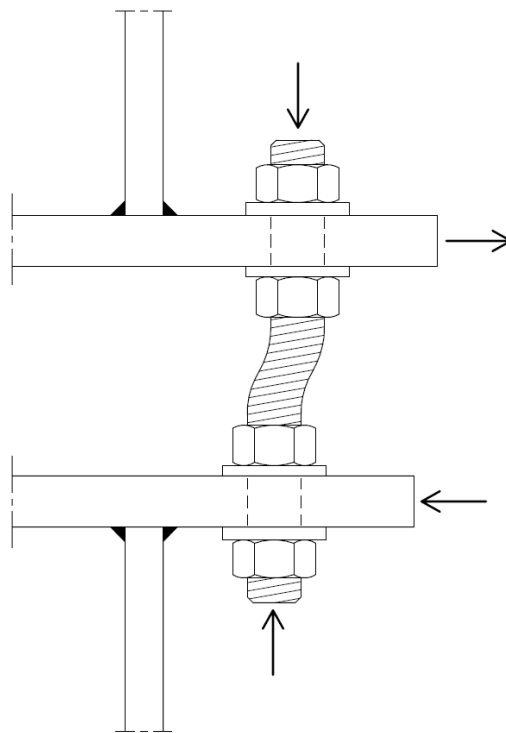


UTMATTNING AV JUSTERBARA FOTPLÅTINFÄSTNINGAR



Wylliam Husson

2019-02-15

Förord

Arbetet som beskrivs i denna rapport pågick under perioden oktober 2018 till februari 2019. Provingarna utfördes av Erik Andersson hos MCE Lab (tidigare Complab), LTU, tack vare finansiering av SBUF via Skanska Sverige AB.

ProDevelopment AB stod för analysen genom Wylliam Husson med hjälp och goda råd av Ove Lagerqvist.

Söderhamn,

Februari 2019

Sammanfattning

I justerbara fotplåtfästningar utsätts skruvarna för en ovanlig kombination av excentricitetsmoment, normalkraft och skjuvkraft. Dessutom är deras böjstyvhet mindre än den hos plåtarna de förbinder och tredimensionella deformationer kan leda till tvångsmoment med risk för försämrade utmattningsegenskaper.

Syftet med detta SBUF-projekt var att undersöka momentfördelningen i skruvarna och dess betydelse för utmattningsbeteendet för att kunna ge tydliga rekommendationer om hur infästningsgrad och eventuella tvångskrafter bör beaktas vid dimensionering.

En serie av 6 statiska provningar utfördes där två skruvar instrumenterades med trådtöjningsgivare för att mäta moment i två led. Två olika avstånd mellan plåtarna testades. Trådtöjningsgivarnas läge förändrades mellan försöken för att få en bild på spänningsfördelningen längs skruvstammarna.

Dessa försök visade att tredimensionella plåtdeformationer ger upphov till betydliga tvångsmoment i skruvarna i stolpens veka riktning, ut ur skruvplanet (M_y). Även momentet i stolpens styva riktning, in i skruvplanet (M_x), påverkas av tvångsdeformationer, dock i mindre grad.

Tvångsmomentet i stolpens veka riktning (M_y) kunde simuleras tillfredsställande med en enkel finit elementmodell. Tvångsmomentet i stolpens styva riktning (M_x) var däremot svårare att simuleras med enkla medel. I det här fallet kunde det uppskattas på säkra sidan till 50 % av momentet från tvärkraft.

Tre fullskaliga utmattningsprovningar utfördes med nya oinstrumenterade skruvar. Samtliga prov klarade betydligt fler cykler än vad som hade beräknats enligt EN 1993-1-9 med den enkla modellen som normalt tillämpas vid dimensionering. Vanlig dimensionering utan hänsyn till tvångsmomenten visade sig tillräcklig säker.

I normala fall med utformningar liknande den i denna rapport rekommenderar vi att använda handberäkningsmodellen utan hänsyn till tvångsmoment. Spänningsvidden består av spänningar från normalkraft samt moment av excentrisk tvärkraft. Skruvarna antas fast inspända i båda ändar och momentfördelningen är linjär och symmetrisk. Utmattningskontrollen görs för en kritisk punkt intill mutterns fria sida där momentet är störst.

Vid osäkerhet kan en enkel finit elementmodell användas för att bedöma storleken på tvångsmomentet i stolpens veka riktning. Ger detta större spänningsvidder än vad normalkraft och excentricitetsmoment ger tillsammans, behöver plåttjocklekarna ökas. I så fall är det mer effektivt att öka justerplåtens tjocklek först.

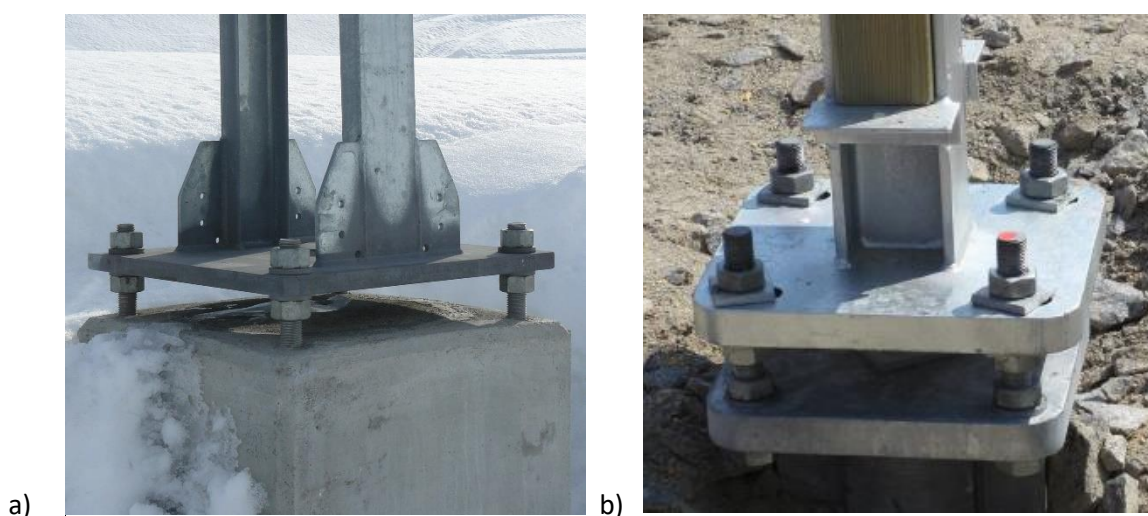
Innehållsförteckning

Förord	1
Sammanfattning	2
Innehållsförteckning	3
1 Inledning	4
2 Provningar	6
2.1 <i>Provupställning</i>	6
2.2 <i>Statisk provning</i>	7
2.3 <i>Utmattningsprovning</i>	9
3 Resultat	10
3.1 <i>Normalkraft</i>	10
3.2 <i>Moment, M_x</i>	11
3.3 <i>Moment, M_y</i>	13
3.4 <i>Utmattningsprovning</i>	14
4 Finit elementmodell	17
4.1 <i>Material</i>	17
4.2 <i>Geometri och elementnät</i>	17
4.3 <i>Interaktion mellan skruv och plåt</i>	18
4.4 <i>Kontakt mellan justerplåt och upplagslinjaler</i>	18
4.5 <i>Belastning</i>	18
5 Analys	19
5.1 <i>Moment, M_x</i>	19
5.2 <i>Moment, M_y</i>	20
5.3 <i>Utmattning</i>	23
5.3.1 <i>Normal dimensionering</i>	23
5.3.2 <i>Dimensionering med hänsyn till tvångsmoment</i>	24
5.3.3 <i>Dimensionering utifrån statistiska provningar</i>	24
6 Slutsatser	25

1 Inledning

Infästningen mellan en stålkonstruktion och dess fundament utgörs i de flesta fall av fotplåtar och ingjutna grundskruvar. Denna lösning är välkänd och för byggnader, där fotplåten brukar ligga an mot betongen eller någon form av undergjutning, finns accepterade dimensioneringsmodeller, se SS-EN 1993-1-8.

