)	7,4	2	2,5
Danmark	Fyns Galvanisering A/S(34)	6,5	1,5	2,5
Danmark	Nordvestjysk Galvanisering A/S (35)	5	1,5	12
Danmark	Sydjysk El galvanisering A/S(36)	6	0,9	1,2
Danmark	Dansk Overflade Teknik A/S(37)	14,5	2,3	2,5
Danmark	Nordvestjysk Galvanisering A/S(35)	12	1,6	3

TABELL 17: STØRRELSE PÅ VARMFORSINKINGSBAD I RESTEN AV EUROPA

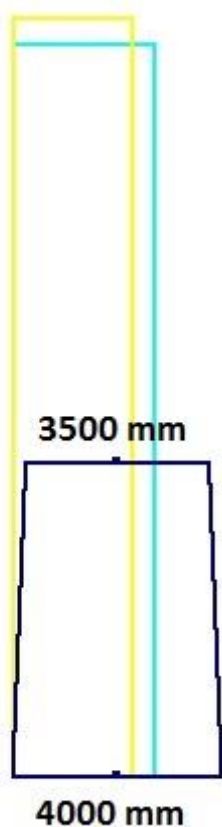
Lokasjon	Selskap	Dimensjoner [m]		
		Lengde	Bredde	Dybde
Tyskland	ZINKPOWER(38)	15,3	1,85	3,3
Ungarn	ZINKPOWER(38)	15,5	1,9	3
Polen	ZINKPOWER(38)	15	2,2	3
England	Joseph Ash Ltd (39)	7	1,5	3,9
England	Joseph Ash Ltd(39)	7,6	2,1	3,35
England	Worksop Galvanizing Ltd(40)	21	1,5	2,78
Frankrike	SOCIÉTÉ BRETONNE DE GALVANISATION(41)	16,5	2,1	3
Frankrike	GALVA UNION(42)	8,5	2,2	3,5
Frankrike	Galva Antlatique(43)	14	2,7	2,9

Dette er ingen komplett liste av alle varmgalvaniseringsbad i hele Skandinavia eller Europa, men det er noe som prosjektgruppen ser på som et godt nok utvalg til å bestemme en størrelse å gå etter.

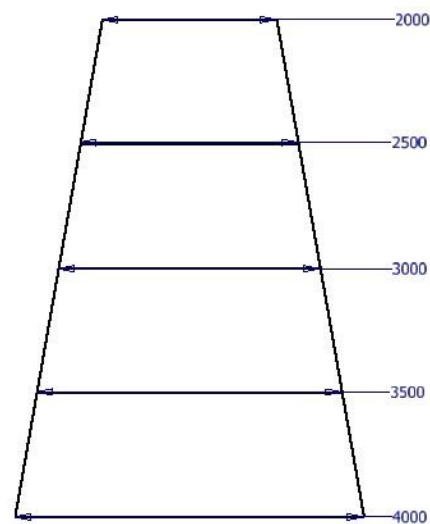
Det badet med størst areal som ble funnet i Skandinavia er fra Dansk Overflade Teknik A/S og har dimensjonene 14,5 m x 2,3 m x 2,5 m, dette badet blir kalt "dansk bad" videre. I Europa er det største badet fra

Galva Antlatique i Frankrike og har dimensjonene 14 m x 2,7 m x 2,9 m, dette badet blir kalt "fransk bad" videre. For å sikre lave fraktkostnader bør helst et bad i Norge eller Skandinavia brukes. Da det ikke ble funnet noen større bad i Norge ble det danske valgt for videre dimensjonering.

Nederste seksjon er dimensjonerende for valg av bad, denne seksjonen vil alltid være den største i masten.



FIGUR 25: TVERRSNITT AV NEDERSTE SEKSJON I TVERRSNITTENE AV DE TO STØRSTE BASSENGENE. GULT: BAD FRA DANMARK, TURKIS: BAD FRA FRANKRIKE.



FIGUR 24: DIAMETRE PÅ SEKSJONENE OPPOVER I MASTEN. MÅLER I MM.

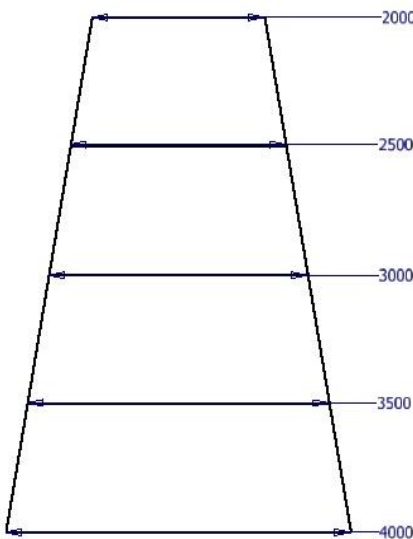
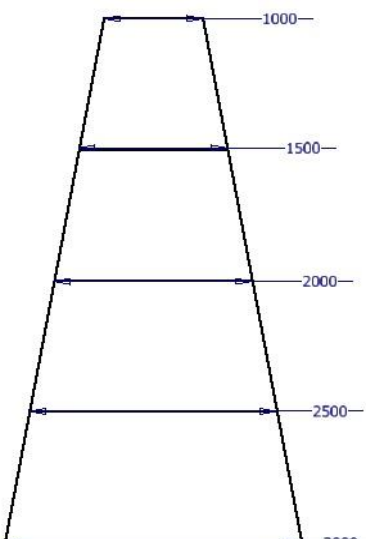
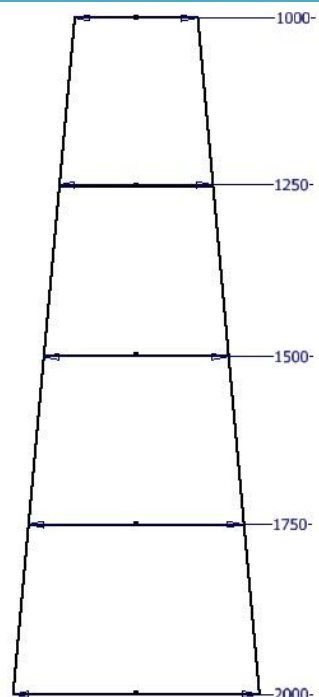
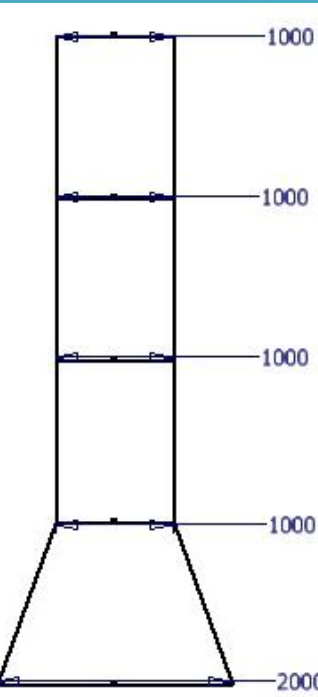
Figur 25 viser den nederste seksjon av masten i de to største bassengene. Ser at uansett hvilket av de to bassengene som brukes så må denne seksjonen deles opp for å kunne galvaniseres. Når en mast har en diameter på 4 meter nederst så vil diameterne oppover bli slik som på figur 24. Av figuren kan det sees at alle seksjonene må deles opp om bassenget fra Danmark brukes, om det Franske brukes trenger ikke den øverste seksjonen å bli delt opp.

Å dele opp seksjonene vil føre til at det må lages fester i oppdelingspunktene og dette vil føre til mer arbeid i både design og produksjon. Det er lite ønskelig å tilføre flere elementer til seksjonene da dette kan gi mer synlighet, og gjøre konstruksjonen mindre estetisk.

Det ble derfor bestemt å prøve seksjoner med mindre diametre for å se om dette var mulig å lage en mindre mast, og å slippe å dele opp seksjonene. En mindre mast kan også gi mindre synlighet.

Det endte opp med fire alternativer som følger, de er basert på Omega Elkrafts tidligere erfaringer med RSB-master. Se tabell 18.

TABELL 18: ALTERNATIVER FOR SEKSJONENE. ALLE MASTENE ER LIKE HØYE (6 M PER SEKSJON, 24 M TIL SAMMEN).

Alternativ	Figur	Alternativ	Figur
<p>Alternativ 1.</p> <p>Samme konstruksjon som i forprosjektet.</p>	 <p>FIGUR 26: MASTESTRUKTUR MED 4000 MM I BUNN OG 2000 MM I TOPP</p>	<p>Alternativ 2.</p> <p>Diameterne er redusert med 1000 mm på alle seksjonene.</p>	 <p>FIGUR 27: MASTESTRUKTUR MED 3000 MM I BUNN OG 1000 MM I TOPP</p>
<p>Alternativ 3.</p> <p>Diameterne er redusert med 2000 mm i bunn og 1000 mm i topp.</p> <p>Diameteren går opp med 250 mm per seksjon nedover i masten. Tilsvarende verdi er 500 mm på alt. 1 og alt. 2.</p>	 <p>FIGUR 28: MASTESTRUKTUR MED 2000 MM I BUNN OG 1000 MM I TOPP</p>	<p>Alternativ 4.</p> <p>Her er det kun to forskjellige diametre. 2000 mm i bunn av nederste seksjon.</p> <p>De tre seksjonene over har 1000 mm i topp og bunn.</p>	 <p>FIGUR 29: MASTESTRUKTUR MED 2000 MM I BUNN OG 1000 MM RESTEN AV VEIEN OPP</p>

Alternativ 1 og 2 må deles opp, mens alternativ 3 og 4 kan passe i et galvaniseringsbasseng både i Danmark og Frankrike uten oppdeling. Sammenligner alternativene i tabell 19 under.

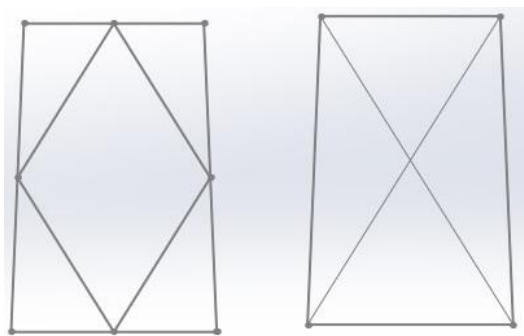
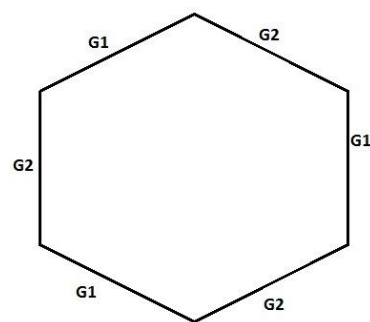
TABELL 19: SAMMENLIGNING AV SEKSJONSALTERNATIVER.

Alternativ	Antall seksjoner som må deles opp	Høyeste diameter	Laveste diameter	Synlighet	Materialbruk
Alternativ 1	3/4 (Fransk bad) eller 4/4 (Dansk bad)	4000 mm	2000 mm	-	-
Alternativ 2	2/4 (Fransk bad) eller 3/4 (Dansk bad)	3000 mm	1000 mm	-	-
Alternativ 3	0/4	2000 mm	1000 mm	+	+
Alternativ 4	0/4	2000 mm	1000 mm	+	+

Da alternativ 3 og 4 har lavest diametre vil alt gitter mellom vangene bli kortere og dette vil spare en god del materiale i forhold til alternativ 1 og 2. Det kan ikke konkluderes med ett av disse alternativene uten en styrkeberegning, alle fire alternativene blir derfor tatt med videre i FEM-analysen.

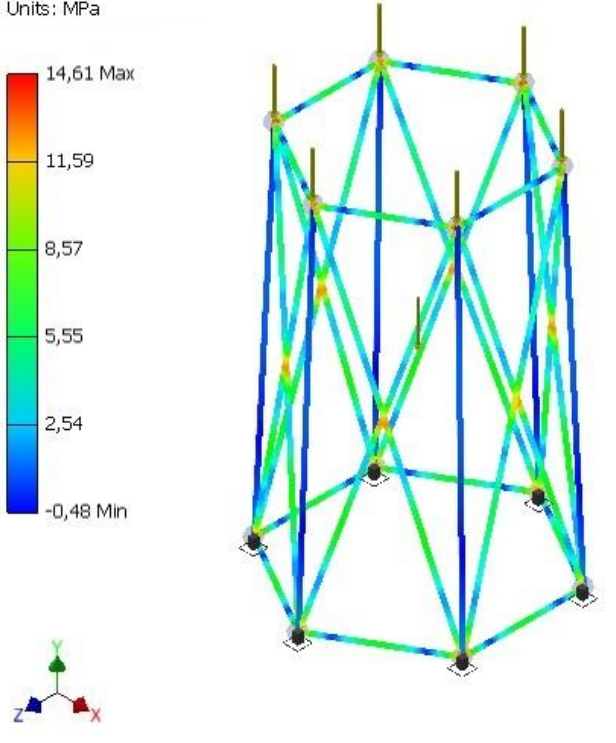
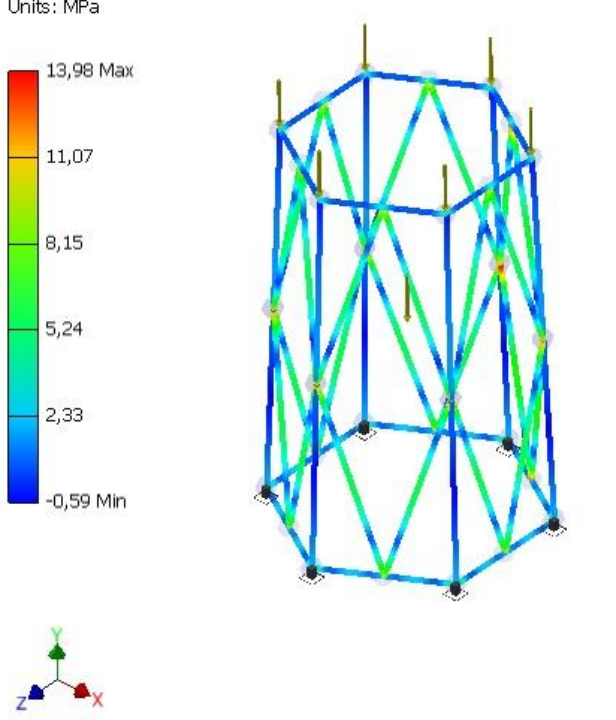
Gitter

I forprosjektet ble det konkludert med at et ruteformet gitter har en fordel fordi den trenger få sveiser, noe som gir det god produserbarhet, lite deler, estetisk design, og lite synlighet. Dette er også det gitteret som brukes i de aller fleste RSB-mastene til Omega Elkraft i dag. Det er fornuftig i forhold til forgitring og avstivning av vanger.


FIGUR 30: GITTERALTERNATIVER. VENSTRE: RUTEGITTER, HØYRE: KRYSSGITTER.

FIGUR 31: MAST SETT OVENFRA.

Det er vanlig med syv ruter/kryss per side i seksjonen. Tre og tre sider er like, de er forskjøvet en halv rute i forhold til hverandre. Figur 31 viser dette. Gitteret vil da være litt forskjøvet i forhold til gitteret på siden, dette ska hindre utrivning.

TABELL 20: SPENNINGSSAMMENLIGNING AV GITTER. SPENNINGSBILDER ER FRA AUTODESK INVENTOR.

Gitter	Spenningsbilde
<p>Kryssgitter</p> <p>Maks spenning: 14,6 MPa</p>	<p>Type: Normal Stress Smax Units: MPa</p>  <p>14,61 Max</p> <p>11,59</p> <p>8,57</p> <p>5,55</p> <p>2,54</p> <p>-0,48 Min</p> <p>FIGUR 32: SPENNINGSBILDE AV KRYSSGITTER</p>
<p>Rutegitter</p> <p>Maks spenning: 14 MPa</p> <p>VALGT</p>	<p>Type: Normal Stress Smax Units: MPa</p>  <p>13,98 Max</p> <p>11,07</p> <p>8,15</p> <p>5,24</p> <p>2,33</p> <p>-0,59 Min</p> <p>FIGUR 33: SPENNINGSBILDE AV RUTEGITTER</p>

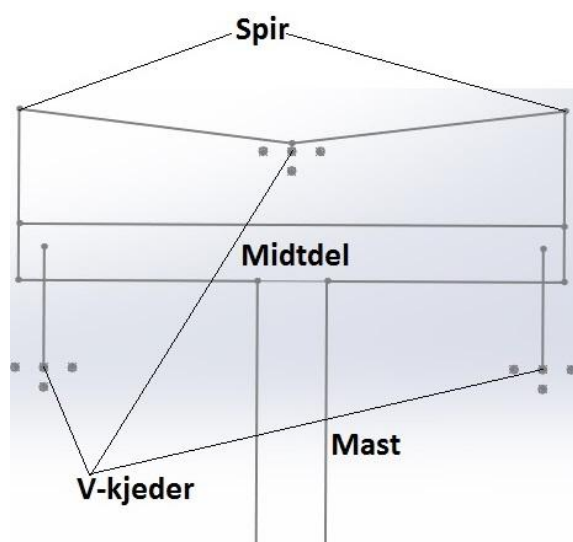
I tabell 20 er det en sammenligning av de to gitteralternativene i Autodesk Inventor. Den er gjort på samme måte som sammenligningen av seksjonstverrsnittet. En seksjon med et sett ruter/kryss ble modellert. Spenningene er relativt like, men rutegitteret har litt lavere. Det velges på bakgrunn av dette og tidligere nevnte fordeler å bruke rutegitteret videre.

7.2.2 TRAVERS



FIGUR 34: TRE FORSKJELLIGE TRAVERSER. (BILDER: OMEGA ELKRAFT)

Det er mange forskjellige måter å designe en travers på, alt er etter behov og hvilken mast som skal lages. Det vil variere om man lager en bæremast, en vinkelmast eller en innspenningsmast. Omega Elkraft kom tidlig inn og valgte en travers som syntes å være mest hensiktsmessig for dette prosjektet. Det er trekantmønster mellom de tre V-kjedene for å redusere magnetfeltet som oppstår i masten. Se figur 35 for en kladd av denne traversen.

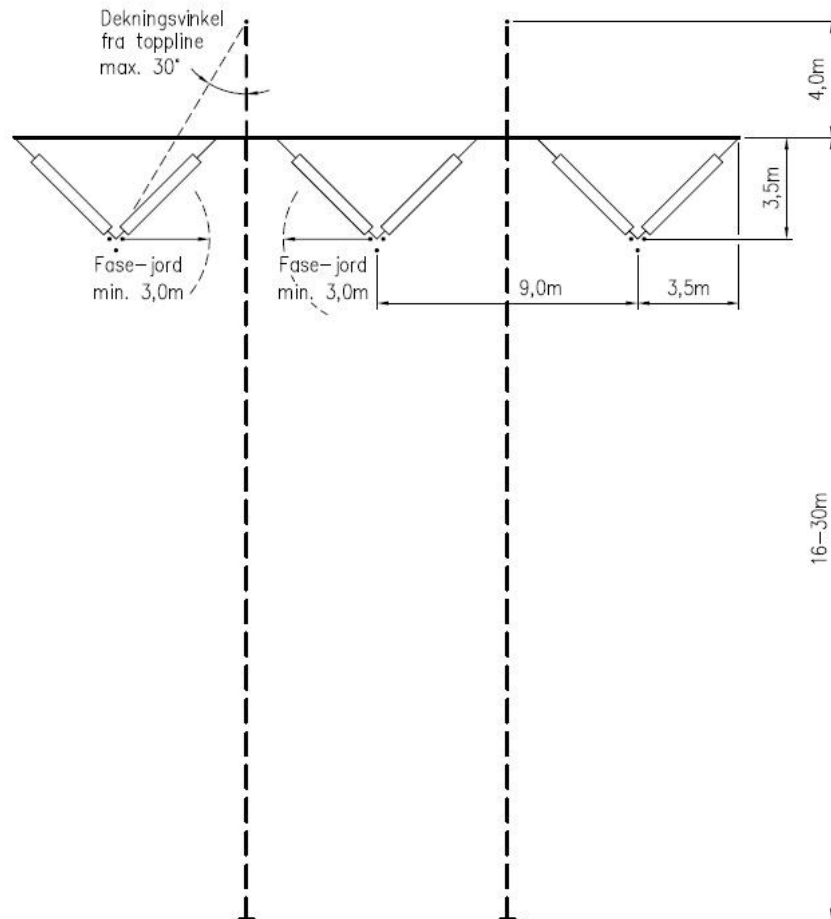


FIGUR 35: STREKTEGNING AV VALGT TRAVERS.

Det ble valgt å bruke denne på grunn av anbefalingen da det ikke syntes hensiktsmessig å bruke tid på å lage en helt ny travers fra bunnen av. Det ble heller brukt tid på dimensjonering av traversen for å få den så stabil og stødig som mulig.

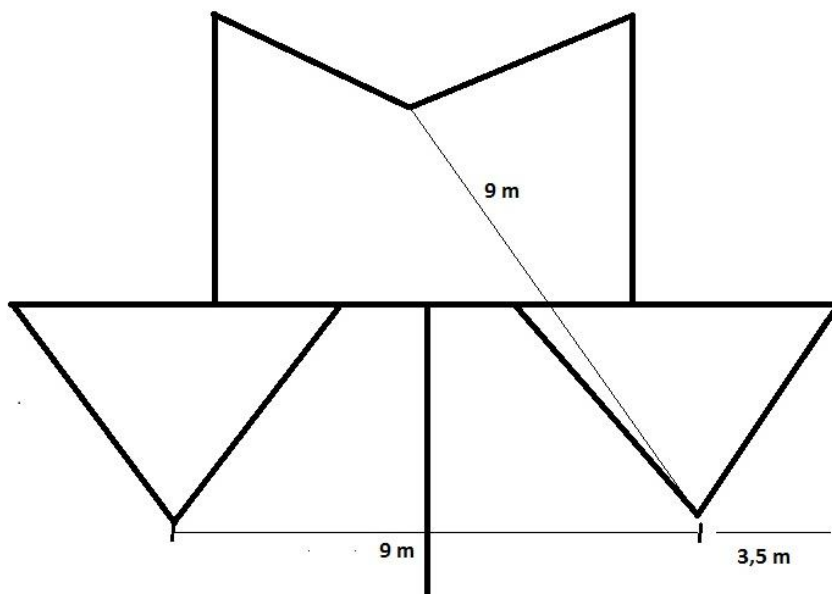
En travers i en 420 kV mast vil få en viss størrelse, og problemet med å få den til å passe det valgte galvaniseringsbadet, kommer her slik som det gjorde med seksjonene tidligere. En travers vil også bli tung, og den bør derfor deles opp for å gjøre produksjon og montering enklere.

Selve oppdelingen med plater imellom vil ikke bli modellert i denne oppgaven, men det vil komme forslag på hvordan den eventuelt kan deles opp.



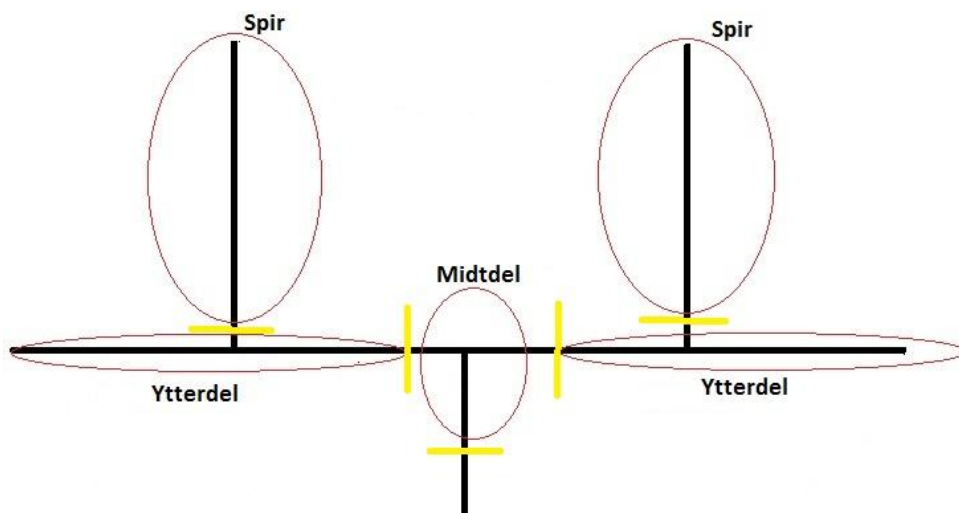
FIGUR 36: EKSEMPEL PÅ ISOLASJONSAVSTANDER I EN TRAVERS (FIGUR: OMEGA ELKRAFT).

I figur 36 kan de forskjellige isolasjonsavstandene leses av, disse skulle traversen i denne oppgaven følge. Traversen på figuren er lik som den som ble modellert i denne oppgaven bortsett fra at det midterste V-kjedet ble satt på oversiden av traversen istedenfor på undersiden.



FIGUR 37: TRAVERS MED ISOLASJONSAVSTANDER

På grunn av isolasjonsavstandene på 9 meter mellom V-kjedene og at det skal være 3,5 meter fra bunnen av V-kjedene til enden av traversen, så blir minste traversbredde: $9\text{ m} + 3,5\text{ m} + 3,5\text{ m} = 16\text{ m}$. Litt avhengig av vinkelen mellom V-kjedene og tykkelsen til traversen, må høyden til traversen være 6-8 meter. V-kjedene settes på etter galvanisering og tas ikke hensyn til i oppdelingen.



FIGUR 38: MULIG OPPDELING AV TRAVERS. SIRKLER VISER DE FORSKJELLIGE DELENE OG DE GULE STREKENE VISER HVOR DET KAN KUTTES.

Figur 38 viser mulig oppdeling av traversen. Den deles opp i fem deler.

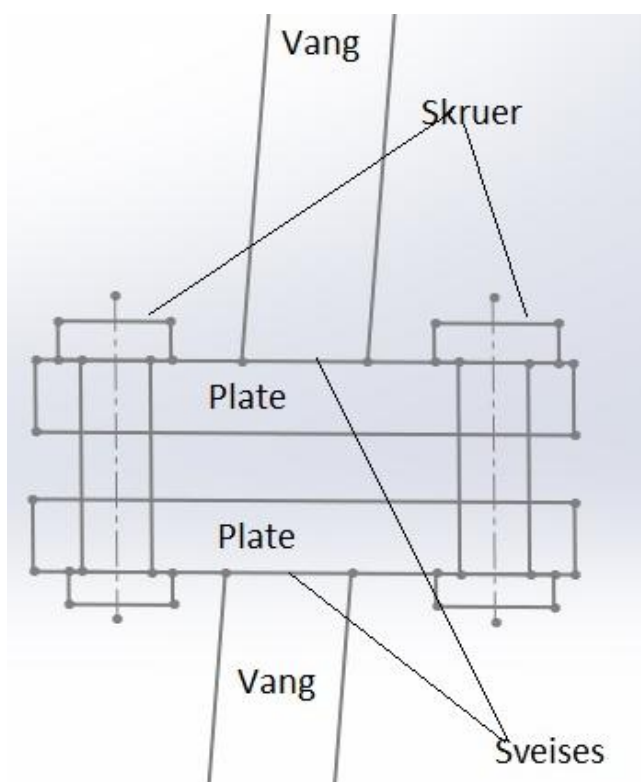
TABELL 21: MULIGE DIMENSJONER TIL DELENE I TRAVERSEN.

Del	Bredde	Lengde
Dansk galvaniseringsbad	2,3 m	14 m
Spir	1,5 - 2 m	6-7 m
Middtel	1-2 m	6-7 m
Overgang	1-1,5 m	1-2 m

Av tabell 21 kan det konkluderes at alle delene kan passe i det danske galvaniseringsbadet. Denne oppdelingen kan da utføres.

7.2.3 FESTER

For å holde masten sammen trengs det fester mellom vangene, vangene og travers, og vangene og fundamentet. Det ble valgt å bruke samme festemetode på alt. Vangene blir sveist til en plate og disse platene skrues sammen. Figur 39 viser prinsippet. Det blir likt mellom vanger og fundament eller travers. Platen ble dimensjonert etter håndberegningene.

**FIGUR 39: FESTE MELLOM TO VANGER(1).**

7.3 BRUKSPÅKJENNINGER, MATERIALER OG TVERRSNITTSVALG

7.3.1 BRUKSPÅKJENNINGER

I en høyspentmast vil brukspåkjenningerne hovedsakelig være miljølaster som vindlaster og islaster. Disse lastene virker på masten i sin helhet, og forskjellige typer laster vil påvirke masten i forskjellig grad.

I denne oppgaven er brukspåkjenningerne gitt ved laster som er dimensjonert med hensyn på normene for høyspentmaster. Disse normene sier at det skal brukes risikonivå i form av returtid for vind og is (77). Mellom mastene er det dimensjonert med en spennlengde på 400 meter, islast på 6 kg/m med returtid på 150 år og vindlast 45 m/sek med returtid på 500 år. Dette er en form for sikkerhetsfaktoren. Hvis en ny mastetraseé skal prosjekteres, kan en meteorolog være med for å anslå risikonivå. Med returtid på 150 eller 500 år menes det den sterkeste is- eller vindlast på et område i løpet av en periode på 150 eller 500 år. (84)

Korrosjon kan oppstå, men på grunn av overflatebehandlingen er masten godt beskyttet mot dette.

7.3.2 MATERIALER

Omega Elkraft bruker SB500 stål på alle deler i strukturen til mastene sine. Dette vil også bli brukt for dette prosjektet. Det er et sterkt stål, og det har god sveisbarhet. Det kan sveises uten forvarming på dimensjoner opp til 40 mm tykkelse uten å risikere sprekkdannelse. Dimensjoner tykkere enn dette varmes opp til 200C. (81)

TABELL 22: MATERIALEGENSKAPER SB500 (81)

Ståltype	Antall % C	Antall % Si	Antall % Mn	Dim [mm]	Re [MPa]	Rm[MPa]
SB500	0,18	0,35	1,4	<30	>500	>610
				30-40	>470	>610
				40-50	>450	>610

Platene som skal være mellom seksjonene skal være i S355 stål. Boltene skal ha en fasthet på ISO/DIN 8.8.

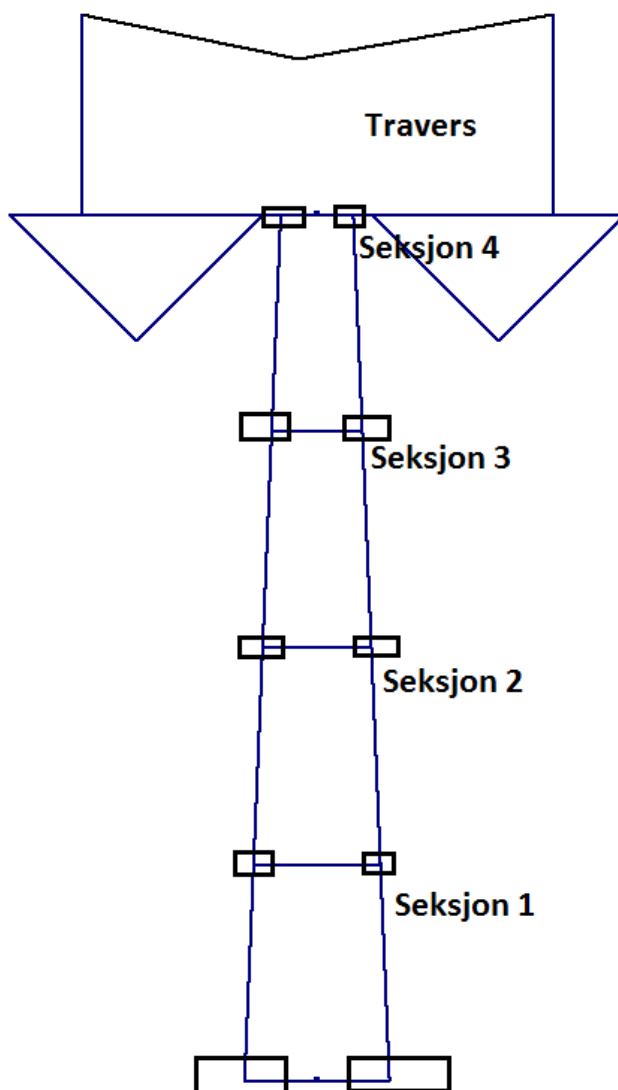
V-kjedene består av mange forskjellige komponenter som er av forskjellige materialer. Dette vil bli beskrevet under kap. 10.2 Komponenter.

7.3.3 TVERRSNITTSVALG

Av tverrsnitt i en RSB-mast er det hovedsakelig diameterne til vangene i seksjonene, gitteret i seksjonene, og til gitter og vanger/gurter i traversen som må velges. Diameterne som blir produsert til masteproduksjon for Omega Elkraft er: 16 mm, 20 mm, 25 mm, 32 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm og 90 mm kan også produseres ved behov. Da vangene i strukturen vil ta mest av lastene er det logisk at disse er de største, det har vært vanlig å bruke 50 mm og oppover på dem. Gitteret har vanligvis vært fra 16 mm til 25 mm. I traversen er det vanlig med diametre mellom 25 mm og 40 mm. Det var ønskelig å bruke FEM-analyse for å finne de minste diameterne som kunne brukes for at masten fortsatt skal være stabil og trygg med en god sikkerhet. Jo større diametre jo mer vekt blir det, og konstruksjonen blir dermed dyrere.

7.4 KONSTRUKSJONSFORSLAG

Etter vurderingene fra avsnitt 7.2 har det endt opp med denne skissen for mastedesignet:



FIGUR 40: SKISSE AV KOMPLETTMAST. MERK AT DET SKAL VÆRE SYV RUTEGITTER I HVER SEKSJON.

Det vil bli brukt 7 rutegitter i hver seksjon. Firkantene i bunn representerer fundament. Firkantene mellom seksjonene, og seksjon 4 og travers representerer fester. Skissen gir grunnlag for CAD-tegningene. Traversen er kladdet veldig enkelt og vil bli litt mer detaljert i CAD-tegningene. I CAD-modellen vil ikke festene med skruer bli tegnet, V-kjedene vil være representert, men ikke tegnet med isolatorer og alle elektroniske komponenter.

De fire alternativene i tabell 18 i avsnitt 7.2.1 vil bli tatt med videre i FEM-analysen.

8. BEREGNINGER

Det forutsettes grunnleggende kunnskaper i statikk og fasthetslære for denne delen av rapporten.

I dette kapittelet følger håndberegninger, flere av beregningene er kun beskrevet kjapt med resultat og mer inngående beskrivelser av beregninger foreligger som vedlegg.

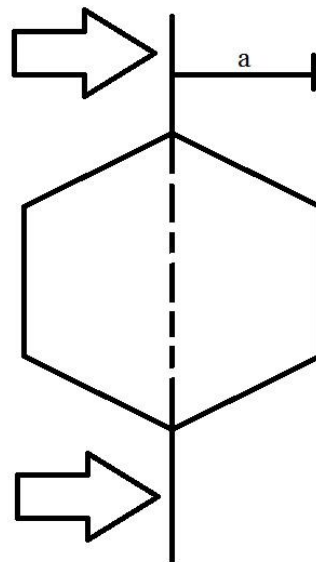
Fremgangsmåte

- Det skal finnes ut hvordan sekskantmasten skal være vridd i forhold til traversen for å tåle mest mulig.
- Det skal dimensjoneres med hensyn på lasttilfellet skjev islast. Skjev islast blir brukt fordi det var antatt at dette var det lasttilfellet som gav masten størst belastning av de aktuelle lasttilfellene.
- Det skal sjekkes for knekking og flyting i vangene til masten, det dimensjoneres sveis for vange mot plate i bunnen av masten.
- Bolter skal dimensjoneres for å tåle maks strekkraft fra vangen.
- Sveis for gitter i masten og sveis i traversen skal dimensjoneres opp mot spenninger fra FEM-analysen.

8.1 BEREGNINGER FOR VRIDNINGEN TIL MASTESTAMMEN

Her gjøres beregninger av hvilken vridning det er best å ha på sekskantmasten i forhold til den overliggende traversen. Ser på tverrsnittet av vangene (sekskanten) helt nederst på masten. Det er to alternativer for vridning av masten.

Alternativ 1



FIGUR 41: TVERRSNITT ALTERNATIV 1

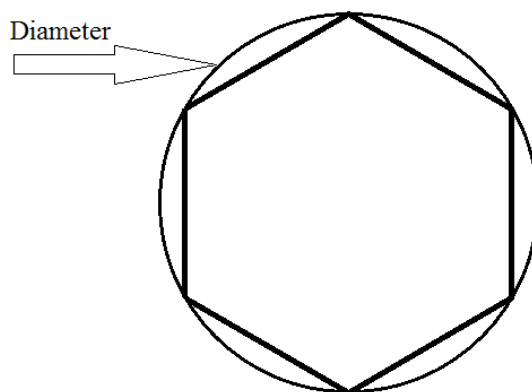
Det settes på et moment på 3500 kNm som vrir seg om nøytralaksen (den stiplede linjen på figur 41 og figur 43) til hvert av de to alternative tverrsnittene, langs denne nøytralaksen kan man se for seg at traversen ligger.

Kaller armen fra nøytralaksen og ut til vangene for "a". Denne armen er lik for alle de 4 vangene. Dette gir følgende formel:

$$S = \frac{M}{4 \cdot a}$$

M er momentet som virker om nøytralaksen. I tillegg til dette kan man legge på de totale vertikale kreftene fra linen. De vertikale kreftene (V) fordeler seg ned i alle de 6 vangene, dette gjør også tyngden (G) til masten. Da får man at kreftene per vange er:

$$S = \frac{M}{4 \cdot a} + \frac{V + G}{6}$$



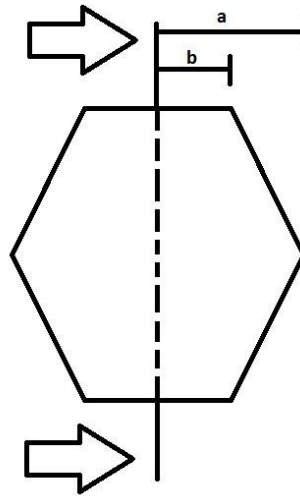
FIGUR 42: DIAMETEREN TIL SELVE MASTEN

Når diameteren til masten blir nevnt så menes det der vangene til sekskanten ville ha truffet en sirkel, med tilsvarende diameter. Dette kan også kalles for bredden til masten.

TABELL 23: SPENNINGER FOR FORSKJELLIGE DIAMETERE ALTERNATIV 1

Diameter	a (arm)	Vangediameter	Maks spenning
4000 mm	1732 mm	60 mm	179 MPa
3500 mm	1515,5 mm	60 mm	204 MPa
3000 mm	1299 mm	60 mm	238 MPa
2500 mm	1082,5 mm	60 mm	286 MPa
2000 mm	866 mm	60 mm	357 MPa
4000 mm	1732 mm	70 mm	131 MPa
3500 mm	1515,5 mm	70 mm	150 MPa
3000 mm	1299 mm	70 mm	175 MPa
2500 mm	1082,5 mm	70 mm	210 MPa
2000 mm	866 mm	70 mm	263 MPa

Alternativ 2



FIGUR 43: TVERRSNITT ALTERNATIV 2.

Når kraften legges på slik som på figuren over så fordeler den seg ned i alle de seks bena. Den gir da trykk/strekk i tre og tre bein.

Det sees på halve tverrsnittet. Det viser seg at lengden "a" er dobbelt så lang som lengde "b". Dette gjør at vangen som er ytterst må ta opp det dobbelte av kreftene som de innenfor. Kraftene i de vangen som ligger på lengde "b" kalles for S1. Kraften i vangen som ligger på lengde "a" kalles for S2.

$$S2 = 2 \cdot S1$$

Hvis man lager et regnestykke på dette og setter det lik momentet fra høyden og linekraften, får man følgende:

$$S2 \cdot a + 2 \cdot S1 \cdot b = \frac{M}{2}$$

$$2 \cdot S1 \cdot 2 \cdot b + 2 \cdot S1 \cdot b = \frac{M}{2}$$

$$6 \cdot 2 \cdot S1 \cdot b = M \rightarrow S1 = \frac{M}{12 \cdot b}$$

I tillegg kan de totale vertikale kreftene (V) fra linen legges til og dele dem med 6 for å få krefter per vange, dette kan også gjøres med tyngden (G) av masten.

Altså:

$$S1 = \frac{M}{12 \cdot b} + \frac{V + G}{6}$$

For å finne den største spenningen så brukes

$$\sigma = \frac{S2}{A}$$

TABELL 24: SPENNINGER FOR FORSKJELLIGE DIAMETERE ALTERNATIV 2

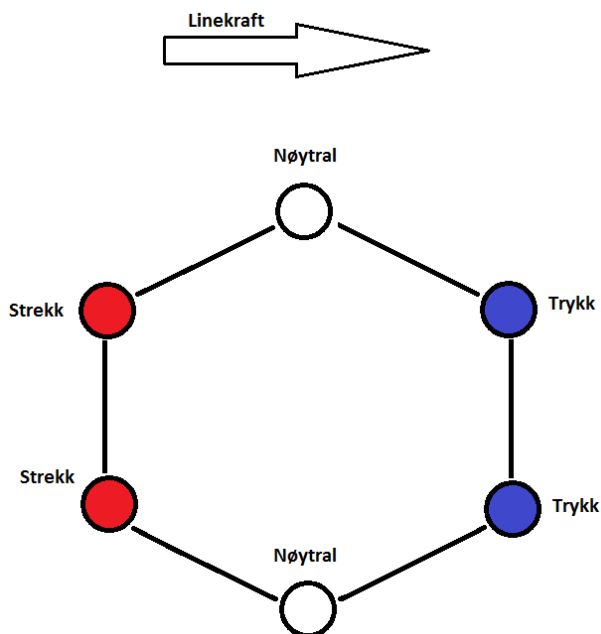
Diameter	a	b	Vangediameter	Maks Spenning
4000 mm	2000 mm	1000 mm	60 mm	206 MPa
3500 mm	1750 mm	875 mm	60 mm	236 MPa
3000 mm	1500 mm	750 mm	60 mm	275 MPa
2500 mm	1250 mm	625 mm	60 mm	330 MPa
2000 mm	1000 mm	500 mm	60 mm	413 MPa
4000 mm	2000 mm	1000 mm	70 mm	152 MPa
3500 mm	1750 mm	875 mm	70 mm	173 MPa
3000 mm	1500 mm	750 mm	70 mm	202 MPa
2500 mm	1250 mm	625 mm	70 mm	243 MPa
2000 mm	1000 mm	500 mm	70 mm	303 MPa

Som det kan ses fra tabell 23 og 24 så gir alternativ 1 mindre spenninger. Vedlegg 11 viser at dette stemmer med en FEM-analyse. Det er også verdt å merke seg at diameteren i bunnen har en del å si for hvor høye spenninger som det blir i vangene. Alternativ 1 ble det tverrsnittet som ble valgt for masten. Men man kan også tenke seg at det blir en bredere travers ved bruk av alternativ 2, dette vil igjen føre til lavere spenninger fordi tverrsnittsmodulet øker på grunn av Steiners sats.

For alle beregninger er det brukt Vedlegg 15 C Tverrsnittsberegninger.

8.2 SKJEV ISLAST

Det er flere lasttilfeller som er aktuelle når en mast skal dimensjoneres, men det er noen lasttilfeller som er verre enn andre. Ut ifra en oversikt av lasttilfeller som Omega Elkraft AS bidro med, ble det tolket at skjev islast ville være det lasttilfellet som gikk hardest utover vangene i masten. Se skjev islast i vedlegg 5. Dette fordi det hadde høye vertikallaster og store laster i lineretningen. På bakgrunn av dette ble det gjort beregninger for dette lasttilfellet. Det var mulig å regne på det uten å ha en ferdig konstruert travers.



FIGUR 44: SPENNINGER I VANGENE VED SKJEV ISLAST

Det som skjer ved lasttilfellet skjev islast er at det er mer is på den ene siden av masten og da vil masten trekke mot denne siden. Dette gjør at det blir trykk i de to vangene som er mot den siden med mest is. Dette gjør også at det danner seg et strekk i vangene på den andre siden av masten.

Høyden opp til der linekreftene virker, ble satt til å være 26 meter, dette er høyden til cirka midt mellom det øvre og de nedre V-kjedene. Høyden ble satt før traversen var ferdig utviklet. På bakgrunn av dette ble det regnet ut et moment fra linekreftene som virket på bunnen av masten.

De vertikale kreftene og den totale tyngden til masten fordeler seg likt på alle de seks vangene når masten står i ro. Men da det er linekrefter i tillegg så "lener" masten seg over på den ene siden. Dette gjør at det blir et tillegg av de vertikale vangekreftene på trykksiden og et fratrekk på strekksiden. Mens de to vangene som ligger på nøytralaksen bare får 1/6 hver av de totale vertikale kreftene med tyngden av masten.

For å regne ut kreftene i vangene så brukes samme fremgangsmåte som i kapittel 8.1, kreftene i to og to vanger er like siden lasttilfellet er symmetrisk.

$$\text{Trykkraft } S_t = \frac{M}{4a} + \frac{V+G}{6} \text{ og strekkraft } S_s = \frac{M}{4a} - \frac{V+G}{6}, \text{ nøytralaksen får trykkraft } S_n = \frac{V+G}{6}$$

Det er valgt en dimensjon på 2 meter i bunnen av masten, dette gjør at armen "a" er 0,866 m. Resultatene fra beregningen er i tabell 25.

For beregninger se vedlegg 15 A.

TABELL 25: KREFTER FRA SKJEV ISLAST

Totale linekrefter	107,125 kN
Totale vertikale krefter	236,911 kN
Totalt moment M fra linekrefter	2785,255 kNm
S_t	860 kN
S_s	750 kN
S_n	54,2 kN

Sjekker mot flyt med 60 mm vange, vedlegg 12 viser at flytegrensen er 450 MPa for SB500 som har en diameter på 50 mm, det antas samme flytegrense ved 60 mm vange.

$$\gamma_{m1} = 1,1 \text{ fra (77)}$$

Maks tillatt flytespenning for vangen er:

$$\sigma_{tillatt} = \frac{fy}{\gamma_m} = \frac{450 \text{ MPa}}{1,1} = 409 \text{ MPa} \quad [9]$$

Prøver med 60 mm vange:

$$\sigma = \frac{S_t}{\pi \cdot r^2} = \frac{860 \text{ kN}}{\pi \cdot 30 \text{ mm}^2} = 304 \text{ MPa} \quad [7]$$

Den holder seg innenfor tillatt flytespenning.

Sjekker knekking:

Knekk lengden for vangen i stammen til masten er det samme fra bunn og opp til toppen og den er på 428,664 mm \approx 429 mm. Knekkefaktorer k , er gitt av Omega Elkraft AS, dette gjelder knekkefaktorene i hele rapporten.

Dette vil si at om man velger vanger med en diameter på 60 mm så kan man finne slankheten slik:

Treghtetsradiusen:

$$i = \frac{D}{4} = \frac{60 \text{ mm}}{4} = 15 \text{ mm} \quad [10]$$

Dette gir slankheten:

$$\lambda = \frac{l \cdot k}{i} = \frac{429 \text{ mm} \cdot 0,6}{15 \text{ mm}} = 17,2 \quad [8]$$

Fra knekketabell i vedlegg 15 E får man ut at tillatt knekkspenning er 393 MPa.

Bruker 60 mm vange for videre dimensjonering.

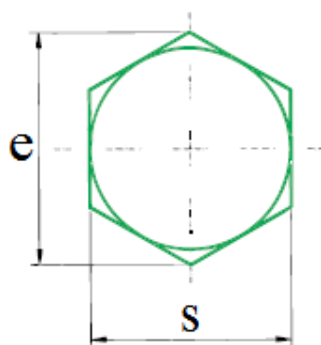
Strekraften i vangen blir brukt for dimensjonering av bolter og plate til vangen. Trykkraften blir brukt for å dimensjonere sveisen til vangen siden den er større enn strekkraften.

8.3 Bolter

Her gjøres det beregninger av boltene på den nederste seksjonen og mot fundamentet, det tas utgangspunkt i kreftene i den nederste seksjonen. Og videre kraft per vange. Hver vange, har en plate under seg som monteres på platen til fundamentet. I første omgang vil det dimensjoneres med fire bolter per plate for å sjekke om det er tilstrekkelig.

Dette beregnes ved bruk av den maksimale strekkraften i vangen fra skjev islast og en avskjæringskraft fra kreftene i lineretningen.

Formålet med beregningene er å finne ut om det holder å bruke M36 bolter med DIN standard 931, som var det Omega Elkraft anbefalte.



FIGUR 45: E OG S MÅL PÅ BOLT (83)

	DIN 931 DIN 933 DIN 960 DIN 961 ISO 4014* ISO 4016*		
Nom.dia.	k	s	e
M 36	22.5	55	60.79

FIGUR 46: E OG S, VERDIER I MM (83)

For beregninger se vedlegg 6 kap 1.

Skruer som er belastet i både avskjæring og strekk, skal tilfredsstillere kravet:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad [3]$$

Dette ble $0,29 \leq 1,0$ og dermed tilfredsstillere M36 boltene kravet.

8.4 SVEISEBEREGNINGER

8.4.1 VANGEN

Her beregnes det hvor stort a-mål det skal være mellom den nederste vangen som ble funnet til å være 60 mm ved skjev islast og den nederste platen. Dette gjøres fordi man da kan bruke samme a-mål oppover i masten om det brukes 60 mm vanger der. Siden kreftene på vangene synker oppover i høyden.

Formålet med disse beregningene er at sveisene på vangene skal kunne tåle de største kreftene fra skjev islast.

For beregninger se vedlegg 6 kap 2.1

Det kan altså brukes et a-mål for vangesveis på 5 mm både for plater under 40 mm tykkelse og fra 40 og opp til 80 mm tykkelse. Men siden det ikke er tatt med skjærspenninger velges 6 mm a-mål for å være helt på den sikre siden. Da blir normalspenningen i sveisen $\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 269 \text{ MPa}$

8.4.2 SVEIS PÅ STAVER

Her beregnes det sveis på gitteret i masten og traversen, dette gjøres ved hjelp av tall fra siste kjøringen i FEM-analysen i vedlegg 8. På grunn av den kompliserte konstruksjonen ble det ikke funnet noen krefter i gitteret ved beregninger, men siden modellen i COMSOL stemmer med håndberegninger, se kapittel 10.2. Så kan det brukes verdier derifra for å regne på sveiser for gitter i masten og sveiser i traversen.

Det brukes maksimale Von Mises spenninger fra det området i gitteret som har høyest spenninger. Maksimale spenninger tas ut i en enkelt gitterstav og derifra gjøres disse spenningene om til krefter som virker i staven. Kreftene som virker i staven må også virke på sveisen til staven. Derfor antas det at denne kraften virker på tverrsnittsarealet til sveisen, på bakgrunn av dette regnes det ut et a-mål for staven.

8.4.3 SVEIS PÅ GITTERET I MASTEN

For beregninger se vedlegg 6 kap 2.2

Et a-mål på 3 mm brukes for gitteret. (78)

8.4.4 SVEISING I TRAVERSEN

For beregninger se vedlegg 6 kap 2.3

For sveisene i traversen så ble det dimensjonert med hensyn på den minste diameteren på stavene i traversen, siden større diameter gir større tverrsnittsareal for en sveis med samme a-mål. Her endte det med 6 mm i a-mål. Dette gjelder traversen i sin helhet.

8.5. PLATENE TIL VANGENE.

Her beregnes platene mot lasttilfellet skjev islast og kreftene i bunn av nederste seksjon, disse platene skal være kontaktflaten mellom hver av seksjonene i masten, samt traversen i toppen. Disse holdes sammen av

M36 bolter. Det beregnes med hensyn på bøyning av platen og tillatt spenning for platen. Det brukes maks strekkraft i vangen for å gjøre denne beregningen. I tillegg til dette må det være plass til bolter med skiver som ikke kommer i kontakten med sveisen til vangen og at muttere kan skrues til se figur 45 og 46. Poenget med beregningene er å finne den minste platen man kan bruke med maks strekkraft i vangen.

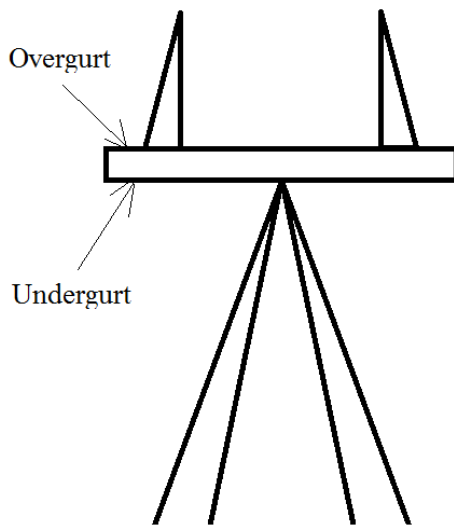
Som utgangspunkt for beregningene ble det satt at det skulle være en firkantet plate, med en bolt i hvert hjørne. Det er derfor et hull i hvert hjørne. Vangen sveises fast på midten av platen, der det er laget et spesialtilpasset hull.

For beregninger se vedlegg 6 kap 3.

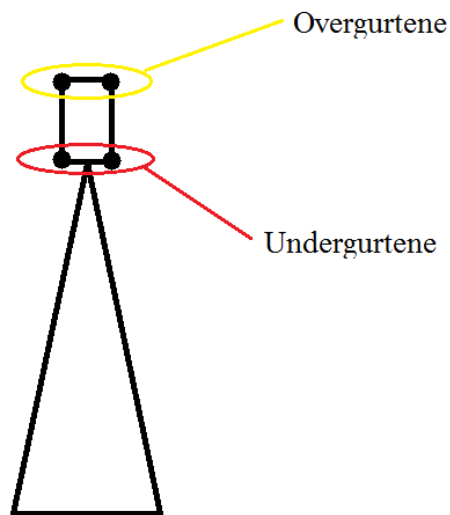
TABELL 26: RESULTAT FOR PLATEN TIL VANGEN

Bredde (B)	Tykkelse (H)	Arm vinkelrett (X)	Arm skrått (X)
180 mm	30 mm	16 mm	37 mm

8.6 BØYEMOMENTBEREGNINGER FOR OVER OG UNDERGURTER I TRAVERSEN



FIGUR 47: GURTER I TRAVERSEN



FIGUR 48: OVER OG UNDERGURTER FRA SIDEN

Her beregnes det hvilke bøyespenninger man får i gurtene ved lasttilfellene skjev islast og maks islast. Gurtene i traversen er de fire rundstålene som ligger horisontalt og har gitterstaver i mellom seg, disse rundstålene er litt kraftigere enn gitteret. Bøyespenningene regnes ut ved hjelp av bøymomentet på gurtene og tverrsnittsmodule. Dette gjøres for å finne ut hvor kraftige staver man trenger for å unngå flyting. Gurter på 40 mm i diameter testes.

For beregninger se: Vedlegg 6 kap 4.2 og vedlegg 15 I.

For skjev islast ble det en total bøyespenning på:

$$\sigma_{tot} = 187 \text{ MPa}$$

For maks islast ble total bøyespenning:

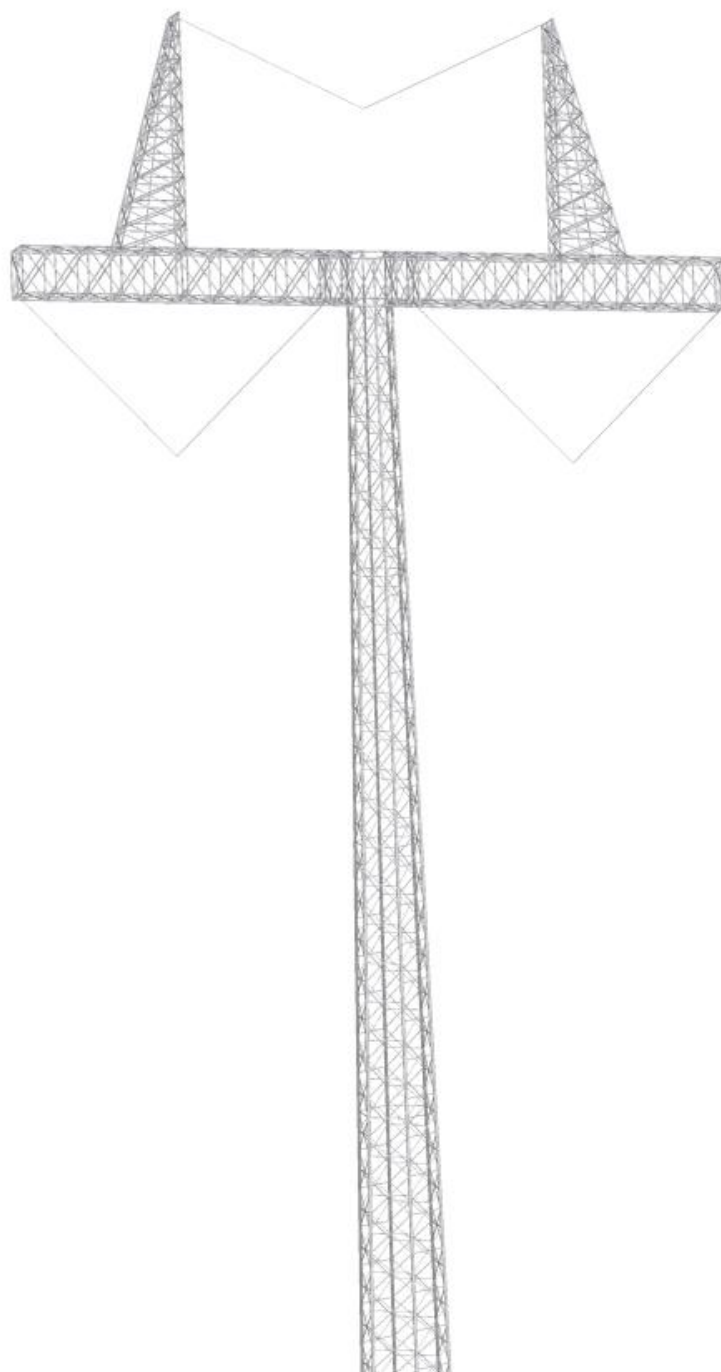
$$\sigma_{tot} = 90 \text{ MPa}$$

Begge disse er godt under tillatt flytegrense på 427 MPa, det vil si at det vil bli brukt gurter på 40 mm.

9. ELEMENT OG LØSNINGSVALG

9.1 HOVEDELEMENTER

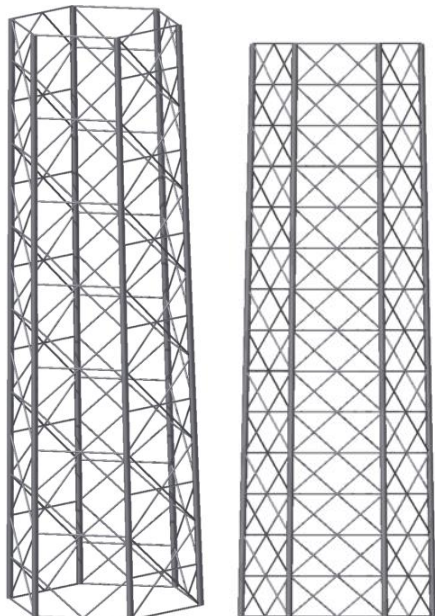
9.1.1 SAMMENSTILLING



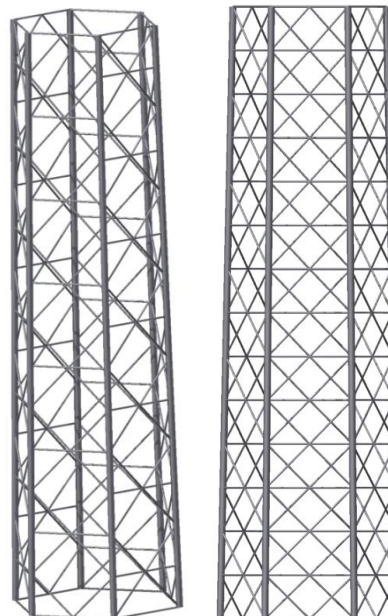
FIGUR 49: SAMMENSTILLING AV KOMPLETT MAST.

9.1.2 DESIGN AV HOVEDELEMENTER

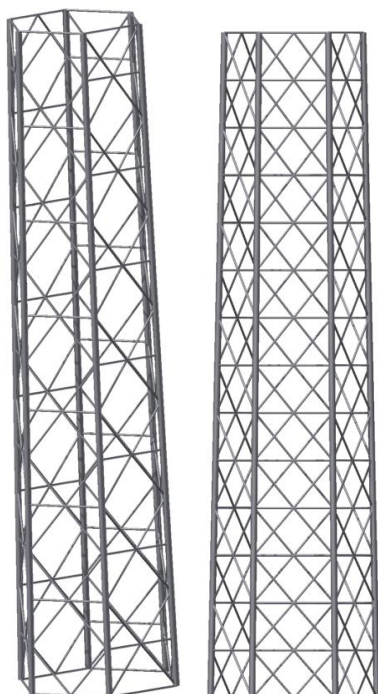
Seksjoner



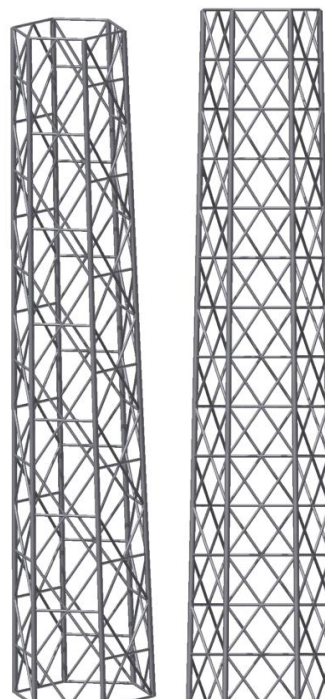
FIGUR 50: SEKSJON 1, BREDDE: 2000 MM I BUNN, 1750MM I TOPP. HØYDE: 6 METER.



FIGUR 51: SEKSJON 2, BREDDE: 1750 MM I BUNN, 1500 MM I TOPP. HØYDE: 6 METER.

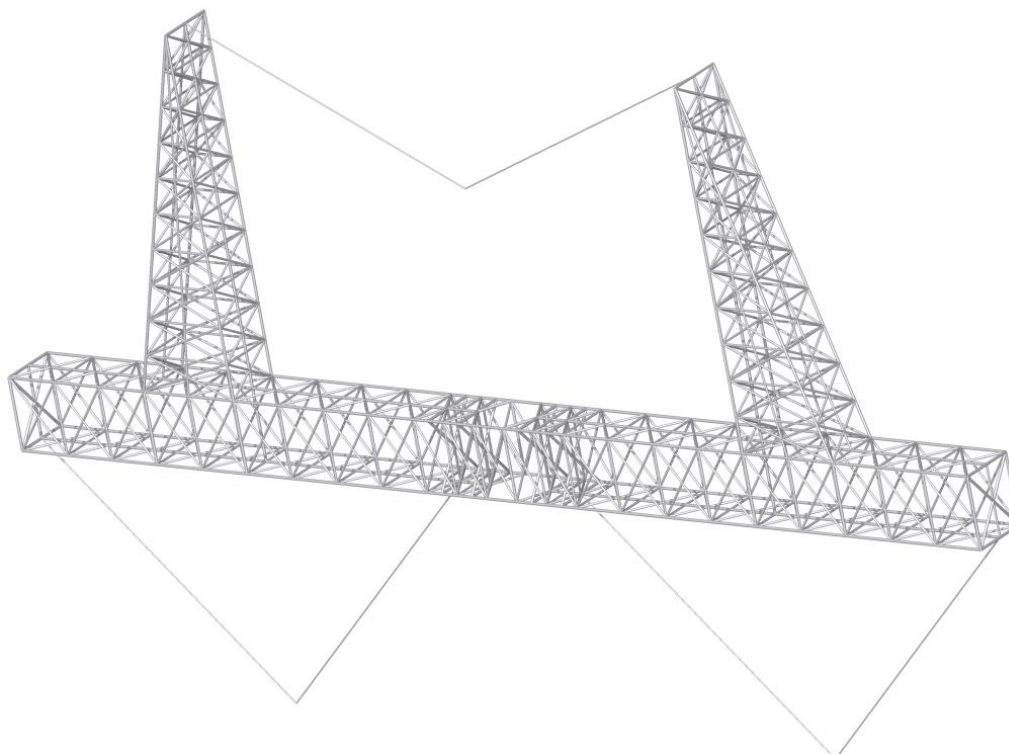


FIGUR 52: SEKSJON 3, BREDDE: 1500 MM I BUNN, 1250 MM I TOPP. HØYDE: 6 METER.

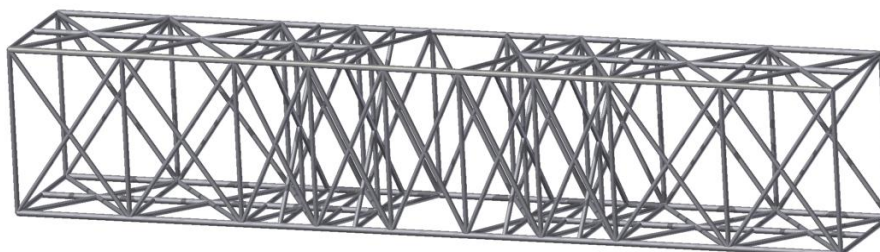


FIGUR 53: SEKSJON 4, BREDDE: 1250 MM I BUNN, 1000 MM I TOPP. HØYDE: 6 METER.

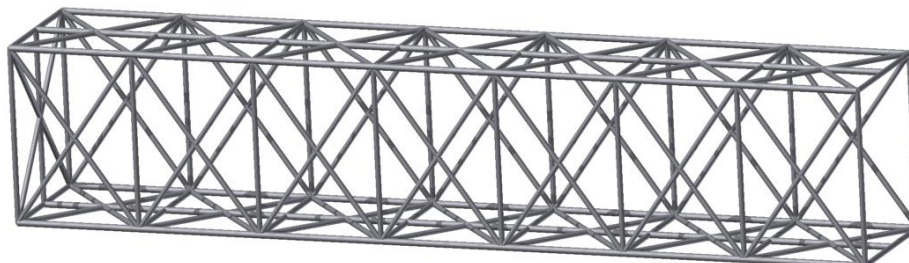
Travers



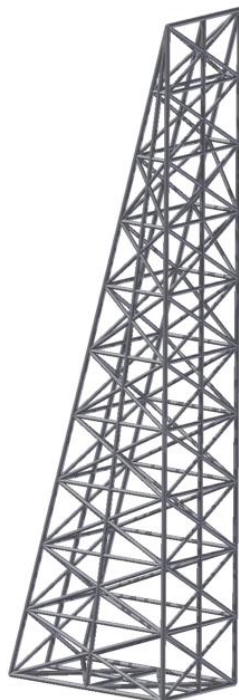
FIGUR 54: KOMPLETT TRAVERS



FIGUR 55: TRAVERS, MIDTDEL. I MIDTEN ER DET FORMET SLIK AT DET PASSER TIL TOPPEN AV ØVERSTE SEKSJON.

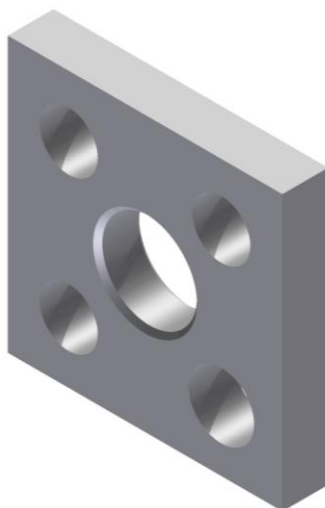


FIGUR 56: TRAVERS, YTTERDEL. PÅ HVER SIDE AV MIDTDEL, V-KJEDET FESTES UNDER DENNE.



FIGUR 57: TRAVERS, SPIR. PLASSERES PÅ HVER YTTERDEL. MELLOM DE TO SPIRENE SKAL DET HENGE ET V-KJEDE.

Plate



FIGUR 58: PLATE, MELLOM VANGENE TIL SEKSJONENE, MELLOM SEKSJONER OG FUNDAMENT, OG MELLOM SEKSJONER OG TRAVERS.

Modellen ble tegnet i Autodesk Inventor. De fire seksjonene ble laget først. Diameterne i topp og bunn av hver seksjon ble parametrisert. Dette var for å kunne lage flere alternativer for masten og videre prøve disse ut i FEM-program. Traversen ble bygd etter isolasjonsavstander, som kan sees i kap. 7.2.2, og slik at midten skulle passe til øverste seksjon i masten.

Platen ble dimensjonert etter beregninger i kapittel 8.5. Den ble ikke satt inn i 3D-modellen av RSB-masten. For enkle konstruksjonstegninger av alle komponenter med mål, se vedlegg 1-4.

9.2 KOMPONENTER

I tillegg til seksjonene, platene og traversen er det flere komponenter som brukes for å lage en komplett mast. Videre følger en liste av disse.

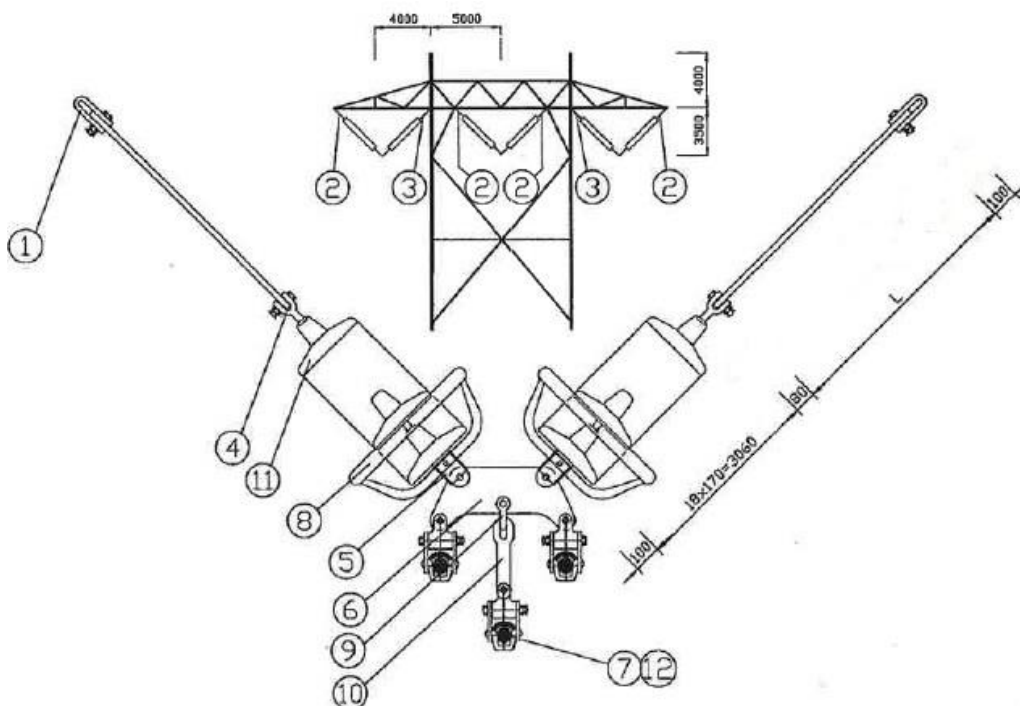
9.2.1 BOLTER, SKIVER OG MUTTERE

Det benyttes bolter, skiver og muttere som leveres med mastene.

Boltene skal være kvalitet ISO/DIN 8.8 og følge DIN standard 931. Skivene skal følge DIN standard 7989, skivene er 8 mm tykke og det er bare skiver under muttere. Muttere skal være av kvalitet ISO/DIN klasse 8 og følge DIN standard 934.(84)





9.2.2 V-KJEDER MED ISOLATORER

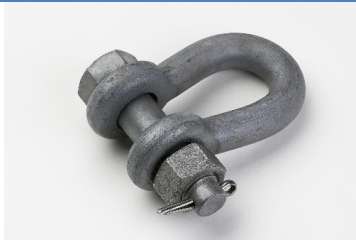

V-kjedene med isolatorer leveres samtidig som resten av masten. I henhold med tidligere masteprojekter til Omega Elkraft blir det i denne masten brukt et lineoppheng med kjedetype V21 triplex i BM. Kjedet består av flere komponenter, viser disse i figur 59 og tabell 27 nedenfor.



FIGUR 59: KONSTRUKSJONSTEGNING AV V-KJEDE. (46)

TABELL 27: KOMPONENTER I V-KJEDE(44),(45),(46)

Del nr. på figur 59	Komponent	Antall pr. mast	Bilde	Materiale/stålkvalitet
1	Fasefeste	6	 FIGUR 60:FASEFESTE(47)	Fe360B
2/3	Kjedeforlengere, 20x65 med 32 mm og 22 mm hull.	6		Fe360B
4	20 mm kulegafler med M20.	6	 FIGUR 61: KULEGAFFEL(48)	Seigherdet stål
5	20 mm kulehaker med M20 og med klammer for feste av feltarmatur type E.	3	 FIGUR 62: KULEHAKE(49)	SJK500
6	20 mm åk for V-kjeder, C-C kjeder 310 mm, C-C liner 450 mm.	3		Fe510D
7	HK6 – Hengeklemme med ledd 515, som passer til respektiv linediameter.	9	 FIGUR 63: HENGEKLEMME(50)	FeAl300
8	Feltarmatur, type E	6		Aluminiumslegering

9	3/4" harpesjakkell med M22.	3	 FIGUR 64: HARPESJAKKEL(51)	Seigherdet stål
10	20x50 mm forlenger med 1 stk ovalt øye for 3/4" sjakkell, 22 mm for hengeklemme.	3		Fe510D
11	Isolatorer, V21. 2 x 18 ledd per kjede.	108	 FIGUR 65: GLASSISOLATORSKÅL (52)	Herdet glass
12	Armeringsspiraler, spirallengde: 2500 mm.	9		Aluminiumslegering

Total vekt for et V21 V-kjede er ca. 327 kg.

9.2.3 LINE

Linevalg blir tatt på bakgrunn av tidligere prosjekter Omega Elkraft har hatt, det er en 380-grackle line som velges her. Dette er en Feral-line, den tåler høye mekaniske påkjenninger.

TABELL 28: LINE-MATERIALEGENSKAPER(TABELL: OMEGA ELKRAFT)

Type	Total				
	Tverrsnitt mm ²	Diam. mm	Vekt pr. km kg	Bruddlast kN	Ledn. Motst. v/20C ohm/km
380-Grackle	682,88	34,03	2278	186,9	0,0477

9.3 MODULARISERING

I en RSB-mast er alle seksjonene koblet sammen med plater og bolter, slik er det også mellom seksjonene og travers, og seksjonene og fundamentet. Seksjoner kan da byttes enkelt siden det bare er skrudd sammen. Det er også enkelt å bytte travers ved å skru av den gamle og skru på en ny, selve masten trengs det ikke gjøre noe med. Komponenter som V-kjeder kan også enkelt byttes ut. Det er altså gode muligheter for modularisering i denne type mast.

10. STRUKTUROPTIMERING/FEM-ANALYSE

Til å utføre FEM-analyser ble programmet COMSOL Multiphysics brukt. Dette er et simulerings verktøy som kan brukes til å modellere, definere geometri, meshe, velge fysikk, løse, og vise resultater(80). Det har også mange moduler som kan installeres etter hvilket behov brukeren har. Til dette prosjektet ble modulene CAD Import Module, Structural Mechanics Module brukt. CAD Import Module ble brukt for å få importert filer fra Inventor over til COMSOL. Structural Mechanics Module ble brukt for å kunne analysere strukturell mekanikk, spesielt bjelkeelementer.

Analyseringen ble utført hos Omega Elkraft og på UMB da programvaren etter hvert ble installert der.

Det ble først laget en volummodell, denne ble tegnet i Autodesk Inventor og fikk lagt på sirkulære tverrsnitt via frame-generator. Denne modellen kunne importeres direkte inn i COMSOL via LiveLink. LiveLink tar med seg alle parametre fra Inventor slik at disse kan redigeres i COMSOL. På grunn av at maststrukturen hadde veldig mange staver tok endringen av parametrene veldig lang tid. Og beregninger tok også mye tid. Dette ble testet hos Omega Elkraft.

Det ble testet med en strekmodell, denne tok mye mindre tid å kjøre enn volummodellen. Modellen ble tegnet opp i Inventor og parametrisert der. Strekmodellen er bygd slik at det er kun selve fagverksstrukturen som er laget, altså uten tverrsnitt. En geometri velges ved at man stiller inn parametrene i Inventor, og så blir filen konvertert videre og strekmodellens geometri blir låst.

For å gå fra CAD-fil i Inventor til COMSOL ble det gjort flere konverteringer. Da den ferdige strekmodellen forelå i Inventor ble denne eksportert fra iam-fil til en dwg-fil som kunne åpnes i AutoCAD. Filen ble åpnet i AutoCAD for å sjekke om noen linjer lå dobbelt, disse ble fjernet eller slått sammen med eksisterende linjer. Dobbellinjene kom grunnet projisering av sketsjer i Inventor. Etter at dette var ordnet ble filen eksportert fra dwg-fil til en step-fil. Dette låser geometrien til strekmodellen og filen kan da åpnes i COMSOL.

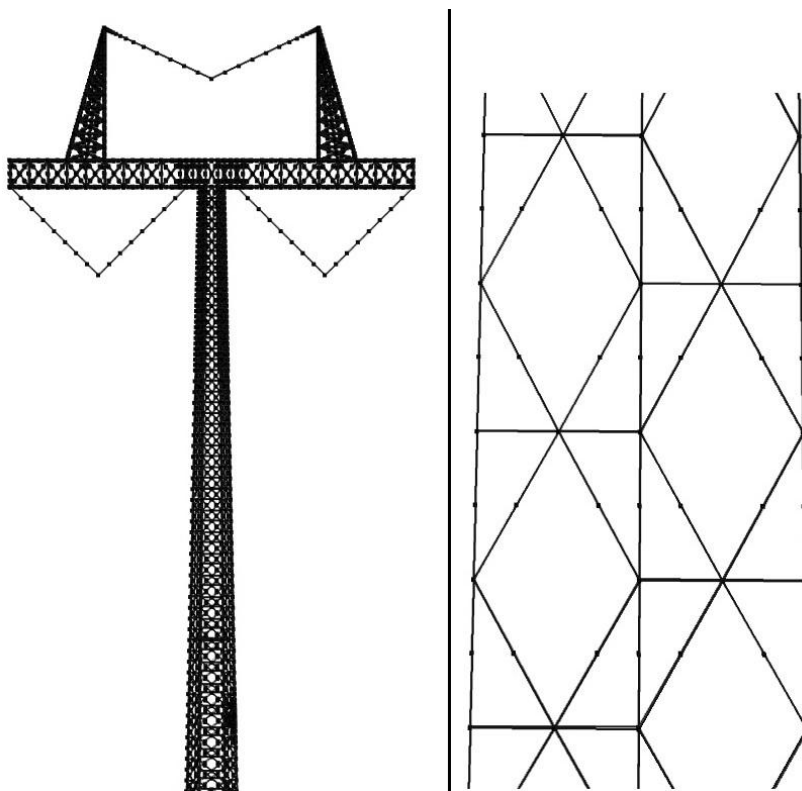
I COMSOL ble det valgt stasjonær bjelkefysikk for seksjonene og traversen. Det ble brukt bjelkeelementer. For å forenkle ble det laget flere seleksjoner av stavene i strukturen, det ble delt opp i gitter, vanger og travers. Dette ble det så satt sirkulære tverrsnitt på. Det ble også lagt på strukturelt stål som materiale.

På V-kjedene ble det brukt fagverkselementer for å simulere at det var et hengende kjede. For å få frem at det var ledd mellom kjede og travers ble kjedene flyttet ned 2 mm også ble nodene der linket med hverandre. Dette hindret at det ble veldig store spenninger i V-kjedene, kreftene overføres bedre til traversen.

Tverrsnittene ble etter hvert parametrisert for å prøve forskjellige diametre. Det ble tatt utgangspunkt i noen diametre, som kunne endres senere se tabell 29. Det ble satt på opplagre i de seks punktene i bunnen av masten og krefter i travers i henhold til de forskjellige lasttilfellene på punkter i travers, se vedlegg 5 for de forskjellige lasttilfellene. Figuren ble så meshet slik at den ble et element per stav se figur 66. Det ble testet med forskjellige mesh for å se om tallene ble like, det viste seg at utregningene ble tilnærmet like uansett hvilken mesh som ble brukt. Dette tyder på at modellen fungerer.

TABELL 29: UTGANGSDIAMETRE

Staver	Diameter
Vanger	60 mm
Gitter	16 mm
Traversgitter	32 mm
Traversvanger/gurter	40 mm



FIGUR 66: ELEMENTER I MAST, HØYRE: HELE MASTEN, VENSTRE: NÆRBILDE AV EN SEKSJON. HVER STAV TILSVARER ET ELEMENT.

Kunne få ut plott av blant annet spenninger og deformasjoner. Det ble tatt ut spenninger i gitter og travers i hver enkelt seksjon. I traversen ble det også tatt ut spenninger i gitter og gurter, for å se hvordan stavene ble valgt i travers se vedlegg 10.

Strekmodell av mast og COMSOL-filer ligger som vedlegg 15 J og 15 K.

10.1 FØRSTE ANALYSE

I denne analysen skulle fire forskjellige geometrier testes ut. Disse kom opp under konseptvurderingen, viser til avsnitt 7.2.1, tabell 18. Det ble bestemt at det skulle gjøres enkle, kjappe analyser på disse for å bestemme seg for et alternativ. Geometrien som ble valgt ble tatt med videre i mer gjennomgående analyser.

TABELL 30: SAMMENLIGNING AV GEOMETRIALTERNATIVER, VEKT ER UTEN V-KJEDE. SPENNINGSTOPPER UTELUKKES.

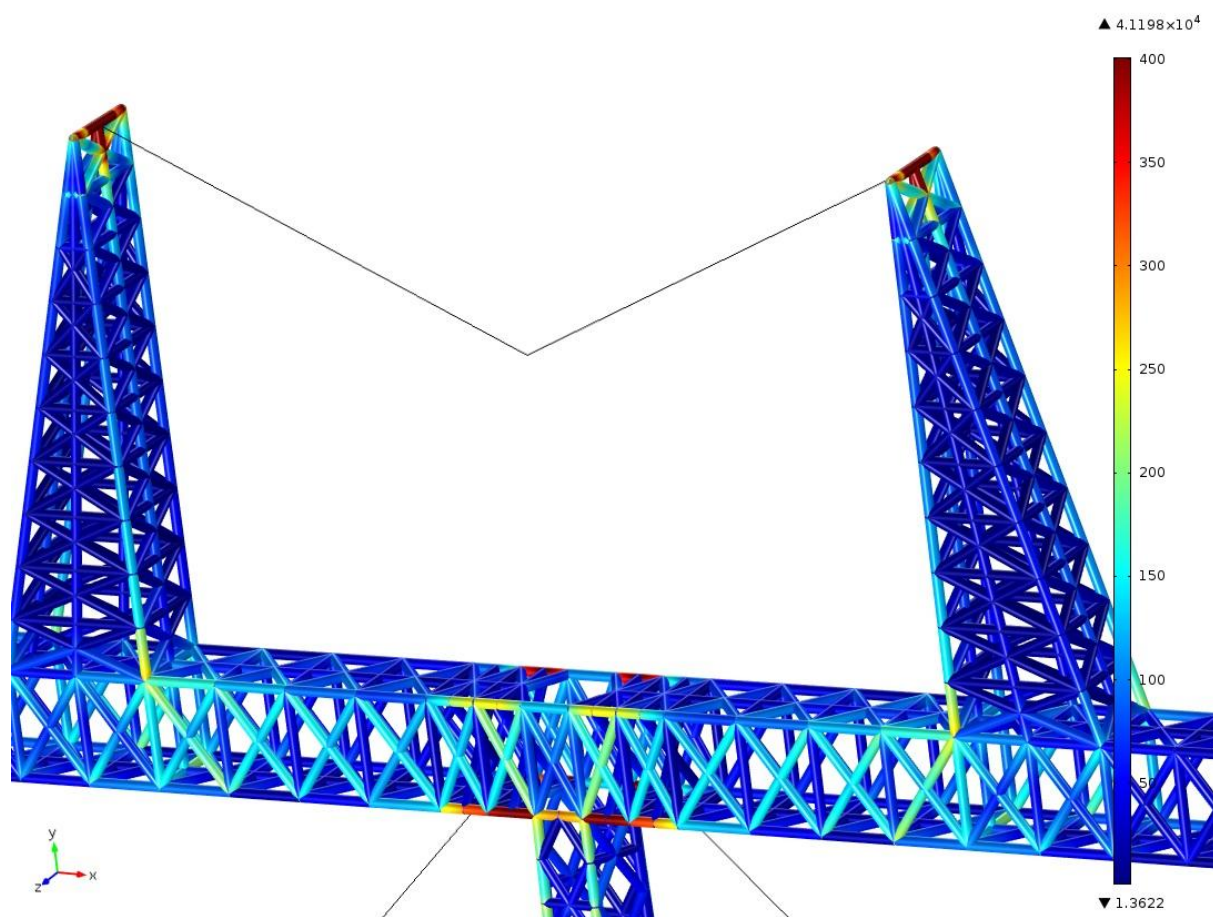
Alternativ	Maksverdier	Spenningsbilde, Von Mises [MPa]
<p>1</p> <p>Spenning: 282,6 MPa Deformasjon: 122,9 mm</p> <p>Vekt: 9748 kg</p>		<p>▲ 1.4332×10⁴</p> <p>▼ 1.0012</p> <p>FIGUR 67: SPENNINGSBILDE AV ALTERNATIV 1</p>
<p>2</p> <p>Spenning: 242,8 MPa Deformasjon: 241,3 mm</p> <p>Vekt: 8179 kg</p>		<p>▲ 1.4445×10⁴</p> <p>▼ 2.2811</p> <p>FIGUR 68: SPENNINGSBILDE AV ALTERNATIV 2</p>

<p>3</p> <p>Spenning: 377,6 MPa Deformasjon: 457,6 mm</p> <p>Vekt: 8004 kg</p> <p>VALGT</p>		<p>FIGUR 69: SPENNINGSBILDE AV ALTERNATIV 3</p>
<p>4</p> <p>Spenning: 633,8 MPa Deformasjon: 1041,5 mm</p> <p>Vekt: 7869 kg</p>		<p>FIGUR 70: SPENNINGSBILDE AV ALTERNATIV 4</p>

Disse resultatene viser at alternativ 1, 2 og 3 holder seg under flytegrensen, mens alternativ 4 kommer over. For å minimere vekt og materialbruk blir det letteste alternativet som fungerer valgt. Alternativ 3 med 2 meter i bunn og 1 meter i topp blir valgt.

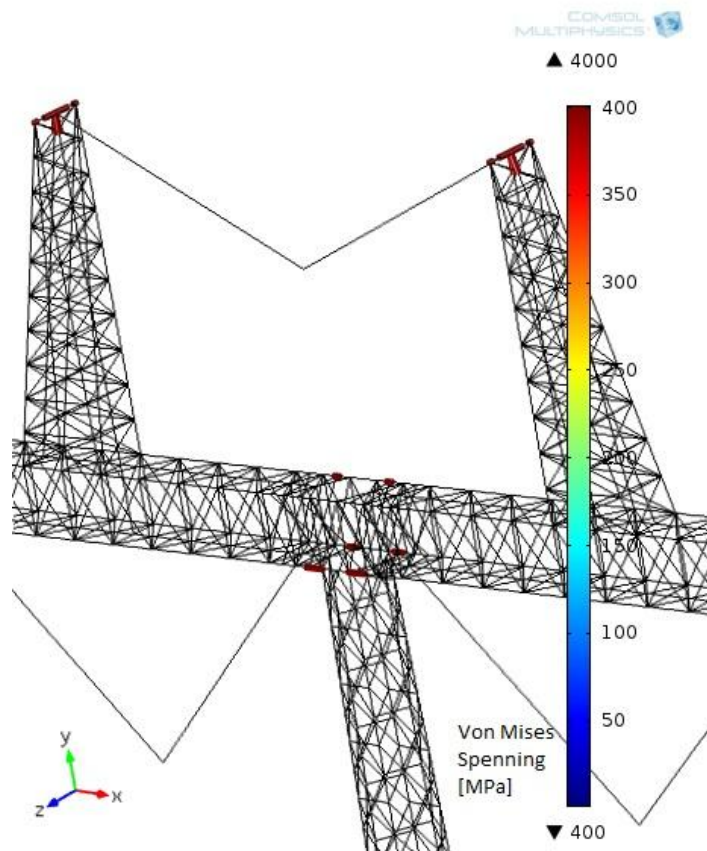
10.2 HOVEDANALYSE

I hovedsak så ble lasttilfellet skjev islast vektlagt, da det ble antatt at dette var det lasttilfellet som ville gi de største kreftene i masten. I første omgang ble det testet om figuren i COMSOL stemte overens med beregningene som ble gjort for krefter i bunnen av masten. Dette ble sjekket ved skjev islast og maks islast for de vertikale kreftene for punktene i bunnen (nederst i vangene). FEM-modellen ble dimensjonert for å tåle skjev islast først og så ble det sjekket opp mot linebrudd ytterfase, maks islast og vind på is.



FIGUR 71: STORE SPENNINGER I OPPKOBLINGSPUNKTENE TIL V-KJEDENE

Store spenninger opptrer på de verst utsatte plassene i traversen, der V-kjedene er koblet mot enkeltstaver i traversen. Disse områdene blir det sett bort i fra, siden det i virkeligheten skal være plater her, som fordeler kreftene på flere staver. Dette gjelder hele FEM-analysen.



FIGUR 72: SPENNINGSTOPPER I TRAVERSEN. DE RØDE STAVENE ER DEM SOM HAR SPENNING OVER 400 MPA.

Sammenligner håndberegninger fra 8.2 med verdier fra COMSOL ved skjev islast. Dette for å undersøke om håndberegninger og FEM stemmer overens.

TABELL 31: VERDIER FRA HÅNDBEREGNINGER OG COMSOL SKJEV ISLAST

	Håndberegninger	COMSOL
S_t	860000 N	871400 N
S_s	750000 N	763000 N
S_n	54200 N	54000 N

Disse verdiene er veldig like håndberegningene. Sjekket da i tillegg med lasttilfellet maks islast. Se vedlegg 15B.

TABELL 32: VERDIER FRA HÅNDBEREGNINGER OG COMSOL MAKS ISLAST

	Håndberegninger	COMSOL
S_t	77255 N	77252 N

Det var litt forskjell på kreftene i bunnpunktene i COMSOL, dette skyldes at tyngden til traversen virker litt forskjellig på de seks punktene. Det ble derfor brukt en gjennomsnittsverdi av de seks punktene for å kontrollere mot håndberegningene. Man kan se at kreftene i punktene nederst stemmer nesten helt nøyaktig med håndberegningene.

På grunnlag av kontrollen ovenfor ble det antatt at figuren stemte overens med virkeligheten og at verdier fra COMSOL kunne brukes for videre dimensjonering av masten.

10.3 DIMENSJONERING MOT KNEKKING VED SKJEV ISLAST

For å dimensjonere mot knekking så er det den aksielle trykkraften/trykkspenningen som er dimensjonerende. Men her ble det tatt ut maks Von Mises spenning og dimensjonert mot knekking. Dette for samtidig å sjekke at det ikke oppstår noe flyting i konstruksjonen. Von Mises tar ut de største spenningene av trykk eller strekk samt andre spenninger(89). Å dimensjonere på denne måten gjør at det blir et konservativt resultat og man vil være på sikker side i forhold til aksialspenningen. I gitteret antas det at trykk og strekkspenningene er forholdsvis like. Dimensjonering mot knekking ble gjort ved hjelp av vedlegg 7 og vedlegg 15 E.

10.3.1 DIMENSJONER I MASTEN

For å komme fram til diametre på rundstålet for de forskjellige seksjonene ble spenningene sjekket opp mot knekketabell. Som en start for sjekking av diametre begynte vengene på 60 mm og gitteret ble satt til 16 mm.

Etter mange kjøringar ble følgende vangediametre valgt for masten:

TABELL 33: VANGEDIAMETERE FOR SKJEV ISLAST

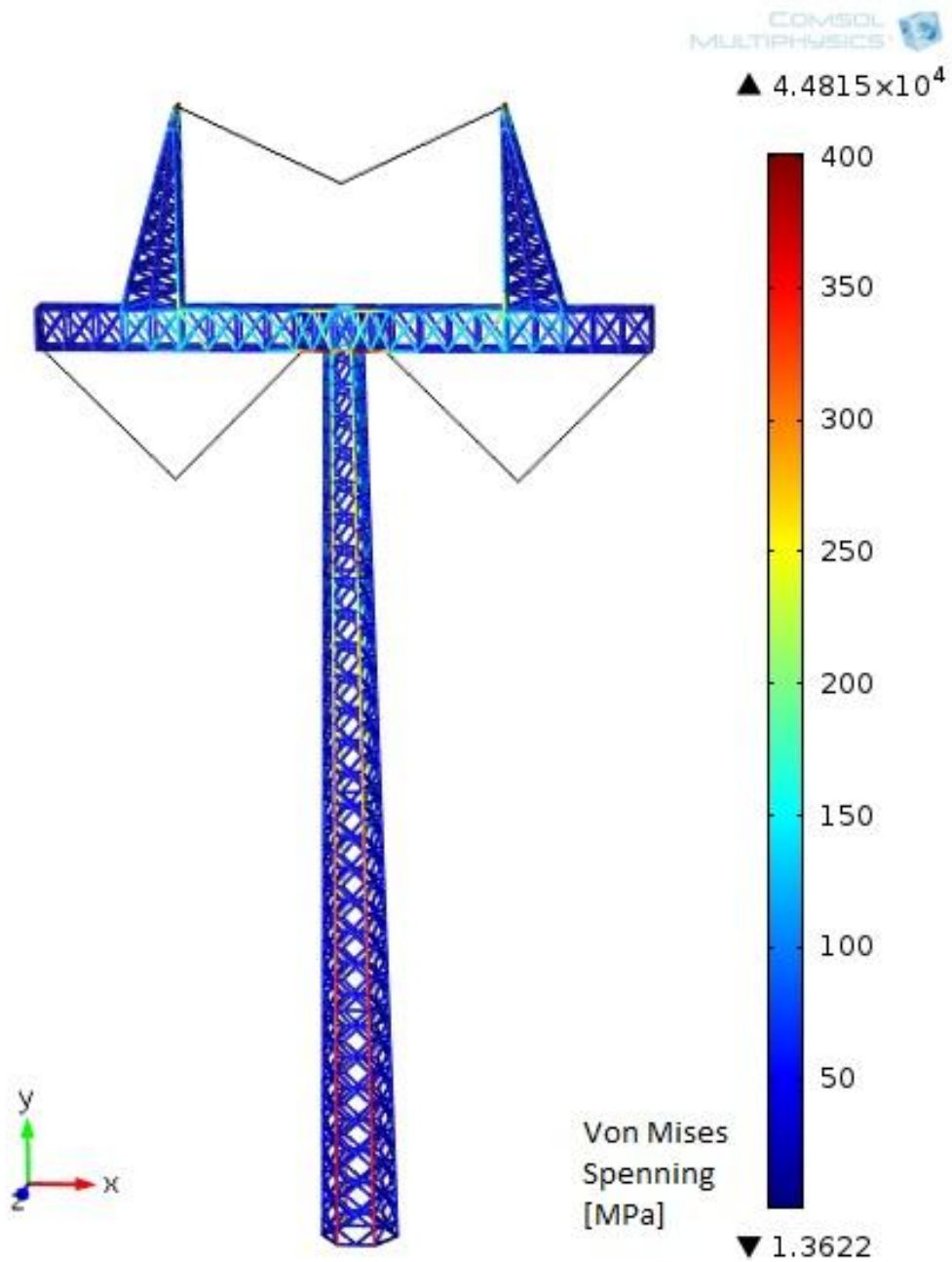
Vanger	Diameter	Maks spenning
Seksjon 1	60 mm	387 MPa
Seksjon 2	60 mm	349 MPa
Seksjon 3	60 mm	302 MPa
Seksjon 4	50 mm	330 MPa

Gitteret til masten var det neste som skulle sjekkes. Her var det følgende dimensjoner som holdt mot knekking:

TABELL 34: GITTERDIAMETERE FOR SKJEV ISLAST

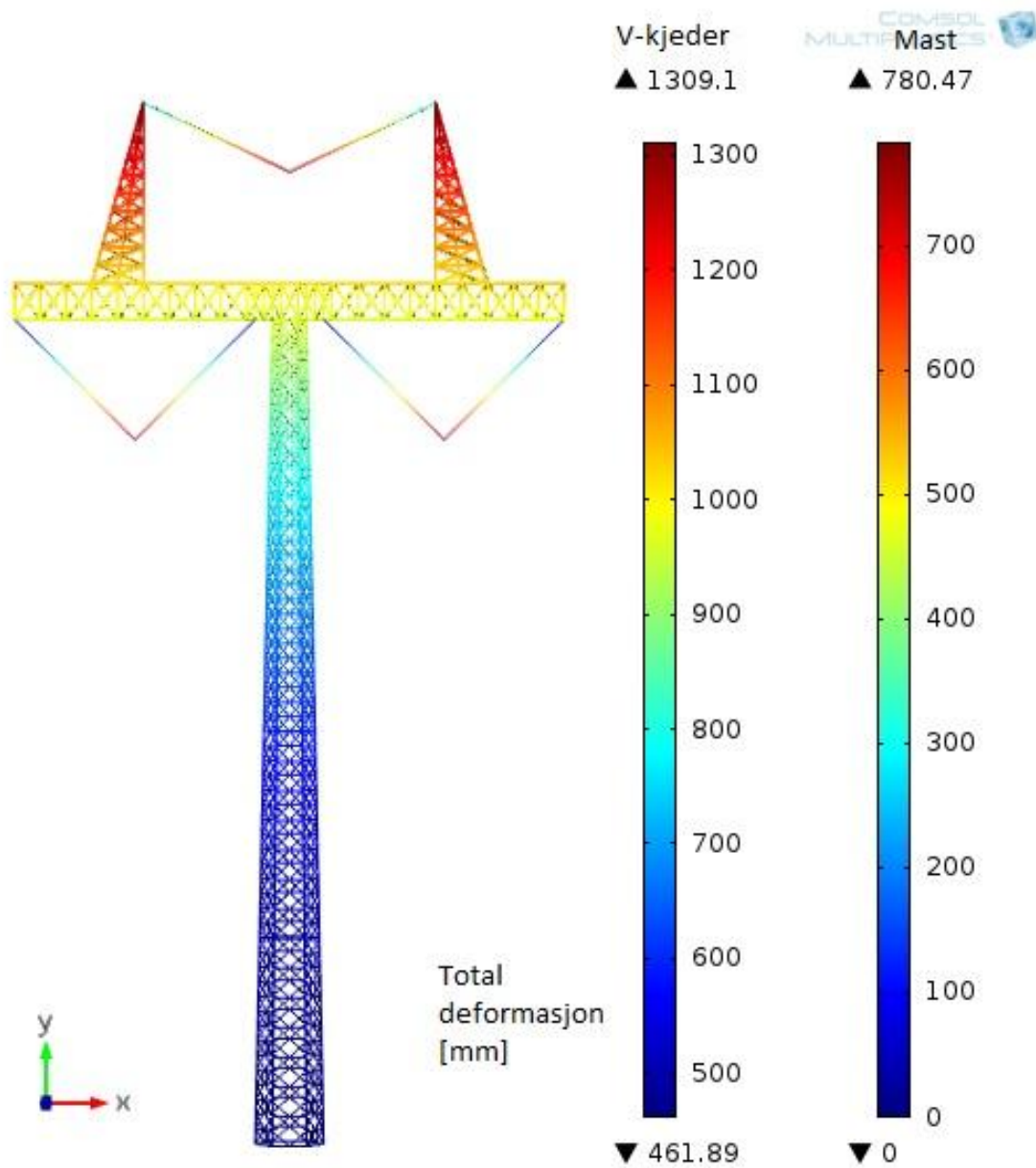
Gitter	Diameter	Maks spenning
Seksjon 1	20 mm	83 MPa
Seksjon 2	20 mm	92 MPa
Seksjon 3	20 mm	103 MPa
Seksjon 4	20 mm	122 MPa

Se vedlegg 8 for komplett testing.