För andra typer av applikationer såsom master, vägmärken och bullerskärmar kan det finnas ett behov att justera fotplåtens höjdläge varvid skruvarna ofta kan liknas vid små "pelare" som överför hela belastningen. Fundamenten kan vara av betong (block eller spont) med ingjutna grundskruvar (se figur 1.1 a) eller pÅlar med olika typer av stÅlinfästningar (se figur 1.1 b).



Figur 1.1 Olika typer av fundament med möjlighet till justering i höjdläget

a) ingjutna grundskruvar i betongblock

b) Rör med stÅlinfästning

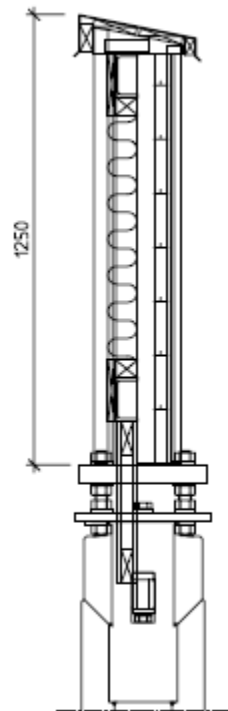
Moment och normalkraft i pelaren eller stolpen resulterar i normalspänningar i skruvarna. Tvärkraft tas genom skjuvning men excentriciteten ger upphov till ett böjmoment vars fördelning längs med skruvstammen beror på inspänningsgraden mellan skruv och plåt. Även tredimensionella deformationer i fotplåten kan orsaka ytterligare tvångsmoment i skruvarna.

Dessa fenomen är svåra att modellera och det finns tyvärr inget stöd i regelverket eller facklitteratur. I SS-EN 1993-4-1 (Dimensionering av stålkonstruktioner – Silor) anges till exempel att antagen infästningsgrad mellan skruv och plåt bör vara i enlighet med god ingenjörsexpraxis.

Om momenten i skruvarna underskattas kan det leda till mycket allvarliga konsekvenser, inte minst för utmattningsbelastade konstruktioner. Frågan har blivit allt mer aktuell vid stora järnvägsprojekt, och särskilt för de bärande konstruktionerna till bullerplank, där Trafikverket i sina granskningar har ifrågasatt tidigare praxis. Eftersom det saknas konkreta kriterier försvåras rationell dimensionering och godkännandeprocesserna kan upplevas som godtyckliga och utdragna.

I praktiken bidrar detta till osäkerhet och svårlösta konflikter. Byggprocessen kan stoppas för långdragna utredningar eller genomförande av tidskrävande och dyrbara åtgärder såsom förstärkningar (se exempel i figur 1.2) eller undergjutning.

Mest drabbade är lösningar med stålinfästningar som annars erbjuder en snabb och smidig grundläggning vilket är en stor fördel vid arbete längs vägar och järnvägar.



Figur 1.2 Exempel på fundament för en låg bullerskärm med orimligt tjock plåt på 50 mm.

Syftet med detta SBUF-projekt var att undersöka momentfördelningen i skruvarna och dess betydelse för utmattningsbeteendet för att kunna ge tydliga rekommendationer om hur infästningsgrad och eventuella tvångskrafter bör beaktas vid dimensionering.

En serie av 6 statiska provningar utfördes där två skruvar instrumenterades med trådtöjningsgivare för att mäta moment i två led. Två olika avstånd mellan plåtarna testades. Trådtöjningsgivarnas läge förändrades mellan försöken för att få en bild på spänningsfördelningen längs skruvstammarna.

Tre fullskaliga utmattningsprovningar utfördes med nya skruvar och antalet lastcykler till brott registrerades. Komponenterna utformades så att brott skulle ske i skruvarna. Trots detta uppstod istället sprickor i svetsar i två av tre försök.

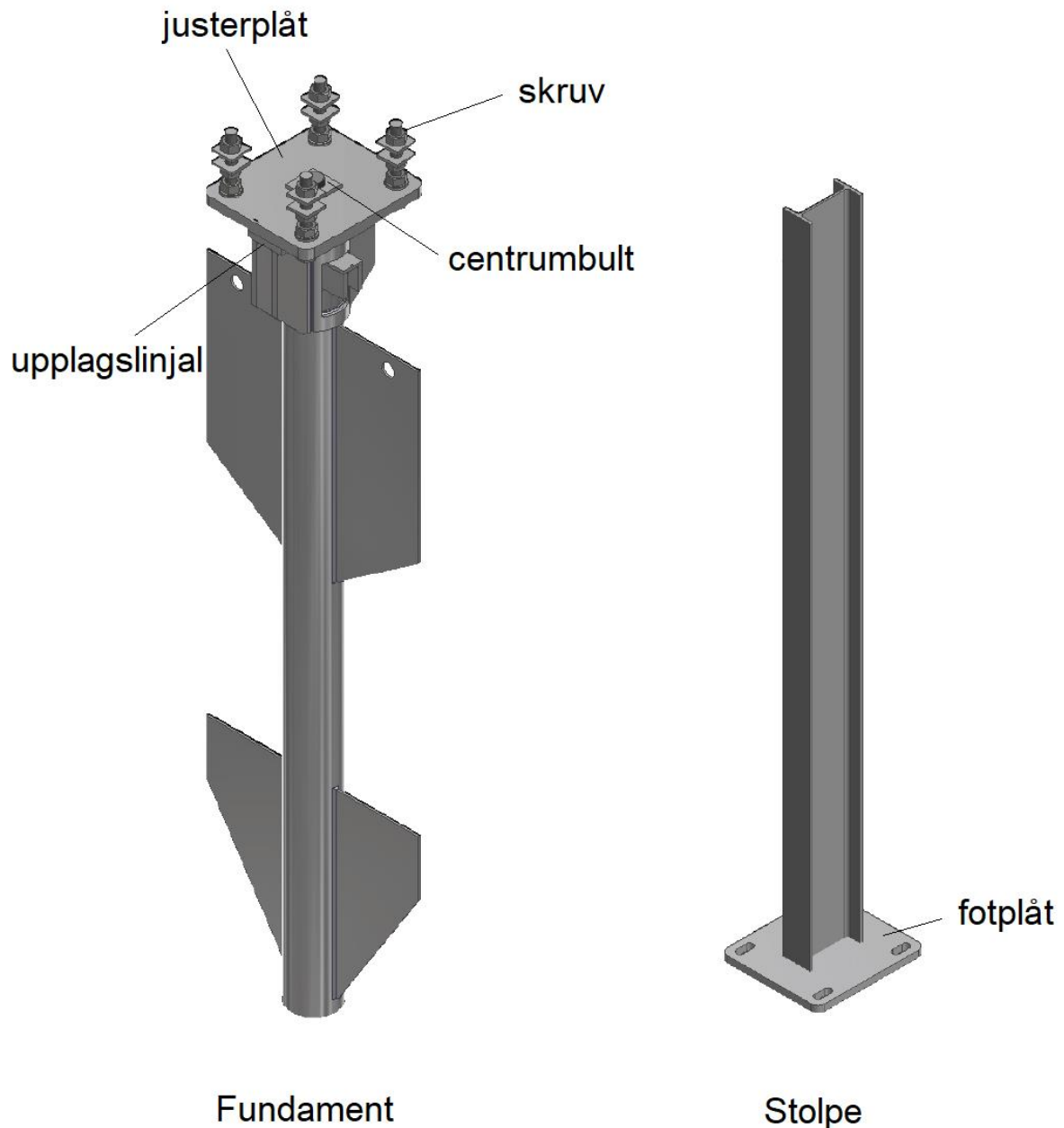
Efter utvärdering jämfördes provningsresultaten med enkla FE-beräkningar.