FIGUR 73: SPENNINGER SKJEV ISLAST.

De største spenningene er i traversen og blir sett bort i fra.



FIGUR 74: DEFORMASJON VED SKJEV ISLAST

Som man ser på figuren så ble det en utbøyning på 780 mm helt i toppen av spiret. Dette er innenfor. (84)

10.3.2 DIMENSJONER I TRAVERSEN

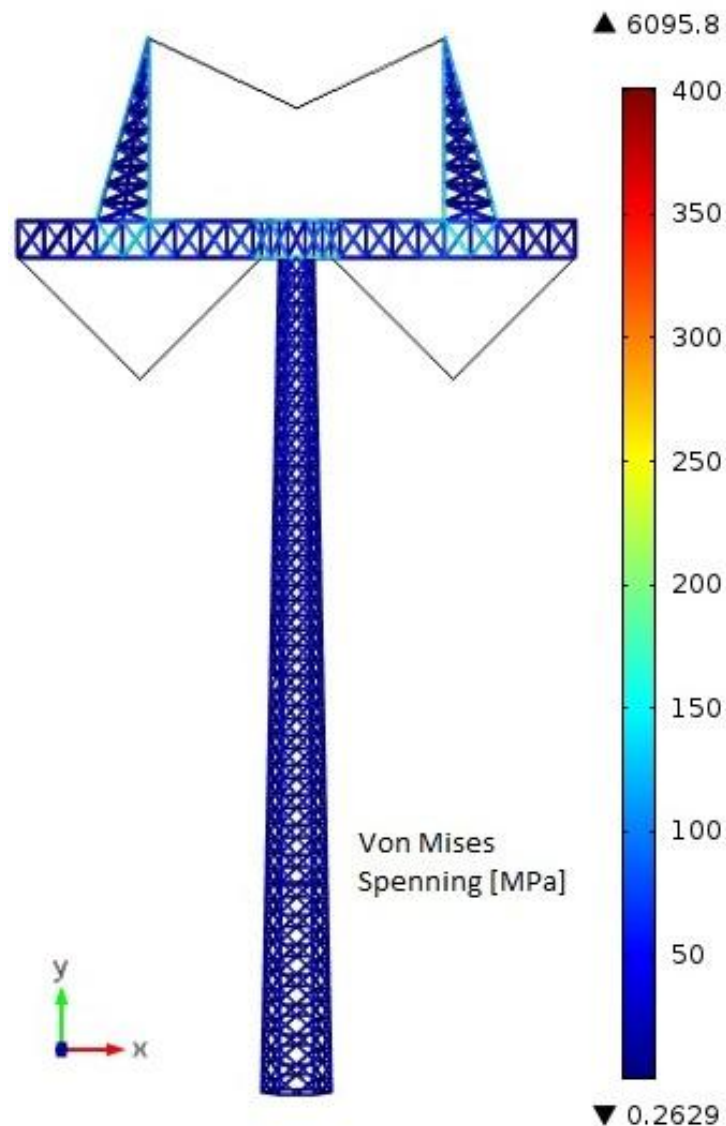
Fra håndberegningene ble det testet med gurter på 40 mm i diameter, mens på gitteret for traversen måtte det prøves mer fram. Det ble funnet at ved skjev islast så holdt dimensjonen på 40 mm for gurtene mot knekking og 32 mm på gitteret i traversen holdt også. Dette ble sjekket opp mot knekkeskemaet.

10.4 KONTROLL AV MODELL MOT KNEKKING

Når dimensjoneringen for skjev islast var ferdig og alle diametre for masten var valgt. Så ble det gjort en kontroll av modellen ved at lasttilfellene maks islast, linebrudd ytterfase og vind på is ble analysert. Dette ble gjort ved hjelp av vedlegg 7 og vedlegg 15 E.

10.4.1 MAKS ISLAST

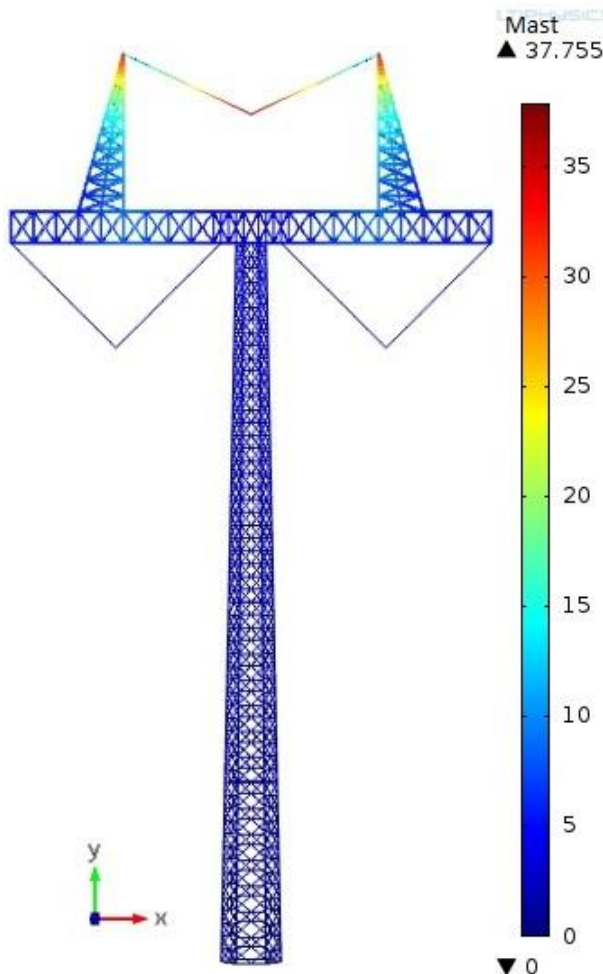
Maks islast gav ikke uventet veldig lite utslag på modellen vår, og besto kontrollen med de dimensjonene som ble funnet ved skjev islast.



FIGUR 75: SPENNINGER MAKS ISLAST

Med maks spenning i vangene på 67 MPa og 36 MPa på gitteret i masten. Og spenningene i traversen holdt seg godt under de spenningene som oppsto ved skjev islast.

Deformasjonene var også veldig små.



FIGUR 76: MAKS ISLAST, DEFORMASJON 38 MM

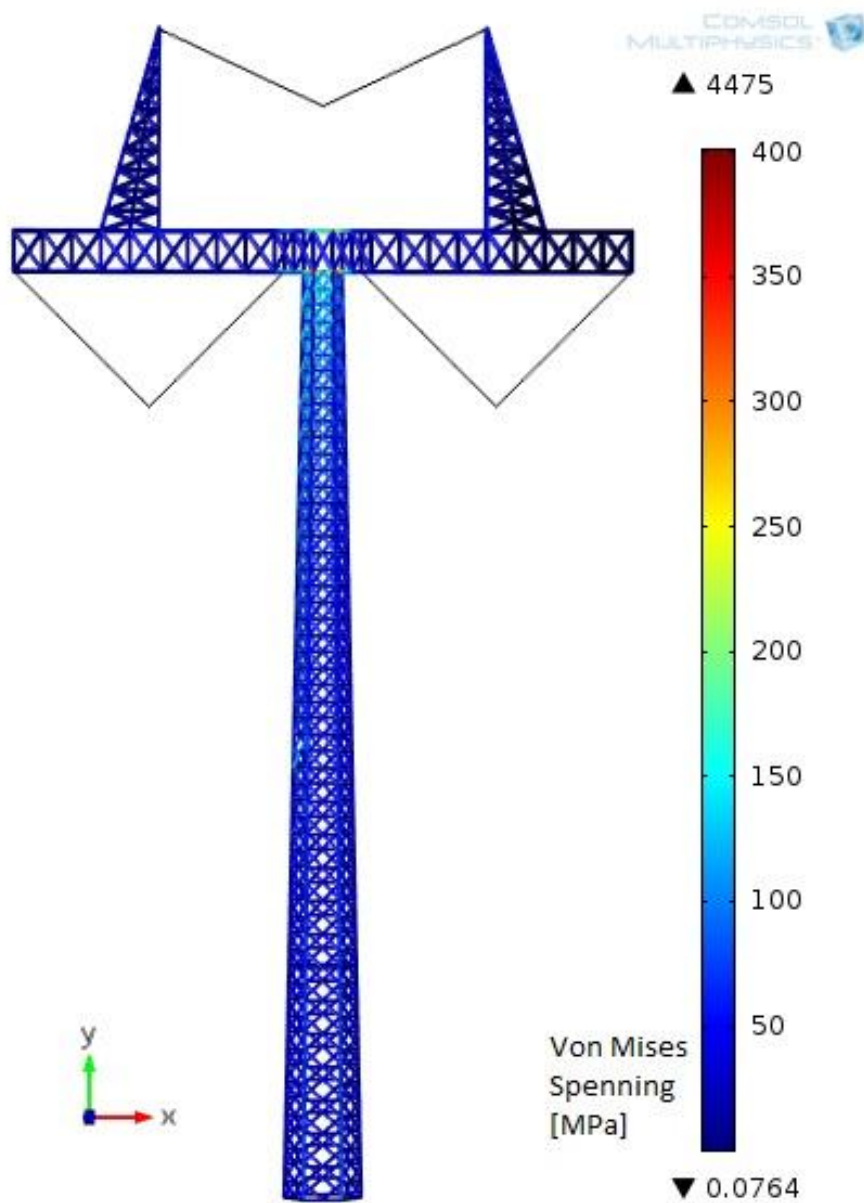
10.4.2 LINEBRUDD YTTERFASE

Linebrudd ytterfase gav noe høyere spenninger i gitteret i toppen av masten enn ved skjev islast. Dette førte til knekking ved 20 mm gitter, og gitteret måtte økes til 25 mm på den øverste seksjonen for å holde. Vangene var godt innenfor og ingen knekking oppsto der.

TABELL 35: LINEBRUDD YTTERFASE

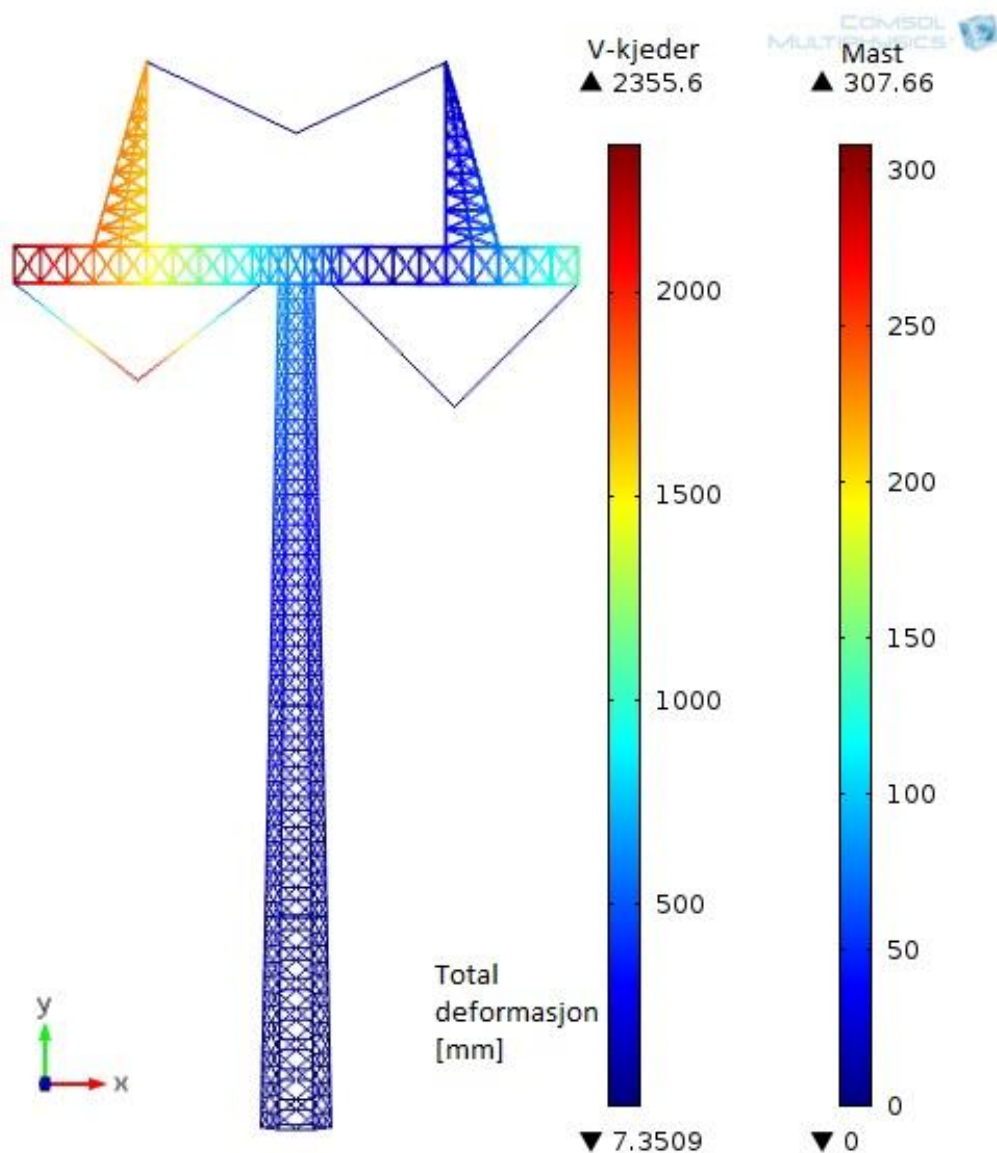
	Vanger	Gitter
Maks spenning	88 MPa	172 MPa
Maks deformasjon	86 mm	86 mm
Gjennomsnittsspenning	33 MPa	45 MPa

Bortsett fra spenningen i det øverste gitteret var det ingenting som så skremmende ut ved linebrudd ytterfase. Traversen lå innenfor de verdiene som var ved skjev islast.



FIGUR 77: SPENNINGSPLOT, LINEBRUDD YTTERFASE

Lave spenninger i masten, bortsett fra ved V-kjedene.

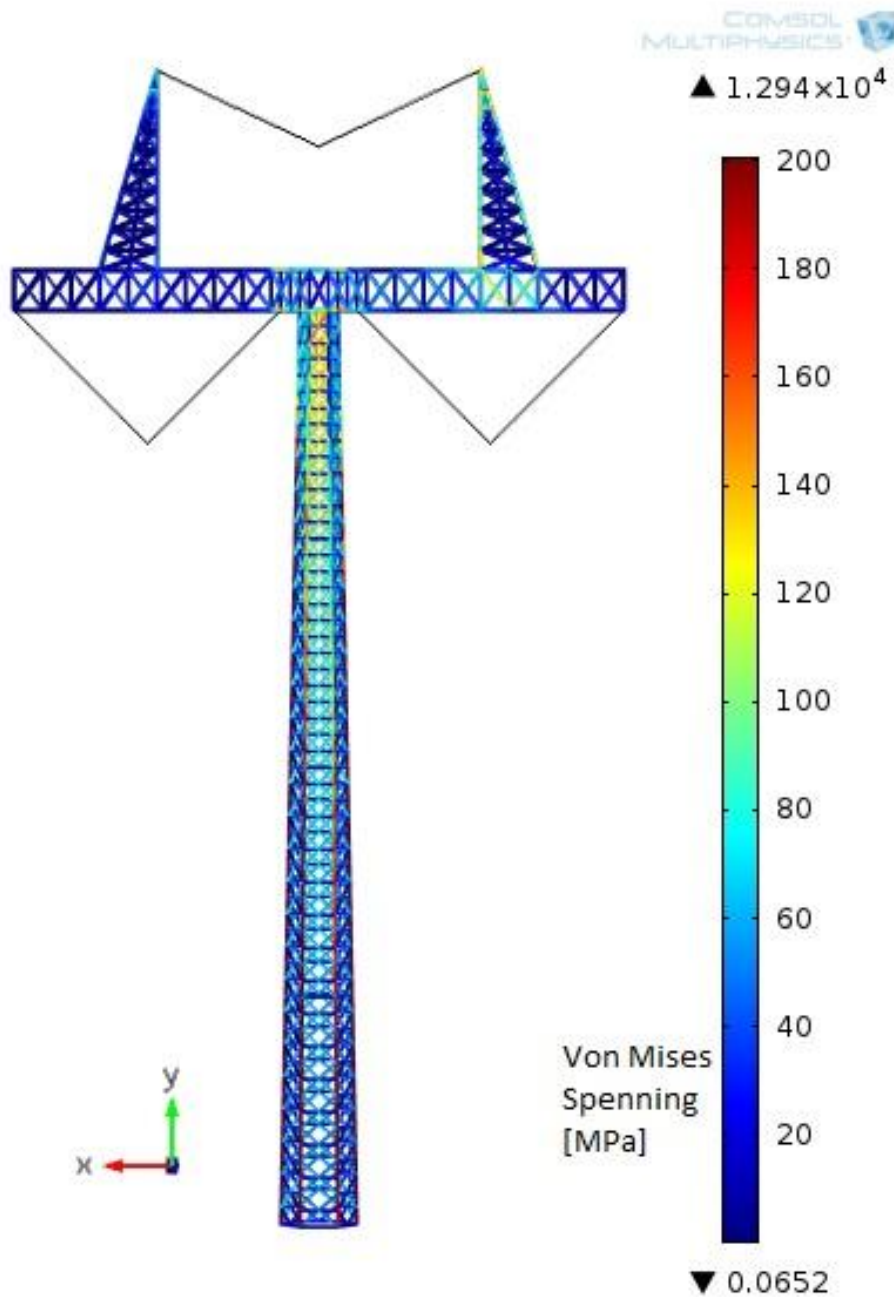


FIGUR 78: DEFORMASJON LINEBRUDD YTTERFASE

Det ble en totaldeformasjon av yttersiden av traversen på 308 mm, noe som er helt akseptabel i følge Omega Elkraft (84).

10.4.3 VIND PÅ IS

Dette lasttilfellet viste seg å være det som gikk hardest utover vangene, her måtte vangene økes til 70 mm for de to nederste seksjonene og 60 mm for den nest øverste seksjonen for å holde mot knekking. Den øverste seksjonen kunne fortsatt være på 50 mm i vangene.



FIGUR 79: SPENNINGSPLOT VIND PÅ IS

Fra figuren ovenfor kan man se at det er høye spenninger i vangene og i gitteret øverst på masten. Det er også høye spenninger under det ene spiret i traversen.

10.5 RESULTATER MED KOMMENTAR TIL LASTTILFELLENE

Kjøringene av masten førte til at dimensjonene ble satt til:

TABELL 36: RESULTAT FOR MASTEN

	Vanger	Gitter
Seksjon 1	70 mm	20 mm
Seksjon 2	70 mm	20 mm
Seksjon 3	60 mm	20 mm
Seksjon 4	50 mm	25 mm

TABELL 37: RESULTAT FOR TRAVERSEN

Gurter	Travers staver
40 mm	32 mm

Ved disse dimensjonene oppstår det ikke knekking uansett hvilket lasttilfelle som kjøres, når man ser bort fra de høye lokale spenningene for oppkoblingene av V-kjedene i traversen. Det var heller ikke flyting i masten bortsett fra på oppkoblingspunktene til V-kjeden.

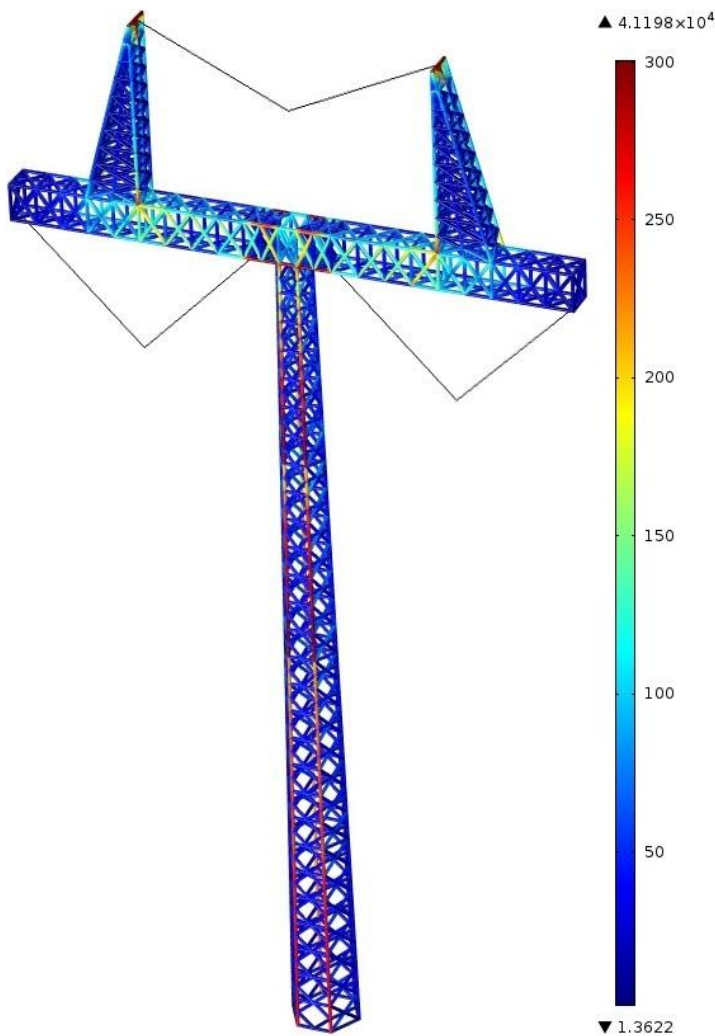
TABELL 38: SPENNINGER I MASTEN MED DEN FERDIGE MASTEN, ALLE VERDIER ER I MPA.

	Skjev islast	Linebrudd	Vind på is	Maks tillatt knekkspenning
Maks spenning vange	338,4	79	332,4	387
Maks spenning gitter 1	73,6	57,3	87,7	103
Maks spenning gitter 2	81,8	117	92,5	118
Maks spenning gitter 3	103,3	89,4	109,1	136
Maks spenning gitter 4	100,1	170,2	107,3	156
Maks spenning gurt	332,4	126	127,2	339
Maks spenning gitter i traversen	244,4	184	174	246
Maks spenning spirvange	282,8	73,2	154,9	368
Maks spenning spirgitter	192,5	76,3	188,5	201

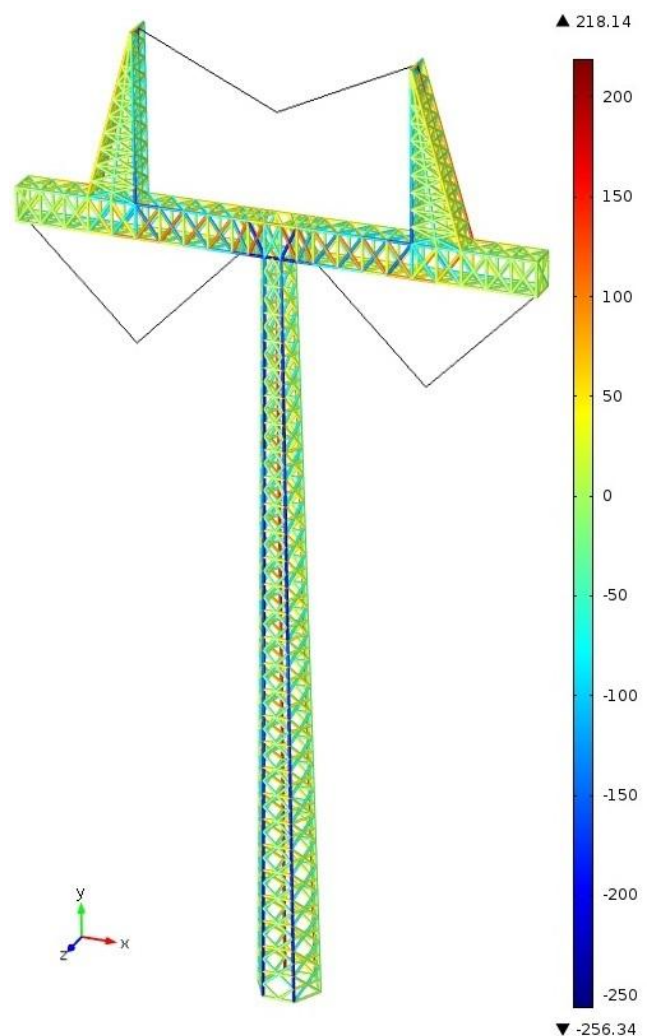
Knekkspenninger funnet ved hjelp av vedlegg 7 og vedlegg 15 E. For flere verdier se vedlegg 9.

Toppen av spirene og midtdelen av traversen er tatt ut av beregningene siden det oppstår høye konsentrasjoner av spenninger der, da det ikke er satt på plater som fordeler kreftene godt nok til traversen fra V-kjedene.

10.5.1 SKJEV ISLAST



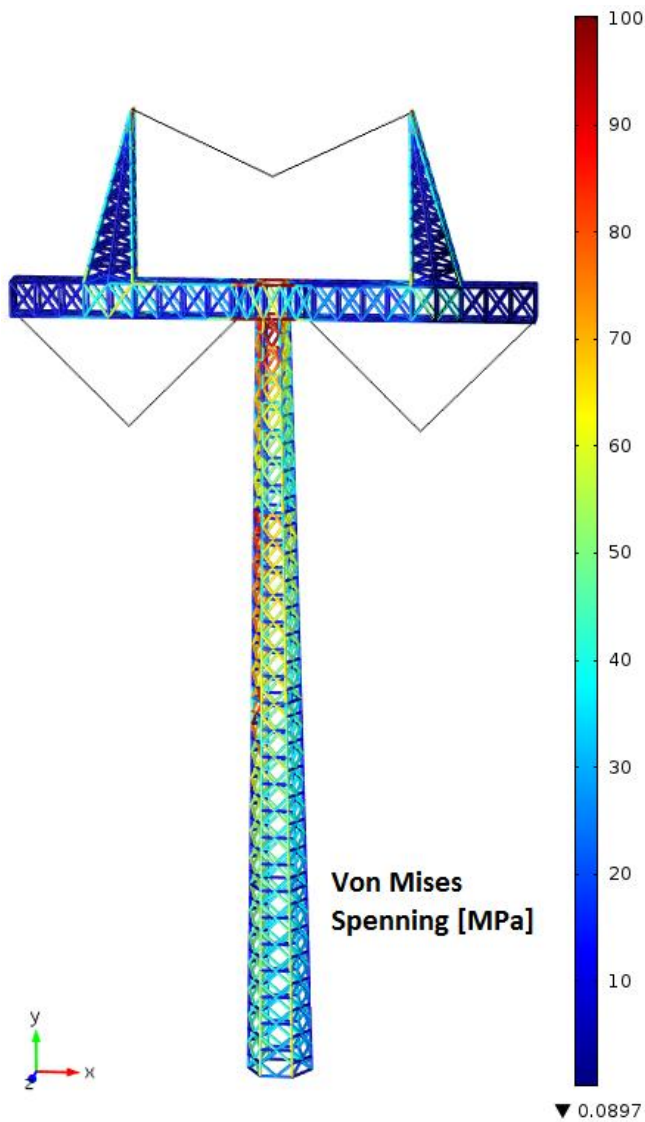
FIGUR 80: SPENNINGER I MASTEN VED SKJEV ISLAST



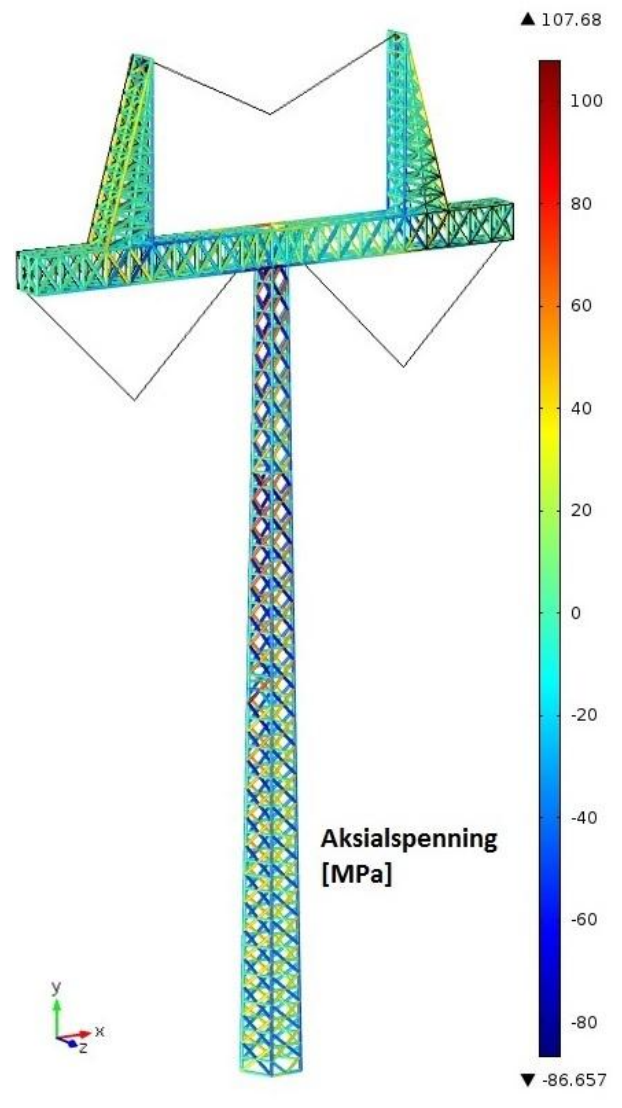
FIGUR 81: AKSIALSPENNING VED SKJEV ISLAST

Man kan se at det er trykk i de to fremste vangene, dette kommer av at alle linekreftene drar masten framover. Man kan også se at det er litt høye trykkspenninger nederst på innsiden av spirene. Dette er naturlig siden masten lener seg over mot denne siden på grunn av kraften i V-kjedet som er i lineretningen og vertikalt nedover. Aksialspenningene ser greie ut.

10.5.2 LINEBRUDD YTTERFASE



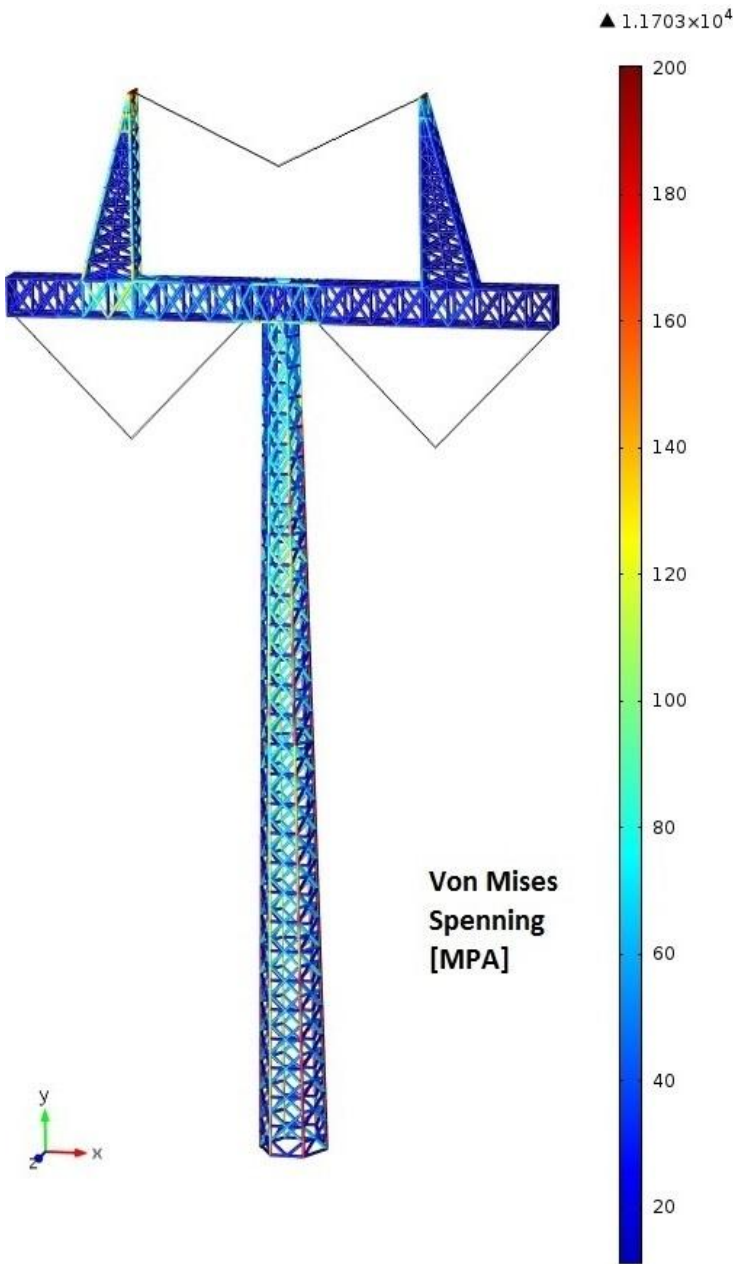
FIGUR 82: SPENNINGER I MASTEN VED LINEBRUDD



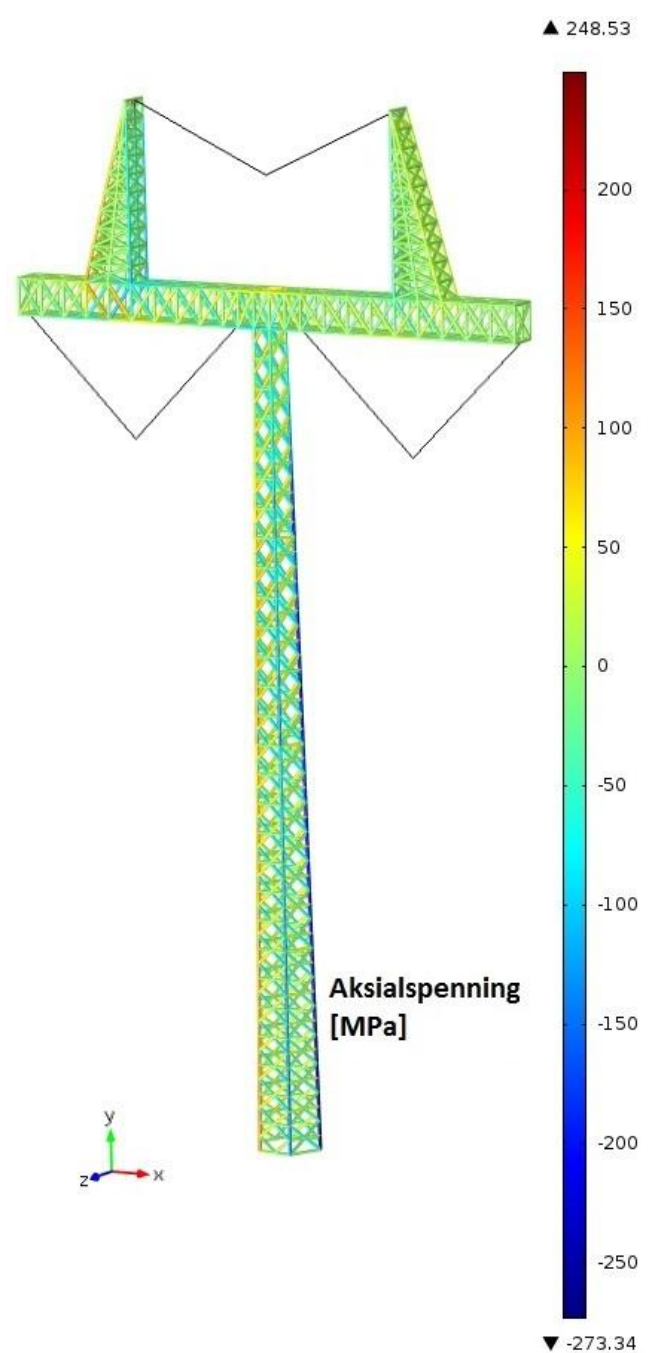
FIGUR 83: AKSIALSPENNING VED LINEBRUDD

Her vises spenningskonsentrasjonene i gitteret til den øverste seksjonen. Dette kommer av at masten vil vri seg på grunn av linebruddet som gir en kraft helt ytterst på traversen som gir et stort moment inn mot toppen av seksjonene. Bortsett fra dette skjer det ikke stort i masten. Ved aksialspenning så forsvinner de store verdiene og konstruksjonen er godt innenfor med tanke på knekking.

10.5.3 VIND PÅ IS



FIGUR 84: SPENNING VED VIND PÅ IS



FIGUR 85: AKSIALSPENNING VED VIND PÅ IS

Det er høye spenninger i noen av vangene og i gitteret øverst på masten. Det er også høye spenninger under det ene spiret i traversen.

Dette gir mening siden all vindkraften går mot den ene siden med dette spiret. Dette fører til at traversen bøyer seg over til denne siden og at det blir høyere spenninger på denne siden enn på den andre siden av masten fordi vertikalkreftene også virker til sammen med vindkreftene. Aksialspenningene ser greie ut.

Utbøyningene er mindre enn før dimensjonene ble økt.

Ferdig mast

Etter at masten var ferdig dimensjonert ble det kjørt med lasttilfellene linebrudd og vind på is. Disse ga større krefter enn ved skjev islast. Derfor måtte beregninger for sveiser, bolter og platetykkelser gjøres om igjen.

Beregninger av ferdig resultat for sveiser, bolter og platetykkelser kan sees i vedlegg 15 D. Gjøres som for skjev islast i vedlegg 6, men med de høyeste belastende kreftene fra vedlegg 15 F og de nye dimensjonene på masten.

TABELL 39: RESULTATER FOR SEKSJONENE

	Seksjon 1	Seksjon 2	Seksjon 3	Seksjon 4
Bolter	M36	M36	M36	M36
a-mål sveis gitter	4 mm	4 mm	4 mm	3 mm
a-mål sveis vanger	6 mm	6 mm	6 mm	6 mm
Platetykkelse	35 mm	35 mm	35 mm	35 mm

TABELL 40: RESULTAT FOR TRAVERSEN

a-mål sveis for hele traversen	7 mm
--------------------------------	------

- Bolter er M36 for hele masten, disse holder i bunnen der kreftene er størst og vil holde hele veien opp i masten.
- Sveis på gitteret for alle seksjonene ble dimensjonert etter den høyeste spenningen som ble funnet for gitteret. Dermed ble det et a-mål på 4 mm for de tre nederste seksjonene og 3 mm på den øverste seksjonen. Dette på grunn av at tverrsnittsarealet for sveisen i gitteret, ble større ved samme a-mål på grunn av større omkrets på gitterstaven.
- Sveis på vanger ble dimensjonert til 6 mm for den nederste seksjonen og siden kreftene er størst der vil 6 mm mest sannsynlig være tilstrekkelig lengre opp i masten selv om man går ned til 60 mm vange for seksjon 3 og 50 mm vange for seksjon 4.
- Platetykkelsen settes til 35 mm siden det ble det for den nederste seksjonen, men antakeligvis kan man gå ned til 30 mm og kanskje 25 mm i den øverste seksjonen. Siden kreftene i vangen går nedover når man beveger seg oppover i masten.
- Sveisen i traversen ble dimensjonert etter den verste spenningen når man tar ut spenningstoppene i traversen og da vil 7 mm a-mål holde for hele traversen.

10.6 EGENFREKVENS

Her nevnes problematikken rundt egenfrekvens, det går ikke i dybden på hvordan det vil påvirke masten.

Egenfrekvensen er den eller de frekvensene et system svinger med når det har fått en svingebevegelse og så overlates til seg selv. Den er bestemt av massen til legemet som svinger og kreftene som trekker den tilbake mot likevektsstillingen.(73)

Hvis systemet blir påvirket av en periodisk kraft med samme frekvens som systemet får man resonans. Da vil det oppstå sterke svingninger og kan forårsake sammenbrudd om svingningene går over hva materialet tåler. Et eksempel på dette kan være at en gruppe mennesker marsjerer i takt over en bro og takten svarer til egenfrekvensen til broen, den kan da kollapse. Det har også skjedd at broer har kollapset på grunn av frekvensen til vind.(74)



FIGUR 86: TACOMA NARROW BRIDGE I WASHINGTON KOLLAPSET I 1940, TROLIG PÅ GRUNN AV RESONANS SKAPT AV VIND. (72)

I denne oppgaven er faren at bestemte vindstyrker skal komme i slike svingninger at høyspentmasten kollapser. Derfor kan det være viktig å få sjekket hva egenfrekvensen er og om det er noen fare ved sterk vind.

Egenfrekvensene fra COMSOL foreligger nedenfor, denne oppgaven inneholder ikke noen analyse av disse tallene, men det anbefales å undersøke dette nærmere i videre arbeid.

TABELL 41: EGENFREKVENSER I MASTEN

Frekvens [Hz]
0,4785
0,47643
0,48898
0,85132
0,95402
1,0647

11. VEDLIKEHOLD OG RESIRKULERING

11.1 VEDLIKEHOLD

En høyspenningmast skal ikke trenge mye vedlikehold. Om det ikke skjer noe uforutsett som ras, knekking av mast eller sliting av line så blir det ikke gjort noe særlig vedlikehold. I blant i sammenheng med inspeksjon av kraftledninger blir master også inspisert. Det vanlige er å bruke helikopter, men en montør kan også klatre opp i masten for å undersøke. Det som blir sjekket er liner, armatur og isolatorer. Dette blir reparert ved behov. Om overflaten i masten har blitt skadet, kan det sprayes sink på. Stramming av bolter og skruer kan bli utført. (84)

11.2 RESIRKULERING

En høyspentmast blir beregnet til å ha lang levetid, Omega Elkraft opererer generelt med en levetid på 25-50 år, men det finnes også eksempler på master som har blitt brukt i over 80 år.

Stål er resirkulerbart og kan brukes om igjen mange ganger uten å miste sine egenskaper. Se tabell 42 for resirkuleringsgrad for stoffene i SB500 stålet.

TABELL 42: RESIRKULERINGSGRAD TIL GRUNNSTOFFENE I SB500 STÅL(53)

Grunnstoff	Resirkuleringsgrad
C, karbon	-
Si, silisium	-
Mn, magnesium	50 % >
Fe, jern	50 % >

Når varmgalvanisert stål resirkuleres blir sinken brent av og da kan sinken resirkuleres i tillegg. Sinkrester kan brukes igjen i sinkbadet, og sinkasken kan brukes i annen industri. I Europa blir 93 % av sinken fra varmgalvanisert stål resirkulert(54).

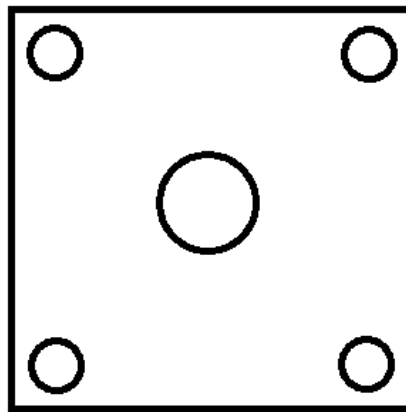
12. PRODUKSJON, MONTERING OG KOSTNADSKALKYLE

12.1 PRODUKSJON

Produksjonen av masten skjer hos Brødrene Berntsen AS, som er Norges ledende produsent og leverandør av galvanisert linjemateriell og stålkonstruksjoner til energinettet siden 1916.(55)

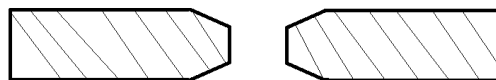
12.1.1 PLATER

Platene kappes med en plasmakutter i de gitte dimensjonene fra arbeidstegningene, se vedlegg 4. Hull for skruene og vangen borres ut.



FIGUR 87: PLATE MED HULL

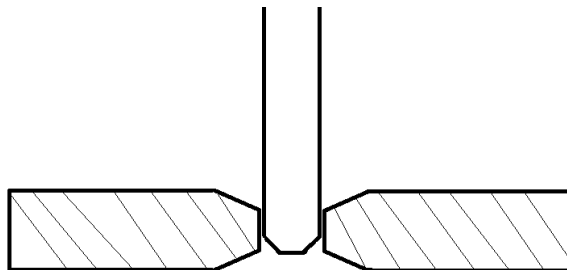
En skråning med 45° vinkel freses ut for vangen, dette gjøres i toppen av platen og i bunnen. Hullet for vangen er 2 mm større i diameteren i forhold til vangediameteren dette for å lette montering og at det gir litt bedre sveis. Skråningene er laget med hensyn på sveisingen av vangen til platen. Dette gjøres slik på grunn av erfaringer Omega Elkraft har gjort seg. Boltehullene har 2 mm større diameter enn boltene.



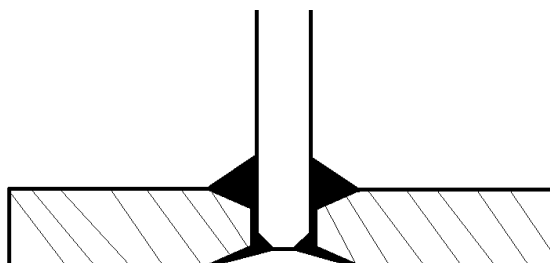
FIGUR 88: PLATE MED FREST HULL

Hullbildet i de platene som skal skrus sammen skal selvfølgelig stemme overens.

12.1.2 SVEISING AV VANGER OG PLATER



FIGUR 89: PLATE OG VANGE FØR SVEISING



FIGUR 90: PLATE OG VANGE ETTER SVEIS

Platene sveises fra over og undersiden med dekk-gassveising. Dette gjøres ved at vangene legges på en rulle og snurres rundt mens platen sveises på fra begge sider. Vangene er noe avrundet i endene for å få en bedre sveis. Man kan betrakte dette som to kilsveiser, en på oversiden av platen og en på undersiden av platen. I tillegg så blir det litt sveis i mellom. (84)

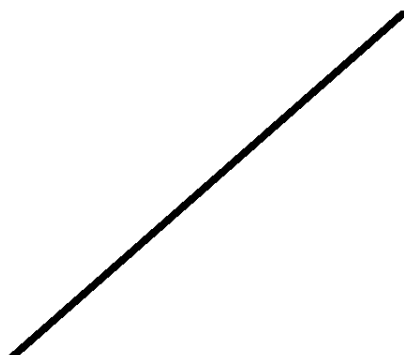
Når hele seksjonen er sveist sammen blir det overflatebehandlet.



FIGUR 91: SVEISING AV SEKSJON (BILDE: OMEGA ELKRAFT)

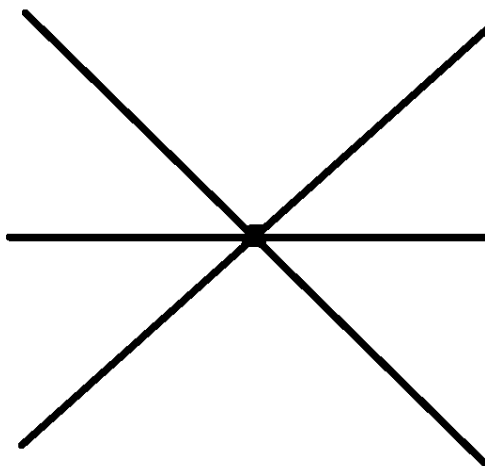
12.1.3 KAPPING OG SVEISING AV GITTERSTAVER

Gitteret kappes til de dimensjonene som er spesifisert ut i fra arbeidstegningene, se vedlegg 2 for eksempel på dette for nederste seksjon i masten.



FIGUR 92: DIAGONAL STAV

Diagonalene kappes i maskin og holdes fast for å få kappet vinklene som er inn mot vangen og mot det horisontale gitteret. De horisontale stavene kappes også i samme maskin.

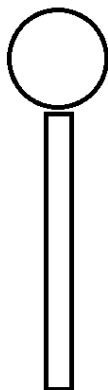


FIGUR 93: GITTERKRYSS

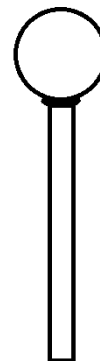
Gitteret sveises sammen til kryss før de sveises til vangen. På en sekskant vil det være tre og tre kryss som har like mål. Da annen hver side er forskyvet med en halv "rute" i forhold til den ved siden av. Sveiserne kontrollerer selv sveisingen, tar sveiseprøver, tar bort slagg og pusser etter de har sveist ferdig. Full gjennomsvøising blir ikke oppnådd på alle steder, men det ligger tett opp mot dette.

Når alle kryssene for en seksjon er laget så blir det punktsveist og sveist til vangene.

Når det skal sveises gitter inntil vangen så vil det bli seende ut som dette ovenfra:



FIGUR 94: VANGE OG GITTER UTEN SVEIS



FIGUR 95: VANGE OG GITTER MED SVEIS



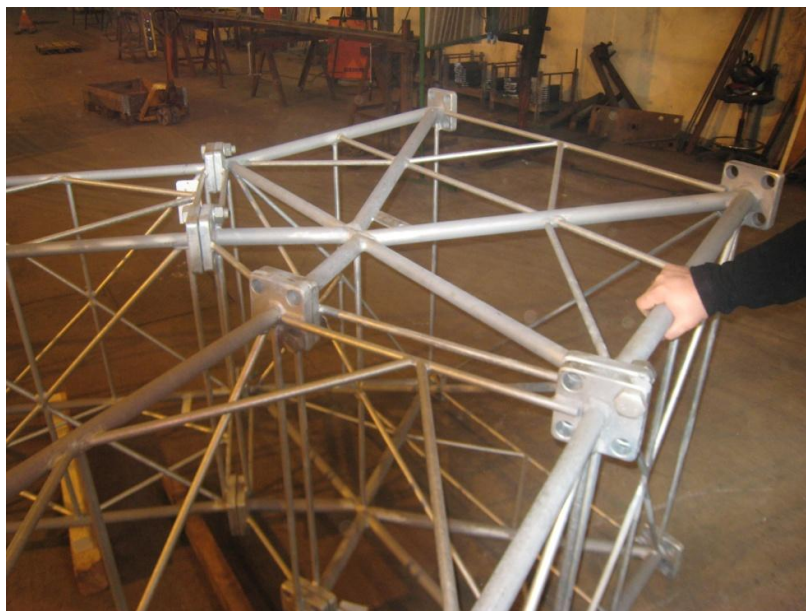
FIGUR 96: MASTPRODUKSJON (BILDE: OMEGA ELKRAFT)



FIGUR 97: GITTER MOT GITTER VED SVEISING

12.1.4 TRAVERSEN

Traversen lages i fem deler, de to spirene og tre deler på langs av traversen. Oppdelingen gjøres slik for blant annet å kunne gjøre overflatebehandlingen. Mellom de forskjellige oppdelingene blir det bolteforbindelser med plater. Sveisingen skjer etter samme måte som for resten av masten.



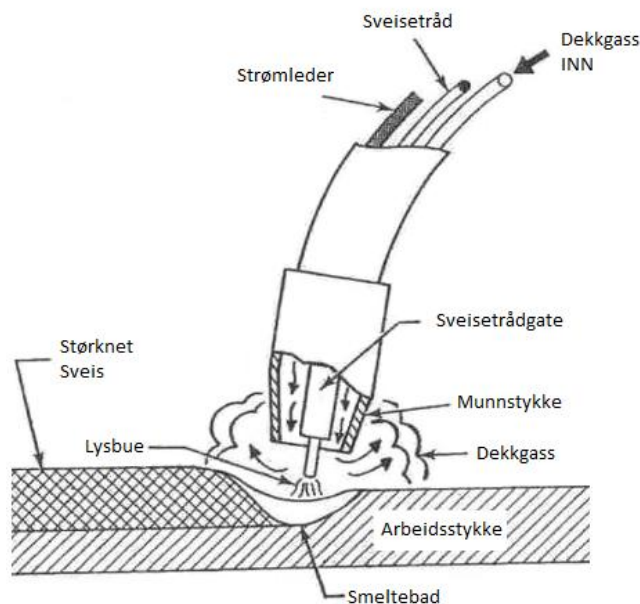
FIGUR 98: OPPDELING AV EN TRAVERS (BILDE: OMEGA ELKRAFT)

12.1.5 OM SVEISEMETODEN

Det brukes dekkgassveising MIG (Metal Inert Gas) for å sveise sammen gitter og vanger.(57)

En lysbue danner seg mellom arbeidsstykket og sveistråden. Når man sveiser vil lysbuen smelte sveistråden hele tiden som den blir matet ut i sveisebadet. Sveistråden og området som det sveises på er beskyttet av dekkgassen fra sveisepistolen. Når det MIG-sveises så brukes det DC-strøm (likestrøm) med sveistråden som positiv polaritet. Å bruke sveistråd med negativ polaritet brukes sjelden på grunn av dårlig overføring av smeltet metall fra sveistråden til arbeidsstykket. Sveisestrøm mellom 50 ampere og opp til over 600 ampere er ofte brukt på sveisespenninger på 15 til 32 volt. En stabil lysbue oppretthodes ved bruk av konstant potensiell spenning og en konstant hastighet på matingen av sveistråden.

Utviklingen av MIG-sveising har gjort at det kan brukes på alle "viktige" metaller som stål, aluminium, rustfritt stål, kobber med mer. Materialer med tykkelser over 0,76 mm kan sveises i alle posisjoner, flatt, vertikalt og over hodet.



FIGUR 99: SVEISEBESKRIVELSE MIG(56)

"Munnstykket har en diameter på 30 mm, og tråden stikker 10-15 mm ut fra munnstykket" (79)

12.2 OVERFLATEBEHANDLING

Overflatebehandlingen som er vanlig å utføre på stålmaster er varmforsinking, også kalt varmgalvanisering. (59)

Varmforsinking er en form for galvanisering og er prosessen med å dekke jern, stål eller aluminium med et tynt sinklag. Dette gjøres ved å dyppe metallet i et smeltebad med flytende sink som holder en temperatur på rundt 460°C. I forkant av dyppingen skal konstruksjonen om nødvendig være tilrettelagt med dreneringshull og utformingen bør være slik at dyppingen kan gjøres enklest mulig. Når man utsetter det ferdig dyppede metallet for luft, så reagerer sinken (Zn) med oksygen (O_2) og danner sinkoksid (ZnO). Dette reagerer videre med karbondioksid (CO_2) og danner ($ZnCO_3$) som vanligvis gir en grålig farge. Dette gir et ganske sterkt materiale som stopper videre korrosjon i mange tilfeller og beskytter det underliggende metallet mot omgivelsene.

Stål korroderer omtrent 200 ganger raskere enn sink. Sink korroderer med en hastighet på mellom 0,5 og 5 mikrometer per år avhengig av omgivelsene. Galvanisert stål er brukt der man trenger å ha materialer som er resistent mot korrosjon, og de kan gjenkjennes ved at det har et krystalliseringsmønster på overflaten. Ved skader på overflaten vil sinken gjøre at man får en katodisk beskyttelse av stålet i overflaten. Dette gjør da at små skader "reparerer" seg selv.



FIGUR 100: SINKOVERFLATE (58)

Galvanisert stål kan sveises, dette er derimot ikke å anbefale blant annet på grunn av sink-avgassene og nedsatt sveisbarhet. I tillegg får man et område etter sveising som ikke er galvanisert, her må man da ty til en annen form for overflatebehandling. Galvanisert stål brukes med omgivelsestemperaturer opp til 200°C. Bruk ved temperaturer over dette resulterer i at sinken skaller av. Elektrogalvanisert platestål brukes ofte i bilbransjen for å øke resistansen mot korrosjon. Dette er derimot en helt annen prosess enn varmforsinking. (59)

Prosess

Proessen med varmforsinking resulterer i en metallurgisk binding mellom sink og stål med en rekke distinkte jernsinklegeringer. Det ferdig belagte stålet kan brukes på samme måte som om det var ubelagt.

Den typiske prosessen ved varmforsinking (64):

- Stålet vaskes med en kaustisk soda. Dette fjerner olje/fett, smuss og maling.
- Kaustisk soda skylles av.
- Stålet blir dypet i et surt bad (syre) for å fjerne glødeskall.
- Syren blir rensset av.
- En fluks, ofte sinkammoniumklorid påføres stålet og hemmer oksidasjon av den rengjorte overflaten ved utsettelse for luft. Fluksen tørker på stålet, og hjelper til i prosessen med å få den flytende sinken til å sette seg til stålet.
- Stålet dypes i flytende sink og holdes der til stålet holder samme temperatur som badet.
- Stålet kjøles ned i en spesialtank som reduserer temperaturen og hindrer uønskede reaksjoner fra det nylagte sinkbelegget med atmosfæren.

Bly (Pb) blir ofte tilsatt sinkbadet for å øke flytbarheten til sinken, og gir da bedre dreneringsegenskaper når den overfløydige sinken drypper av. I tillegg hindrer det flytende slagg. Dette gjør resirkulering av slagg lettere samt at det beskytter kjelen for ujevn varmfordeling fra brennerne. Bly blir enten tilsatt primært eller via at det brukes brukt sink som inneholder bly fra før.

Noen ganger kan man oppleve at konstruksjoner "slår seg" i etterkant av varmforsinking. Dette fordi spenninger i sveisene utløser seg når det blir varmt altså i sinkbadet. Og når konstruksjonen har blitt kald igjen

så har den "slått seg". Grunnen til at det blir store spenninger i sveisene kan være fordi det er sveist på stag som egentlig er for korte. (84)

Andre moderne teknikker har i stor grad erstattet varmforsinking. Dette inkluderer elektrogalvanisering, som deponerer laget av sink fra en vannløst elektrolytt ved galvanisering, dette danner et tynt og sterkt bånd på utsiden av metallet. Elektrogalvanisering brukes blant annet i bilindustrien da det gir et tynt og jevnt lag som gjør videre overflatebehandling enkel. Men varmforsinking brukes fortsatt den dag i dag på grunn av at det dannes et mye tykkere lag av sink på metallet enn ved for eksempel elektrogalvanisering. Dette laget med sink kan være så mye som opptil 10 ganger tykkere, noe som har veldig mye å si for levetiden. (61), (75)

Retningslinjer for valg av stål opphengingsgods som varmforsinkes ved 450°C (60).

For varmforsinket konstruksjonsstål avhenger sinkbeleggets tykkelse og struktur hovedsaklig av:

- Stålets silisiuminnhold
- Stålets tykkelse
- Stålets overflateruhet
- Dyppetiden i sinkbadet

I alminnelige varmvalsede konstruksjonsstål har særlig stålets innhold av silisium innvirkning på sinkbeleggets struktur og tykkelse. Stålets øvrige legeringselementer forekommer normalt i så små mengder, at de ikke får nevneverdig innflytelse på beleggets oppbygning. (63)

Varmvalset eller glødet stål

Stålet har en sammensetning som er ideell for varmforsinking, når følgende krav til innhold av silisium blir opprettholdt(62):

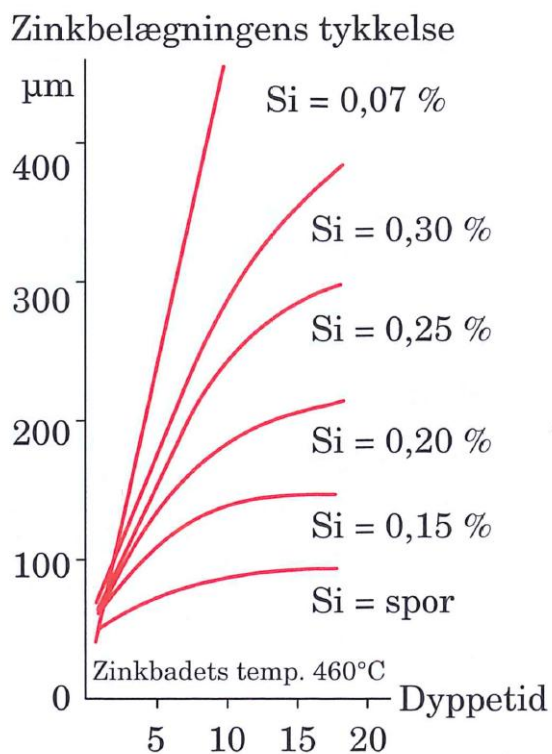
Ubehandlet stål (uten aluminium): $Si < 0,04$ % vekt

Stål behandlet med aluminium: $Si < 0,02$ % vekt

Stål behandlet med silisium (med eller uten aluminium) $0,15$ % vekt $\leq Si \leq 0,35$ % vekt

De to første typene av stål oppnår typisk et sinkbelegg på 60-90 μm og får en glatt og metallisk overflate. Det metalliske utseendet skyldes at sinkbeleggets ytterste del er helt rent. Belegget er relativt robust når det gjelder støt og slag.

Sinktykkelsen som oppnås kan variere ganske mye, men vil typisk ligge innenfor et intervall fra 100-400 μm . Tykkelsen stiger både med silisiuminnholdet og med dyppetiden.



FIGUR 101: SINKBELEGGETS TYKKELSE VED DYPPETID (ANTALL MIN) (60, S.110)

Figuren viser sammenhengen mellom dyppetider og tykkelser på sinklaget for stål med forskjellige silisiuminnhold. Figuren er basert på middelverdier, så det forekommer avvik fra disse verdiene.

Spesifikt for masten

Ut ifra databladet til SB500 stål, vedlegg 12, kan det ses at stålet inneholder 0,35 % Silisium der kan det ses på figur 101 ovenfor at det kan skapes en tykkelse på overkant av 300 μm om det dyppes i 15 minutter.

Stål med Si innhold over 0,35 % kan også varmforsinkes, men tykkelsen på sinken øker veldig hurtig med dyppetiden. Får man et for stort lag med sink på det som varmforsinkes så vil avskalling lettere oppstå, for eksempel ved støt og slag under transport og håndtering.

Standard NS-EN ISO 1461:2009 er grunnlaget for varmgalvaniseringen Omega Elkraft får utført. Den sier at galvaniseringsbadet ikke skal inneholde mer enn 1,5 % av totalvekt av andre stoffer enn sink. Under inspeksjon bør en visuell sjekk av utseende til overflatebehandlingen utføres, og det bør gjøres en test av tykkelsen til sinkbelegget. Et tilfeldig utvalg av alle varmgalvaniserte produkter bør testes.

Ved visuell sjekk fra en avstand på over en meter skal produktet være fritt for knuter, blemmer, røffhet, skarpe punkter som kan føre til skade og områder som ikke har fått belegg på seg. Men hovedmålet med galvanisering er å beskytte stålet, estetiske og dekorative egenskaper er sekundært.(76)(84)

12.3 MONTERING

12.3.1 FUNDAMENTER

Det er i hovedsak tre forskjellige typer fundamentering som brukes. En type fjellfundament og to typer av jordfundamentering. (84)

Fjellfundament

Her borres det med en lang bor først. Fire ganger per fundament, deretter puttes det ned fire helgjengede bolter. Etter dette er gjort kan det støpes rundt dem slik som på bildet under.



FIGUR 102: FUNDAMENTER PÅ FJELL (BILDE: OMEGA ELKRAFT)

En plate skrues fast til boltene, og det blir justert til de er i vater. Det siste glippet under platen forsvinner da det blir brukt ekspanderende mørtel under dem. Masten kan da monteres på fundamentet.

Jordfundament

Metode 1: Støping

Det graves omtrent to meter ned i jorden i det området som masten skal bygges. Det legges armeringsjern på bunnen av hullet. Det armeres også sirkulært oppover i fire papprør. I hvert papprør er det fire helgjengede bolter. Når all armeringen er laget så støpes dette med de fire helgjengede boltene i en og samme prosess. Armeringen som ble gjort i bunn vil i etterkant av støping være ca 40 cm tykk betong. Armeringen kan sees på figur 103.



FIGUR 103: JORDFUNDAMENT (BILDE: OMEGA ELKRAFT)

Når dette er gjort fylles det på med jord, og det eneste som stikker over bakken er litt av de fire betongsylindrene og de fire helgjengede boltene som er på hver av sylindrene. En plate blir skrudd fast på toppen av hver sylinder på samme måte som ved fjellfundament. Da kan masten monteres.

Metode 2: Nedgraving

Den nederste seksjonen boltes fast til H-bjelker. Massive trestolper boltes på H-bjelkene, disse kan gjerne være stolper fra en mast som har stått der tidligere. Det stålet som er under bakkenivå lakkres for å unngå korrosjon, særlig i området mellom jord og luft. Det fylles på med jord og monteringen av resten av masten starter.



FIGUR 104: NEDGRAVING (BILDE: OMEGA ELKRAFT)

12.3.2 SEKSJONENE OG TRAVERSEN

Monteringen av masten skjer ute i felten. Monteringen skjer ved hjelp av en kran, et helikopter eller annet løfteutstyr. Seksjonene blir fraktet til et område i nærheten av plassen de skal settes opp. På denne plassen blir alt av komponenter som V-kjeder og annet montert i traversen. Man starter med den nederste seksjonen, den plasseres på fundamentene og skrues fast gjennom platene. Deretter skrues de øvrige seksjonene på, en etter en. Det benyttes ikke forspente bolter, disse tiltrekkes til de sitter. Teknikere på bakken samarbeider med helikopterpiloten eller kranføreren om å få seksjonene plassert på hverandre og å få dem skrudd sammen.

12.3.3 V-KJEDER OG ISOLATORER

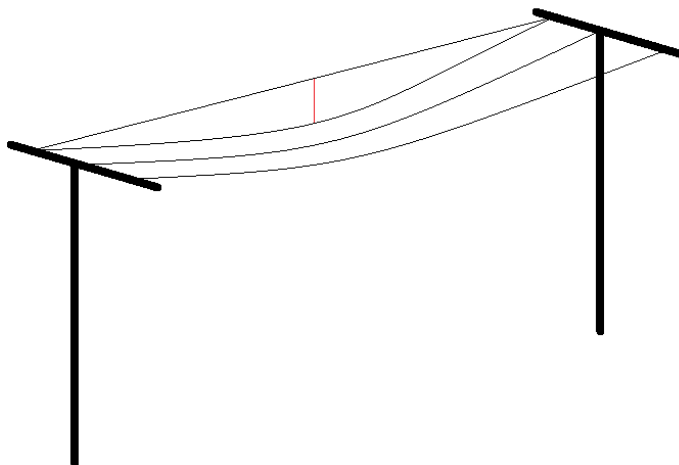
V-kjedene monteres helst på bakken først, på monteringsstedet.

På undersiden av traversen er det sveist plater med en bølge i hver plate. I disse bølgene monteres V-kjeden med isolatorer ved hjelp av en opphengingsbolt med ovalt øye(46). Se vedlegg 14 for tegninger av isolator, og vedlegg 13 for V-kjede.

12.3.4 LINEN

Linen henger i trinser under isolatorkjedene, den justeres til pilhøyden får riktig spenn midt på linene.

Pilhøyde: "Den vertikale avstanden fra den rette linjen mellom en kjedes (eller en lednings) opphengningspunkt og kjedens (ledningens) dypeste punkt" (82)



FIGUR 105: PILHØYDE MARKERT SOM RØD STREK

På forhånd lages det en tabell for hvor mye spenn det skal være ved forskjellige temperaturer. Med spenn så menes det hvor stor strekkspenningen i linen skal være. Den skal verken være for slak eller for stram. For stram gir vibrasjoner, mens slak line gir store svingninger og stort nedheng. Når V-kjeden med alt er montert så kan linen tres og strammes opp til at spennet er likt både foran og bak masten. Kjedene fra V-kjedet skal henge loddrett når linen er strammet opp.

Linen blir vanligvis installert ved at et helikopter med en spesiallaget nål treer en pilotlinje inn i festet under isolatorene i masten. Denne pilotlinen brukes så til å få inn linen som skal brukes. (84)

12.4 KOSTNADSKALKYLE FOR EN PROTOTYPE

Kostnaden for en prototype er summen av delkostnadene for konseptutviklingsarbeidet og delkostnadene for prototyping. Denne total kostnaden blir for å produsere en enhet.

Det lyktes ikke prosjektgruppen å få tak i alle nøyaktige tall for kostnads kalkylen, det er sjeldent en høyspentmast blir laget alene. Kiloprisen for stål på 40-50 kr/kg som Omega Elkraft AS har fra Brødrene Berntsen AS gjelder for produksjon, sammensetning og frakt av komplett mast til område den skal settes opp.

Prisen for helikoptertransport gjelder innen et område på 1000 meter. (E-post: John-Erik Sogn, 29.4.13). Det antas at det er mulig å montere 3 master på en dag. Kostnadene ved montering og el-arbeid er antagelser.

TABELL 43: KOSTNADER VED PRODUKSJON OG MONTASJE AV EN MAST (46), (HANS GRAVERMOEN, BRØDRENE BERNTSEN AS). TIMEANTALLET FOR KONSEPTUTVIKLINGEN ER ET GROVT ESTIMAT. VEKT PÅ MAST ER HENTET UT FRA COMSOL. VEKTEN SOM BRUKES ER FOR STÅLET I MAST OG TRAVERS, PLUSS VEKT AV PLATER OG SKRUER.

I. Konseptutvikling				
	Timer	Kvanta	Pris	Sum, NOK
1. Utredningsarbeid	300	-	650 kr/t	195 000
2. Uvikling, design og beregninger	110	-	650 kr/t	71 500
3. 3D-modellering og FEM-analyse	140	-	650 kr/t	91 000
4. Prosjektrapport	300	-	650 kr/t	195 000
5. Konstruksjonstegninger	30	-	650 kr/t	19 500
SUM, konseptutvikling	880			572 000
II. Prototyping				
Arbeidskostnader				
1. Montering	4		1000 kr/t	4000
2. El-arbeid	4		500 kr/t	2000
4. Helikoptertransport			38 000 kr	38 000
5. Fundamentet med alt			100 000 kr	100 000 kr
Materialer og komponenter:				
1. Stål i seksjoner og travers, produksjon, frakt, skruer og plater inkl.		11 300 kg	50 kr/kg	565 000
2. Armatur		1	30 000 kr	30 000
3. Isolator skåler		108 stk	230 kr/stk	24 840
4. Klemme til toppline		11 liner	3000 kr/pr line (i mast)	33 000
5. Avstandsholder mellom liner		1	400 kr/pr line (antall master)	400
SUM, prototyping				797 240
III. Totalkostnader prototyping				1 369 240

12.5 KOSTNADSKALKYLE VED SERIEPRODUKSJON

Ved serieproduksjon har materialkostnadene størst betydning og kostnadene blir avhengig av antall produserte enheter.

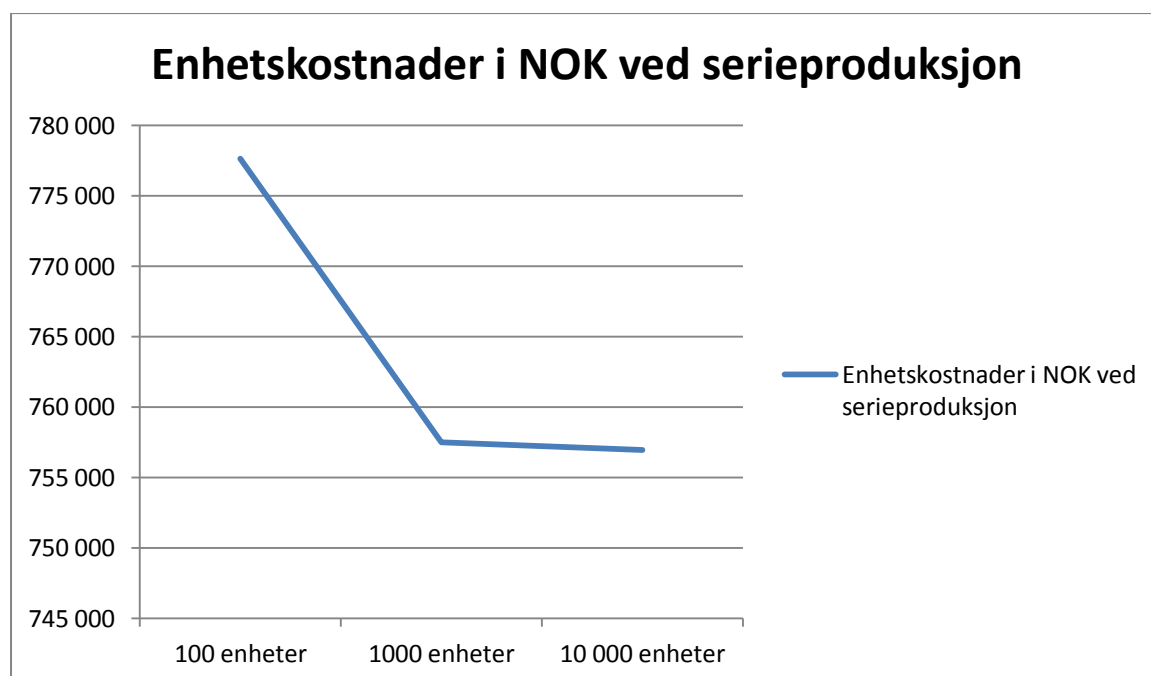
Siden det er antatt at det kan monteres tre master på en dag så blir helikopterkostnadene 38 000 NOK / 3 = 12 667 NOK per mast.

TABELL 44: KOSTNADSKALKYLE FOR SERIEPRODUKSJON

I. Engangskostnader				
	Timer	Kvanta	Pris	Sum, NOK
SUM, konseptutvikling	880		650 kr/time	572 000
SUM, engangskostnader				572 000
II. Løpende kostnader				
Arbeidskostnader				
1. Montering	4		1000 kr/t	4000
2. El-arbeid	4		500 kr/t	2000
4. Helikoptertransport			12 667 kr	12 667
5. Fundamentering med alt			100 000	100 000
Materialer og komponenter:				
1. Stål i seksjoner og travers, produksjon, frakt, skruer og plater inkl.		11 300 kg	50 kr/kg	565 000
2. Armatur		1	30 000 kr	30 000
3. Isolator skåler		108 stk	230 kr/stk	24 840
4. Klemme til toppline		11 liner	3000 kr/pr line (i mast)	33 000
5. Avstandholder mellom liner		1	400 kr/pr line (antall master)	400
SUM, løpende kostnader				771 907

TABELL 45: KOSTNADER VED SERIEPRODUKSJON

Serieproduksjon 100 enheter			
	Antall	Pris, NOK	Sum, NOK
Engangskostnader	1	572 000	572 000
Løpende kostnader	100	771 907	77 190 700
Totale kostnader			77 762 700
Enhetskostnad			777 627
Serieproduksjon 1000 enheter			
	Antall	Pris, NOK	Sum, NOK
Engangskostnader	1	572 000	572 000
Løpende kostnader	1000	771 907	771 907 000
Totale kostnader			772 479 000
Enhetskostnad			772 479
Serieproduksjon 10 000 enheter			
	Antall	Pris, NOK	Sum, NOK
Engangskostnader	1	572 000	572 000
Løpende kostnader	10 000	771 907	7 719 070 000
Totale kostnader			7 719 642 000
Enhetskostnad			771 964



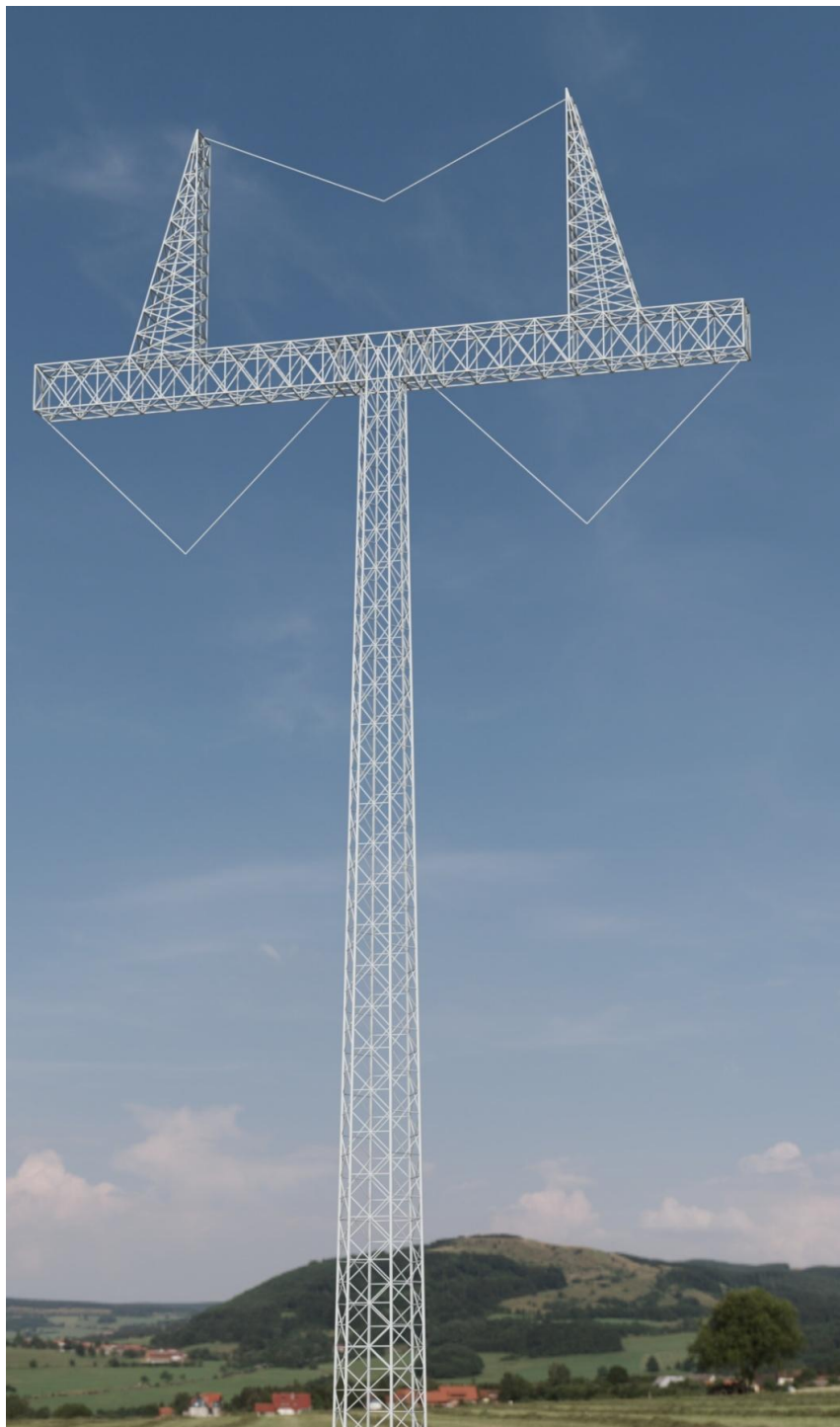
FIGUR 106: ENHETSKOSTNADER VED SERIEPRODUKSJON. ENHETSKOSTNADER GÅR MOT DE LØPENDE KOSTNADENE NÅR ANTALL ENHETER ØKER

12.6 KONKURRENTANALYSE

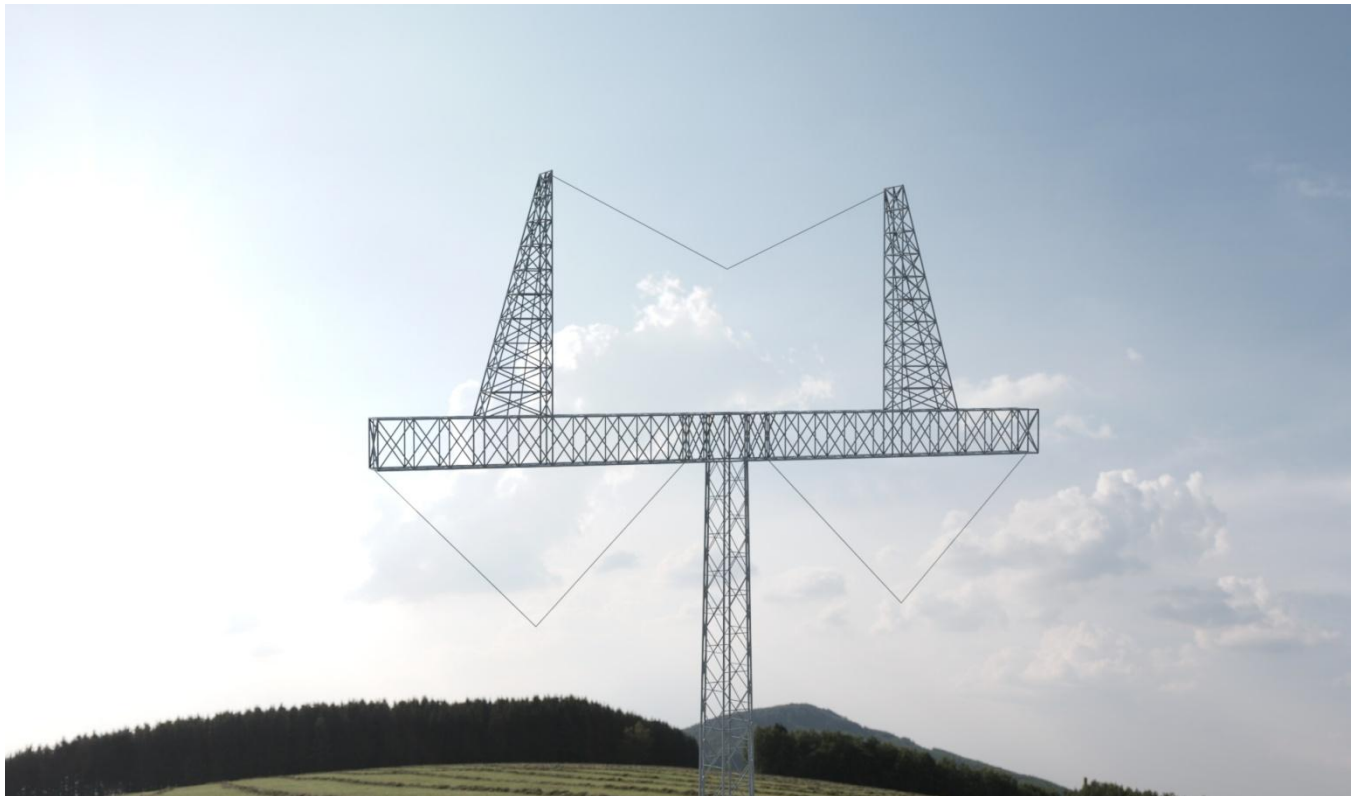
Den konkurrerende masten som er nærmest RSB-masten i denne oppgaven er en vinkelstålmast på 420 kV. Opplysninger gitt av Jarle Eide i Lyse Infra AS sier at prisen for en vinkelstålmast ferdig fundamentert og montert kommer på 1,7 millioner NOK totalt. Velges RSB-mast isteden kan det spares nærmere en million NOK ved serieproduksjon, mens ved produksjon av kun en mast spares det rundt 300-400 000 NOK. Med alle de gode egenskapene til RSB-mast og samtidig en lavere kostnad så må det sies at RSB-master kan ha potensial til å få et godt konkurransefortrinn.

13. MARKEDSPRESENTASJON

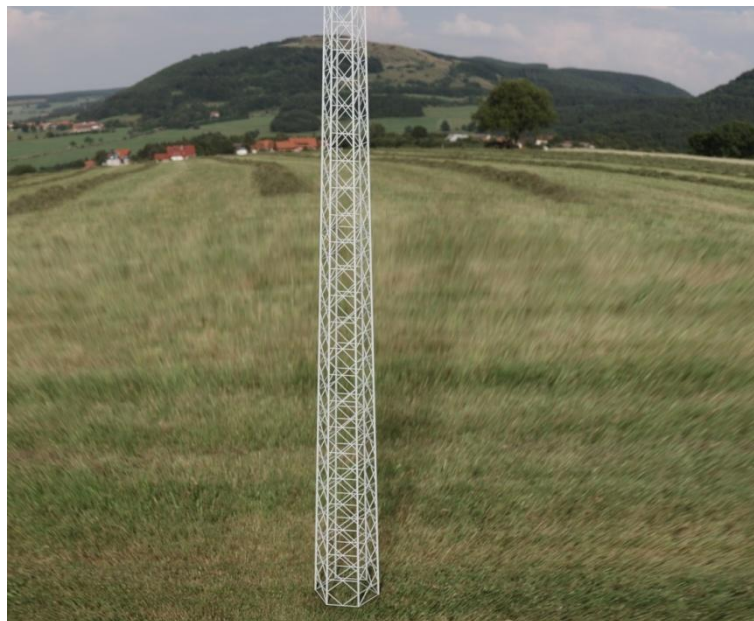
13.1 RENDERTE FREMSTILLINGER



FIGUR 107: RENDERT FREMSTILLING AV RSB-MASTEN.

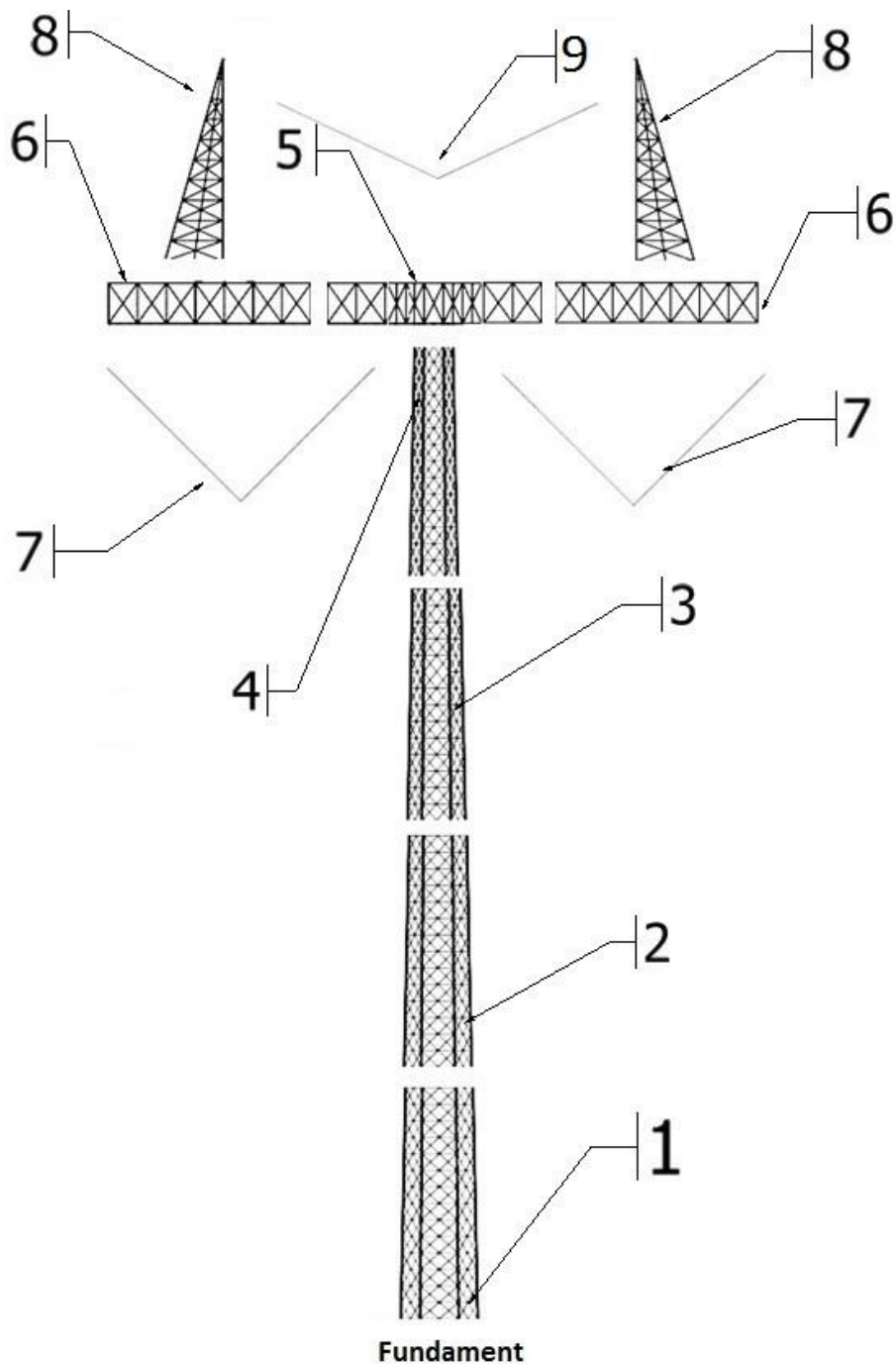


FIGUR 108: RENDERT FREMSTILLING AV RSB-MASTEN, MED FOKUS PÅ TRAVERSEN



FIGUR 109: RENDERT FREMSTILLING AV RSB-MASTEN, FOKUS PÅ NEDRE SEKSJONER

13.2 TEKNISKE BESKRIVELSER



FIGUR 110: EKSPLOSJONSTEGNING AV RSB-MAST.

- 1) Seksjon 1:** Seksjonen blir fraktet dit den skal monteres. Seksjonen blir skrudd fast i fundamentet i alle hjørneplatene.
- 2) Seksjon 2:** Seksjonen blir fraktet dit den skal monteres. Seksjonen blir plassert på og skrudd fast i 1) i alle hjørneplatene.
- 3) Seksjon 3:** Seksjonen blir fraktet dit den skal monteres. Seksjonen blir plassert og skrudd fast i 2) i alle hjørneplatene.
- 4) Seksjon 4:** Seksjonen blir fraktet dit den skal monteres. Seksjonen blir plassert på og skrudd fast i 3) i alle hjørneplatene.
- 5) Midtdel av travers:** Midtdelen blir fraktet dit den skal monteres. Den blir plassert på og skrudd fast i 4) i alle platene.
- 6) Ytterdel av travers:** Ytterdelene blir fraktet dit de skal monteres.
- 7) Nedre V-kjede:** De nedre V-kjedene monteres på 6). 6) blir satt på hver side av 5) og skrudd sammen i platene.
- 8) Spir:** Spirene blir fraktet dit de skal monteres. De blir så skrudd sammen til 6) på sine respektive plasseringer.
- 9) Øvre V-kjede:** Det øvre V-kjedet monteres på 8).

13.3 VAREMERKE OG EMBALLASJE

RSB er Omega Elkraft sitt varemerke, og de har en logo som brukes i alle sammenhenger med RSB-master. Det er en enkel logo som kun består av bokstavene RSB – Round Steel Bar.



FIGUR 111: RSB-LOGO. (BILDE: OMEGA ELKRAFT).

Produktet blir pakket i beskyttende emballasje og fraktet til monteringssted.

14. DISKUSJON OG PROSESSEVALVERING

14.1 FORBEDRINGSPOTENSIAL

Utviklingsarbeidet i oppgaven har hatt god progresjon, den eneste hindringen som er verdt å nevne er at det tok litt tid før det ble gitt tilgang til korrekt FEM-analyse program ved UMB. Erfaringene fra forprosjektet har kommet godt med i arbeidet, dette gjorde at prosjektgjennomføringen gikk bra. Det ble brukt mye tid på å få laget en modell av masten, og å lære seg COMSOL. Dette var nødvendig for å få den modellen som krevdes. Det ble også brukt mye tid på å sette seg inn i forskjellige emner rundt temaet. Det var mye nytt i denne oppgaven, og gruppen måtte gjennom en læringsprosess innen flere emner for å kunne finne en god løsning.

Under sammenligningen av de forskjellige eksisterende løsningene ble det ikke gått veldig i dybden, og vi støttet oss til mye informasjon direkte fra Omega Elkraft AS. Det følte ikke nødvendig å gjøre mer på dette.

På grunn av oppdraget som ble gitt var det ting som ble valgt uten å analysere det noe nærmere. Det ble for eksempel ikke undersøkt om andre materialer enn SB500 stål kunne vært hensiktsmessig å bruke. Det ble heller ikke sammenlignet forskjellige traversalternativer opp mot hverandre. Man kunne gått mer i dybden her, men på grunn av dårlig tid var det greit å gå for noe som lignet på det som tidligere har blitt gjort. Oppdragsgiver har lang erfaring rundt emnet så det følte ikke nødvendig å undersøke dette nærmere.

Det kunne nok blitt gjort flere grunnleggende fagverksberegninger i masten for å få et mer helhetlig bilde av masten. Dette kunne blitt svært tidkrevende på grunn av antall staver i masten og det ble ikke sett på som nødvendig for å dimensjonere konstruksjonen av oss eller oppdragsgiver.

De fleste av beregningene tok utgangspunkt fra standarder for stål eller luftledninger. Men man kunne sikkert brukt enda mer materiell fra standarder, men dette ble ikke sett på som nødvendig fra veileder eller oppdragsgiver.

Under konseptanalysen ble det sett på flere alternativer for forskjellige elementer i masten. Her kunne det nok blitt mer tid på å være nyskapende med nye løsninger.

14.2 DESIGN-, PRODUKSJONS- OG KOSTNADSREVISJON

Det kunne ha blitt sett mer på traversen, gjerne for å få den til å bli mindre fremtredende i masten. Men på grunn av isolasjonsavstandene var dette vanskelig.

I dimensjonerende beregninger ble en Von Mises-spenning brukt, det kunne ha blitt dimensjonert etter aksialspenning som er lavere. Dette kunne ha ført til reduserte diametre for stålet til masten. Det er allikevel bra å være på konservativ side for å sikre at masten kan holde under alle belastninger.

Flere nøyaktige tall kunne ha blitt innhentet under kostnadsanalysen, men det virker som om tallene viser et realistisk bilde av kostnadene.