2 Provingar

2.1 Provuppställning

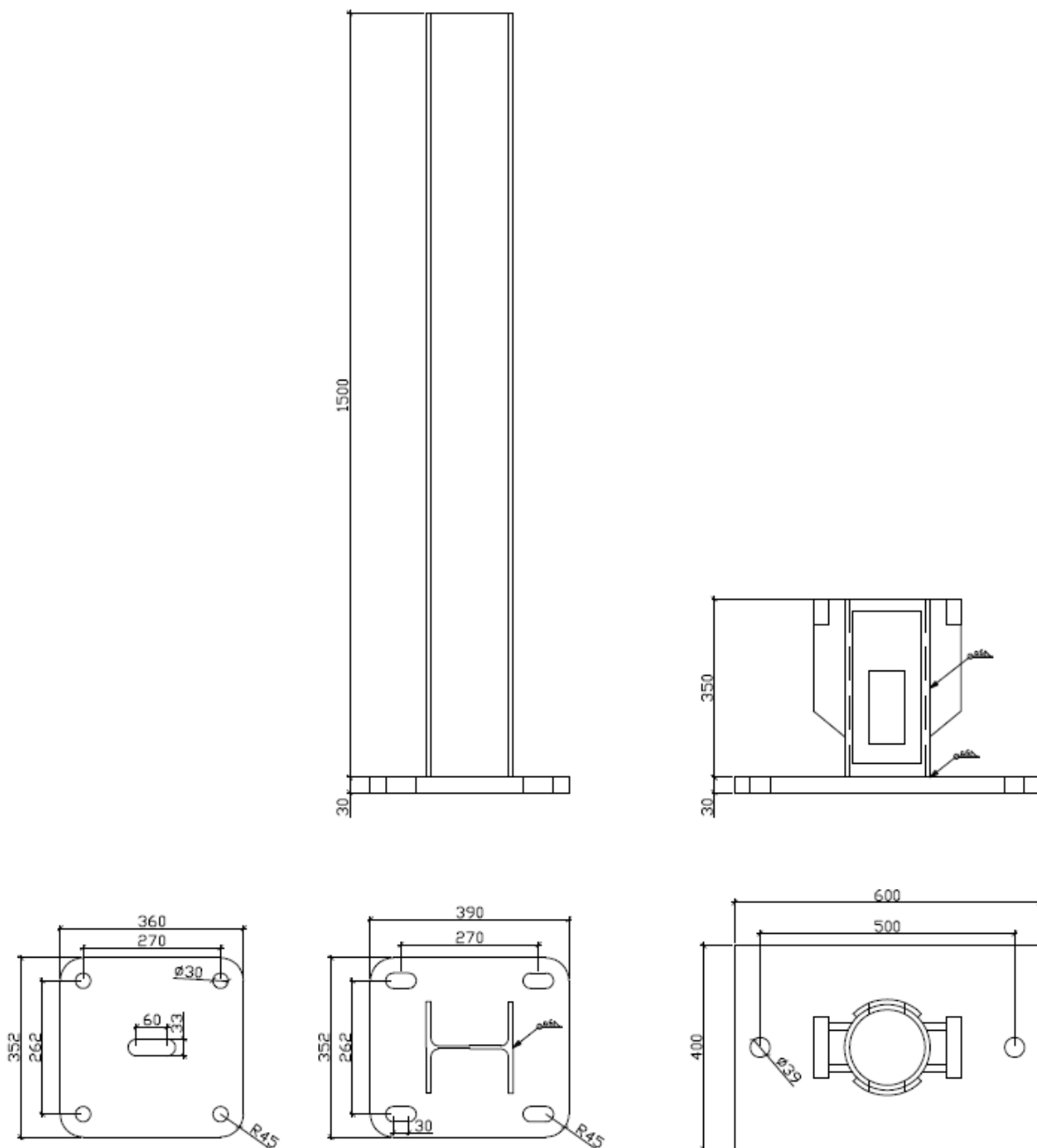
Provkropparna utgjordes av en typisk infästning mellan bullerskärm och stålörfundament. Stolpenshöjd på 1,5 m som belastas av en punktlast motsvarar en vanlig bullerskärm med 3 m höjd och ger ett realistiskt förhållande mellan tvärkraft och moment i infästningen.

På fundamentets sida monteras en justerplåt på fundamentörret. Justerplåten trycks ner mot upplagslinjaler av en förspänd centrumbult. På denna justerplåt monteras fyra gängstänger, som därefter kallas skruvar, som håller stål Stolpen med hjälp av en svetsad fotplåt.



Figur 2.1 Principskiss

Dimensioner på komponenterna anges i figuren nedan. Allt stålmaterial är S355. Stolpen är en HEA 180. Skruvarna är varmförzinkade klass 8.8 M27. Centrumbulten är en klass 10.9 M30.



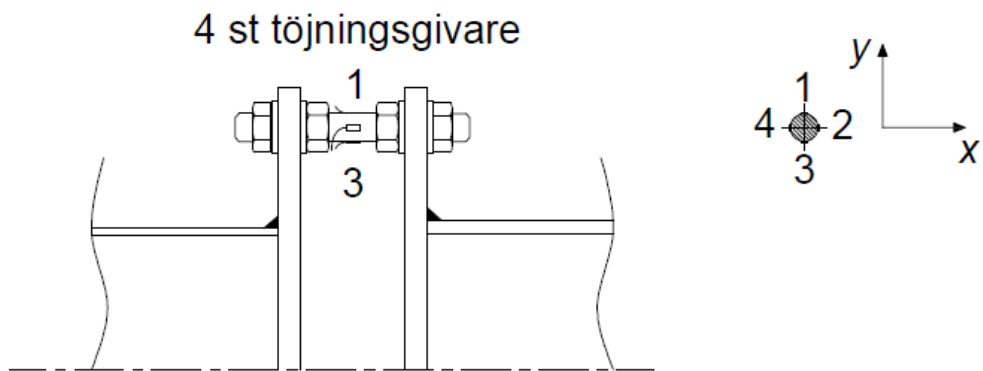
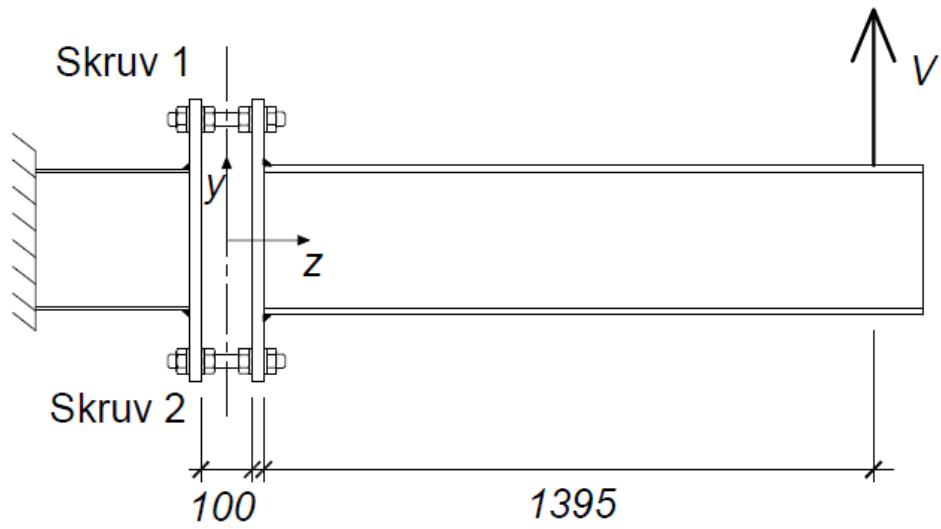
Figur 2.2 Dimensioner på komponenterna.

Infästningen provades liggande med en vertikal kraft som angriper stolpen 1395 mm från fotplåtens ovansida vid ett avstånd på 100 mm mellan fot- och justerplåt. Cylindern flyttades inte vilket betyder att hävarmen minskade till 1375 mm vid ett avstånd på 120 mm mellan plåtarna. Skillnaden anses försumbar.

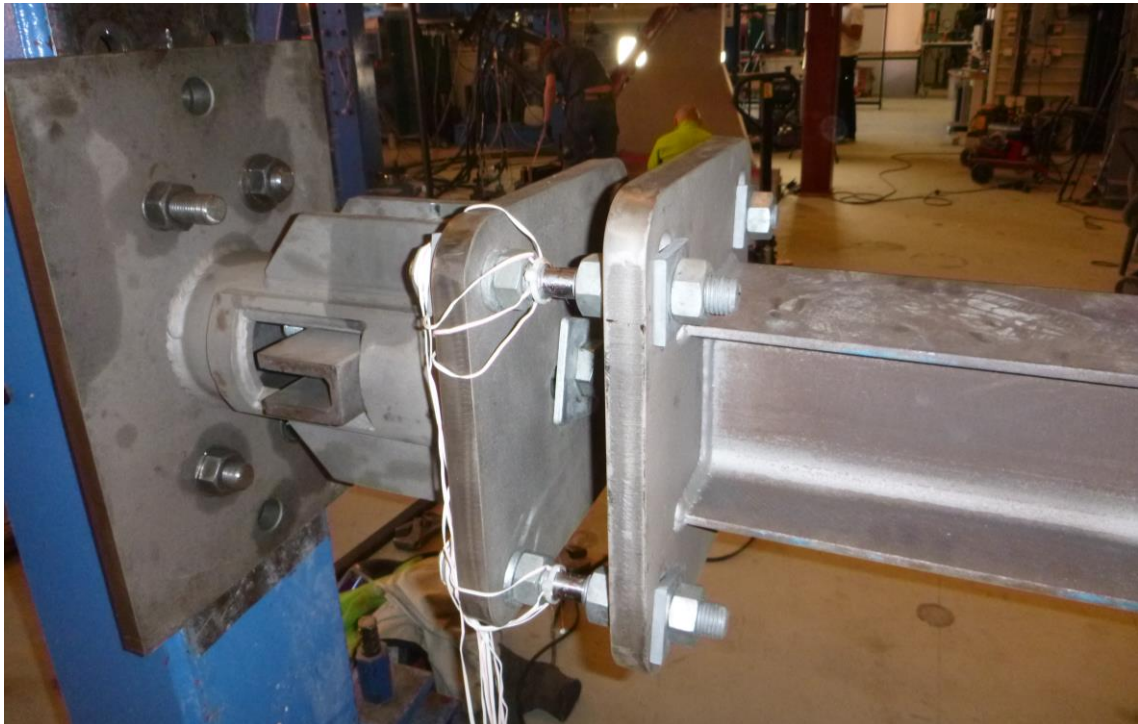
Centrumbulten förspändes med ett åtdragningsmoment på 2000 Nm och M27 skruvarna drogs med 800 Nm.

2.2 Statisk provning

Vid statisk provning instrumenterades två skruvar med 4 trådtöjningsgivare var. För att kunna limma givarna svarvades skruvarna ner till en diameter på 22,2 mm. Numreringen anges på figuren nedan.



Figur 2.3 Trådtöjningsgivarnas läge vid statisk provning



Figur 2.4 Provupställning

Totalt gjordes 6 försök med olika läge för töjningsgivarna och två avstånd, 100 respektive 120 mm, mellan plåtarna enligt tabellen nedan. Det fria avståndet mellan inre muttrar var litet (ca 40 respektive 60 mm) och töjningsgivarna kunde på grund av sin längd endast förflyttas inom ett mycket begränsat område. Det hade varit önskvärt att placera dem närmare muttrarna men var tyvärr inte tekniskt möjligt.

Tabell 2.1 Varierande parametrar vid statisk provning

Provningsnr.	Avstånd mellan plåtarna [mm]	Givarnas läge längs z i förhållande till mittplanet [mm]
1	100	+5
2		+10
3		0
4	120	0
5		-10
6		+10

Trådtöjningsgivare registrerar töjningar som omvandlas till spänningar under antagande av en elasticitetsmodul enligt:

$$\sigma = \epsilon \cdot E$$

För skruvmaterialet antas samma E-modul som för annat stål enligt SS-EN 1993-1-1, dvs $E = 210 \text{ GPa}$.

För att underlätta senare jämförelser med beräkningsmodeller är det lämpligt att omvandla spänningar till böjmoment och normalkrafter. De största uppmätta spänningarna är väl under materialets sträckgräns och en elastisk spänningsfördelning kan antas i tvärsnittet. De instrumenterade skruvarna har en diameter $d = 22,2 \text{ mm}$ vilket ger en tvärsnittsarea $A = 387 \text{ mm}^2$ och ett elastiskt böjmotstånd $W = 1074 \text{ mm}^3$.

I avsnitt 3 presenteras resultat i form av spänningsskillnader. Senare i avsnitt 5 är det lämpligare att omvandla spänningsskillnaderna till moment som enklare kan jämföras med resultat från FE modellen.

2.3 Utmattningsprovning

Tre utmattningsförsök utfördes och nya komponenter användes till varje försök.

Första försöket utfördes med en lastcykel på +/- 12 kN vid 0,5 Hz.

För att minska antalet lastcykler till brott ökades lasterna till +/- 15 kN i följande försök och hastigheten sänktes till 0,3 Hz. På grund av stora laster märktes rörelser mellan justerplåt och fundament. Proven justerades och rotationer mellan justerplåt och fundament förhindrades.