Seksjonene var det som det ble lagt mest vekt på. Traversen ble ikke ferdig dimensjonert med plater for V-kjedene, så det er uvisst hvordan spenningene da vil fordele seg i traversen. Ut i fra COMSOL modellen ser det allikevel ut som de resultatene vi fikk var realistiske.

15. KONKLUSJON OG ANBEFALINGER

15.1 KONKLUSJON

En sekskantet RSB-mast til bruk ved spenninger på 420 kV har blitt utviklet, både seksjoner og travers har blitt designet. Mastekonstruksjonen som ble valgt består av fire seksjoner, den har en bredde i bunn på 2 meter og bredde i topp er på 1 meter. Breddene går innover med 250 mm per seksjon oppover i masten. Masten er 30,3 meter høy med travers. Traversen er 16 meter bred, og 6,3 meter høy fra bunn til topp av spir. Totalvekten til masten i sin helhet er ca 11,1 tonn.

Prosjektet har resultert i følgende dimensjoner:

TABELL 46: RESULTAT FOR MASTEN

Seksjon	Vangediameter	Gitterdiameter	Bolter	A-mål, sveis gitter	A-mål, sveis vanger	Platetykkelse
Seksjon 1	70 mm	20 mm	M36	4 mm	6 mm	35 mm
Seksjon 2	70 mm	20 mm	M36	4 mm	6 mm	35 mm
Seksjon 3	60 mm	20 mm	M36	4 mm	6 mm	35 mm
Seksjon 4	50 mm	25 mm	M36	3 mm	6 mm	35 mm

TABELL 47: RESULTAT FOR TRAVERSEN

Gurter	Traversstaver/traversgitter	A-mål, sveis
40 mm	32 mm	7 mm

Det konkluderes med at en sekskantet RSB-mast med disse dimensjonene kan tåle alle påkjenninger som kreves ved bruk i strømmettet ved spenninger på 420 kV. Med returtider på 150 år for islast og 500 år for vindlast, og materialfaktorer på toppen av dette får masten en god sikkerhet. Det har blitt utviklet en 3D-modell, med enkle konstruksjonstegninger og en prosjektrapport som analyserer nåværende løsninger og problemområder. Resultatet kom etter omfattende kunnskapstillegning rundt emnet, og flere analyser av strukturen.

15.2 ANBEFALINGER

Følgende anbefalinger gis for masten i denne oppgaven:

- Bruke mindre dimensjoner på bredder i bunn og topp av masten for å få den til å passe i galvaniseringsbad i Norge. Eventuelt dele opp de to nederste seksjonene.
- Finne ut om det er mulig å automatisere sveiseprosessen.
- Bruke mindre konservativ dimensjonering for å få lavere materialbruk.
- Se på muligheter for forskjellige estetiske designvalg.

15.3 VIDERE ARBEID

Dette prosjektet er kun et steg på veien til å få utviklet en ferdig RSB-mast. Følgende anbefalinger blir gitt for videre arbeid:

- Dimensjonere et fungerende fundament for alle underlag.
- Utvikle alternativer for travers med lynavleder og overspenningsbeskyttelse.
- Utføre en konsekvensutredning for aktuelle områder som masten skal plasseres i, og undersøke blant annet inngrep i naturen, som påvirkning av dyreliv og fauna med mer.
- Utvikle komplette konstruksjonstegninger med sveis, plater og bolter ferdig med toleranser.
- Undersøke egenfrekvens nærmere.
- Utføre utmattingsberegninger.
- Lage en 3D-modell med alle komponenter for hele masten, og kjøre en komplett FEM-analyse. Med sjekking opp mot håndberegninger.
- Sjekke om V-kjedet for masten holder belastningene.
- Utvikle plater til V-kjedene som fordeler kreftene effektivt over til traversen og hindrer spenningstopper.
- Utføre fagverksberegninger for gitter i masten og travers.

16. LITTERATURREFERANSER

16.1 SKRIFTLIGE KILDER

- (1): Hoff og Kristensen, RSB Høyspenningmast: 6/8-Kantete Seksjoner, UMB, Ås, 2012, 108 sider. Foreligger som vedlegg 15 G.
- (2): Løvås, Tilrettelegging for ny produksjon, Statnett SF, Oslo, 2008, 24 sider.
- (3): Statnett, ÅPEN ARKITEKTKONKURRANSE OM SKULPTURMAST, Statnett, Oslo, 2010, 20 sider.
- (4): Halvorsen, Tore (2012). "Oppgrader til mer enn dobbel kapasitet", Elektromedia AS, *Energiteknikk* 06.2012: side 14-15.
- (5): Svarte, H. Sebergsen. Energiproduksjon og energidistribusjon Produksjon, nettsystemer og beregninger. 1. utgave og 1. opplag, 2002, Gyldendal Norsk Forlag AS, 0130 Oslo, ISBN: 82-05-27493-2, s 5-53
- (7): D.O.Skjold, L. Thue (2007). Statens nett: Systemutvikling i norsk elforsyning 1890-2007, Universitetsforlaget, Oslo. 622 sider.
- (9): Berlijn, Sonja (2012). "Oppgrader til neste generasjon sentralnett", Elektromedia AS, *Energiteknikk* 07.2012: side 64-65
- (13): Standard Handbook for Electrical Engineers, G.Fink, W.Beaty, McGraw-Hill, 2000, USA.2304 sider.
- (15): GUIDELINES ON TECHNICAL SPECIFICATIONS FOR THE INSTALLATION OF TELECOMMUNICATIONS MASTS AND TOWERS, 2009, The National Institute of Industrial Technology.39 sider.
- (18): Kraftoverføringens kulturminner, NVE, 2011. 17 sider.
- (19): Produkter til kraftledningsnett Norsk Ståldag 29.10.2008, John-Petter Sivertsen. 40 sider.
- (23): Konsekvensutredning 300 kV Mongstad – Kollsnes: Vedlegg, BKK Nett, 2007, side 84
- (26): Presentasjons PowerPoint om RSB-master, Omega Elkraft, Oslo, 2012, 13 sider. Foreligger som vedlegg 15 H.
- (28): NEK 445-2009 Luftledninger over 1 kV, Tillegg L: L1 Krav til konstruksjonene. 1.utgave, NEK, Oslo, 2009. 242 sider.
- (46): Lineoppheng for lavfeltmast SRI, Brødrene Bertnsen. 1 side.
- (52): Insulators for power transmission lines and substations with voltage from 0.4 kV to 1150 kV, Product catalogue. YuAIZ, Global Insulator Group & LIC. 2012. Side 21.
- (59): Info about surface treatment. Dansk Overflade Teknik. 25 sider.
- (60): Nielsen, P. Kronborg (2005). Korrosionshindrende overflatebehandling af stål. Erhvervsskolernes Forlag, Odense. 254 sider.

- (65): Faktablad om Omega Elkraft AS, Omega Elkraft AS. 1 side.
- (66): Faktablad om RSB-master, Omega Elkraft AS. 1 side.
- (67): Faktablad om RSB-kraftledninger, Omega Elkraft AS. 1 side.
- (69): Berlijn, Sonja (2012). "Spenningsoppgradering – hva vil det si?", Elektromedia AS, *Energiteknikk* 07.2012: side 40-41.
- (70): Saxebøl G. (Leder av arbeidsgruppa). Forvaltningsstrategi om magnetfelt og helse ved høyspentanlegg – rapport fra en arbeidsgruppe. StrålevernRapport 2005:8. Østerås: Statens strålevern, 2005.
- (76): NS-EN ISO 1461:2009 Varmforsinkede belegg på fabrikkerte jern- og stålprodukter. Spesifikasjoner og prøvingsmetoder. Standard Norge, 2009. ICS 25.220.40
- (77): NEK EN 50341-1-2001 Luftledninger over 45 kV, fellesspesifikasjoner, side 104 pkt 7.3.5.1.1 General (Chapter 5.1.1) 2)
- (78): NS EN 1993-1-8 Eurokode 3_Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-8 Knutepunkter og forbindelser punkt 4.5.2 (2)
- (79): Sveiste forbindelser Eurokode 3 side 30, IMT/UMB 2012 Geir Terjesen 2012
- (81): Grades of steel, Omega Elkraft.1 side.
- (84): Arne Madsen, Omega Elkraft

16.2 NETTKILDER

- (8): Meld. St. 14 (2011–2012) Melding til Stortinget Vi bygger Norge – om utbygging av strømmettet, Olje- og energidepartementet, <http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/dok/regpubl/stmeld/2011-2012/meld-st-14-20112012.html?id=673807>
- (10): Økonomisk regulering av nettselskap, NVE, <http://www.nve.no/no/Kraftmarked/Regulering-av-nettselskapene/>
- (11): Sentralnett, regionalnett, lokalnett, Statnett, <http://www.statnett.no/no/Om-Statnett/Statnett-pa-1-2-3/Sentralnett-regionalnett-lokalnett/>
- (12): Fakta om strømmettet i Norge, Hafslund Nett, http://www.hafslundnett.no/nett/artikler/les_artikkel.asp?artikkelid=40
- (16): Designanalyse høyspentmaster 300 (420) kV, Moelven Limtre AS, <http://www.moelven.com/no/Produkter-og-tjenester/Limtre/Bygge-med-Limtre/Hvorfor-bruke-Limtre/>
- (22): Komposittmaster, Melbye Skandinavia, <http://www.melbye.com/melbye/frontend/mediabank/2294/Melbye-Komposittmaster.pdf>

- (24): RSB-master, Omega Elkraft, <http://www.omegaelkraft.no/wp-content/uploads/2011/12/RSBmaster.pdf>
- (25): KILE, SINTEF, <http://www.sintef.no/Projectweb/KILE/>
- (27): RSB Kraftledningsmaster, Omega Elkraft, <http://www.omegaelkraft.no/rsb-kraftledningsmaster/>
- (29): Widenoja, E, Skaug & Aastorp. (2009). Landskapstilpasset mastedesign. Oslo, NVE. <http://www.nve.no/Global/Publikasjoner/Publikasjoner%202009/Rapport%202009/rapport9-09.pdf>
- (30): Teknisk informasjon, NOT Varmforzinking. <http://www.not-varmforzinking.no/Teknisk/69F13299-DCEB-466C-9674-A0FF2EFB9443/1>.
- (31): Företagets Kapacitet, Pohlinvest. http://www.hvz.se/sv/saffle_kapacitet.html
- (32): Företagets Kapacitet, Pohlinvest. http://www.hvz.se/sv/halmstad_kapacitet.html
- (33): Kapacitet, JIWE Varmforzinking. <http://www.zink.se/default.asp?do=showproduct&list=no&id=1&pid=1&page=2>
- (34): Fyns Galvanisering. <http://www.fynsgalvanisering.dk/>
- (35): Nordvestjysk Galvanisering A/S ekspanderer på Fyn og Sjælland, Nordvestjysk Galvanisering. <http://www.nvg.dk/index.php?mact=News,cntnt01,detail,0&cntnt01articleid=8&cntnt01origid=16&cntnt01detailtemplate=vis-nyhed&cntnt01returnid=28>
- (36): Sydjysk galvanisering. <http://www.sydgalvano.dk/>
- (37): Kapacitet, Dansk Overflade Teknik. <http://www.dot.dk/Default.aspx?ID=217>
- (38): Locations, Zinkpower. <http://www.zinkpower.com/en/locations.aspx>
- (39): Bath Sizes, Joseph Ash Galvanizing. http://www.josephash.co.uk/bath_sizes.php
- (40): Plant Locator, Worksop Galvanizing. http://www.wedge-galv.co.uk/Worksop_Galvanizing.aspx
- (41): SOCIÉTÉ BRETONNE DE GALVANISATION. <http://www.sbg.fr/index.php>
- (42): Your part dimensions, Galva Union. <http://www.galvaunion.com/gb/offre-galvanisation/dimensions-bain-zinc-galva.php>
- (43): Our strengths, Galva Atlantique. <http://www.galva-atlantique.fr/en/strengths>
- (44): Linjemateriell, Brødrene Berntsen. <http://www.bberntsen.no/Produkter-tjenester/Linjemateriell/>
- (45): Elnummerbanken, Elektroforeningen. <http://efobasen.efo.no/Elnummers%C3%B8k/tabid/53/Default.aspx>
- (53): Recycling Rates of Metals – A Status Report, UN Environment Programme. http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf
- (54): Case for Galvanizing, Galvanizers Association Sustainability. http://www.sustainable-galvanizing.com/case_for_galvanizing/recycling/recycling_galvanized_steelwork/

- (55): Brødrene Berntsen. <http://www.bberntsen.no/> 03.05.13
- (57): Introduction, ESAB. http://www.esabna.com/EUWeb/MIG_handbook/592mig1_1.htm
- (61): What Is ElectroGalvanization?, wiseGEEK. <http://www.wisegeek.com/what-is-electroGalvanization.htm>
- (62): Steels suitable for galvanizing, Nordic Galvanizers.
<http://www.nordicgalvanizers.com/narvar/Steelssuitableforgalvanizing.htm>
- (63): Beroliget stål, Den Store Danske.
[http://www.denstoredanske.dk/It, teknik og naturvidenskab/Kemi/Jern og st%C3%A5l/beroliget st%C3%A5l](http://www.denstoredanske.dk/It,_teknik_og_naturvidenskab/Kemi/Jern_og_st%C3%A5l/beroliget_st%C3%A5l)
- (64): Hot Dip Galvanizing Process, Voigt & Schweitzer.
http://www.hotdipgalvanizing.com/hot_dip_galvanizing_process/index.html
- (68): Steel lattice towers for 10, 20 and 35 kV transmission lines- INSTRUCTIONS FOR DEPLOYMENT OF TOWERS, Dalekovod Proizvodnja d.o.o. <http://www.dalekovod-proizvodnja.com/EasyEdit/UserFiles/pdf/steel-lattice-towers-for-10-20-and-35-kv.pdf>
- (71): Om Oss, Omega Elkraft AS. <http://www.omegaelkraft.no/om-oss/>
- (73): Egenfrekvens, Store Norske Leksikon. <http://snl.no/egenfrekvens>
- (74): Resonans, Store Norske Leksikon. <http://snl.no/resonans>
- (75): Difference between ElectroGalvanized Steel and Hot Dip Galvanized Steel, Finishing.com.
<http://www.finishing.com/221/64.shtml> (7.3.2013)
- (80): COMSOL Multiphysics, COMSOL. <http://www.comsol.com/products/multiphysics/>
- (82): Pilhøyde. – vertikal avstand, Store Norske Leksikon. http://snl.no/pilh%C3%B8yde./vertikal_avstand
- (83): Dimensjoner skruer og muttere, L Hansen Engineering. <http://www.lhe.no/Files/Dimensjoner.pdf>
- (85): What is an IAM File? About.com. <http://pcsupport.about.com/od/fileextensions/f/iam-file.htm>
- (86): What is DWG? CoolUtils. <http://www.coolutils.com/Formats/DWG>
- (87): Opening STEP files, File.org. <http://file.org/extension/step#>
- (88): Project Geometry, Autodesk Wikihelp.
http://wikihelp.autodesk.com/Inventor_Fusion/enu/2013/Help/0056-Modeling56/0059-Sketch_E59/0081-Project_81
- (89): Von Mises Stress, Continuum Mechanics.
<http://www.continuummechanics.org/cm/vonmisesstress.html> [10.05.13]

16.3 ILLUSTRASJONER

- (1): Hoff og Kristensen, RSB Høyspenningmast: 6/8-Kantete Seksjoner, UMB, Ås, 2012, 108 sider.
- (6): Hjemfall: Norske kraftverk med nedbørsfelt, Kraftnytt.no,
<http://www.kraftnytt.no/default.asp?page=21869&article=28448>
- (7): D.O.Skjold, L. Thue. (2007). Statens nett: Systemutvikling i norsk elforsyning 1890-2007. Oslo, Universitetsforlaget.
- (8): Meld. St. 14 (2011–2012) Melding til Stortinget Vi bygger Norge – om utbygging av strømmettet, Olje- og energidepartementet, <http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/dok/regpubl/stmeld/2011-2012/meld-st-14-20112012.html?id=673807>
- (14): 124 Salten–Svartisen, NVE,
<http://www.nve.no/no/Kulturminneplaner/Kraftoverforingen/Kraftledninger/L24/>
- (17): 23 Grana – Orkdal, NVE,
<http://www.nve.no/no/Kulturminneplaner/Kraftoverforingen/Kraftledninger/L23/?part=begrunnelse>
- (18): Kraftoverføringens kulturminner, NVE, 2011. 17 sider.
- (19): Produkter til kraftledningsnett Norsk Ståldag 29.10.2008, John-Petter Sivertsen. 40 sider.
- (20): Andre master, Omega Elkraft, <http://www.omegakraft.no/andre-master/>
- (21): Komposittmast, Melbye Skandinavia, http://www.melbye.com/melbye/frontend/mediabank/7804/-DN21163_m.jpg
- (27): RSB Kraftledningsmaster, Omega Elkraft, <http://www.omegakraft.no/rsb-kraftledningsmaster/>
- (46): Lineoppheeng for lavfeltmast SRI, Brødrene Berntsen. Upublisert.
- (47): FASEFESTE M24 M/SH.LENKE 1723A, Elektroforeningen.
<http://efobasen.efo.no/Elnummers%C3%B8k/tabid/53/ctl/ElnView/mid/570/ComboSyndId/0/syndId/355/Default.aspx?itemId=2837061>
- (48): KULEGAFFEL 20MM SH/SKR M20X80, Elektroforeningen.
<http://efobasen.efo.no/Elnummers%C3%B8k/tabid/53/ctl/ElnView/mid/570/ComboSyndId/0/syndId/355/Default.aspx?itemId=2850154>
- (49): KULEH. 20MM M/GAFFEL M20 109, Elektroforeningen.
<http://efobasen.efo.no/Elnummers%C3%B8k/tabid/53/ctl/ElnView/mid/570/ComboSyndId/0/syndId/355/Default.aspx?itemId=2850334>
- (50): HK 6/20 DIAM. 58-64MM, Elektroforeningen.
<http://efobasen.efo.no/Elnummers%C3%B8k/tabid/53/ctl/ElnView/mid/570/ComboSyndId/0/syndId/355/Default.aspx?itemId=2844580>

- (51): SJAKKEL 3/4" SL389H SH HARPE, Elektroforeningen.
<http://efobasen.efo.no/Elnummers%C3%B8k/tabid/53/ctl/ElnView/mid/570/ComboSyndId/0/syndId/355/Default.aspx?itemId=2850316>
- (52): Insulators for power transmission lines and substations with voltage from 0.4 kV to 1150 kV, Product catalogue. YuAIZ, Global Insulator Group & LIC. 2012. Side 21.
- (56): Metal Project Plans. http://www.metalprojects.no-ip.com/misc/MIG%20Welding_files/image002.jpg
- (58): Feuerverzinkte Oberfläche, Wikimedia.
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/Feuerverzinkte_Oberfl%C3%A4che.jpg
- (70): Saxebøl G. (Leder av arbeidsgruppa). Forvaltningsstrategi om magnetfelt og helse ved høyspentanlegg – rapport fra en arbeidsgruppe. StrålevernRapport 2005:8. Østerås: Statens strålevern, 2005.
- (72): A Short History of “Gallopig Gertie”, Mark Ketchum's Online Scrapbook.
<http://www.ketchum.org/tacomacollapse.html>
- (60): Nielsen, P. Kronborg (2005). Korrosionshindrende overflatebehandling af stål. Erhvervsskolernes Forlag, Odense. Side 110.
- (83): Dimensjoner skruer og muttere, L Hansen Engineering. <http://www.lhe.no/Files/Dimensjoner.pdf>

17. VEDLEGG

Vedlegg 1. Konstruksjonstegning: Komplet Mast.

Vedlegg 2. Konstruksjonstegning: Seksjon 1, nederste seksjon.

Vedlegg 3. Konstruksjonstegning: Travers.

Vedlegg 4. Konstruksjonstegning: Plate.

Vedlegg 5. Lasttre for de forskjellige lasttilfellene.

Vedlegg 6. Beregninger.

Vedlegg 7. Knekk lengder i masten.

Vedlegg 8. Test av forskjellige vangediametre og gitterdiametre.

Vedlegg 9. Test av valgte diametre ved forskjellige lasttilfeller.

Vedlegg 10. Stavvalg i COMSOL.

Vedlegg 11. Sammenligning av vridd og ikke-vridd mast.

Vedlegg 12. Materialeegenskaper SB500.

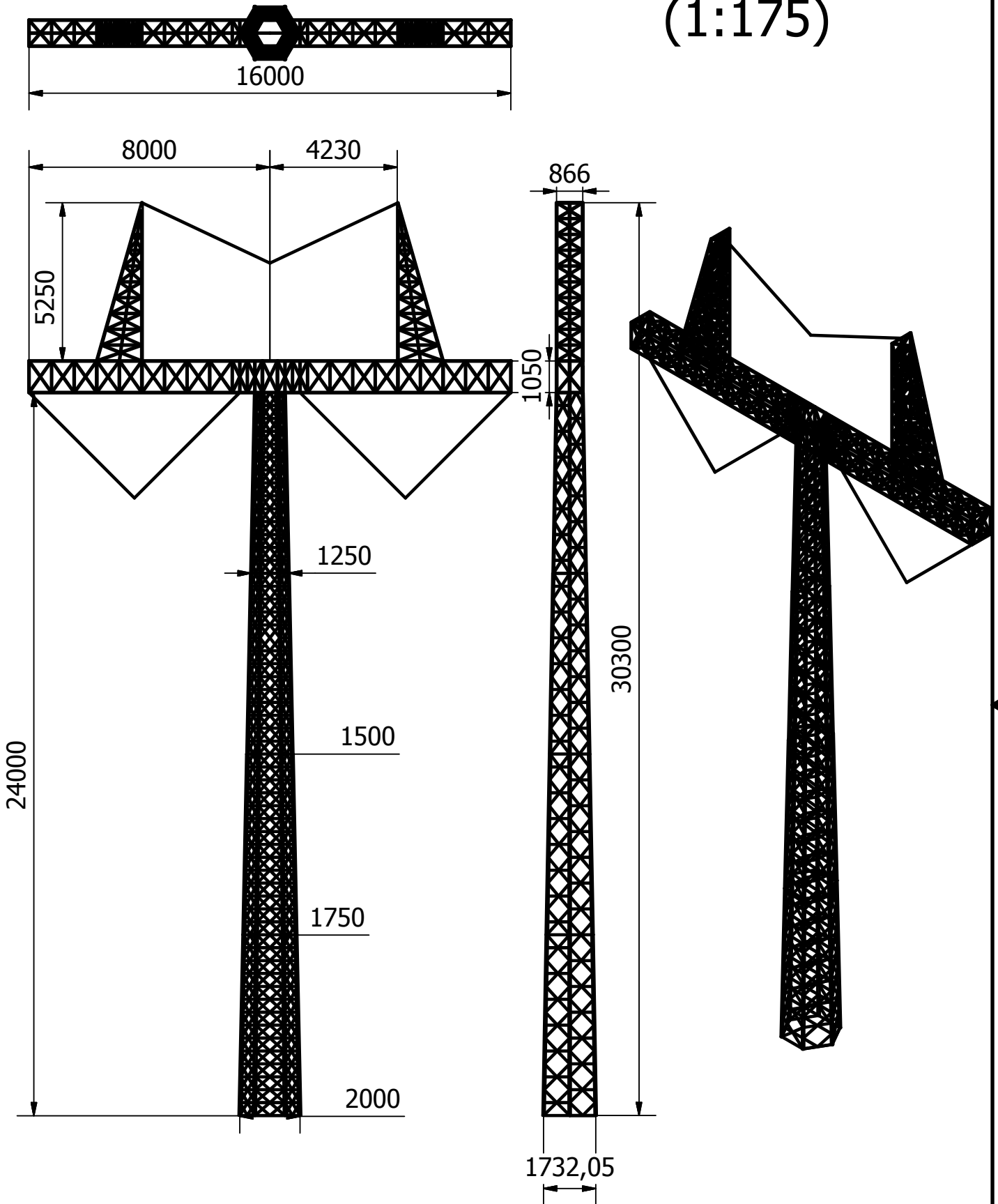
Vedlegg 13. Lineoppheng for lavfeltmast SRI.

Vedlegg 14. Bilder av V-kjede skål.

Vedlegg 15. Digitale vedlegg.

- A. Lasttilfellet skjev islast beregninger.
- B. Lasttilfellet maks islast beregninger.
- C. Tverrsnittsberegninger.
- D. Beregninger på ferdig dimensjonert mast.
- E. Knekking av forskjellige tverrsnittsareal med forskjellige knekk lengder.
- F. Resultater ferdig mast.
- G. Forprosjekt: RSB Høyspenningmast 6/8-Kantete Seksjoner.
- H. RSB-master Presentasjon Omega Elkraft.
- I. Bøyespenningsberegninger på over- og undergurter
- J. Strekmodell av mast fra Autodesk Inventor.
- K. COMSOL-filer.

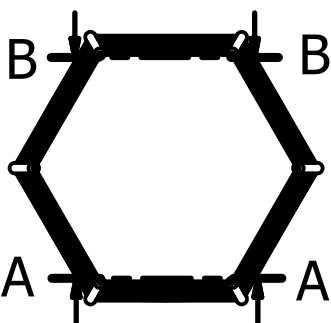
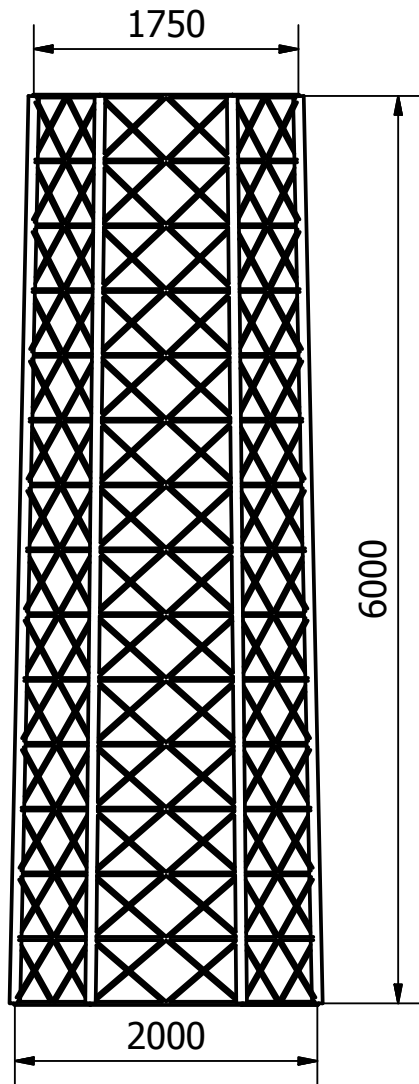
(1:175)



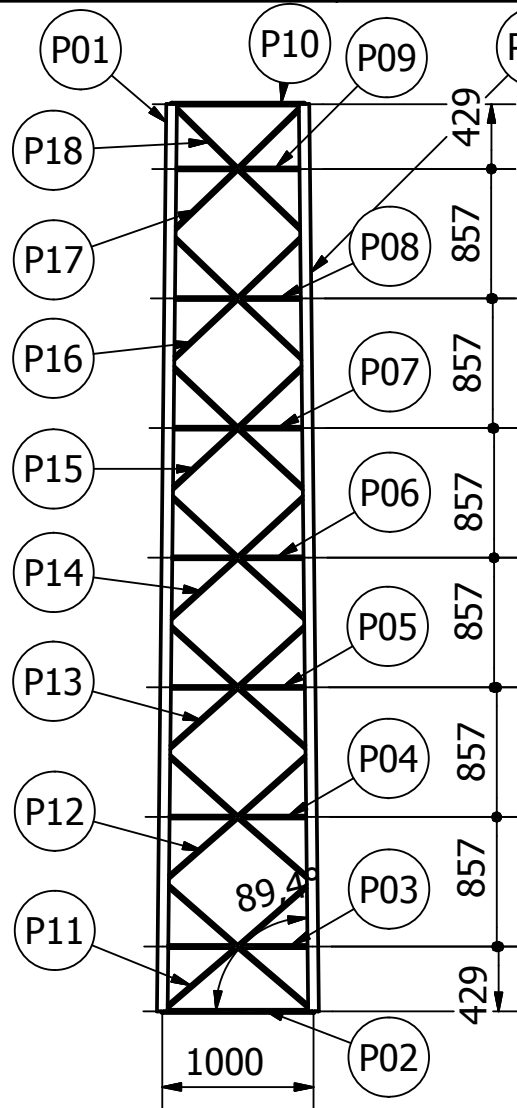
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

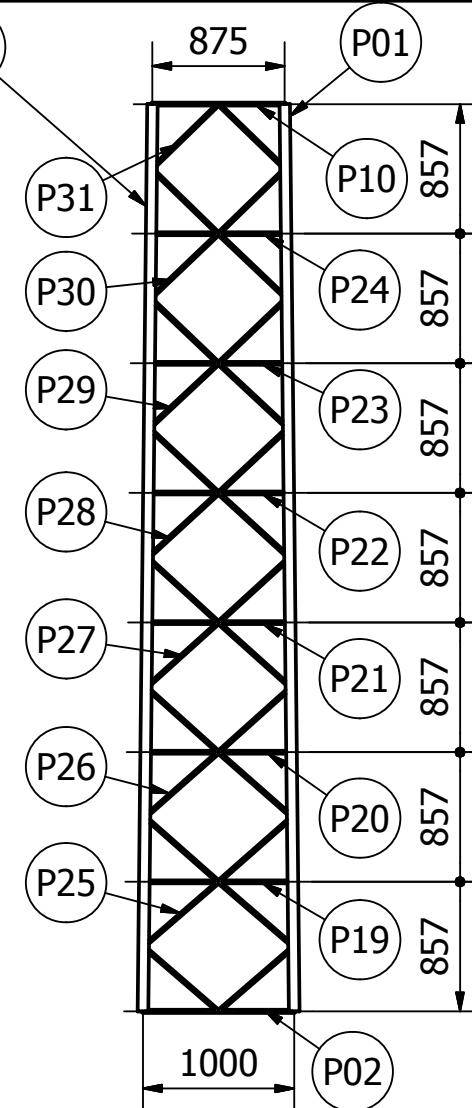
Designed by Johannes Hoff og Magnus Kristensen	Date 07.05.2013
Hele RSB-masten. Materialet er SB500 stål. Alle mål er i mm. Totalvekt: 11 120 kg.	Vedlegg 1
	Komplett mast
	Sheet 1 / 1



(1:50)



A-A (1 : 50)



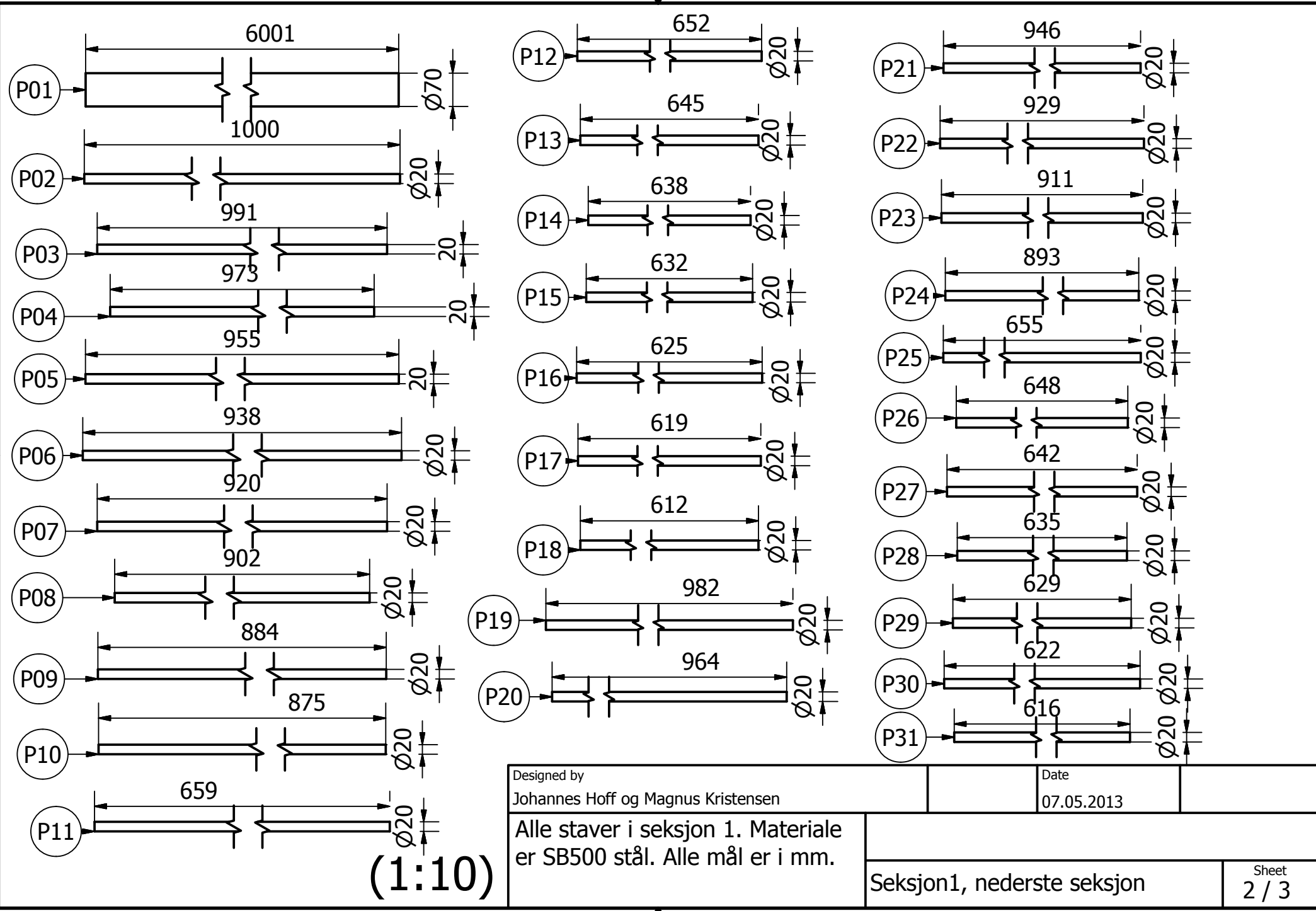
B-B (1 : 50)

Alt diagonalt og horisontalt gitter sveises til vanger med kilsveis, a-mål: 4 mm.

Sveis mellom vange og plater er kilsveis, a-mål: 6 mm.

Seksjonene sveises sammen i jigg og varmforsinkes i henhold til gjeldende prosedyrer.

Designed by Johannes Hoff og Magnus Kristensen	Date 07.05.2013
Nederste seksjon av RSB-masten. Snitt A-A og B-B viser de to forskjellige sidene. De går rundt seksjonen annenhver. Materialet er SB500 stål. Alle mål er i mm. Total vekt: 1469 kg.	
Vedlegg 2	
Seksjon1, nederste seksjon	Sheet 1 / 3



Designed by Johannes Hoff og Magnus Kristensen	Date 07.05.2013
Alle staver i seksjon 1. Materiale er SB500 stål. Alle mål er i mm.	
Seksjon1, nederste seksjon	Sheet 2 / 3

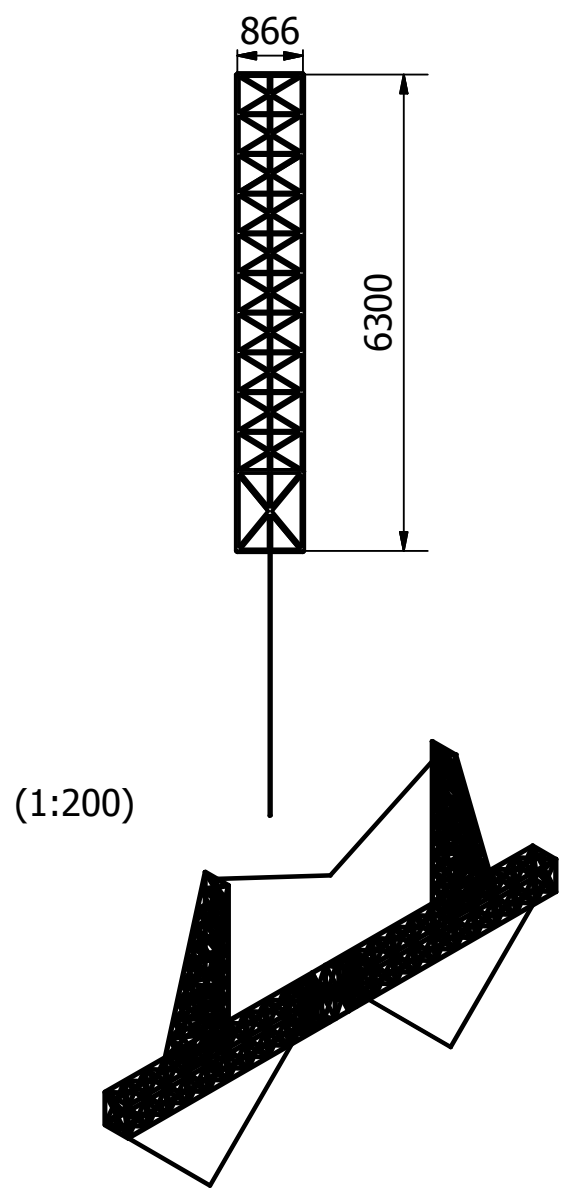
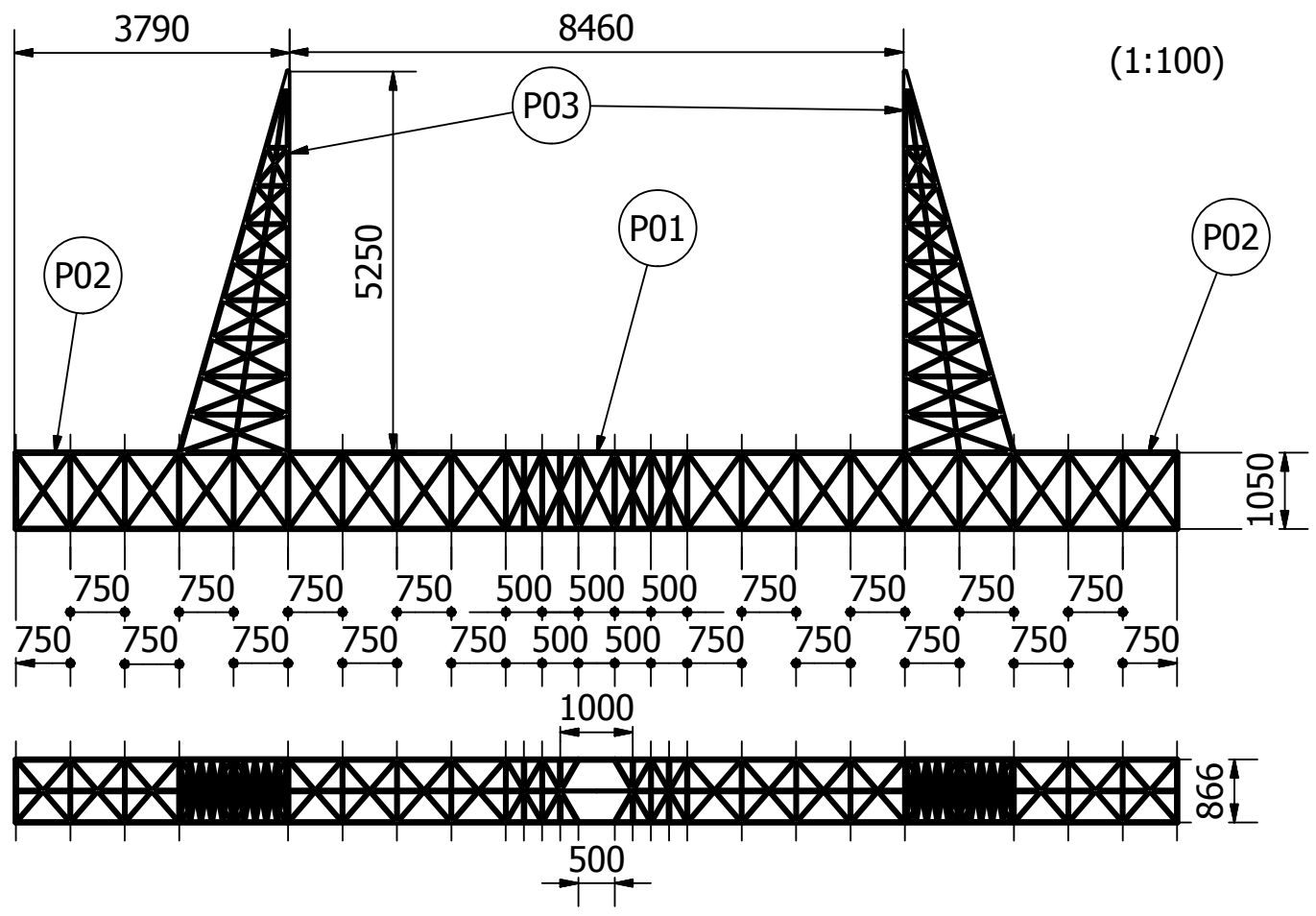
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

RUNDSTÅLMAST - SB500 - Staver i seksjon 1

Pos. nr	Antall	Beskrivelse	Dimensjon	Utstrekning	Vekt	Totalvekt	Materiale
1	6	Vanger	Ø 70 mm	6001 mm	181 kg	1086 kg	SB500
2	6	Horisontal	Ø 20 mm	1000 mm	2,5 kg	15 kg	SB500
3	6	Horisontal	Ø 20 mm	991 mm	2,4 kg	14,4 kg	SB500
4	6	Horisontal	Ø 20 mm	973 mm	2,4 kg	14,4 kg	SB500
5	6	Horisontal	Ø 20 mm	955 mm	2,35 kg	14,1 kg	SB500
6	6	Horisontal	Ø 20 mm	938 mm	2,3 kg	13,8 kg	SB500
7	6	Horisontal	Ø 20 mm	920 mm	2,3 kg	13,8 kg	SB500
8	6	Horisontal	Ø 20 mm	902 mm	2,2 kg	13,2 kg	SB500
9	6	Horisontal	Ø 20 mm	884 mm	2,2 kg	13,2 kg	SB500
10	6	Horisontal	Ø 20 mm	875 mm	2,15 kg	12,9 kg	SB500
11	6	Skrå forgitring	Ø 20 mm	659 mm	1,6 kg	9,6 kg	SB500
12	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	652 mm	1,6 kg	19,2 kg	SB500
13	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	543 mm	1,6 kg	19,2 kg	SB500
14	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	638 mm	1,6 kg	19,2 kg	SB500
15	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	632 mm	1,55 kg	18,6 kg	SB500
16	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	625 mm	1,5 kg	18 kg	SB500
17	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	619 mm	1,5 kg	18 kg	SB500
18	6	Skrå forgitring	Ø 20 mm	612 mm	1,5 kg	9 kg	SB500
19	6	Horisontal	Ø 20 mm	982 mm	2,4 kg	14,4 kg	SB500
20	6	Horisontal	Ø 20 mm	964 mm	2,4 kg	14,4 kg	SB500
21	6	Horisontal	Ø 20 mm	946 mm	2,3 kg	13,8 kg	SB500
22	6	Horisontal	Ø 20 mm	929 mm	2,3 kg	13,8 kg	SB500
23	6	Horisontal	Ø 20 mm	911 mm	2,2 kg	13,2 kg	SB500
24	6	Horisontal	Ø 20 mm	893 mm	2,2 kg	13,2 kg	SB500
25	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	655 mm	1,6 kg	19,2 kg	SB500
26	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	648 mm	1,6 kg	19,2 kg	SB500
27	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	642 mm	1,6 kg	19,2 kg	SB500
28	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	635 mm	1,6 kg	19,2 kg	SB500
29	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	629 mm	1,55 kg	18,6 kg	SB500
30	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	622 mm	1,5 kg	18 kg	SB500
31	12	Skrå forgitring	Ø 20 mm	616 mm	1,5 kg	18 kg	SB500

Designed by Johannes Hoff og Magnus Kristensen	Date 07.05.2013
Tabell over alle staver i seksjon 1.	Seksjon1, nederste seksjon
	Sheet 3 / 3

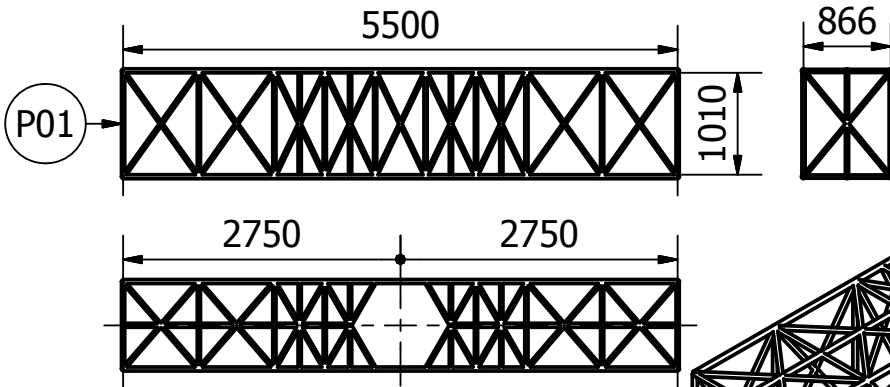


Designed by Johannes Hoff og Magnus Kristensen	Date 10.05.2013
Traversen i RSB-masten. Materialet er SB500 stål. Alle mål er i mm. V-kjeder er ikke tatt med i målsettingen. Total vekt på travers er 5172 kg.	Vedlegg 3
Travers	Sheet 1 / 2

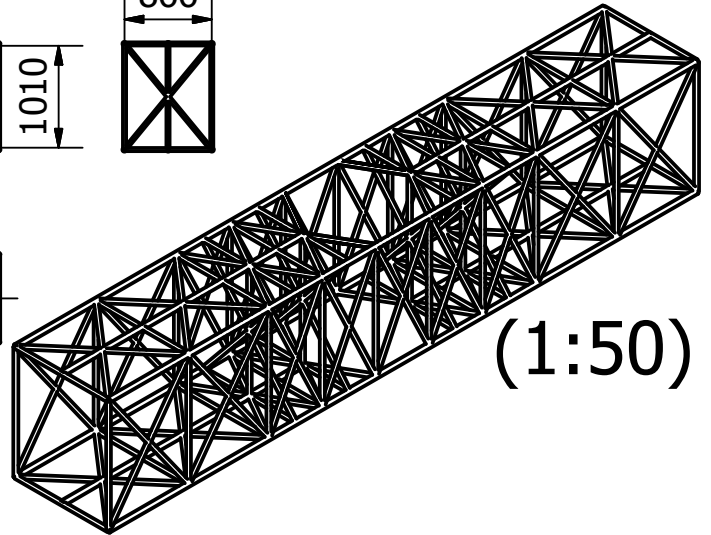


(1:75)

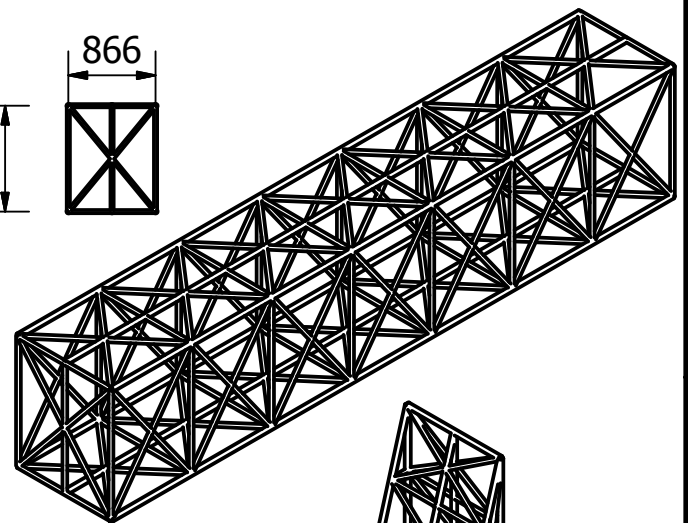
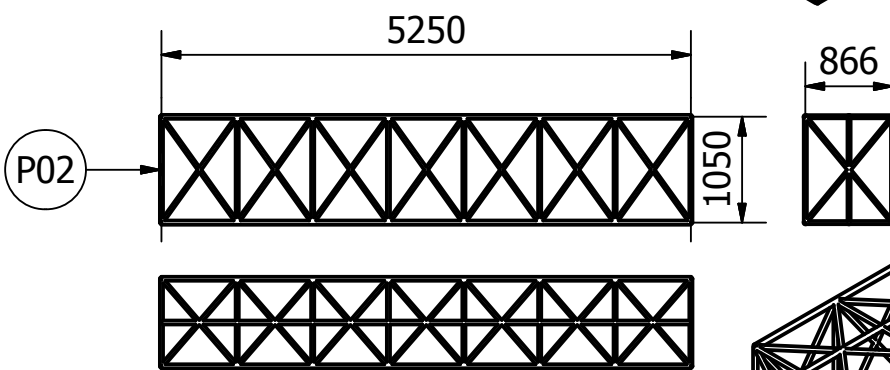
Middeldel