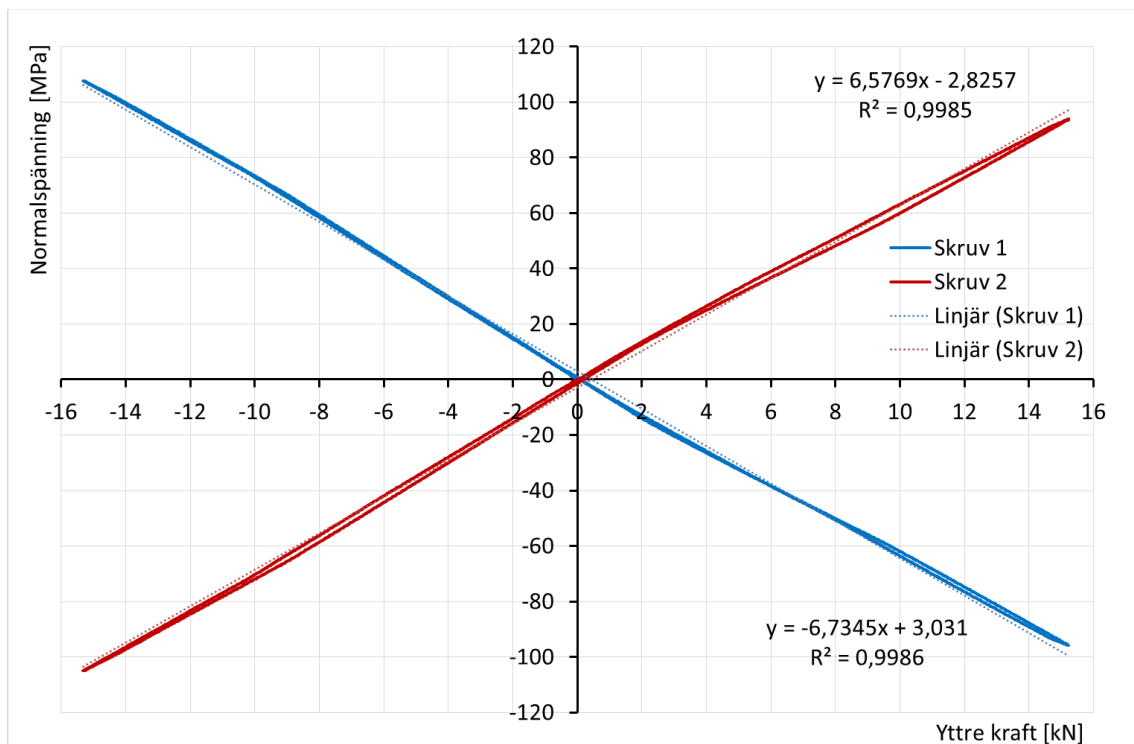
3 Resultat

3.1 Normalkraft

Figur 3.1 nedan visar den genomsnittliga spänningen för båda skruvar under provning nr1. Beteendet är elastiskt och kurvorna är symmetriska, dvs skruvkrafterna har samma intensitet men är riktade åt motsatta håll.

Skruvkrafterna blir större när den yttre kraften är riktad uppåt (Skruv 1 är tryckt). Detta uppstår konsekvent i alla statistiska provningar, se tabell 3.1 och tabell 3.2.

Den teoretiska skruvkraften vid en yttre kraft på 15 kN är ca 39 kN, oavsett den yttre kraftens riktning. Det visar sig att skruvkrafterna är något större (ca 4%) när den yttre kraften är positiv och mindre (ca 10%) när den yttre kraften är negativ. En möjlig förklaring till detta fenomen är inspänningar som introducerar ett böjmoment i stolpens ände.



Figur 3.1 Genomsnittlig skruvspänning som funktion av yttre kraft under provning nr1.

Tabell 3.1 Genomsnittliga skruvspänningar och –krafter vid minsta yttre kraft.

Provning	F [kN]	Genomsnittlig spänning [MPa]		Genomsnittlig skruvkraft [kN]
		Skruv 1	Skruv 2	
1	-15,3	107,6	-104,9	41,1
2	-15,2	105,7	-105,6	40,9
3	-15,3	104,1	-104,8	40,4
4	-15,3	105,6	-104,7	40,7
5	-15,3	103,4	-104,6	40,2
6	-15,3	102,1	-102,8	39,7

Tabell 3.2 Genomsnittliga skruvspänningar och –krafter vid största yttre kraft.

Provning	F [kN]	Genomsnittlig spänning [MPa]		Genomsnittlig skruvkraft [kN]
		Skruv 1	Skruv 2	
1	15,2	-95,8	93,8	36,7
2	15,3	-92,9	90,9	35,6
3	15,3	-95,3	88,7	35,6
4	15,3	-90,5	91,5	35,2
5	15,3	-89,8	92,9	35,4
6	15,3	-86,4	89,5	34,0

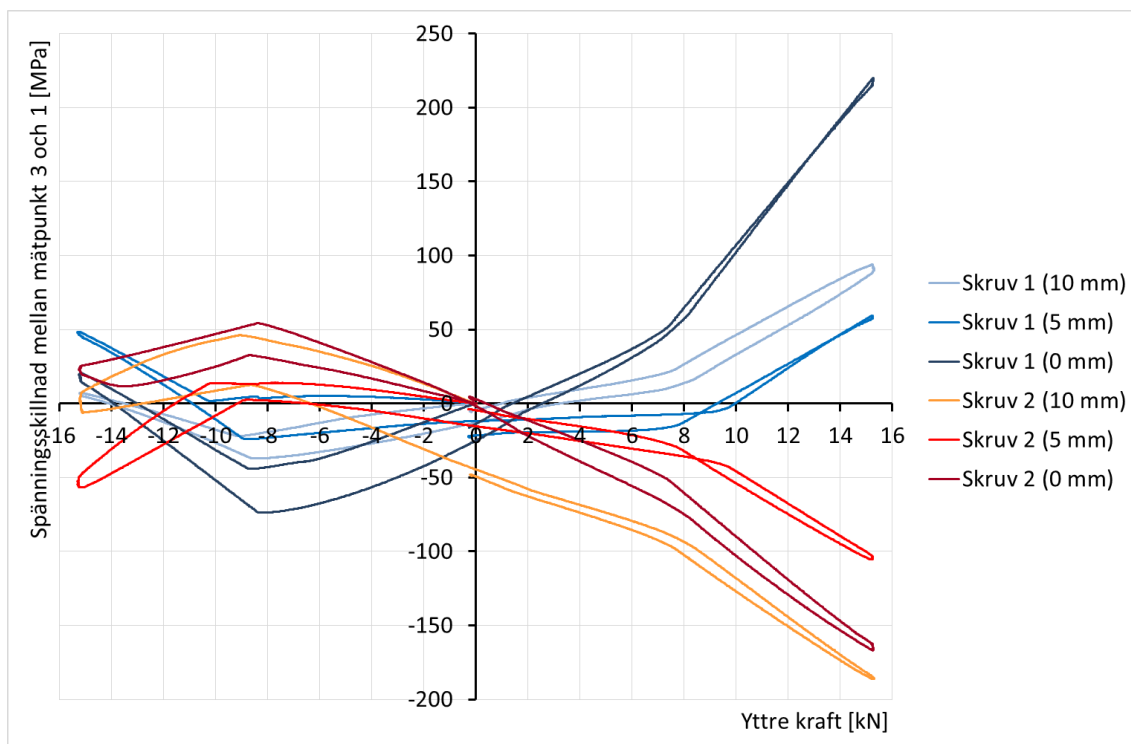
3.2 Moment, M_x

Figur 3.2 och figur 3.3 visar spänningsskillnaden mellan mätpunkt 3 och 1 på Skruv 1 och Skruv 2 vid ett avstånd mellan plåtar på 100 respektive 120 mm. Töjningsgivarnas läge i förhållande till mittplanet mellan fotplåt och justerplåt anges i parentes. Positiva värden betyder att mätpunkterna är närmare fotplåten än justerplåten och vice versa.