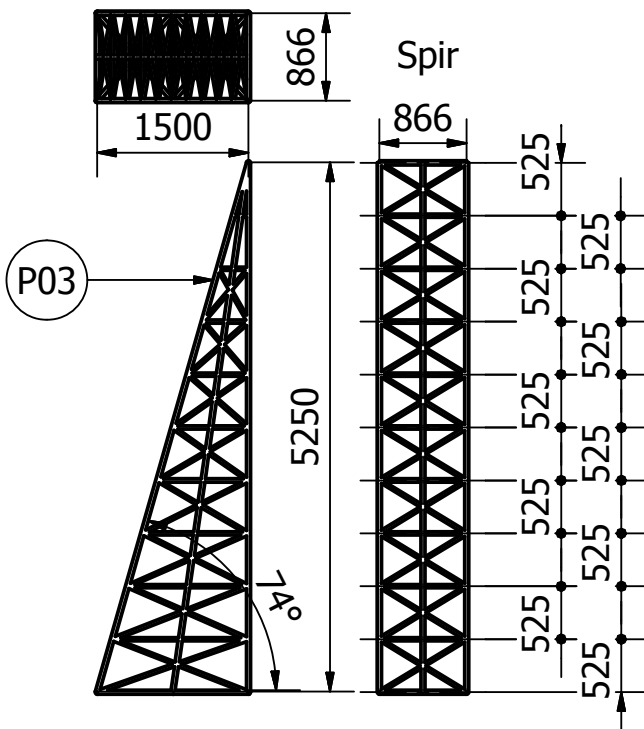
(1:50)



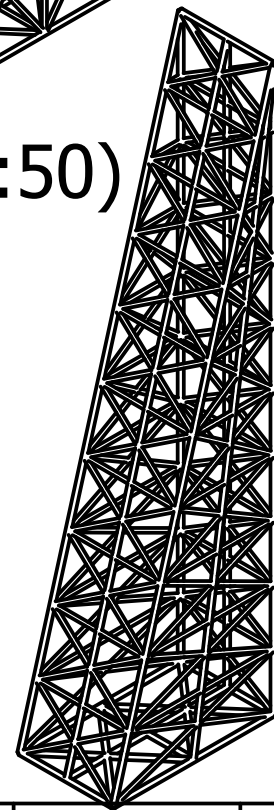
Ytterdel



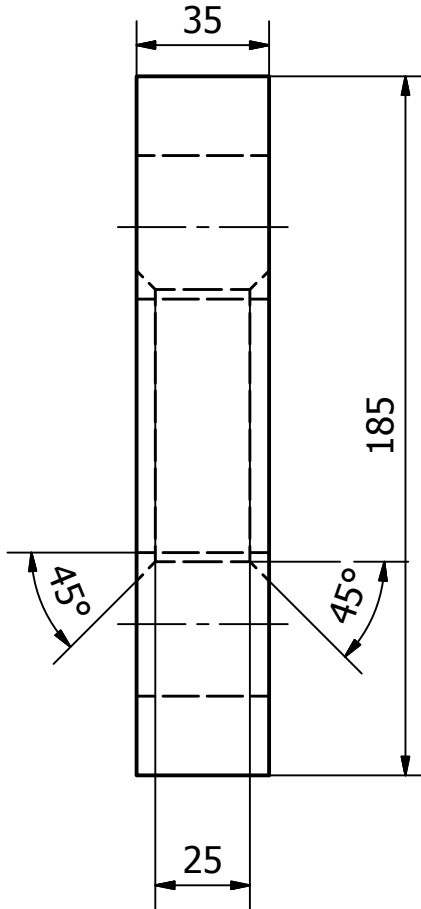
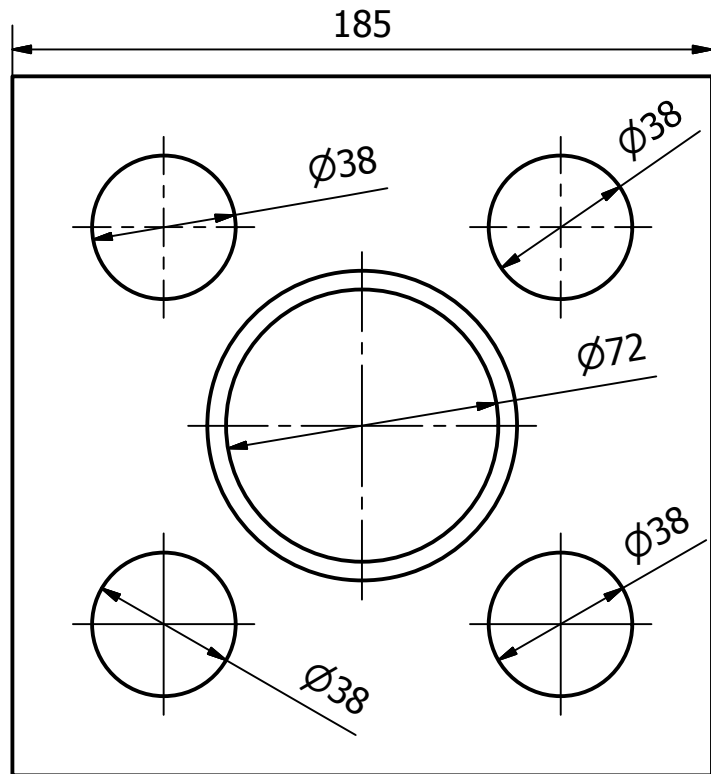
Spir



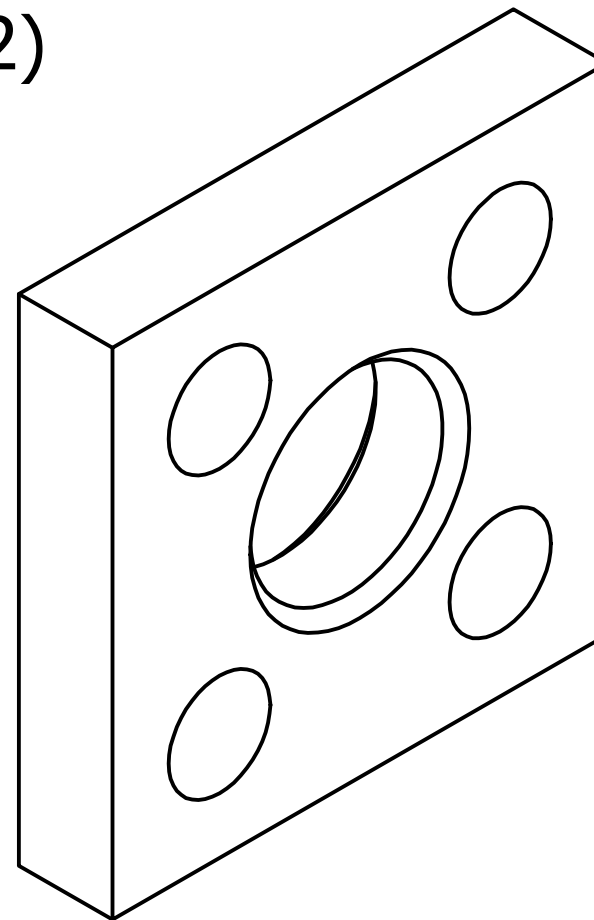
(1:50)



Designed by Johannes Hoff og Magnus Kristensen	Date 10.05.2013
Komponenter i travers. SB500 stål. Alle mål er i mm.	Travers
	Sheet 2 / 2



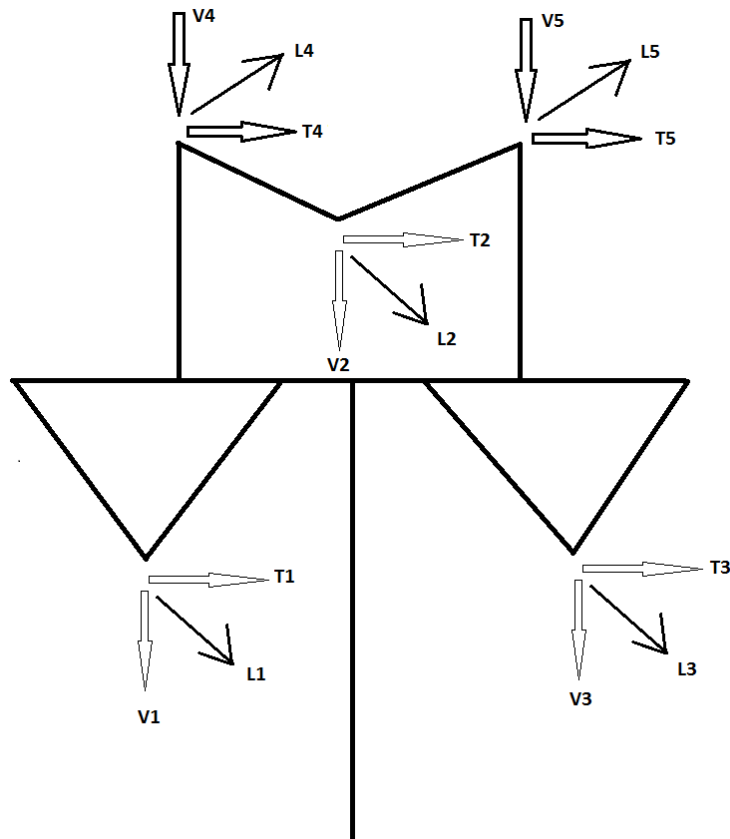
(1:2)



Designed by Johannes Hoff og Magnus Kristensen	Date 11.05.2013
Plater til å feste seksjoner i hverandre og til travers. Materialet er S355 stål. Alle mål er i mm. En plate veier 7 kg.	Vedlegg 4
Plate	Sheet 1 / 1



VEDLEGG 5: LASTTRE FOR DE FORSKJELLIGE LASTTILFELLENE



FIGUR 1: LASTTRE, L=LINERETNING,V=VERTIKAL,T=TRANSVERSIELL

Skjev islast

I lasttilfellet skjev islast så legger det seg is på linene til masten, og da mer is på ene siden av masten enn den andre siden. Dette gjør at kreftene i lineretningen øker og det samme gjør de vertikale kreftene. Og masten vil lene seg over til den siden med mest is.

Maks islast

Ved maks islast er det bare vertikale krefter som virker på masten. Det har lagt seg is på linene på begge sider av masten med tilsvarende like mengder som tilsier at masten fortsatt er i likevekt i lineretningen. Altså at linekraftene er null. Det er ingen transversielle krefter.

Vind på is

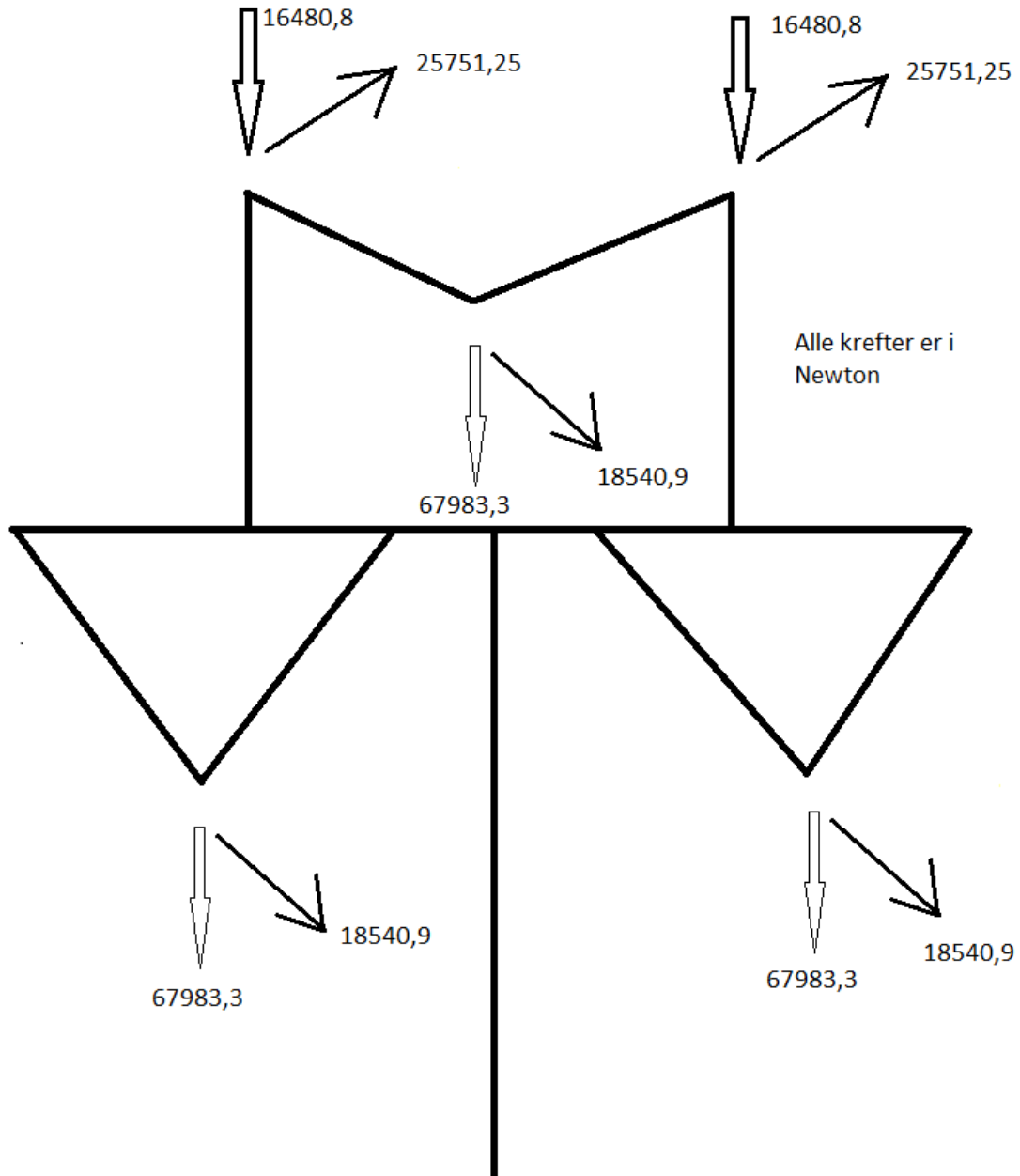
Ved vind på is så er det kommet is på linene til masten og i tillegg så kommer det vind på denne isen. Det er bare krefter i den ene retningen i transverσιell retning, lineretning og vertikal retning.

Linebrudd ytterfase

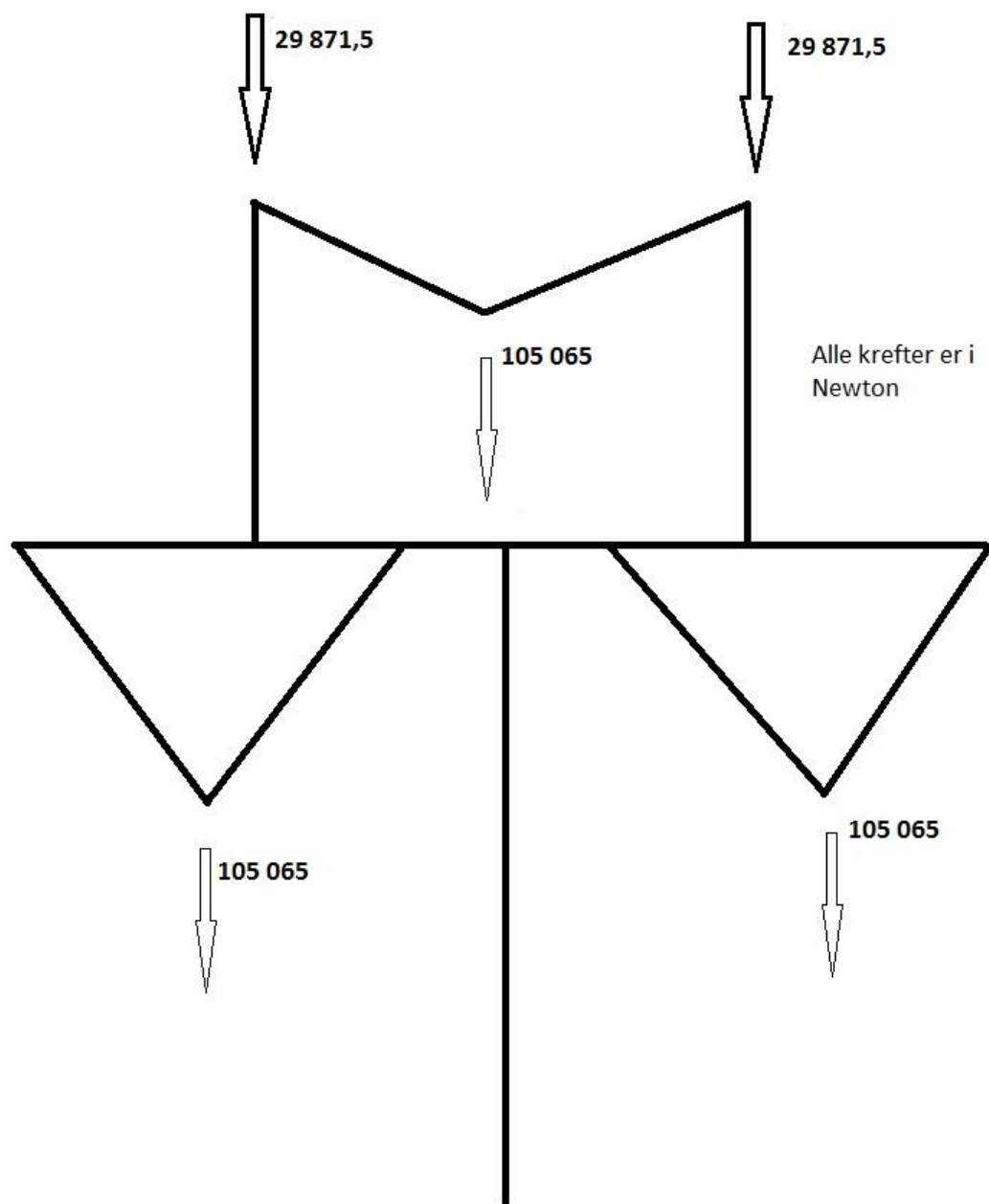
Når det er linebrudd i ytterfase, så får man en kraft som virker i den samme ytterfasen. Dette fordi linene fortsatt holdes fast i en klemme siden linene bare ryker på en side av masten av gangen. Bortsett fra linebruddet så er det ingen krefter i lineretningen.

Lasttilfeller med krefter

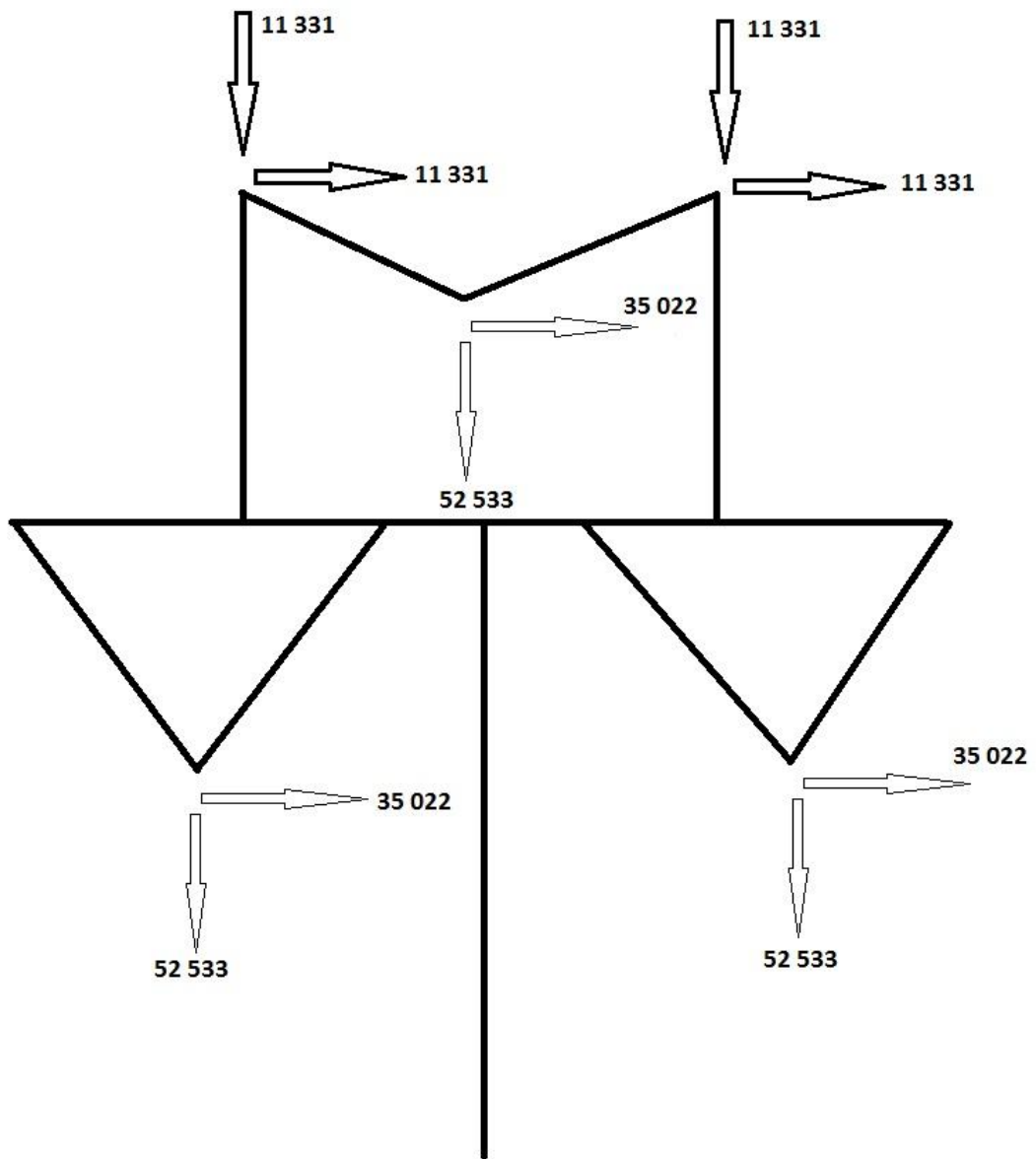
Kreftene som peker nedover er i negativ y-retning (vertikale krefter), de som peker horisontalt er i positiv x-retning (transversielle krefter) og de som peker diagonalt enten opp eller ned er begge i positiv z-retning (linekrefter).



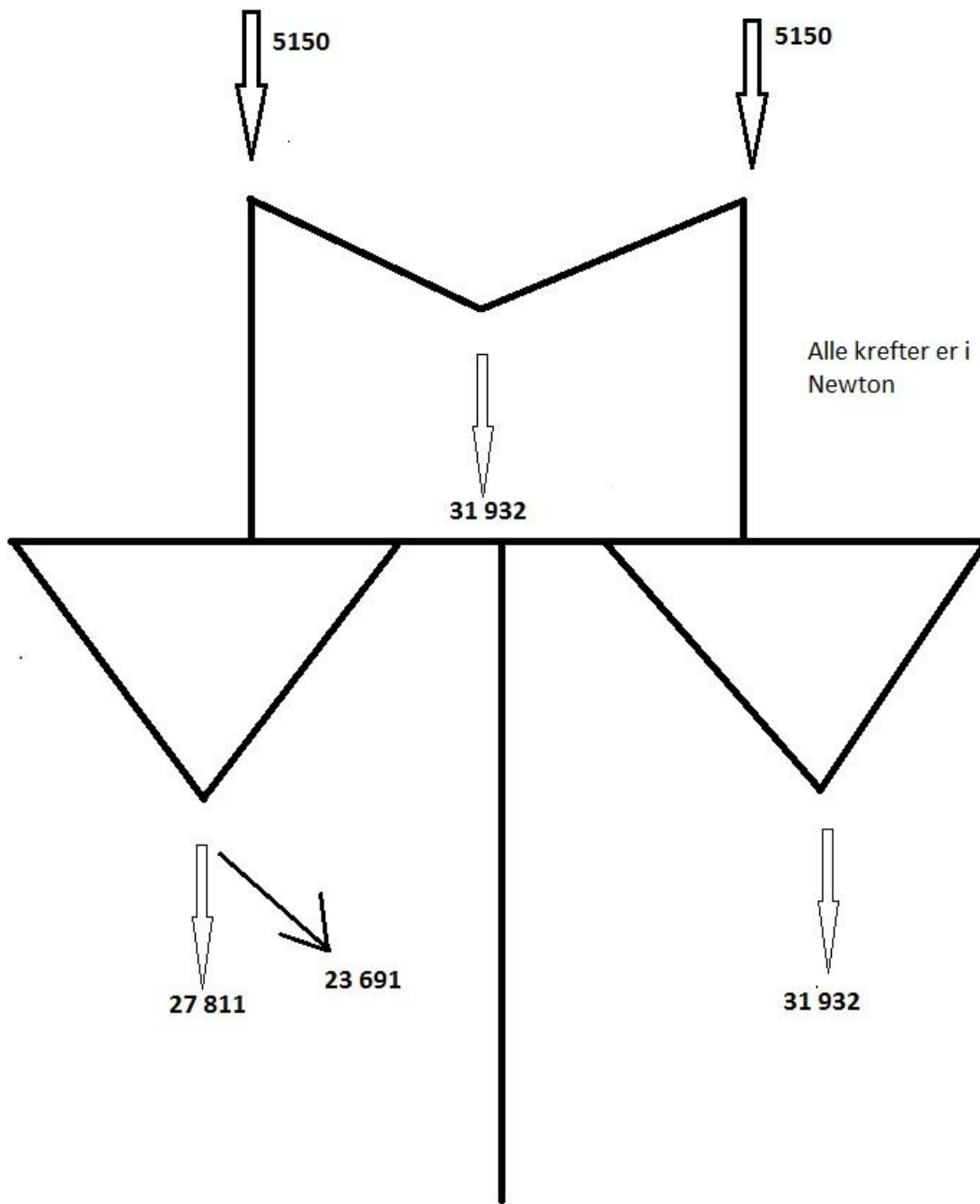
FIGUR 2: LASTTRE, SKJEV ISLAST. KREFTER I NEWTON



FIGUR 3: LASTRE, MAKS ISLAST. KREFTER I NEWTON



FIGUR 4: LASTRE, VIND PÅ IS. KREFTER I NEWTON.



FIGUR 5: LASTTRE, LINEBRUDD YTTERSIDE. KREFTER I NEWTON

VEDLEGG 6 BEREGNINGER

1. Bolter

For beregningene av boltene på den nederste seksjonen og mot fundamentet tas det utgangspunkt i kreftene i den nederste seksjonen. Og videre kraft per vange. Hver vange har en plate under seg som monteres på platen til fundamentet. I første omgang vil det dimensjoneres med fire bolter per plate for å sjekke om det er tilstrekkelig.

Fra beregninger skjev islast (12), ble det kjent at strekkraft per vange er ca $S_s = 750 \text{ kN}$. Denne kraften gjelder for en diameter på 2 meter nede i bunnen av den nederste seksjonen.

Det skal brukes M36 gjengebolter i masten, disse har et spenningsareal på 817 mm^2 (1)

Skrueforbindelser

For skruer 4.6 til 8.8:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad [1]$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad [2]$$

Der $k_2 = 0,63$ er for senkeskrue, ellers $k_2 = 0,9$.

Det brukes ikke senkeskruer så velger $k_2 = 0,9$.

For skruer med skårne gjenger skal $F_{t,Rd}$ multipliseres med 0,85.

Kravet er at $F_{t,Rd} \geq F_{Ed}$ (dimensjonerende lastvirkning i skruen)

Skruer belastet i avskjæring og strekk:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad [3]$$

Der

$F_{v,Ed}$ er dimensjonerende avskjæringskraft i skrue (lastvirkning)

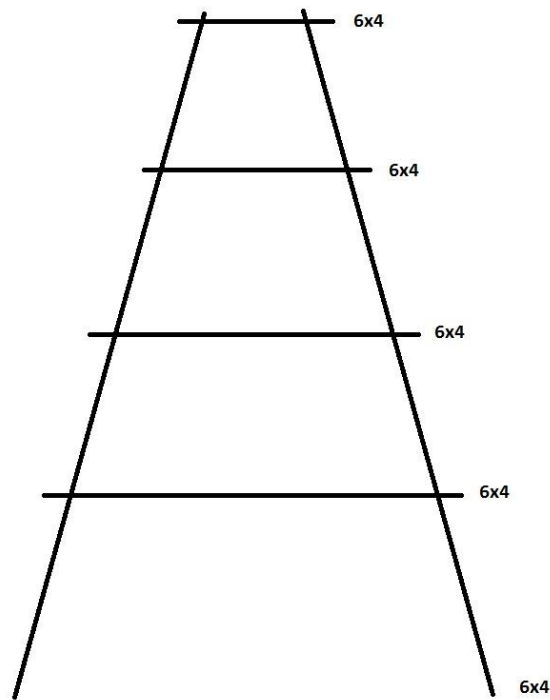
$F_{t,Ed}$ er dimensjonerende strekkraft i skrue (lastvirkning)

Fra beregninger (12) har strekkraften i vangen som tilsvarer $S_s = 750 \text{ kN}$, når diameteren i bunnen er 2 meter. Dimensjonerende strekkraft i skruen er:

Dimensjonerer for 4 skruer per plate altså: $F_{t,Ed} = \frac{750 \text{ kN}}{4} = 187,5 \text{ kN}$.

For å finne dimensjonerende avskjæringskraft per skruer så må man vite hva alle de horisontale kreftene er altså linekrefter og transversielle krefter. Disse fordeles da på skruene i masta. Det er vanskelig å anslå et korrekt tall på hvor mange av skruene avskjæringskraften fordeler seg på. Men velger å si rundt 50 % av skruene. (3)

I bunnen og mellom alle seksjonene er det 6 plater, hver av disse platene har 4 skruer.



FIGUR 1: MAST MED ANTALL SKRUE PÅ HØYRE SIDE

Til sammen blir dette $6 \cdot 4 \cdot 5 = 120$ skruer, 50 % av 120 skruer er 60 skruer.

De totale horisontale kreftene er: 107,125 kN

$$F_{v,Ed} = \frac{107,125 \text{ kN}}{60} = 1,785 \text{ kN}$$

For skruer med 8.8 kvalitet er $f_{ub} = 800 \text{ N/mm}^2$ (2). $A_s = 817 \text{ mm}^2$ for en M36 skruer(4).

$$\frac{0,6 \cdot 800 \cdot 817}{1,25} = 313,728 \text{ kN} \quad [1]$$

$$\frac{0,9 \cdot 800 \cdot 817}{1,25} = 470,592 \text{ kN} \quad [2]$$

$$\frac{1,785 \text{ kN}}{313,728 \text{ kN}} + \frac{187,5 \text{ kN}}{1,4 \cdot 470,592 \text{ kN}} \leq 1,0 \quad [3]$$

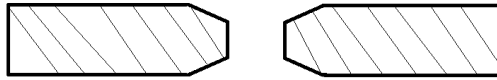
$0,29 \leq 1,0$ Den tilfredstiller kravet med M36 bolter.

Formler brukt ovenfor er fra (2).

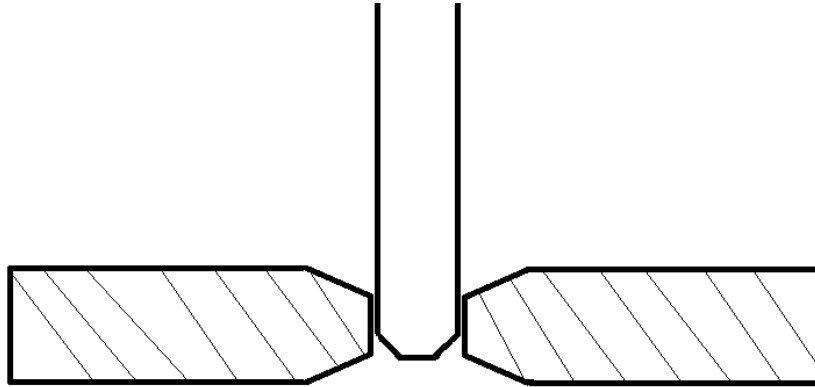
2. SVEISEBEREGNINGER

2.1 VANGEN:

Ser på sveisen som går rundt vangen for å få den sveist til platen.



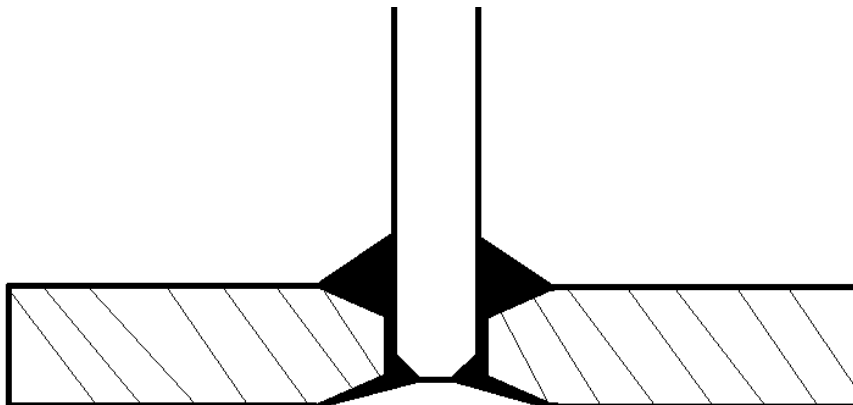
FIGUR 2: PLATE FRA SIDEN, VISER VANGEHULLETS UTFORMING



FIGUR 3: PLATE FRA SIDEN MED VANGE

Platene kuttet sånn at de får en vinkel på 45° inn mot vangen hullet for vangen i platen er 2 mm større i diameter enn selve vangen. Det rette partiet på midten av platen utgjør omentrent $1/3$ av tykkelsen til platen.

Når det er ferdig sveist vil det se ut som noe ala dette:




FIGUR 4: PLATE FRA SIDEN MED SVEIST VANGE

Det skal brukes en plate av S355 kvalitet. Platene sveises fra over og undersiden med dekk-gassveising. Dette gjøres ved at vangene legges på en rulle og snurres rundt mens platen sveises på fra begge sider. Man kan betrakte dette som to kilsveiser, en på oversiden av platen og en på undersiden av platen. I tillegg så blir det litt sveis i mellom.

Sveisen betraktes som en linje.

"Fordelen med å se på sveisen som en linje er at vi relativt enkelt kan finne a-målet. Dette kan vi gjøre uansett om sveisen er bøye- eller vridepåkjent. Tanken er å finne resulterende kraft pr.lengdeenhet hvor belastningen er størst og deretter sammenlikne denne belastningen mot dimensjoneringskriteriet." (5)

Kontur av sveisesøm b = bredde d = dybde	Bøyning = W_{sv} (mm ²) (om x-x aksen)	Torsjon = I_{psv} (mm ³)
	$\frac{\pi d^2}{4}$	$\frac{\pi \cdot d^3}{4}$

FIGUR 5: SVEISEØM SIRKEL(5)

Dimensjonerende kapasitet for kilsveis er tilfredsstillende hvis begge følgende betingelser er oppfylt(7):

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{fu}{\beta_w \gamma_{m2}} \quad [4]$$

og

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9fu/\gamma_{m2} \quad [5]$$

Vinkelrett skjærspenning normalt på sveisens lengdeakse blir satt til null: $\tau_{\perp} = 0$

Skjærspenningen parallelt med sveisens lengdeakse blir også satt til null da denne heller ikke gir noe stort bidrag for sveisens totale spenning: $\tau_{\parallel} = 0$

Bruker trykkraften i vangen S_t for å dimensjonere sveisen, siden den er størst. (12)

$$\sigma_{\perp} = \frac{F}{\sqrt{2}a_e \cdot d \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{860000N}{\sqrt{2} \cdot 5mm \cdot 60mm \cdot 2 \cdot \pi} = 323 MPa \quad [6]$$

Multipliserer diameteren med 2 siden det sveises både fra over og undersiden av platen.

Da får man at:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} = [184^2 + 3(0^2 + 0^2)]^{0,5} = 323 MPa \quad [4]$$

"Sveiser mellom deler med ulike stålsorter bør dimensjoneres på grunnlag av egenskapene til godset med den laveste fastheten".(7)

Det finnes ulike typer S355 stål, derfor brukes det en gjennomsnittsverdi for fastheten fra fire forskjellige varmvalsede plater av S355 kvalitet.

For plater inntil 40 mm tykkelse:

$$fu = (510+490+470+510)/4 = 495 MPa$$

Hvis platen er mellom 40 og 80 mm tykk får man at:

$$fu = (470+470+450+490)/4 = 470 Mpa$$

Korrelasjonsfaktor for kilsveis og S355 stål er $\beta_w = 0,9$ (7)

Materialfaktor $\gamma_{m2} = 1,25$ (11)

For platetykkelser inntil 40 mm:

$$\frac{fu}{\beta_w \cdot \gamma_{m2}} = \frac{495}{0,9 \cdot 1,25} = 440 \text{ MPa} \quad [4]$$

For platetykkelser mellom 40 og 80 mm:

$$\frac{fu}{\beta_w \cdot \gamma_{m2}} = \frac{470}{0,9 \cdot 1,25} = 418 \text{ MPa} \quad [4]$$

For platetykkelser inntil 40 mm er kravet oppfylt:

$$323 \text{ MPa} \leq 440 \text{ MPa} \quad [4]$$

og

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9fu}{\gamma_{m2}} \rightarrow 323 \leq \left(\frac{0,9 \cdot 495}{1,25}\right) = 356 \quad [5]$$

For platetykkelser 40-80 mm er kravet oppfylt

$$323 \text{ MPa} \leq 418 \text{ MPa} \quad [4]$$

og

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9fu}{\gamma_{m2}} \rightarrow 323 \leq \left(\frac{0,9 \cdot 470}{1,25}\right) = 338 \quad [5]$$

Verdier for fu for plater hentet fra (8).

2.2 SVEIS PÅ GITTERET I MASTEN

Her brukes Von Mises spenningen som dimensjonerende for sveisen. (9) Dimensjonerer for 20 mm gitter som ved punkt 10.3.1 i rapporten.

Von Mises $\sigma_{vm} = 122 \text{ MPa}$

Aksialspenningen i senterlinjen $\sigma_{\perp} = 99,9 \text{ MPa}$. Aksialspenningen vil her være normalspenningen.

Strekfasthet: $fu = 610 \text{ MPa}$ for SB500 stål. (10)

$\gamma_{m2} = 1,25$ (11)

β_w settes til 1 siden det ser ut som om at den er 1 hvis stålet har flytegrenser på over 420 MPa. (7)

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{fu}{\beta_w \cdot \gamma_{m2}} \quad [4]$$

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} = \sigma_{vm} \rightarrow 122 \text{ MPa} \leq \frac{610}{1 \cdot 1,25}$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9fu/\gamma_{m2} \quad [5]$$

$122 \text{ MPa} \leq 488 \text{ MPa}$, her oppfylles kravet og $99,9 \text{ MPa} \leq \frac{0,9 \cdot 610 \text{ MPa}}{1,25} \rightarrow 439 \text{ MPa}$ oppfylles også.

Tverrsnittsareal for 20 mm gitter $A = 314,16 \text{ mm}^2$

$$F_{w,Rd} = 122 \text{ MPa} \cdot 314,16 \text{ mm}^2 = 38328 \text{ N}$$

Setter a-målet til 3 mm

$$\sigma = \frac{38328 \text{ N}}{\pi \cdot 20 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}} = 203 \text{ MPa}$$

Dette gir spenninger på under 439 MPa og 488 MPa dermed kan en sveis med a-mål på 3 mm brukes.

2.3 SVEISING I TRAVERSESEN

I traversen er det staver på 32 mm i diameter og 40 mm i diameter. Bruker de største spenningene her for å dimensjonere a-målet og bruker den minste diameteren på 32 mm. Bruker samme a-mål i hele traversen. Spenninger i traversen er hentet fra COMSOL ved lasttilfellet skjev islast.

Von Mises $\sigma_{vm} = 278 \text{ MPa}$

Aksialspenning ved senterlinjen: $\sigma_{\perp} = -73,4 \text{ MPa}$

Samme materiale i traversen som for gitteret i masten.

Samme som under punkt 2.2 for $\frac{fu}{\beta_w \cdot \gamma_{m2}}$ og $0,9fu/\gamma_{m2}$

Bruker Von Mises her: $278 \text{ MPa} \leq 488 \text{ MPa}$ og aksialspenningen $73,4 \text{ MPa} \leq 439 \text{ MPa}$

Areal for 32 mm gitter, $A = \pi \cdot 16^2 = 804 \text{ mm}^2$ [11]

$$F_{w,Rd} = 278 \text{ MPa} \cdot 804 \text{ mm}^2 = 223581 \text{ N}$$

Prøver med et a-mål på 3mm:

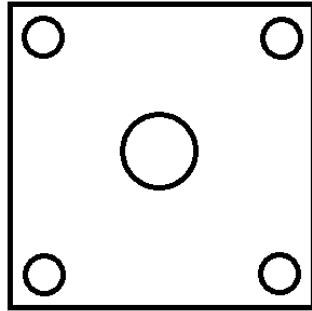
$$\sigma = \frac{223581 \text{ N}}{\pi \cdot 32 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}} = 741 \text{ MPa}$$

a-mål på 3 mm går ikke, fra excel får man ut at 6 mm går bra:

$$\sigma = \frac{223581 \text{ N}}{\pi \cdot 32 \text{ mm} \cdot 6 \text{ mm}} = 370 \text{ MPa}$$

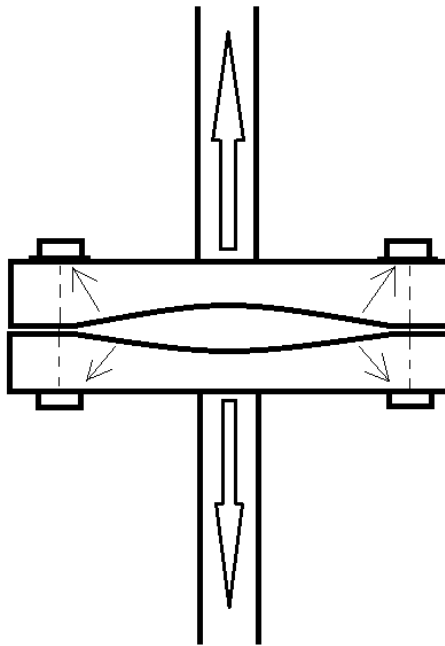
Som er mindre enn 439 MPa og 488 MPa. (7),(9),(10),(11)

3. PLATENE TIL VANGENE.



FIGUR 6: PLATEN

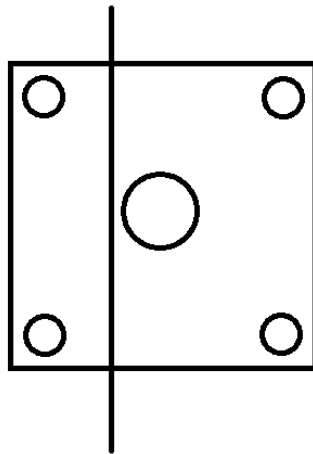
Det som ble funnet til å være dimensjonerende for platene var ved strekk i vangen. Utifra beregninger er strekkraften i vangen funnet til å være 750kN ved skjev islast.(12)



FIGUR 7: STREKK I VANGEN MELLOM SEKSJONENE

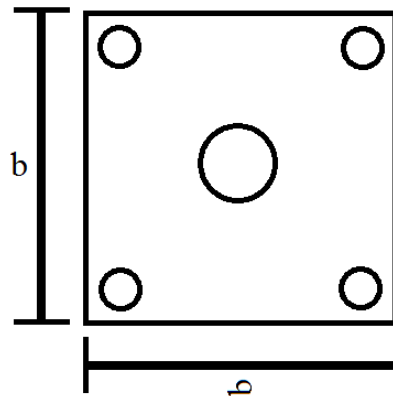
Beregningene er gjort for den nederste platen som er mot fundamentet, figur 7 viser hvordan strekket i vangen virker mellom seksjonene. Det danner seg et trykk under skivene til mutteren og mot boltehodene. Det er derfor bra å ha en stor anleggsflate under mutteren for å få fordelt kreftene.

Bøyning rett over platen:

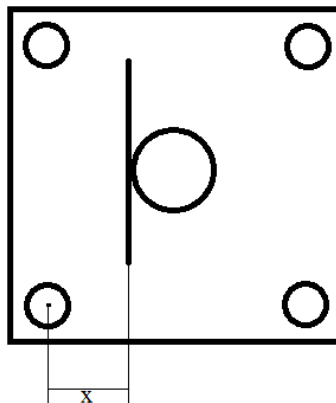


FIGUR 8: BØYNING RETT OVER PLATEN

De to skruene på venstresiden tar opp halve vangekraften og bøyespenningen konsentrerer seg i det tverrsnittet som er vist på figur 8. For å regne seg fram til bøyingsspenningen som er i tverrsnittet så trenger man en arm for å finne momentet ut fra boltene. Dette ble gjort på følgende måte:



FIGUR 9: BREDDEN TIL PLATEN



FIGUR 10: ARM FOR BØYING

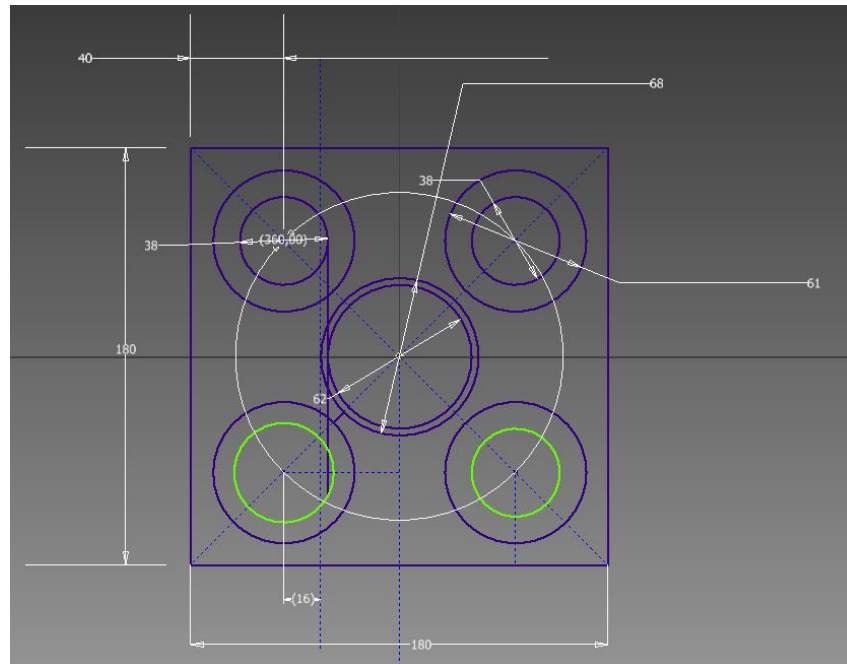
a-mål vange = 6mm, Diameter vange = 60mm, Hull vange = 62mm i diameter, Hull vange + a-mål = 68mm i diameter.

$$\text{Strekraft per bolt: } F = \frac{750000N}{4} = 187500N$$

Det ble valgt M36 bolter for den nederste seksjonen siden disse var godt innenfor på styrkeberegningene, og at det ble anbefalt av Omega Elkraft. Hullet til boltene ble på 38 mm i diameter. Skivene som skal være under mutteren er 8 mm tykke.

Armen X er fra senter av boltene og vinkelrett inntil sveisen til vangen. Metoden for å finne armen er anbefalt av Omega Elkraft.

B er bredden til platen. Når armen er funnet kan man finne bøyemomentet ved å multiplisere med kraften som de to boltene "holder igjen" med. Testingen av forskjellige plater gav til slutt at:



FIGUR 11: TEGNING AV PLATEN FRA INVENTOR

TABELL 1: MÅL PÅ PLATEN

Bredde (B)	Tykkelse (H)	Arm vinkelrett (X)	Arm skrått (X)
180 mm	30 mm	16 mm	37 mm

$$M = 2 \cdot 187500N \cdot 16mm = 6000000Nmm$$

$$W = \frac{1}{6}BH^2 = \frac{1}{6} \cdot 185 \cdot 30^2 = 27750 mm^3 \quad [11]$$

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{6000000Nmm}{27750 mm^3} = 223 MPa \quad [12]$$

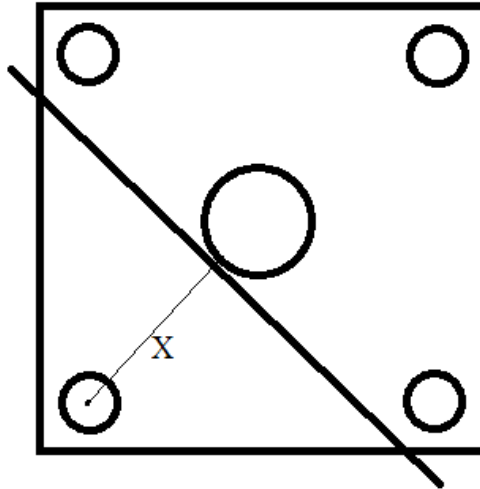
$$\gamma_{m2} = 1,25 \quad (13)$$

Tillatt spenning for platen er:

$$\sigma_{tillatt} = \frac{fy}{\gamma_{m2}} = \frac{355MPa}{1,25} = 284 MPa \quad [9]$$

Det er altså innenfor tillatt spenning når det er bøyning rett over platen.

Bøyning på tvers av platen:



FIGUR 12: ARM FRA BOLT I HJØRNET

Her skjærer bøyespenningen platen på tvers. Fra innsiden av boltene i hvert hjørne og innsiden av vangen. Det blir også her dimensjonert ved strekk i vangen.

Kraften for boltene nede i venstre hjørne vil være $\frac{1}{4}$ av den totale vangekraften. Det er altså denne kraften som gir bøyning på tvers av platen. Armen til kraften er fra senter av boltene og skrått opp og inntil sveisen. Metoden for å finne armen er anbefalt av Omega Elkraft. Vinkelen til armen her blir 45° siden platen er kvadratisk.

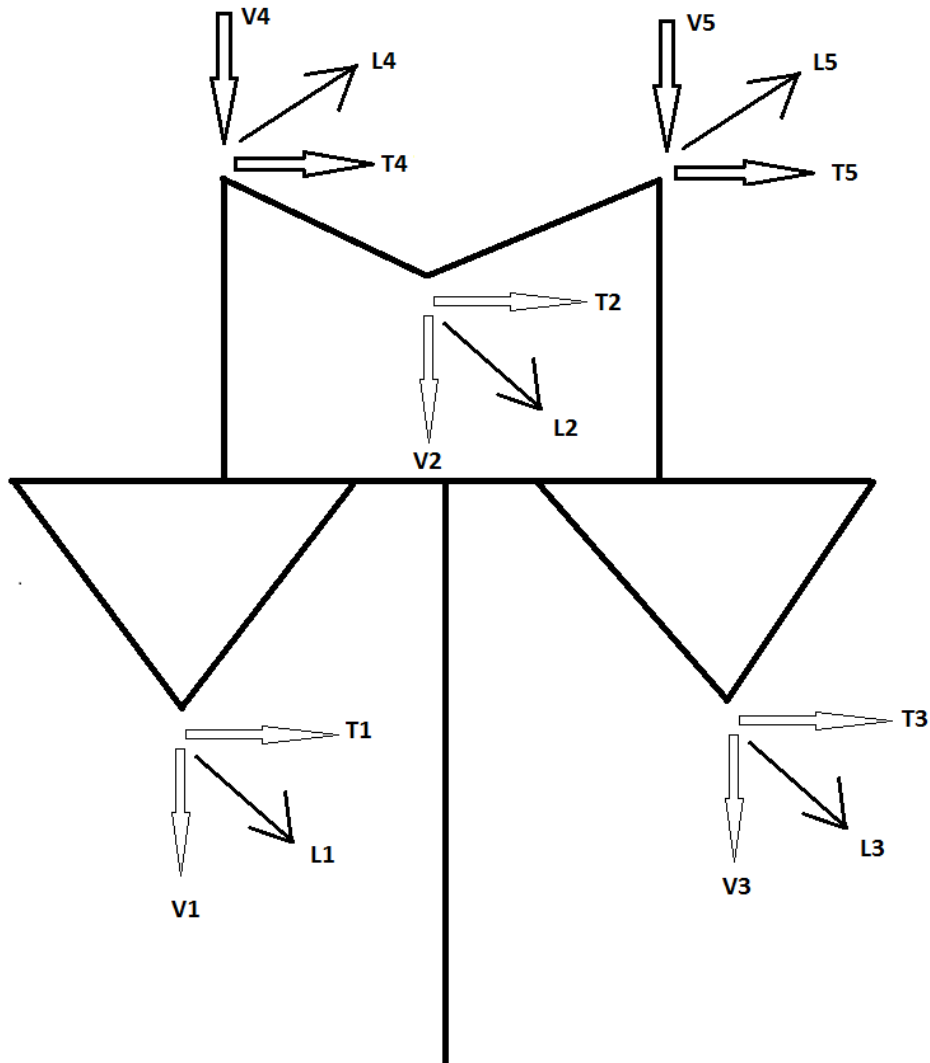
Bøyespenningen her blir som følger:

$$\sigma_b = \frac{F \cdot x}{W} = \frac{187500 \text{ N} \cdot 37 \text{ mm}}{27750 \text{ mm}^3} = 257 \text{ MPa} \quad [12]$$

Begge verdiene er godt innenfor, men det overskrides om man går ned til 25 mm platetykkelse.

4.1 BEREGNINGER I TRAVERS FOR SKJEV ISLAST OG MAKS ISLAST

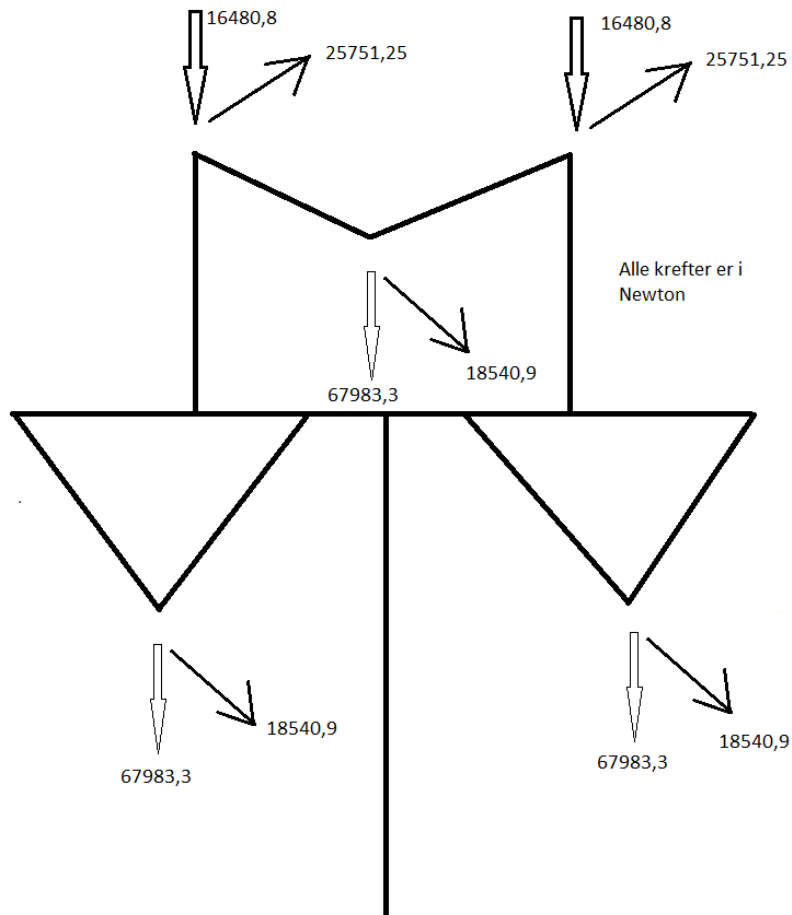
For å se hvordan krefter og momenter er i toppen av masten må det undersøkes hvordan kreftene overføres fra traversen til seksjonene. Kraftene kommer fra linene og miljølaster og fungerer på visse punkter i traversen, viser til figur 13 nedenfor.



FIGUR 13: LASTER PLASSERT PÅ TRAVERS

På figuren kan det sees at kreftene vil fungere på fem forskjellige punkter. Tre av disse punktene er nede i V-kjeder. Det kan være ønskelig å se hvilke krefter V-kjedene vil føre til i traversen på punktene der kjedet ender opp.

Hvordan kreftene blir, vil variere etter hvilket lasttilfelle som undersøkes. Det er forskjellige størrelser på kreftene og de virker i forskjellige retninger. Det vil nå bli tatt utgangspunkt i lasttilfellet "skjev islast" som kun har vertikale krefter og linekrefter i lineretning, også settes opp generelle formler ut fra dette.



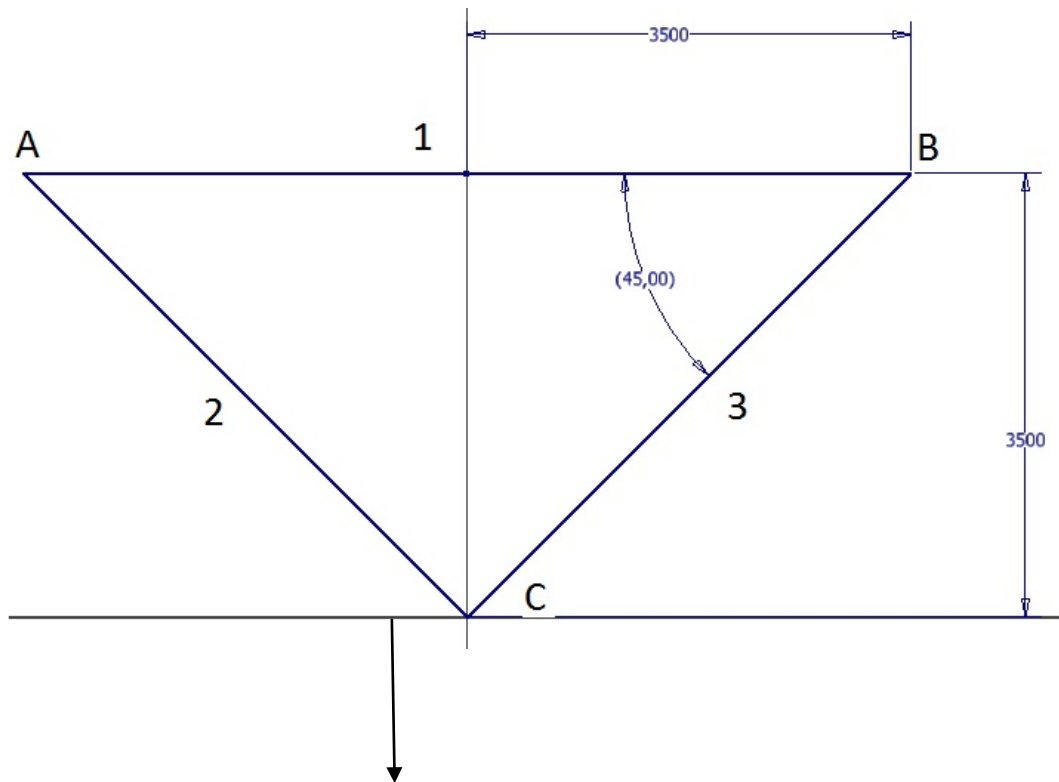
FIGUR 14: LASTTILFELLET SKJEV ISLAST, ALLE KREFTER ER I NEWTON.

Se figur 14 for oversikt over hvilke krefter som fungerer i dette lasttilfellet. De vertikale kreftene fungerer i negativ y-retning, mens linekreftene fungerer i positiv z-retning.

Det beregnes for et V-kjede om gangen.

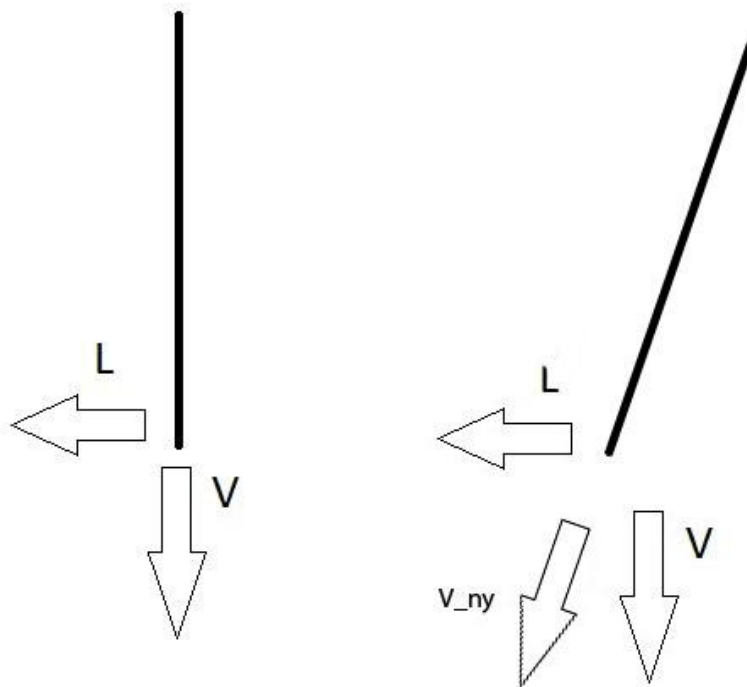
Nedre kjeder

Det er to V-kjeder på undersiden av traversen, disse er like og vil få samme krefter i seg.



FIGUR 15: NEDRE V-KJEDE. ALLE LENGDER ER I MILLIMETER.

For å få med både kraften i z-retning og i y-retning ser man på v-kjedet fra siden. Det vises da at kjedet raskt vil skrås og man kan sette sammen kreftene i y-retning og z-retning til en kraft. Deretter vris v-kjedet tilbake og denne kraften brukes så som kraft i y-retning videre. Kaller kraften for V_{ny} .



FIGUR 16: KREFTER I V-KJEDET FRA SIDEN.

$$V_{ny} = \sqrt{L^2 + V^2} = \sqrt{18540,9 N^2 + 67983,3 N^2} = 70466,3 N$$

I stav 2 og 3 er det en kraft S som løper parallelt med skråstavene. Denne kan dekomponeres i to krefter som fungerer i x - og y -retning i punktene V -kjedet ender opp i traversen. Siden V -kjedet er symmetrisk og kraften fungerer på midten så antas det at kreftene er like i begge punktene, bare motsatt rettet kraft i x -retning. Kaller den vertikale kraften for V og den horisontale for H .

$$V = S * \cos \alpha, H = S * \sin \alpha. \text{ Vinkelen er } \alpha = 45^\circ$$

$$\text{Når kjedet skrår får det en vinkel rundt } x\text{-aksen på: } \varphi = \arctan\left(\frac{L}{V}\right) = \arctan\left(\frac{18540,9N}{67983,3N}\right) = 15,26^\circ.$$

$$\text{Finner så kraften } A_{y_skrå}: \Sigma M_B = 0: A_{y_skrå} * 7m - V_{ny} * 3,5m \rightarrow A_{y_skrå} = \frac{70466,3 * 3,5m}{7m} = 35233,15 N$$

Kan så dekomponere denne kraften for å finne krefter i y - og z -retning:

$$A_y = A_{y_skrå} * \cos \varphi = 35233,15 N * \cos 15,26^\circ = \mathbf{33990,9 N \approx 33991N}$$

$$A_z = A_{y_skrå} * \sin \varphi = 35233,15 N * \sin 15,26^\circ = \mathbf{9273,35 N \approx 9270 N}$$

Tar moment rundt punkt C , ser på stav AC :

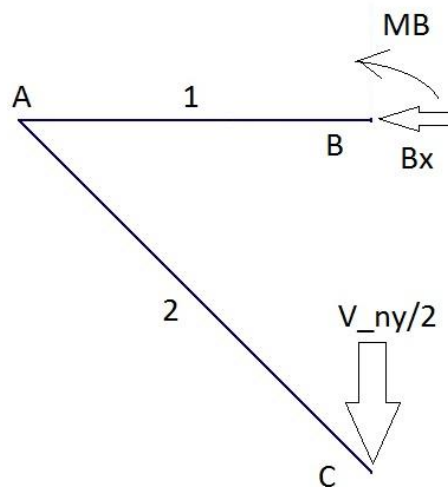
$$\Sigma M_C = 0: A_x * 3,5m - A_y * 3,5m = 0 \rightarrow A_x = A_y = \mathbf{33990,9 N \approx 33991N}$$

Finner kreftene i punkt B :

$$\Sigma F_x = 0: A_x + B_x = 0 \rightarrow B_x = -A_x = \mathbf{-33990,9 N \approx 33991N}$$

$$\Sigma F_y = 0: A_y + B_y - 67983,3 N \rightarrow B_y = 67983,3 N - 33990,9 N \approx \mathbf{33991N}$$

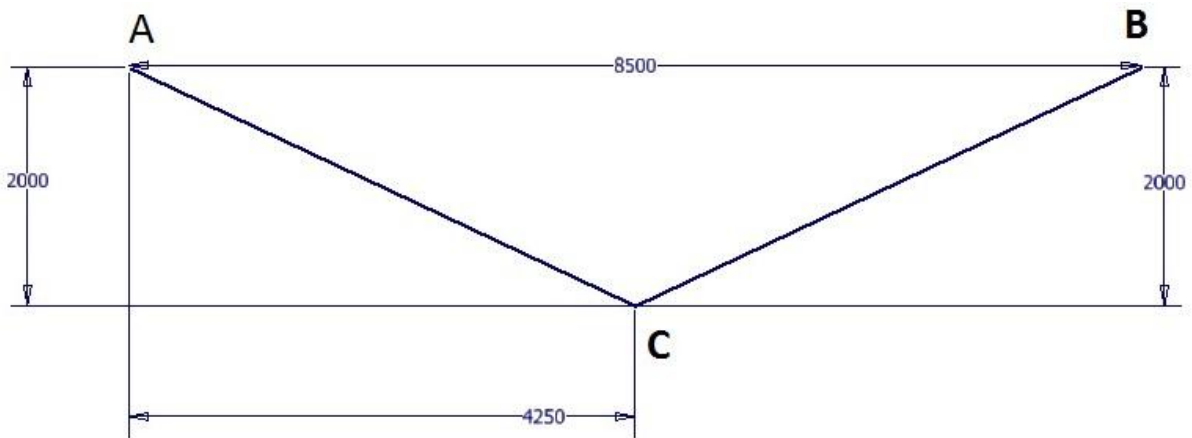
$$\Sigma F_z = 0: A_z + B_z - 18540,9 N = 0 \rightarrow B_z = 18540,9 N - 9273,35 N = \mathbf{9267,6N \approx 9270N}$$



FIGUR 17: SNITT AV NEDRE V-KJEDE.

Øvre kjede

Ser så på det øvre V-kjedet som henger i toppen av traversen:



FIGUR 18: ØVRE V-KJEDE, VERDIER ER I MILLIMETER.

I dette kjedet fungerer det krefter i punktene A, B og C. Først blir opplagerkreftene skapt av kreftene i punkt C beregnet. Dette blir gjort veldig likt slik det ble gjort med de nedre V-kjedene.

$$V_{ny} = \sqrt{L^2 + V^2} = \sqrt{18540,9 \text{ N}^2 + 67983,3 \text{ N}^2} = 70466,3 \text{ N}$$

$$\text{Finner så kraften } A_{y_skrå} : \Sigma M_B = 0: A_{y_skrå} * 8,5\text{m} - V_{ny} * 4,25 \text{ m} \rightarrow A_{y_skrå} = \frac{70466,3 * 4,25 \text{ m}}{8,5 \text{ m}} = 35233,15 \text{ N}$$

Kan så dekomponere denne kraften for å finne krefter i y- og z-retning:

$$A_y = A_{y_skrå} * \cos \varphi = 35233,15 \text{ N} * \cos 15,26^\circ = \mathbf{33990,9 \text{ N} \approx 33991 \text{ N}}$$

$$A_z = A_{y_skrå} * \sin \varphi = 35233,15 \text{ N} * \sin 15,26^\circ = \mathbf{9273,35 \text{ N} \approx 9270 \text{ N}}$$

Tar moment rundt punkt C, ser på stav AC:

$$\Sigma M_C = 0: A_x * 2\text{m} - A_y * 4,25\text{m} = 0 \rightarrow A_x = \frac{4,25}{2} A_y \approx \mathbf{72231 \text{ N}}$$

Slik som i de nedre kjedene vil også her kreftene i A og B være like på grunn av symmetri.

Summene av kreftene i punkt A og B blir da:

$$F_{x_A} = 72231 \text{ N mot høyre}, F_{y_A} = 33991 \text{ N} + 16480 \text{ N} = 50471 \text{ N nedover}, F_{z_A} = 9270 \text{ N} + 25751 \text{ N} = 35021 \text{ N utover}.$$

Maks islast

Øvre kjede

$$A_y = \frac{105065,1}{2} = 52532,55 \text{ N}$$

$$\Sigma M_C = 0: A_x * 2m - A_y * 4,25m = 0 \rightarrow A_x = \frac{4,25}{2} A_y \approx \mathbf{111632N}$$

4.2 DIMENSJONERING AV GURTER

A= tverrsnittsarealet til gurtene, a= lengde mellom gurtene i kraftretningen, D= diameteren på gurtene.

Finner annet arealmoment for de fire gurtene. Det multipliseres med 4 siden det er fire stykker, dette gjøres også ved Steiners sats.

$$I_1 = \frac{4 \cdot \pi \cdot D^4}{64} \quad [14]$$

Fra Steiners sats får man et tillegg som ser slik ut:

$$I_2 = 4 \cdot A \cdot \frac{a^2}{2} \quad [14]$$

$$I_{tot} = I_1 + I_2$$

$$\text{Tverrsnittsmodule } W = \frac{I_{tot}}{\frac{a}{2}}$$

M_b = bøyemomentet om den aktuelle aksene

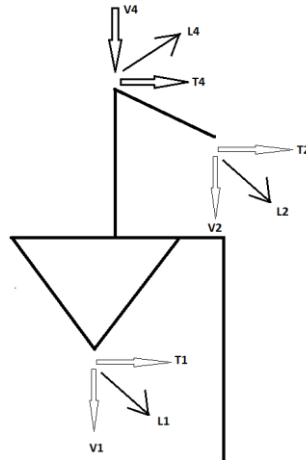
Ut ifra dette får man at bøyespenningen blir:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} \quad [13]$$

Fra bøyespenningsformelen ser man at om man har høyere tverrsnittsmodule så vil bøyespenningen bli lavere. Dette kan gjøres på to forskjellige måter.

- Øke diameteren og dermed tverrsnittsarealet for gurtene.
- Øke avstanden mellom gurtene i kraftretningen. Dette vil føre til at W blir større siden tillegget med $\frac{a^2}{2}$ gir $\frac{\frac{a^2}{2}}{\frac{a}{2}} = a$ på oversiden av brøkstreken, når det deles med $\frac{a}{2}$.

Traversen deles på midten, dette gjør at den skiller seg på midten av masten. Det blir da en hel v-kjede og en halv v-kjede på hver side av delingen. Dette må man ta hensyn til under beregningene.



FIGUR 19: MASTEN KUTTET I TO

Ved skjev islast får man ut følgende tall:

Momentet på midten av masten finnes ut i fra kreftene til lasttilfellet. De kreftene som virker på det nederste v-kjedet (line 1)

TABELL 2: SKJEV ISLAST

Lasttilfelle	L1	V1	T1	L2	V2	T2	L3	V3	T3	L4	V4	T4	L5	V5	T5
Skjev islast	18541	67983	0	18541	67983	0	18541	67983	0	25751	16481	0	25751	16481	0

Ut beregningene i 4.1 så får vi at punktet i toppen av spiret har to vertikale krefter som er 16481N fra topplinen og 50471N fra v-kjedet. Dekomponerer man kreftene i v-kjedet på undersiden av traversen så får man at det virker 33991N på hvert av oppkoblingspunktene til kjedet.

Dette gir et moment på midten som er:

$$M_{\text{vertikalt.senter}} = (16481N + 50471N) \cdot 4,25m + 33991N \cdot 8m + 33991N \cdot 1m = 590465Nm$$

Dette momentet gir en bøyning om høyden til traversen, høyden for traversen er satt til 1,05m.

Formelen for å finne bøyepeningen er $\sigma_b = \frac{M}{W}$, for å finne annet arealmoment til de fire gurtene så brukes det den vanlige formelen for annet arealmoment pluss et steinerstillegg som kommer som følge av avstanden mellom de fire gurtene. Diameteren for gurtene blir i første omgang satt til 40mm. For utregninger se (14).

$$I = \frac{4 \cdot \pi \cdot D^4}{64} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 40^4}{64} = 502655mm^4 \quad [14]$$

Steiners tillegg ($I_{\text{høyde}}$) regnes ut i fra hvilken akse som det bøyes om, når det bøyes med vertikale krefter så er dette om høyden til traversen.

Tverrsnittsarealet til gurtene er:

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{40^2}{4} = 1256,64 mm^2 \quad [11]$$

$$I_{\text{høyde}} = 4 \cdot A \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^2 = 4 \cdot 1256,64 mm^2 \cdot \left(\frac{1050mm}{2}\right)^2 = 1385442360mm^4 \quad [14]$$

Når man har annet arealmoment så kan man finne tverrsnittsmodulen ved vertikale krefter (Wv).

$$W_v = \frac{I + I_{h\ddot{o}yde}}{\frac{H}{2}} = \frac{502655\text{mm}^4 + 1385442360\text{mm}^4}{\frac{1050\text{mm}}{2}} = 2639895,3\text{mm}^3$$

Bøyespenning vertikalt:

$$\sigma_{bv} = \frac{M_{\text{vertikalt.senter}}}{W_v} = \frac{590465 \cdot 1000\text{Nmm}}{2639895,3\text{mm}^3} = 224\text{MPa} \quad [13]$$

I tillegg til bøymomentet som kommer av de vertikale kreftene så er det også et bøymoment fra kreftene i lineretningen:

$$M_{\text{Horisontalt.senter}} = (9270\text{N} + 25751\text{N}) \cdot 4,25\text{m} + 9270\text{N} \cdot 8\text{m} + 9270\text{N} \cdot 1\text{m} = 232269\text{Nm}$$

Annet arealmoment er det samme som for vertikal, men det blir et annet steinerstillegg nå siden traversen ikke er kvadratisk (I_{bredde}).

$$I_{\text{bredde}} = 4 \cdot A \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^2 = 4 \cdot 1256,64\text{mm}^2 \cdot \left(\frac{866\text{mm}}{2}\right)^2 = 942422504\text{mm}^4 \quad [14]$$

Tverrsnittsmul krefter i lineretning:

$$W_l = \frac{I + I_{\text{bredde}}}{\frac{H}{2}} = \frac{502655\text{mm}^4 + 942422504\text{mm}^4}{\frac{866\text{mm}}{2}} = 2177656\text{mm}^3$$

Bøyespenning i lineretning:

$$\sigma_{bl} = \frac{M_{\text{horisontalt.senter}}}{W_l} = \frac{232269 \cdot 1000\text{Nmm}}{2177656\text{mm}^3} = 107\text{MPa} \quad [13]$$

Det vil også være en transversell kraft som gir bøymoment på gurtene, denne denne virker innover fra oppkoblingspunktene til v-kjedet. Og siden begge oppkoblingspunktene er med på det ene v-kjedet så vil den bli utlignet der. Men siden masten er delt på midten så vil det være en transversell kraft som virker i samme oppkoblingspunkt som til topplinen. Dette vil gi et moment om høyden til traversen.

$$M_{\text{Transversell.senter}} = 72231\text{N} \cdot 5,25\text{m} = 379212,75\text{Nm}$$

$$\sigma_{bv} = \frac{M_{\text{vertikalt.senter}}}{W_v} = \frac{379212,75 \cdot 1000\text{Nmm}}{2639895,3\text{mm}^3} = 144\text{MPa} \quad [13]$$

Dette gir et bøymoment motsatt vei av det som de vertikale kreftene påfører traversen, det vil si at man kan trekke det fra hverandre.

$$\sigma_{bvtot} = 224\text{MPa} - 144\text{MPa} = 80\text{MPa}$$

$$\sigma_{tot} = \sigma_{bvtot} + \sigma_{bl} = 80\text{MPa} + 107\text{MPa} = 187\text{MPa}$$

Beregner med hensyn på maks islast (se punkt 4.1 maks islast):

TABELL 3: MAKS ISLAST

Lasttilfelle	L1	V1	T1	L2	V2	T2	L3	V3	T3	L4	V4	T4	L5	V5	T5
Max is	0	105065	0	0	105065	0	0	105065	0	0	29872	0	0	29872	0

Her virker det bare vertikale krefter på traversen. For utregninger se (14).

$$M_{\text{vertikalt.senter}} = 105065,1\text{N} \cdot 4,5\text{m} + \frac{105065,1\text{N}}{2} \cdot 4,25\text{m} + 29871,5\text{N} \cdot 4,25\text{m} = 590465\text{Nm}$$

Det blir også en transversell kraft her som følge av at det bare er halve v-kjedet i toppen som er med i beregningen.

$$M_{\text{Transversuell.senter}} = 111632\text{N} \cdot 5,25\text{m} = 586066,3\text{Nm}$$

$$\sigma_{bv} = 312\text{MPa}$$

$$\sigma_{tv} = 222\text{MPa}$$

$$\sigma_{tot} = 90\text{MPa}$$

Flytegrensen for SB500 stål med 40 mm diameter er 470 MPa. (10) Og tillatt flytegrense er

$$\sigma_{\text{tillatt}} = \frac{fy}{\gamma_{m1}} = \frac{470\text{MPa}}{1,1} = 427\text{MPa} \quad [9] \quad (13)$$

Utifra beregningene fra skjev islast og maks is, så holder det godt med 40 mm diameter på gurtene siden spenningen ikke er i nærheten av tillatt flytegrense på 427 MPa.

Kilder:

- (1): Skrueforbindelser Repetisjon Geir Terjesen IMT/UMB 2012 side 16
- (2): Utdrag fra NS-EN 1993 Prosjektering av stålkonstruksjoner Tema: Skrueforbindelser IMT/UMB2012 Geir Terjesen, side 3 og 9
- (3): Arne Madsen, Omega Elkraft AS
- (4): NS EN 1993-1-8 Eurokode 3 Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-8, side 21, Tabell 3.1
- (5): Sveiste forbindelser Eurokode 3 (Stålkonstruksjoner) side 42, IMT/UMB 2012 Geir Terjesen 2012 og figur fra side 44.
- (6): Fra figur 8.10 k) side 109 i Sveiste Konstruksjoner, Helge Helgesen
- (7): NS EN 1993-1-8 Eurokode 3 Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-8 Knutepunkter og forbindelser. Punkt 4.5.3 Dimensjonerende kapasitet
- (8): Sveiste forbindelser Eurokode 3 (Stålkonstruksjoner) side 6, IMT/UMB 2012 Geir Terjesen 2012
- (9): Von Mises Stress, Continuum Mechanics.
<http://www.continuummechanics.org/cm/vonmisesstress.html> [10.05.13]
- (10): Vedlegg 12, Materialeegenskaper SB500
- (11): Sveiste forbindelser Eurokode 3 (Stålkonstruksjoner) side 15, IMT/UMB 2012 Geir Terjesen 2012
- (12): Vedlegg 15 A, Skjev islast
- (13): NEK EN 50341-1-2001 Luftledninger over 45 kV, fellesspesifikasjoner, Side 104 pkt 7.3.5.1.1 General (Chapter 5.1.1) 2)
- (14): Vedlegg 15 J, Bøyepenningsberegninger på over og undergurter

VEDLEGG 7. KNEKKELENGDER I MASTEN

VANGEN

Knekk lengden for vangene i stammen til masten er det samme fra bunn og opp til toppen, og den er på 428,664 mm \approx 429mm.

Dette vil si at om man velger vanger med en diameter på 60mm så kan man finne slankheten til å være:

Treghetsradiusen:

$$i = \frac{D}{4} = \frac{60mm}{4} = 15mm \quad [10]$$

Dette gir slankheten:

$$\lambda = \frac{l \cdot k}{i} = \frac{429mm \cdot 0,6}{15mm} = 17,2 \quad [8]$$

Setter man opp diameteren på vangen til 70mm får man ut at:

$$i = \frac{D}{4} = \frac{70mm}{4} = 17,5mm \quad [10]$$

Dette gir slankheten:

$$\lambda = \frac{l \cdot k}{i} = \frac{429mm \cdot 0,6}{17,5mm} = 15 \quad [8]$$

Utifra knekketabell for SB500 stål, gitt av Omega Elkraft, se vedlegg 15 E, kan man da finne at disse slankhetene gir.

$$\lambda = 17,2 \rightarrow fk = 493MPa$$

$$\lambda = 15 \rightarrow fk = 496MPa$$

Det brukes en materialfaktor $\gamma_m = 1,25$.

Fra knekketabellene får man for 60mm vange:

$$fk_{tillatt} = \frac{fk}{\gamma_m} = \frac{493MPa}{1,25} = 394MPa \quad [15]$$

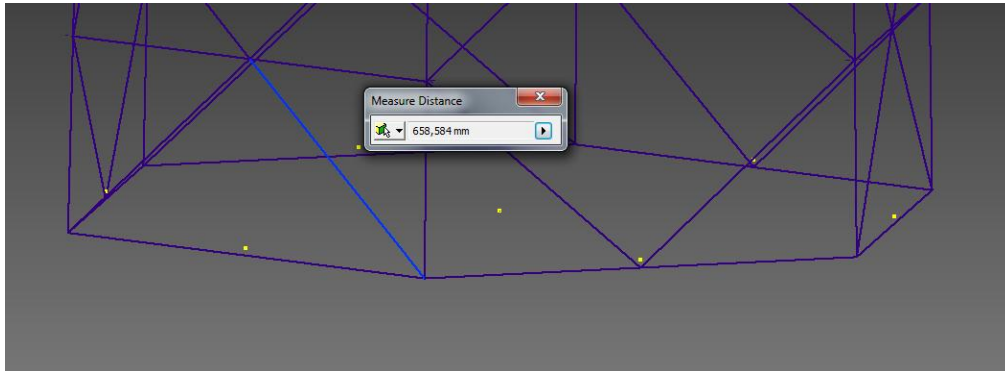
Og for 70mm vange:

$$fk_{tillatt} = \frac{fk}{\gamma_m} = \frac{496MPa}{1,25} = 397MPa \quad [15]$$

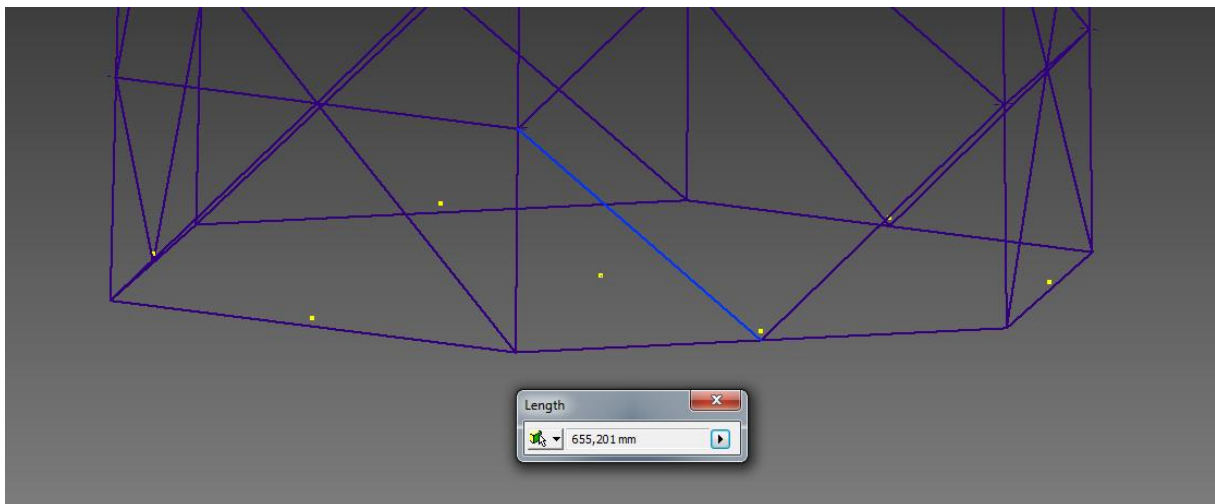
Slankheten med 40 mm er 21,6 og slankheten for 50 mm er 27. Dette gir $fk_{tillatt} = 388MPa$ for 40mm og $fk_{tillatt} = 379 MPa$

GITTERET / DIAGONALER

Knekkleddene for gitteret varierer litt oppover i masen på grunn av at masten skrår innover.

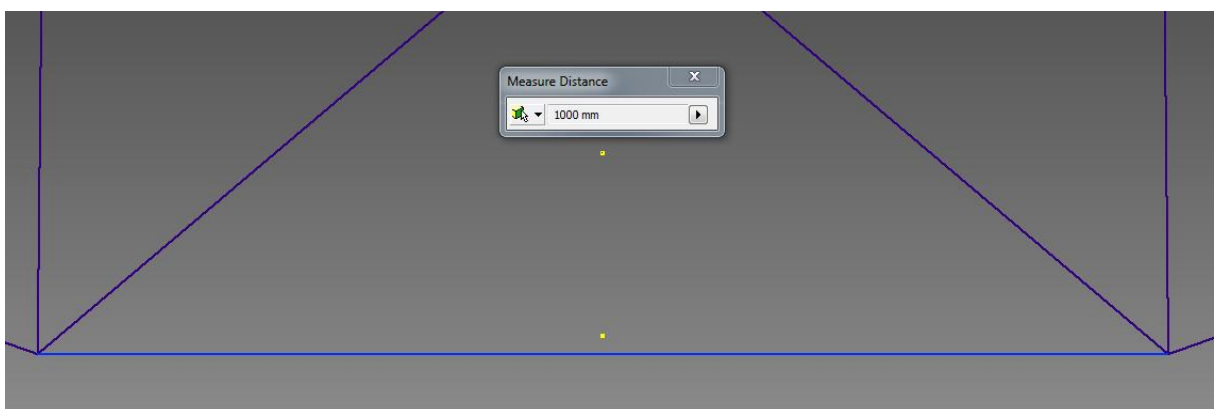


FIGUR 1: DIAGONALSTAV HALV RUTE NEDERST



FIGUR 2: DIAGONALSTAV HEL RUTE NEDERS

Nederst i konstruksjonen er det lengder på ca 650 mm for diagonalene øverst i den nederste seksjonen er de ca 610mm.



FIGUR 3: HORISONTALSTAV HELT NEDERST PÅ NEDERSTE SEKSJON

De lengste knekkleengdene i konstruksjonen er de horisontale lengdene som er i bunn og topp av hver mast. I den nederste seksjonen er det 1000mm, og deretter følger staver på 825mm, 750mm, 625mm og 500mm i toppen.

TABELL 1: KNEKKELENGDER FOR GITTER I MASTEN

	Horisontaler Maksimum	Horisontaler Minimum	Diagonaler Maksimum	Diagonaler Minimum
Nederste seksjon	495 mm	440 mm	660 mm	610 mm
Nest nederste seksjon	440 mm	380 mm	610 mm	570 mm
Nest øverste seksjon	380 mm	320 mm	570 mm	530 mm
Øverste seksjon	320 mm	250 mm	530 mm	500 mm

Dette er circa verdier hentet fra Inventor.

Aktuelle diametere på gitteret er 16, 20 og 25 mm.

TABELL 2: SLANKHETER

Vangediametre (mm)	16	20	25
Tverrsnittsareal (mm²)	201,0619298	314,1593	490,8739
Treghetsradius (mm)	4	5	6,25
K-verdi	0,85	0,85	0,85
Knekkleengder (mm)	Slankheten lambda		
150	31,875	25,5	20,4
200	42,5	34	27,2
250	53,125	42,5	34
300	63,75	51	40,8
350	74,375	59,5	47,6
400	85	68	54,4
450	95,625	76,5	61,2
500	106,25	85	68
550	116,875	93,5	74,8
600	127,5	102	81,6
650	138,125	110,5	88,4
700	148,75	119	95,2
750	159,375	127,5	102
800	170	136	108,8
850	180,625	144,5	115,6

Med 16 mm diagonaler så vil tillatt knekkspenning f_k bare være på 76 MPa i bunnen av masten til 127 MPa i toppen. Øker man til 20 mm så vil tillatt knekkspenning for diagonalene i bunnen av masten være 115 MPa og 184 MPa i toppen. Øker man videre opp til 25 mm så vil den tillatte knekkspenningen i bunnen komme på 168 MPa og 251 MPa i toppen.

TABELL 3: KNEKKELENGDER OG TILLATT KNEKKSPENNING MED 20 MM GITTERDIAMETER

Gitter 20 mm i diameter	Største knekkleengde diagonal (mm)	Slankhet	Tillatt knekkspenning	Gitter 25 mm i diameter	Største knekkleengde diagonal (mm)	Slankhet	Tillatt knekkspenning
Seksjon 1	660 ->700	119	103 MPa	Seksjon 1	660 ->700	95	153 MPa
Seksjon 2	610 ->650	111	117 MPa	Seksjon 2	610 ->650	88	172 MPa
Seksjon 3	570 ->600	102	136 MPa	Seksjon 3	570 ->600	82	194 MPa
Seksjon 4	530 ->550	94	156 MPa	Seksjon 4	530 ->550	75	221 MPa

Siden diagonalene er større enn horisontalene for gitteret så brukes disse knekkleengdene for å finne rette diametere ved hjelp av et maks-spenningsplot fra Comsol. Bruker tabell med slankheter og rundet opp til nærmeste på steg med 50 mm.

HORISONTALENE

I horisontalene som er noe kortere enn diagonalene vil tillatt knekkspenning ligge noe høyere. Siden knekkleengdene er mellom 495 og 250 mm.

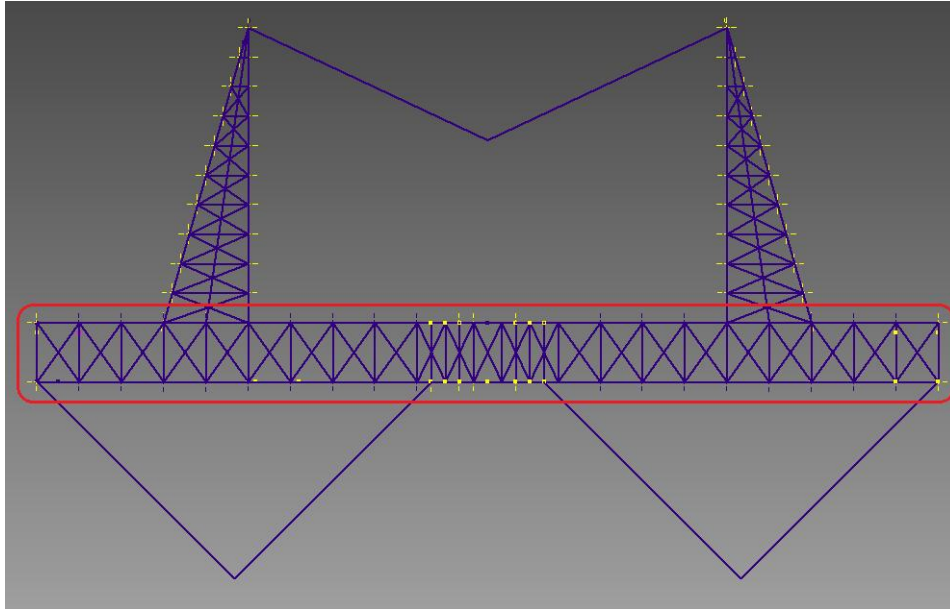
For 16 mm får man maks 106 i slankhet og minimum 53 i toppen av masten. Dette gir tillatt knekkspenning på 127MPa – 313MPa.

For 20 mm får man maks 85 i slankhet og minimum 42,5 i toppen av masten. Dette gir tillatt knekkspenning på 184MPa – 346MPa.

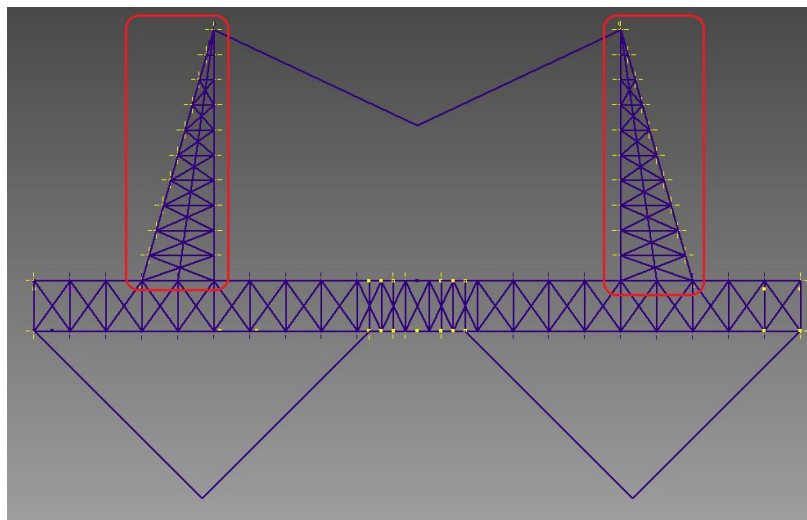
For 25 mm får man maks 68 i slankhet og minimum 34 i toppen av masten. Dette gir tillatt knekkspenning på 250MPa – 366MPa.

TRAVERSEN

For å gjøre knekkeberegninger i traversen lokaliseres de korteste og lengste stavnene i forskjellige områder av traversen.



FIGUR 4: TRAVERSENS HOVEDDEL (INN FELT I RØDT)



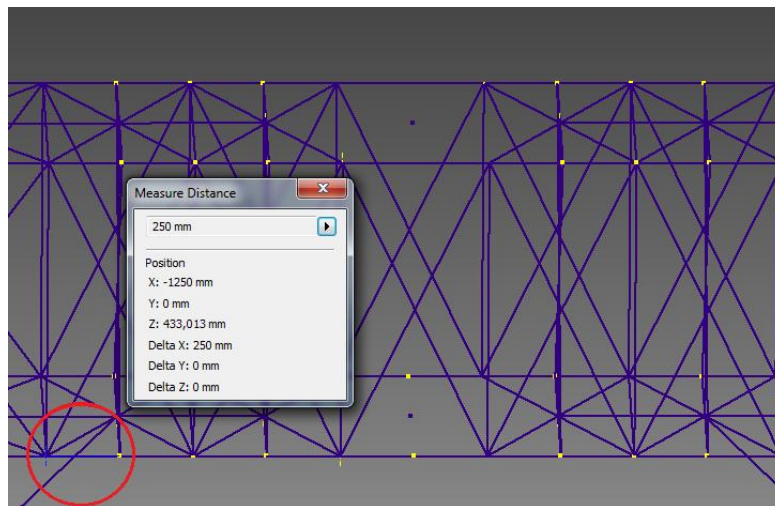
FIGUR 5: SPIRENE TIL TRAVERSEN (INN FELT I RØDT)

KNEKKLENGDER PÅ STAVENE I TRAVERSENS HOVEDDEL

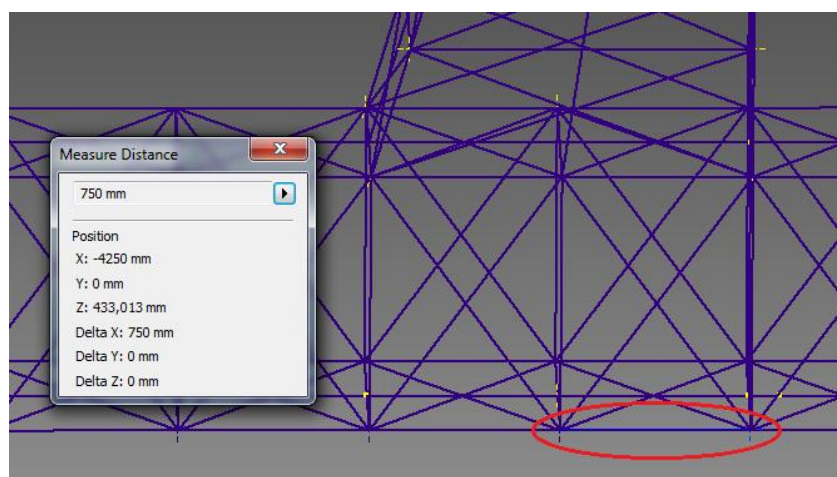
TABELL 4: KNEKKLENGDER FOR TRAVERSENS HOVEDDEL

Horisontaler minimum	Horisontaler maksimum	Diagonaler minimum	Diagonaler maksimum	Fra siden
250 mm	750 mm	581 mm	645 mm	466 mm

Kommentar til knekkelengder på traversens hoveddel: De korteste horisontalene finner vi i senter av hoveddelen til traversen. Her har vi lengder på 250 mm, de lengste horisontalene er de som er oppdelingene av selve rutene, disse er på 750 mm hver. De korteste diagonalene finner man som kryss-staver blant de korteste horisontale staverne i midten av hoveddelen. De lengste diagonalene er de som danner krysset i hver rute. Lengdene for horisontalene fra siden er det samme fra bunnen av hoveddelen og til toppen av spiret, denne er på 466 mm.