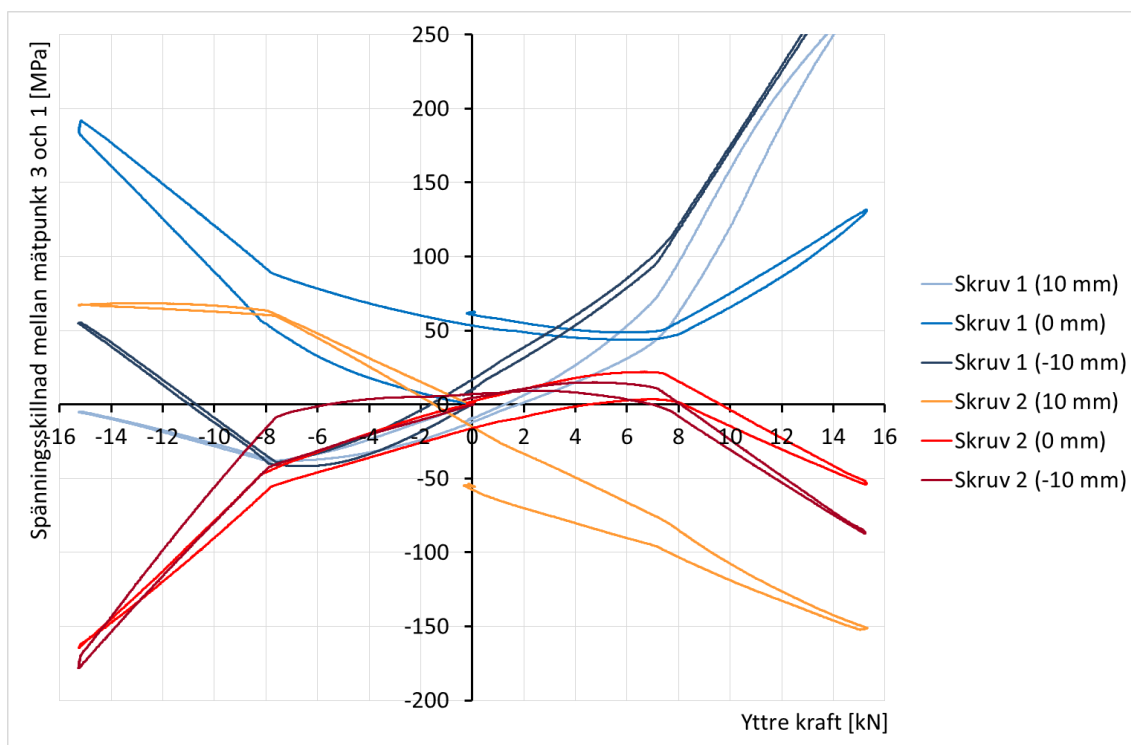
Beteendet är någorlunda linjärt upp till en yttre kraft på ca 8 kN. Vid större positiva yttre krafter ökar momentet ännu snabbare i förhållande till den yttre kraften. Vid större negativa yttre krafter minskar däremot momentet.

Vid en given punkt längs skruvens stam är momenten i de dragna och de tryckta skruvarna motriktade vilket tyder på att de uppstår på grund av plåtdeformationer snarare än excentricitet som skulle påverka skruvarna på samma sätt, oberoende av normalkraftens riktning.

Troligen beror denna förändring på skilda deformationer i justerplåten som har kontakt med upplagslinjaler på båda sidor när den yttre kraften är liten. Vid större yttre krafter lyfter dock justerplåten på dragsidan vilket kan påverka tvångskrafterna i skruvarnas nedre del.



Figur 3.2 Spänningskillnad mellan mät punkt 3 och 1 vid ett avstånd mellan plåtar på 100 mm (provning nr1 till nr3).



Figur 3.3 Spänningskillnad mellan mät punkt 3 och 1 vid ett avstånd mellan plåtar på 120 mm (provning nr4 till nr6).

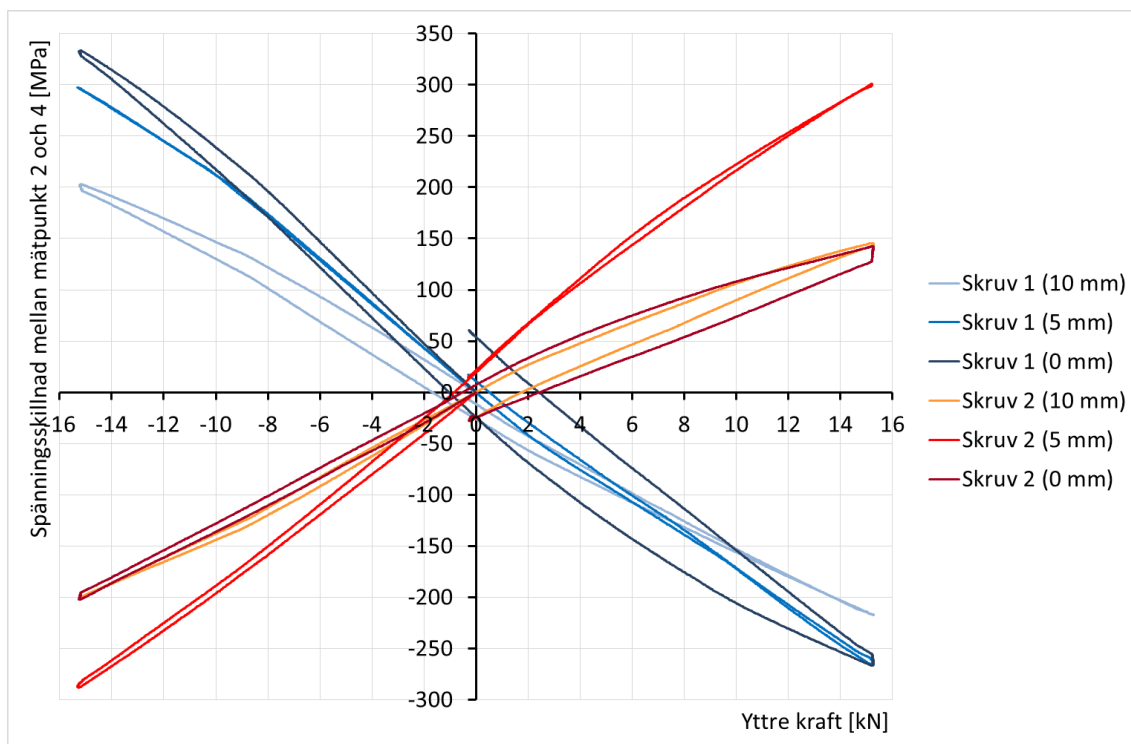
För en given yttre kraft kan inget mönster urskiljas utifrån mät punkternas läge längs skruvens stam. Utrymmet mellan plåtarna var mycket begränsat och förskjutningen mellan de olika provningarna är i samma storleksordning som töjningsgivarnas längd. Det är därför svårt att dra slutsatser angående momentfördelningen längs med skruvstammen för en given yttre kraft.