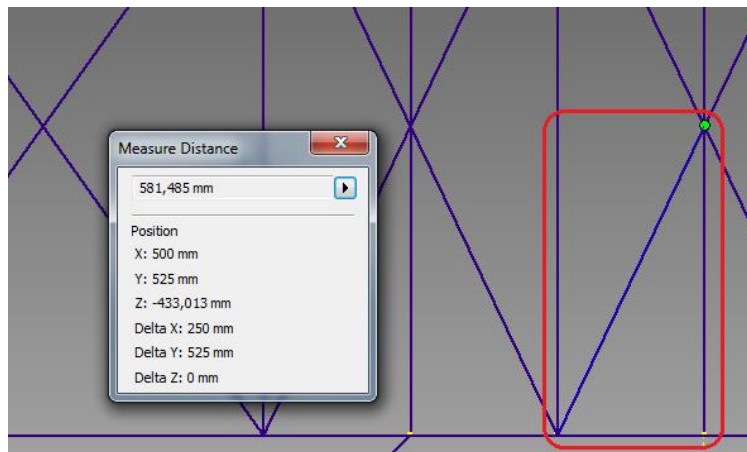


FIGUR 6: HORIZONTALSTAV I MIDTEN

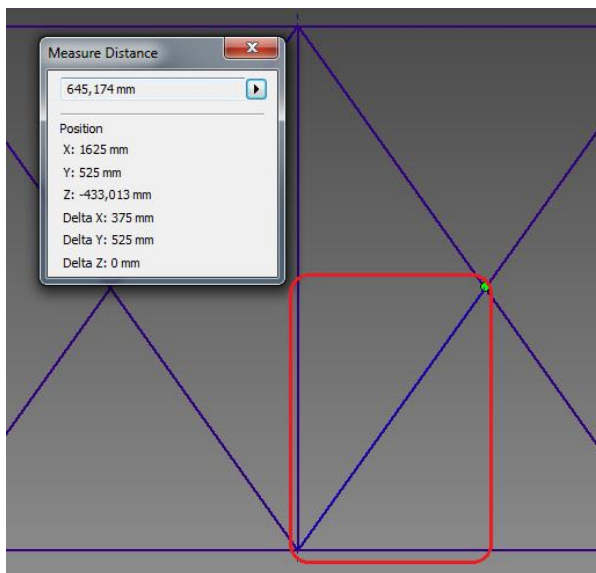


FIGUR 7: HORIZONTALSTAV UNDER SPIRET

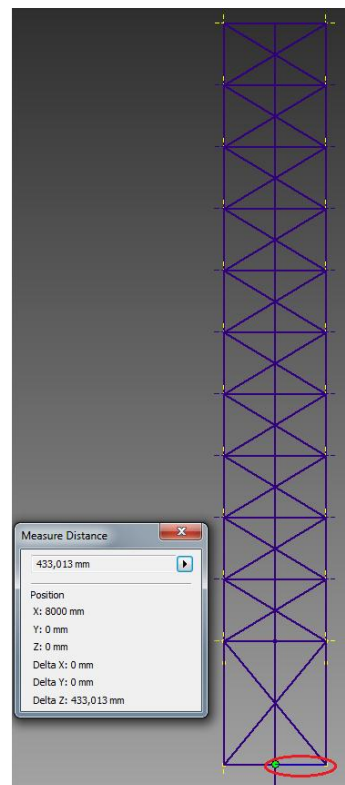
Diagonaler



FIGUR 8: DIAGONAL FRA MIDTEN AV TRAVERSEN



FIGUR 9: DIAGONAL TRAVERS

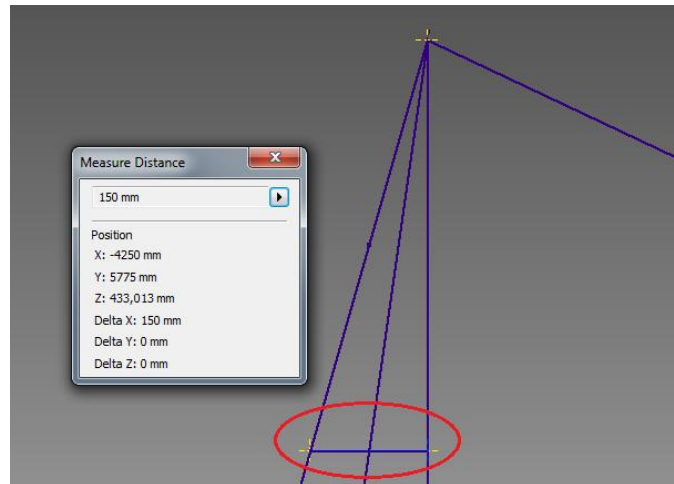


FIGUR 10: TRAVERS SETT FRA SIDEN

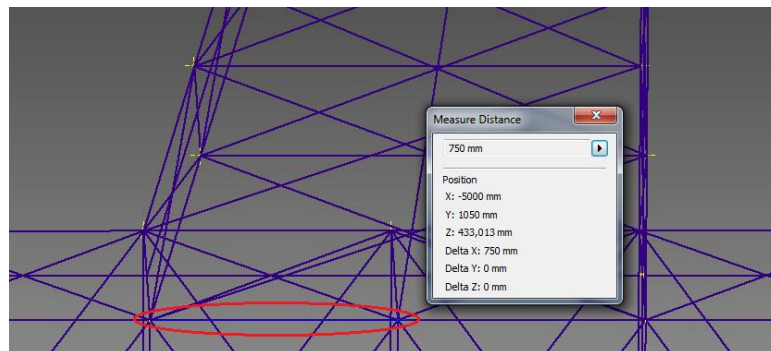
KNEKKLENGDER PÅ STAVENE I SPIRENE

TABELL 5: KNEKKLENGDER I SPIRENE TIL TRAVERSEN

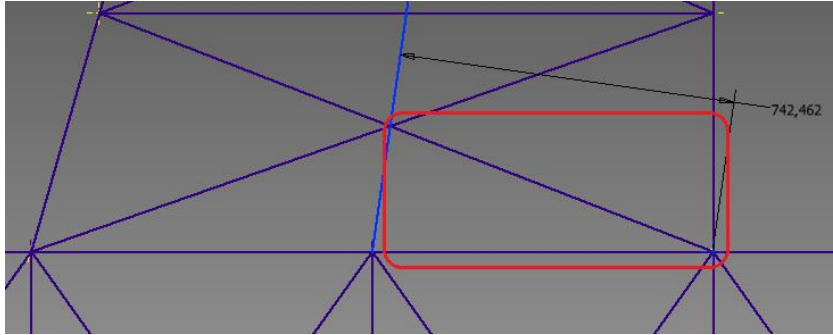
Horisontaler minimum	Horisontaler maksimum	Diagonaler minimum	Diagonaler maksimum	Fra siden
150 mm	750 mm	342 mm	743 mm	466 mm



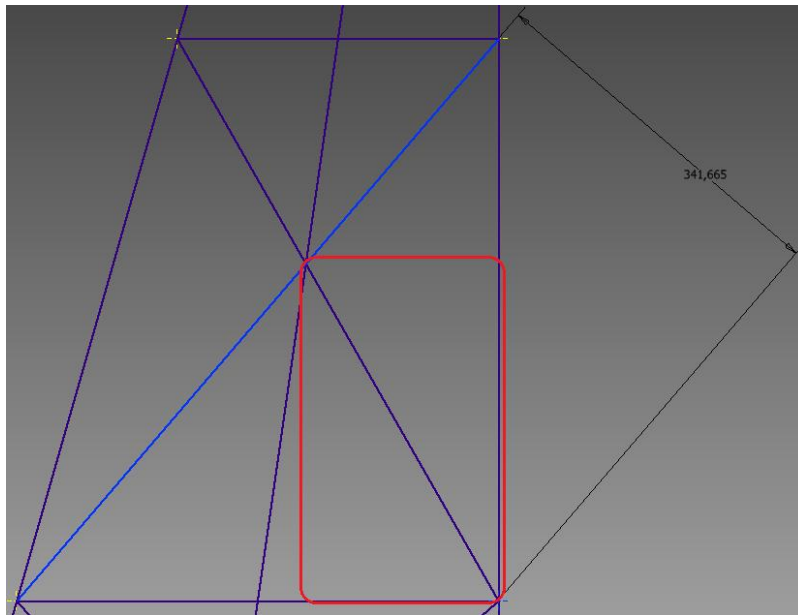
FIGUR 11: HORIZONTALSTAV I TOPPEN AV SPIRET



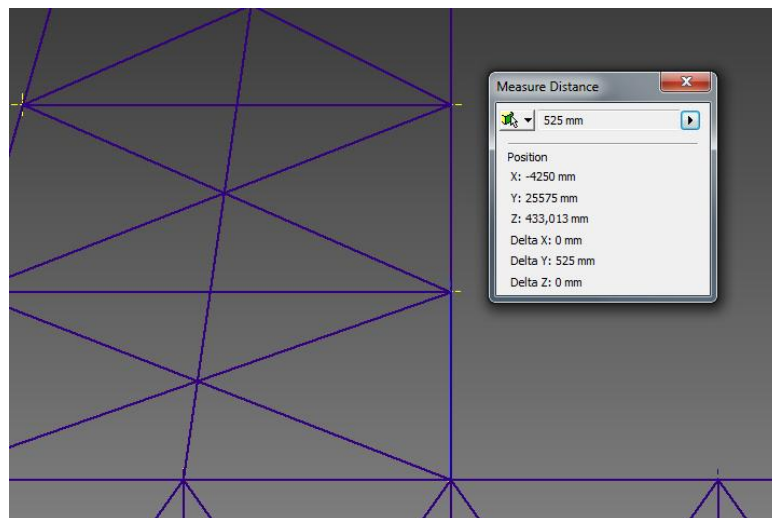
FIGUR 12: HORIZONTALSTAV I BUNNEN AV SPIRET



FIGUR 13: DIAGONAL NEDERST PÅ SPIRET



FIGUR 14: DIAGONAL ØVERST PÅ SPIRET



FIGUR 15: SPIRVANGE KNEKKELENGDE

TABELL 6: TILLATT KNEKKSPENNING FOR TRAVERSENS HOVEDDEL

Gitterdiameter	Knekkelengde horisontal	Slankhet horisontal	Tillatt knekkspenning horisontal	Knekkelengde diagonal	Slankhet diagonal	Tillatt Knekkspenning diagonal
16	150 mm	32	370 MPa	581 mm	128	90 MPa
20	150 mm	26	381 MPa	581 mm	102	136 MPa
25	150 mm	20	390 MPa	581 mm	82	194 MPa
16	750 mm	159	60 MPa	645 mm	138	78 MPa
20	750 mm	128	90 MPa	645 mm	111	117 MPa
25	750 mm	102	82 MPa	645 mm	88	174 MPa

Ut i fra tabellene kan man se at det spesielt er lav tillatt knekkspenning ved de største lengdene på horisontalene. For diagonalene så er det jevnt over ganske lav tillatt knekkspenning.

TABELL 7: TILLATT KNEKKSPENNING FOR SPIRET

Gitterdiameter	Knekkelengde horisontal	Slankhet horisontal	Tillatt knekkspenning horisontal	Knekkelengde diagonal	Slankhet diagonal	Tillatt Knekkspenning diagonal
16	150 mm	32	370 MPa	342 mm	74	225 MPa
20	150 mm	26	381 MPa	342 mm	60	285 MPa
25	150 mm	20	390 MPa	342 mm	48	330 MPa
16	750 mm	159	60 MPa	743 mm	159	60 MPa
20	750 mm	128	90 MPa	743 mm	128	90 MPa
25	750 mm	102	82 MPa	743 mm	102	82 MPa

VEDLEGG 8. TEST AV FORSKJELLIGE VANGEDIAMETRE OG GITTERDIAMETRE.

Undersøkte diametre på vanger og gitter i mast systematisk. Begynte med 60 mm på vanger og 16 mm på gitter. Lasttilfellet var skjev islast.

Spenningsene som blir listet opp er maksimum i gitter eller vanger.

I all testing er traversgitterdiameter satt til 32 mm og gurt diameter er satt til 40 mm.

TABELL 1: TEST AV VANGEDIAMETER, GITTER DIAMETER VAR 16 MM PÅ ALLE GITTER

	Vangediameter, mm	Maks spenning
Seksjon 1	70	270,7 MPa - holder
Seksjon 2	60	338,7 MPa - holder
Seksjon 3	60	291,7 MPa - holder
Seksjon 4	60	221,3 MPa - holder

TABELL 2: TEST AV VANGEDIAMETER, GITTER DIAMETER VAR 16 MM PÅ ALLE GITTER

	Vangediameter, mm	Maks spenning, MPa
Seksjon 1	60	370,7 - holder
Seksjon 2	50	484 – holder ikke
Seksjon 3	50	417 – holder ikke
Seksjon 4	50	315 - holder

TABELL 3: TEST AV VANGEDIAMETER, GITTER DIAMETER VAR 16 MM PÅ ALLE GITTER

	Vangediameter, mm	Maks spenning, MPa
Seksjon 1	60	374 - holder
Seksjon 2	60	336 – holder
Seksjon 3	60	290 – holder
Seksjon 4	50	319 - holder

Vangediametre fra tabell 3 ble valgt.

TABELL 4: TEST AV GITTERDIAMETER, VANGEDIAMETER VAR PÅ DET SOM BLE BRUKT I TABELL 3.

	Gitterdiameter, mm	Maks spenning, MPa
Seksjon 1	16	100 – holder ikke
Seksjon 2	16	114 – holder ikke
Seksjon 3	16	133 – holder ikke
Seksjon 4	16	171 – holder ikke

TABELL 5: TEST AV GITTERDIAMETER, VANGEDIAMETER VAR PÅ DET SOM BLE BRUKT I TABELL 3.

	Gitterdiameter, mm	Maks spenning, MPa
Seksjon 1	20	82 – holder
Seksjon 2	20	91 – holder
Seksjon 3	20	103 – holder
Seksjon 4	20	122 – holder

Diametre fra tabell 5 ble valgt for gitteret.

En kombinasjon av valgt vangediametre og valgt gitterdiametre gir disse resultatene:

TABELL 6: TEST AV GITTERDIAMETER, VANGEDIAMETER VAR PÅ DET SOM BLE BRUKT I TABELL 3.

	Vangediameter, mm	Maks spenning, MPa
Seksjon 1	60	389 – holder
Seksjon 2	60	349 – holder
Seksjon 3	60	302 – holder
Seksjon 4	50	330 – holder
	Gitterdiameter	Maks spenning, MPa
Seksjon 1	20	83 – holder
Seksjon 2	20	92 – holder
Seksjon 3	20	103 – holder
Seksjon 4	20	122 – holder

VEDLEGG 9: TEST VALGTE DIAMETRE VED FORSKJELLIGE LASTTILFELLER.

Etter at vangediametre på 60 mm, 60 mm, 60 mm, 50 mm (seksjon 1,2,3,4) og gitterdiametre på 20 mm, 20 mm, 20 mm, 20 mm (seksjon 1,2,3,4) var valgt ble dette testet i alle de forskjellige lasttilfellene i COMSOL.

Høye verdier i travers skyldes at kritiske punkter ble tatt med i analysen.

TABELL 1: VERDIER FRA COMSOL

Lasttilfelle	Skjev islast	Max islast	Linebrudd ytterside	Vind på is
Maks spenning, i vange	389 MPa	67 MPa	88 MPa	449 MPa
Maks spenning, gitter	122 MPa	35 MPa	172 MPa	155 MPa
Maks spenning, V-kjede	19 MPa (aksial)	28,1 MPa (aksial)	9,1 MPa (aksial)	19 MPa (aksial)
Maks spenning, travers	44814,7 MPa	6096 MPa	4475 MPa	12939,9 MPa
Maks deformasjon, vange	462 mm	3,4 mm	86,1 mm	461 mm
Maks deformasjon, gitter	462 mm	3,4 mm	86,1 mm	461 mm
Maks deformasjon, V-kjede	1309 mm	87,7 mm	2356 mm	697 mm
Maks deformasjon, travers	780,5 mm	37,8 mm	307,6 mm	697 mm
Gjennomsnittsspenning, vange	175 MPa	34,3 MPa	32,5 MPa	174 MPa
Gjennomsnittsspenning, gitter	40 MPa	5,6 MPa	49 MPa	48 MPa
Gjennomsnittsspenning, V-kjede	14,7 MPa (aksial)	20,9 MPa (aksial)	6,9 MPa (aksial)	10,5 MPa (aksial)
Gjennomsnittsspenning, travers	55,5 MPa	42,8 MPa	17 MPa	24,7 MPa
Maks aksialkraft, vange	745621 N	-40254 N	119191 N	954672 N
Maks aksialkraft, gitter	31329 N	33359,5 N	33272,3 N	40004,4 N
Maks aksialkraft, V-kjede	82357 N	1210000 N	39321 N	81942 N
Maks aksialkraft, travers	1753760	2560000 N	85625 N	1537470 N

I linebrudd ble det for høy maks spenning på gitteret, så spenningen i hvert gitter ble tatt ut:

TABELL 2: MAKS SPENNING PÅ GITTER UNDER LASTTILFELLET LINEBRUDD

Gitter seksjon 1	Gitter seksjon 2	Gitter seksjon 3	Gitter seksjon 4
58 MPa - holder	116 MPa – holder	89 MPa - holder	175 MPa – holder ikke

Spenningen er for høy i gitter seksjon 4 så det ble bestemt å gå opp til 25 mm i diameter.

I vind på is ble det for høy maks spenning på gitteret, så spenningen i hvert gitter ble tatt ut:

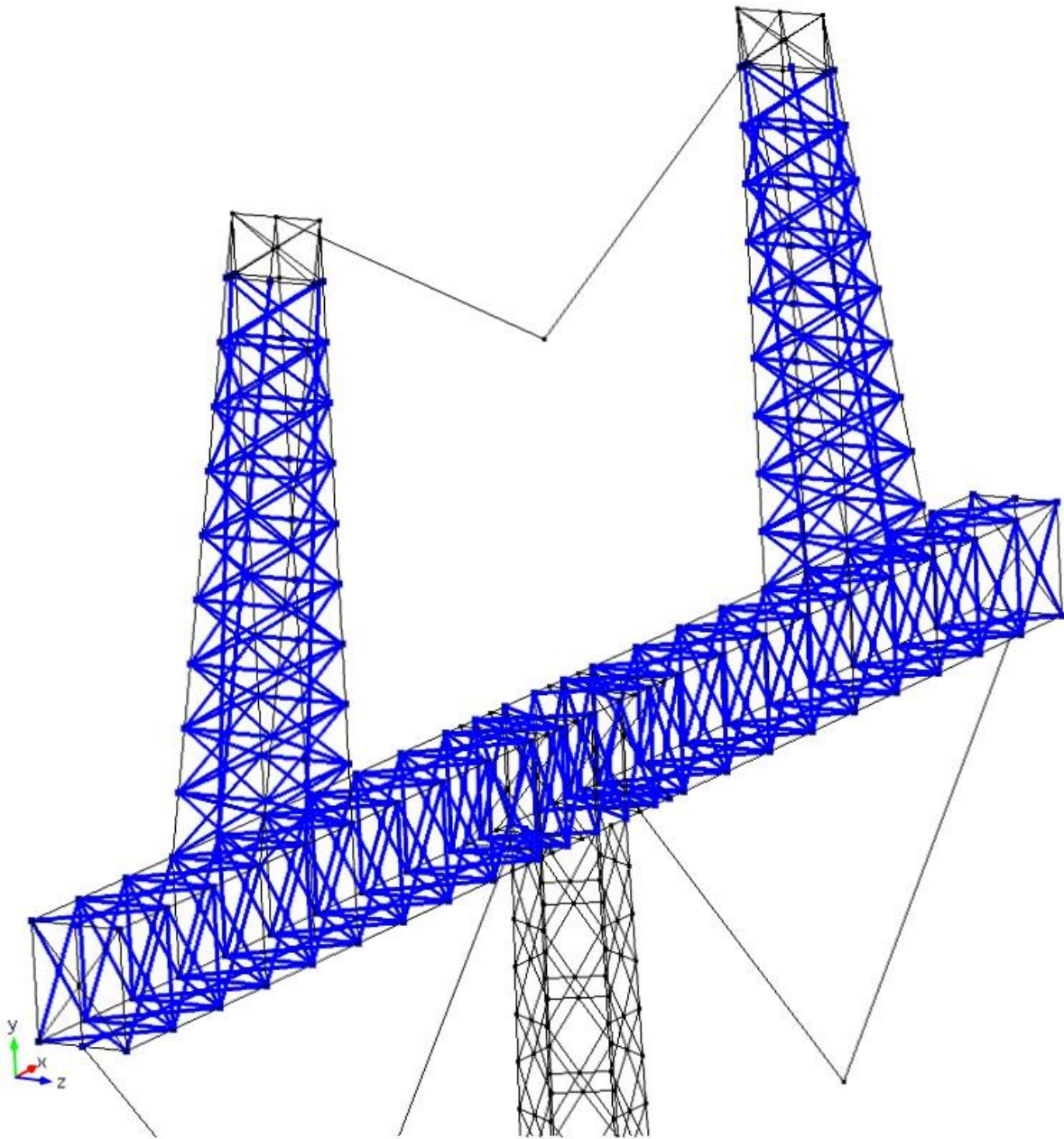
TABELL 3: MAKS SPENNING PÅ VANG UNDER LASTTILFELLET VIND PÅ IS

Vange seksjon 1	Vange seksjon 2	Vange seksjon 3	Vange seksjon 4
448,6 MPa - holder ikke	394 MPa – holder ikke	317 MPa - holder	290 MPa – holder

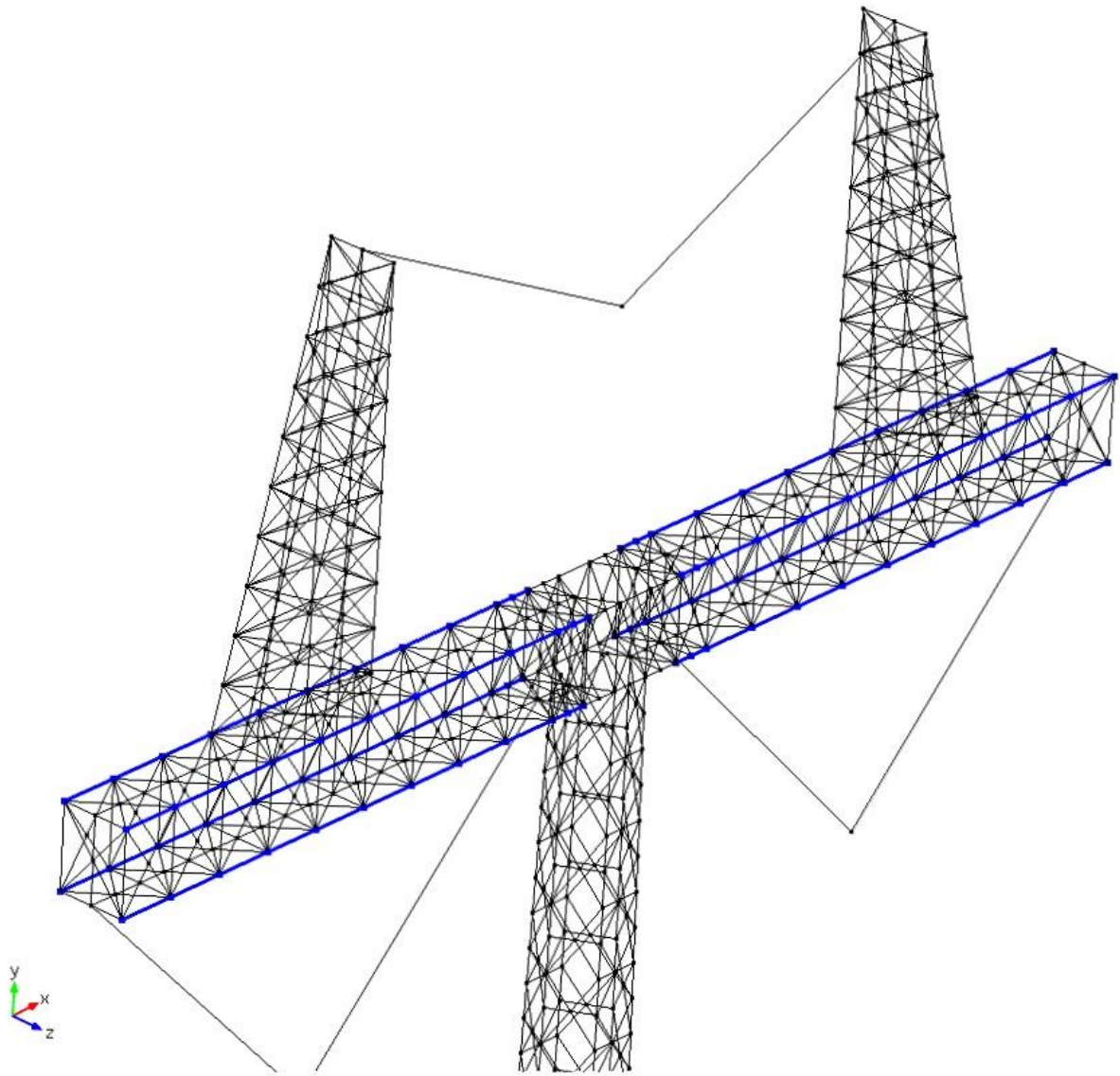
Spenningen er for høy i vanger seksjon 1 og vanger seksjon 2 så det ble bestemt å gå opp til 70 mm i diameter på begge disse.

VEDLEGG 10: STAVVALG I COMSOL

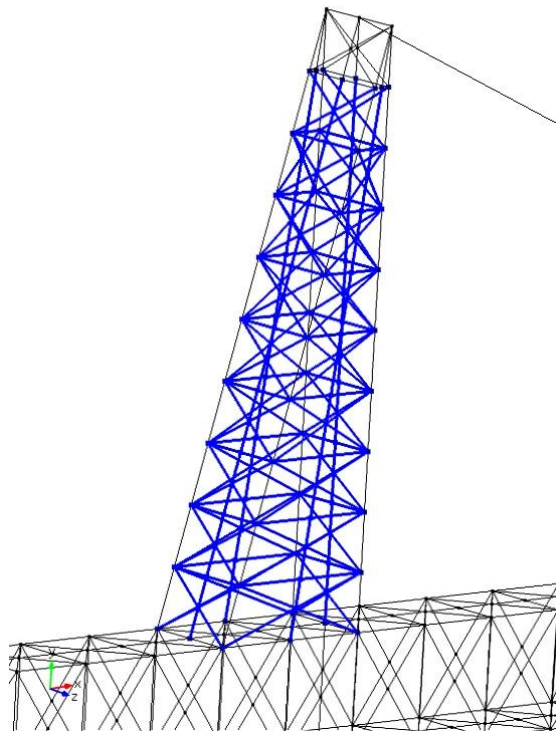
Figurene nedenfor viser hvilke staver som ble brukt til å finne maks spenninger i forskjellige deler av masten.



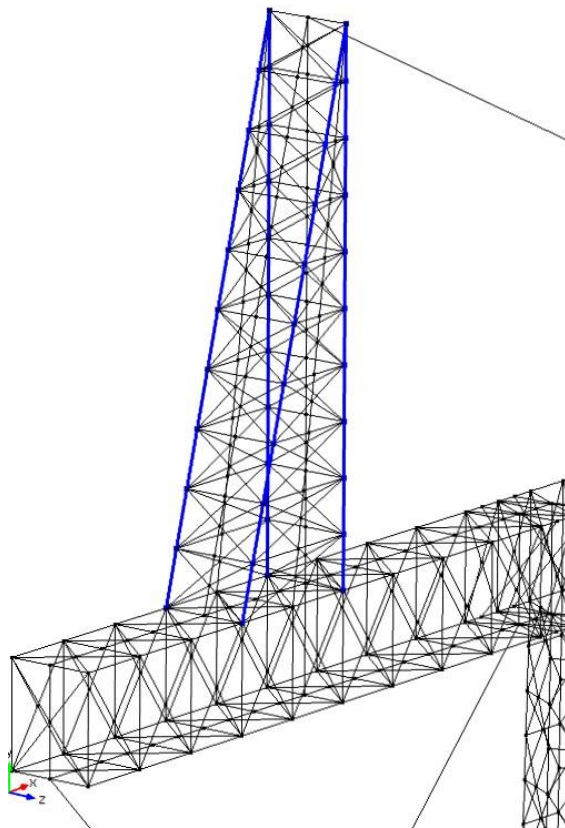
FIGUR 1: GITTER I TRAVERS, TOPPENE ER TATT BORT



FIGUR 2: GURTENE I TRAVERS. MERK AT MIDTEN ER TATT BORT.



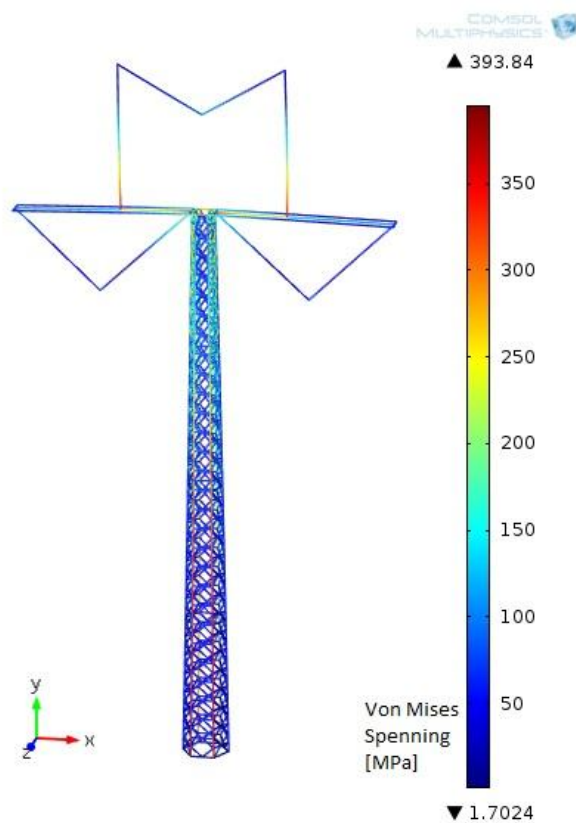
FIGUR 3: GITTER I SPIR. TOPP ER FJERNET.



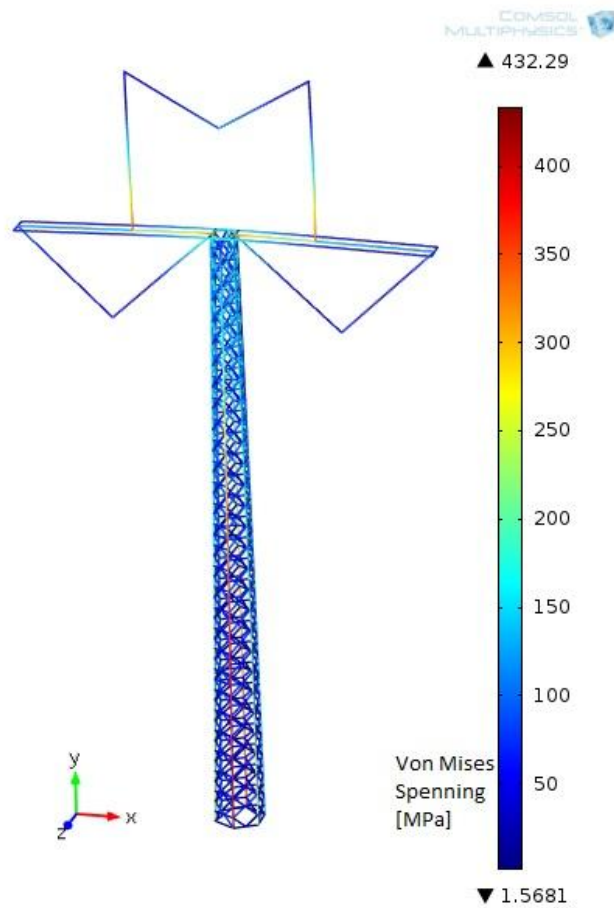
FIGUR 4: VANGER I SPIR

VEDLEGG 11. SAMMENLIGNING AV VRIDD OG IKKE-VRIDD MAST.

Det ble testet to måter traversen kunne stå på masten. Dette ble utført før traversen var ferdig utviklet, det ble derfor brukt en enkel "placeholder" modell. Begge alternativene ble testet i COMSOL. Det ble brukt vangediameter på 60 mm, gitterdiameter på 16 mm og en traversdiameter på 200 mm. Det ble brukt så stor diameter på traversen for å stive den opp og gjøre den mer realistisk til å være en så enkel modell. Lasttilfellet skjev islast ble brukt.



FIGUR 1: SPENNINGSPLOTT, IKKE VRIDD TRAVERS.(ALTERNATIV 1)



FIGUR 2: SPENNINGSPLOTT, VRIDD TRAVERS.(ALTERNATIV 2)

TABELL 1: VRIDD OG IKKE VRIDD SAMMENLIGNING.

Traversplassering	Max spenning, vang [MPa]	Max spenning, gitter [MPa]	Max spenning, travers [MPa]
Ikke vridd (standard)	393	271	345
Vridd	432	206	339

Det er her mest logisk å sammenligne i vangene. Den som ikke er vridd har de miste spenningene (Alternativ 2).

Deformasjonen var tilnærmet lik i begge tilfellene.

Vedlegg 12

Several microalloy steels have been developed by Fundia. The table below shows grades, approximate analyses and mechanical properties.

Grades of steel

Grade	C%	Si%	Mn%	Other	Dim(mm)	ReH(MPA)	Rm(Mpa)	A5(%)	KV J	Temp.°C
SB400	0,18	0,30	1,2	Nb/V alloy	<80	>400	>530	>20	27	-20
280	0,18	0,35	1,4	S/V alloy	<80	>440	550-700	>19	-	-
280A	0,18	0,35	1,4	AL/V alloy	<80	>440	550-700	>19	>27	-20
SB500	0,18	0,35	1,4	Nb/V alloy	<30	>500	>610	>16	>27	-20
					(30)-40	>470	>610	>16	>27	-20
					(40)-50	>450	>610	>16	>27	-20
SB550+	0,18	0,40	1,3	Nb/V alloy	<80	>550	>650	>19	>27	-20
SB600	0,23	0,35	1,5	Nb/V alloy	>15	>600	ca 780	>14	-	-
					(15)-30	>570	ca 780	>14	-	-
					(30)-60	>540	ca 780	>14	-	-
					(60)-	>510	ca 780	>14	-	-
482	0,42	0,25	1,4	AL/Cr/V alloy	>80	>580	>850	>12	>27	+20

State as delivered

These steels are normally delivered in the hot-rolled state. They can also be normalised where so required, for example after forging or extensive cold forming. Normalisation improves the already good impact toughness of these steels in the hot-rolled state.

After heating to high temperature, for example normalising at around 900°C – followed by natural cooling in air – the yield strength is reduced by around 10–20%.

Machining

In the untreated state these steels are easy to machine. Grades that are alloyed with sulphur have even better machining properties.

Hot rolling

Forging takes place at 900–1200°C The holding time following thorough heating should be kept as short as possible. Normalisation may be required following plastic forming in the cold state.

Weldability

These steels have good weldability and can be welded using all common manual and automated welding techniques. The composition of these steels is such that they are resistant to hot cracking, i.e. cracks that arise when the weld metal solidifies.

Summary of grades and equivalent standard

Grade	EN	DIN	BS	AFNOR	ASTM/SAE
SB400	S420N	StE380	-	-	-
SB500	S460N	StE460	-	-	-
SB550+	17MnV6	StE500	55M	E420	A572
482	38MnVS6	-	-	30MV6	1045V

For more information regarding analysis, strength and delivery state refer to the relevant standard.

With a carbon content of less than 0.25% these steels can normally be welded without preheating in thicknesses up to 30–40 mm, with no risk of cracking in the heat affected zone close to the weld. When welding thicker material and steel with a carbon content higher than 0.25%, or if there is a risk of the weld cooling too rapidly, the work should be carried out at a slightly higher temperature, around 150–200°C.

It is important to ensure that the welding electrodes and consumables are dry. Where post-weld stress relief is carried out this should be done at 550–600°C for one hour.

Vedlegg 13 V-Kjede info.

KOMPONENTER FOR KJEDETYPE "V16" og "V21" triplex i BM, inntil 3gr. hor.vinkel, 420kV

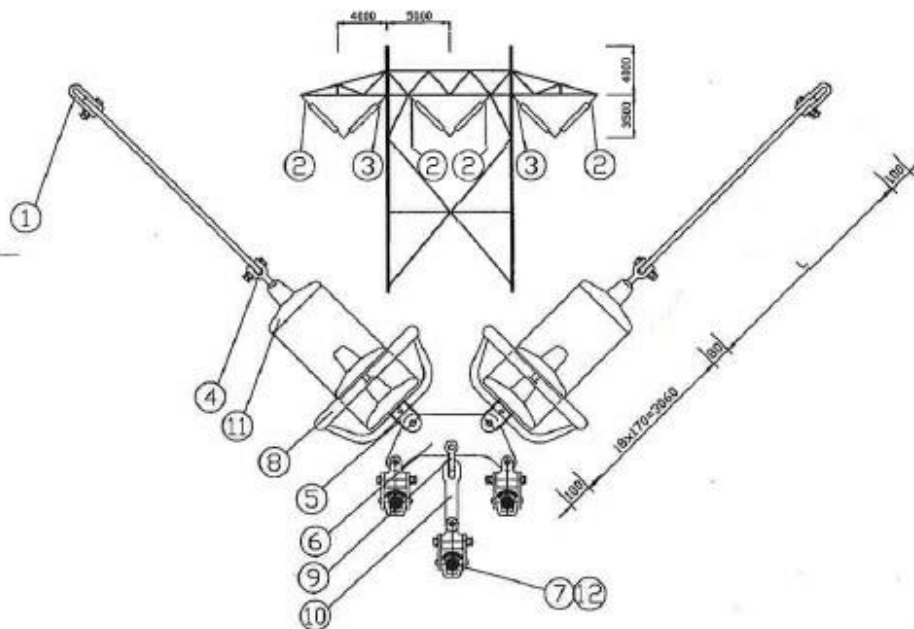
BB-1062

Del nr.	Spesifikasjon	Antall pr.sett	Antall pr.mast	Merket	Matr. Stålkval.	Bruddl. kN	Vekt
1	FASEFESTE se tegn. nr.: Følger masten		6				
	Armaturer: Best.nr.: Lev. Br. Berntsen A/S						
2	Kjedeforlengere, 20x65mm med 32mm og 22mm hull. Tegn.nr. 969		4	969+	Fe360B	210	12.9
3	Byggelengde: 1200mm		2	byggelengde			15.5
4	20mm kulegaffler med M20 sh.skr. Art.nr. 09.1330.00	2	6		Seigh.	210	0.8
5	20mm kulehaker med M20 sh.skr. og med klemmer for feste av feltarmatur type E. Art.nr. 09.1013.00	2	6	361	SJK500	210	2.2
6	20mm 8k for V-kjeder, C-C kjeder 310mm, C-C liner 450mm. Tegn.nr. 901	1	3	901	Fe510D	min.200	13.0
7	HK 6 med ledd 515, for linediam. ca. mm. Art.nr. 09. .04	3	9	Art.nr.		150	Ca.8.0
8	Feltarmatur, type E	2	6	E	Al.leg.		2.0
9	3/4" harpesjakkal med M22 sh.skr. Art.nr. 09.2310.00	1	3		Sh.	260	1.1
10	20x50mm forlenger med 1stk. ovalt øye for 3/4" sjakkal, 22mm hull for hengeklemme. Byggelengde: 380mm. Teg.nr. 967	1	3	967+	Fe510D	200	2.6
11	ISOLATORER Best.nr.: Lev.: Ensto-NTP						
	Kjedetype "V16" 2 x 18 ledd NTP-33048	36	108	NTP		160	6.2
	Kjedetype "V21" 2 x 18 ledd NTP-33049 (Isolasjonsnivå iht. montajeliste)	36	108	33048 33049	Herd. glass	210	7.0
12	ARMERINGSSPIRALER Best.nr.: Lev. Art.nr.						
	Armeringsspiraler for linetype: Antall tråder pr. sett:						
	Tråddiam.: Pakkes med 6 sett pr. emballasje	3	9		Al.leg.		
	Spirallengde: 2500 mm.						

Tiltrekningsmoment for hengeklemme HK6: 6kpm. Alle armatursplinter nedenfor isolatorene skal bøyes helt inn til skruene. Alle armatursplinter ovenfor isolatorene skal være godt viket. Isolatorsplinter og de store bronse-splintene i B.B. kulehaker skal ikke viktes. Armeringsspiraler skal monteres jevne i endene og alle kordeller skal ligge inn til linen. Mutterskruer pos. 1 og 5 skal monteres med skruhodet opp

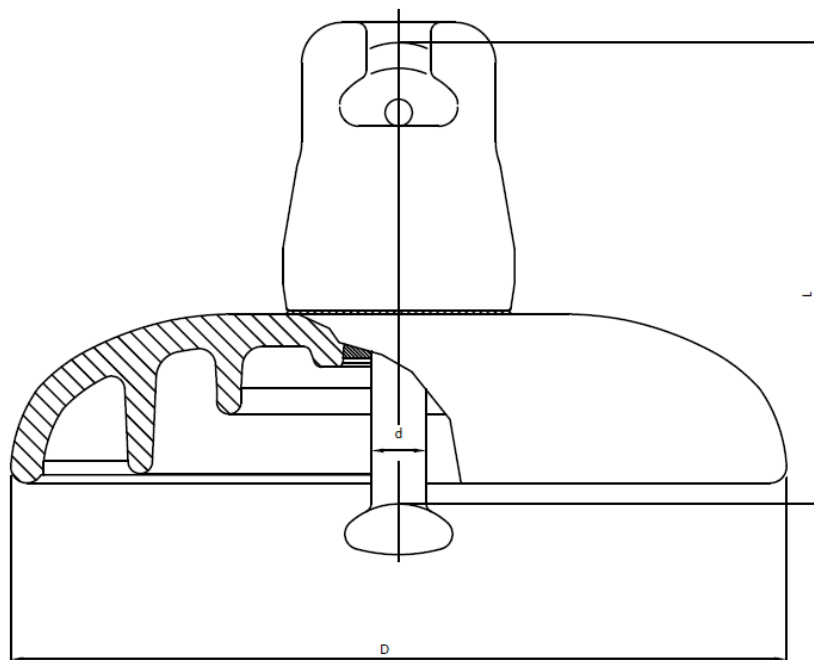
Tot. vekt "V16": ca. 299kg
Tot. vekt "V21": ca. 327kg

01.12.98



Pos.	Forordning	Typet	Material	Stør.
1	Lineoppheng for lavfeltmast STR1			17
2	Armatur for kjedetype "V16" og "V21" i mast			11
3	type BM, triplex, inntil 3gr. hor.vinkel			17
DANN AB BB-1062 A4				

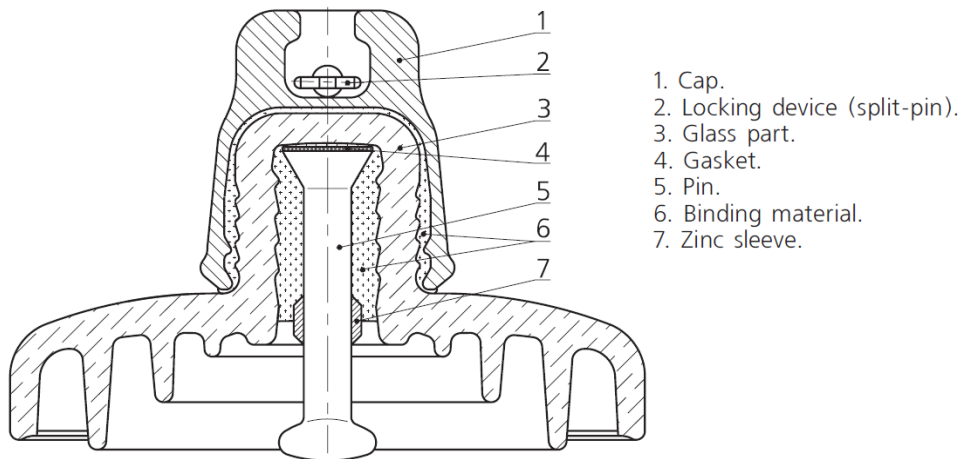
VEDLEGG 14. INFO OM V-KJEDETS GLASSISOLATOR.



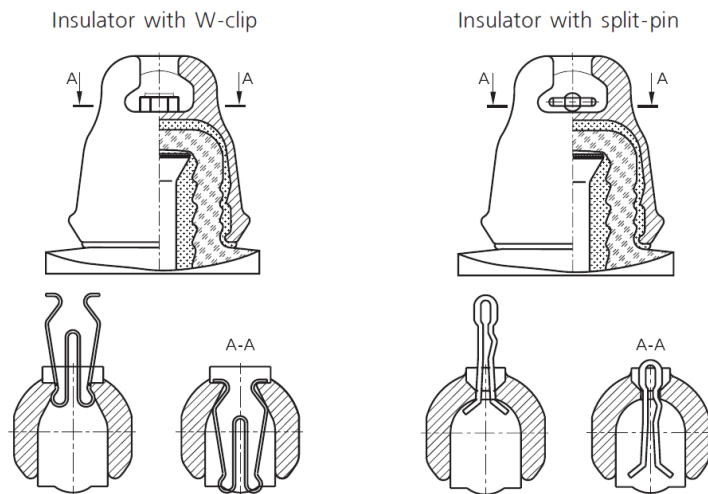
FIGUR 1: TEGN FOR MÅL PÅ GLASSISOLATOR

NTP art. Nr	K 33049 50
Elnummer	28 617 19
IEC Klasse	U210B
Min. mek. Bruddlast kN	210
Skåldiam. mm (D)	280
Byggelengde mm (L)	170
Krypestrømsvei mm	380
Boltdiam mm (d)	20
50 Hz gjennomslagsspenning i prøveolje kV	130
Holdespenning 1 min.tørr kV	75
Holdespenning 1 min. våt kV	45
Impulsholdespenning tørr kV	110
Nettovekt kg/stk	7,2
Antall stk/kasse	6
Antall stk/pall	72
Bruttovekt pall kg	593
Volum pall m ³	1,41

FIGUR 2: FAKTA GLASSISOLATOR



FIGUR 3: NAVN PÅ GLASSISOLATOR



FIGUR 4: LÅSEMEKANISME GLASSISOLATOR

Kilder:

Global insulator group, Insulators for power transmission lines and substations with voltage from 0.4 kV to 1150kV. [http://www.gig-group.com/data/File/en/Glass Insulators.pdf](http://www.gig-group.com/data/File/en/Glass%20Insulators.pdf) [02.05.13] Side 12 og 31.

Glassisolatorer, NTP AS. <http://www.ntp-as.no/system/script/getfile2.asp?id=5> [02.05.13]

VEDLEGG 15. DIGITALE VEDLEGG.

- A. Lasttilfellet skjev islast beregninger.
- B. Lasttilfellet maks islast beregninger.
- C. Tverrsnittsberegninger.
- D. Beregninger på ferdig dimensjonert mast.
- E. Knekking av forskjellige tverrsnittsareal med forskjellige knekk lengder.
- F. Resultater ferdig mast.
- G. Forprosjekt: RSB Høyspenningmast 6/8-Kantete Seksjoner.
- H. RSB-master Presentasjon Omega Elkraft.
- I. Bøyespenningsberegninger på over- og undergurter
- J. Strekmodell av mast fra Autodesk Inventor.
- K. COMSOL-filer.