3.3 Moment, M_y

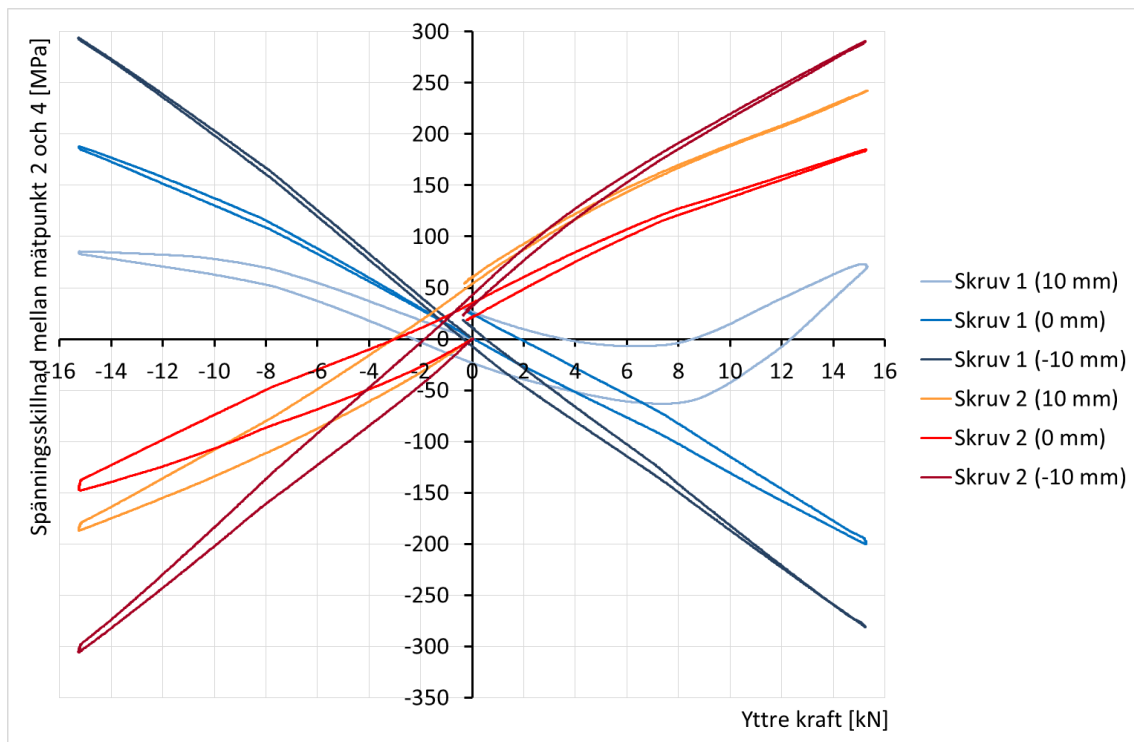
Figur 3.4 och figur 3.5 visar spänningsskillnaden mellan mät punkt 2 och 4 på Skruv 1 och Skruv 2 vid ett avstånd mellan plåtar på 100 respektive 120 mm. Töjningsgivarnas läge i förhållande till mittplanet mellan fotplåt och justerplåt anges i parentes. Positiva värden betyder att mätpunkterna är närmare fotplåten än justerplåten och vice versa.

Vid en given punkt längs skruvens stam är momenten i de dragna och de tryckta skruvarna motriktade vilket tyder på att de uppstår på grund av plåtdeformationer beroende av normalkraftens riktning.

Beteendet är någorlunda linjärt och symmetriskt mellan min och max yttre kraft.



Figur 3.4 Spänningsskillnad mellan mät punkt 2 och 4 vid ett avstånd mellan plåtar på 100 mm (provning nr1 till nr3).



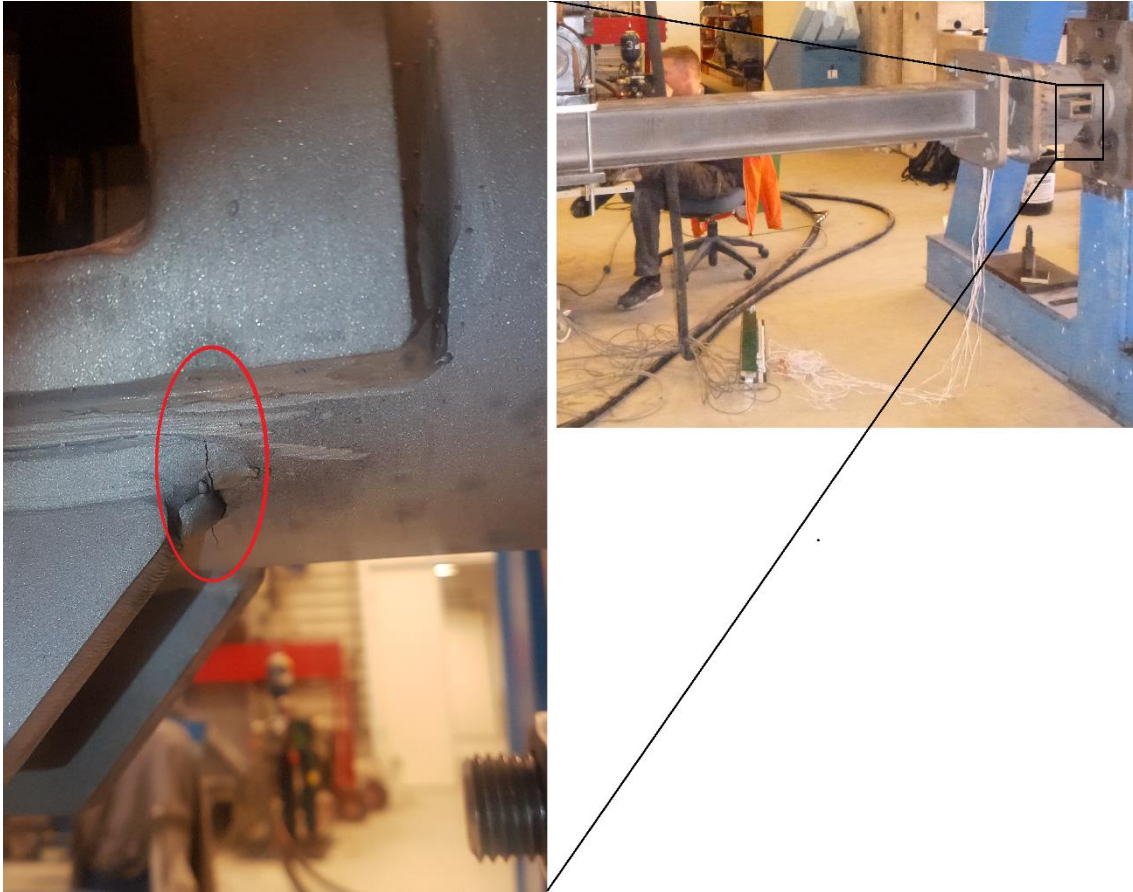
Figur 3.5 Spänningsskillnad mellan mätpunkt 2 och 4 vid ett avstånd mellan plåtar på 120 mm (provning nr4 till nr6).

Kurvornas lutningar varierar: för en given yttre kraft skiljer sig momenten vid olika läge längs skruvstammen. I Skruv 1 verkar momentet öka närmare justerplåten. Detta mönster finns inte hos Skruv 2.

3.4 Utmattningsprovning

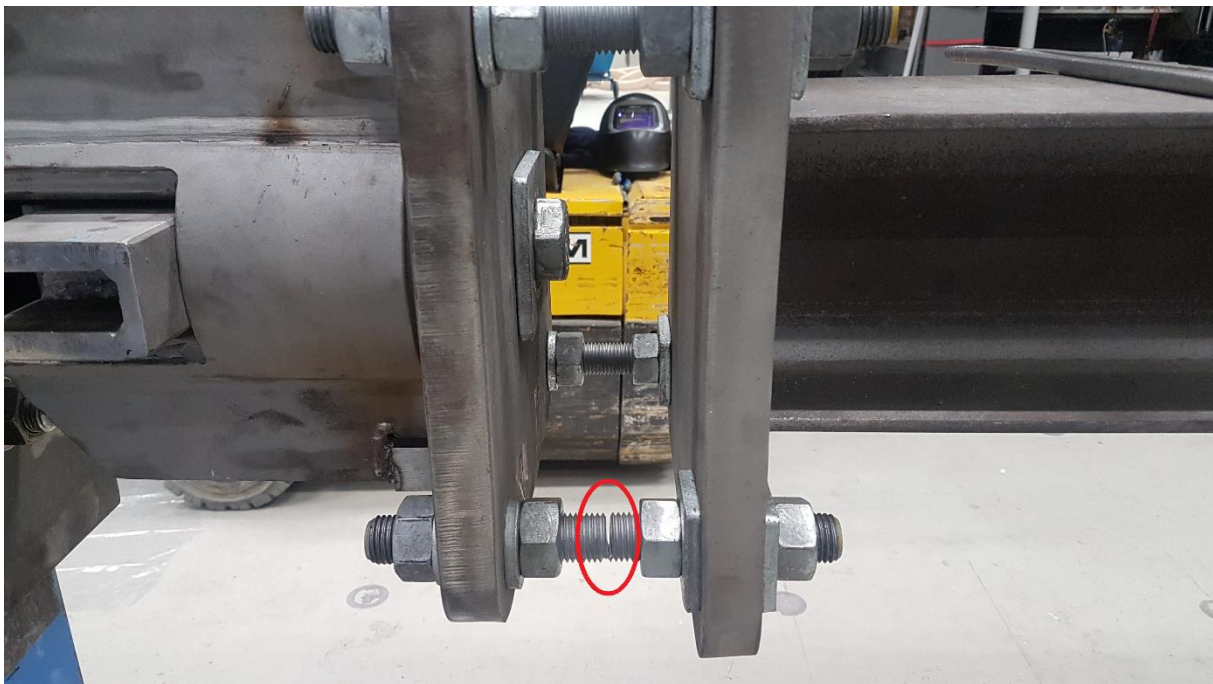
Ett av tre försök avslutades efter utmattningsbrott i skruvfästningen. De övriga två försöken fick avbrytas efter sprickor upptäcktes i svetsar.

Provning nr 1 avbröts efter 129 000 lastcykler (+/-12 kN) då sprickor upptäcktes i en källsvets vid övergången mellan fundamentröret och en vertikal plåt, se figur 3.6 nedan, samt mellan rör och infästningsplåt.



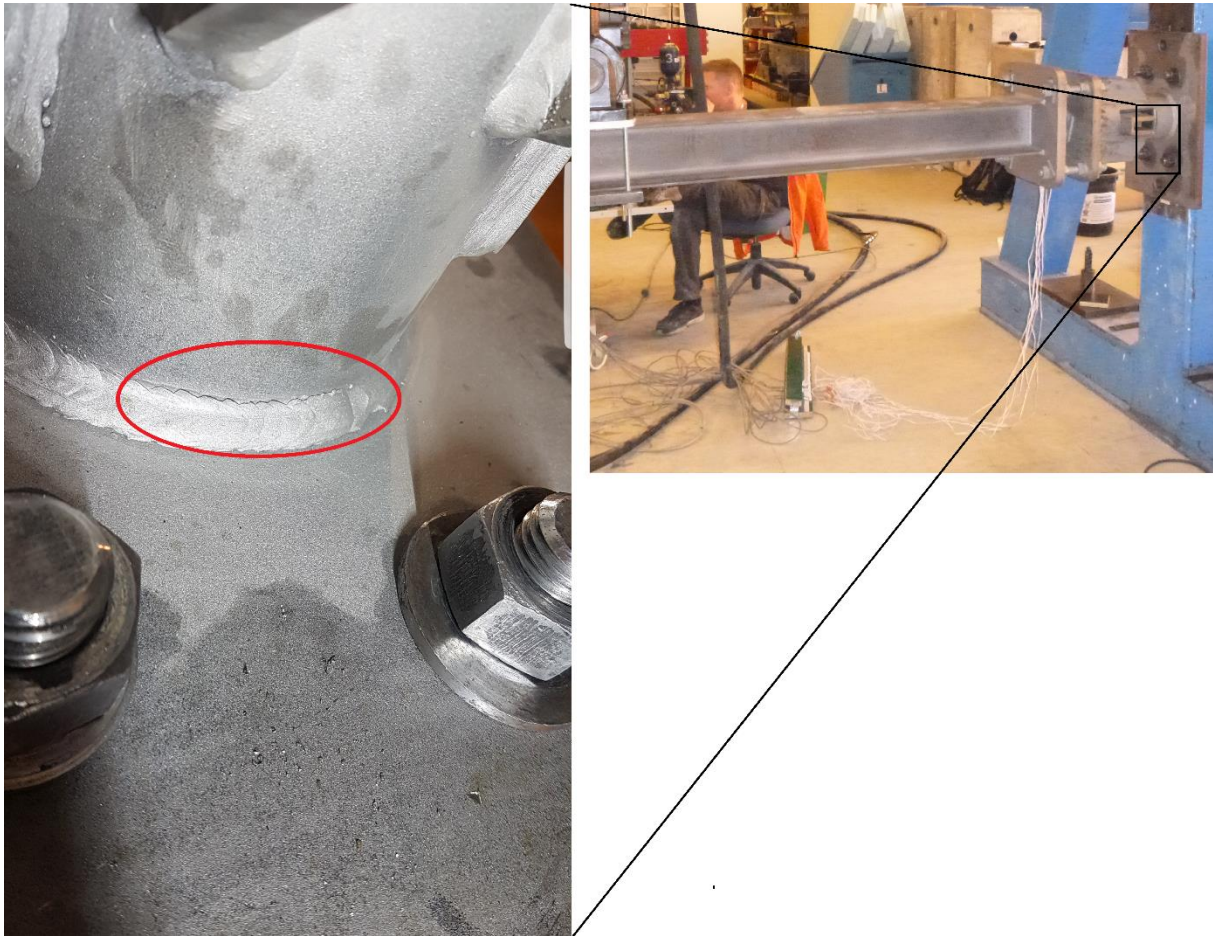
Figur 3.6 Utmattningsprovning nr 1, sprickbildning vid 129 000 lastcykler.

Provning nr 2 avslutades med skruvbrott efter 68 000 lastcykler (+/- 15 kN), se figur 3.7. Brottet verkar ha initierats på insidan av skruven som motsvarar mät punkt 2 och utsattes för de största spänningsvariationerna vid statiskprovning. Brotttytan befinner sig dock en kort bit från mitten på fotplåtens sida trots att den kritiska punkten bör vara i anslutning till muttern på justerplåtens sida.



Figur 3.7 Utmattningsprovning nr 2, skruvbrott vid 68 000 lastcykler.

Provning nr 3 avbröts efter 46 000 lastcykler (+/-15 kN) då sprickor upptäcktes i kälsvetsen mellan fundamentrör och infästningsplåt, se figur 3.8.



Figur 3.8 Utmattningsprovning nr 3, sprickbildning vid 46 000 lastcykler.

Resultaten sammanfattas i tabell 3.3. Samtliga prov klarade betydligt fler cykler än vad som hade beräknats enligt EN 1993-1-9 med den enkla modellen som normalt tillämpas vid dimensionering (se 5.3.1). Resultaten kan tolkas på säkra sidan som att utmattningsbrott skede i skruvfästningen.

Tabell 3.3 Resultat av utmattningsprovning

Provning	Last	Lastcykler till brott	Brott
1	+/- 12 kN	129 000	Sprickbildning i svets mellan vertikal plåt och rör
2	+/- 15 kN	68 000	Skruvbrott
3	+/- 15 kN	46 000	Sprickbildning i svets mellan rör och plåt

4 Finit elementmodell

Interaktionen mellan mutter, skruv och plåt är mycket komplex och det behövs avancerade modeller för att studera den i detalj. Den modell som beskrivs här är avsiktligt förenklad då vi vill undersöka eventuella fördelar med enkla numeriska verktyg jämfört med ännu grövre handberäkningsmetoder.

Denna enkla linjära finita elementmodell användes för att analysera och extrapolera experimentella resultat när det var möjligt.

4.1 Material

Allt stål modelleras som elastiskt med en elasticitetsmodul på 210 GPa och ett tvärkontraktionstal på 0,3.

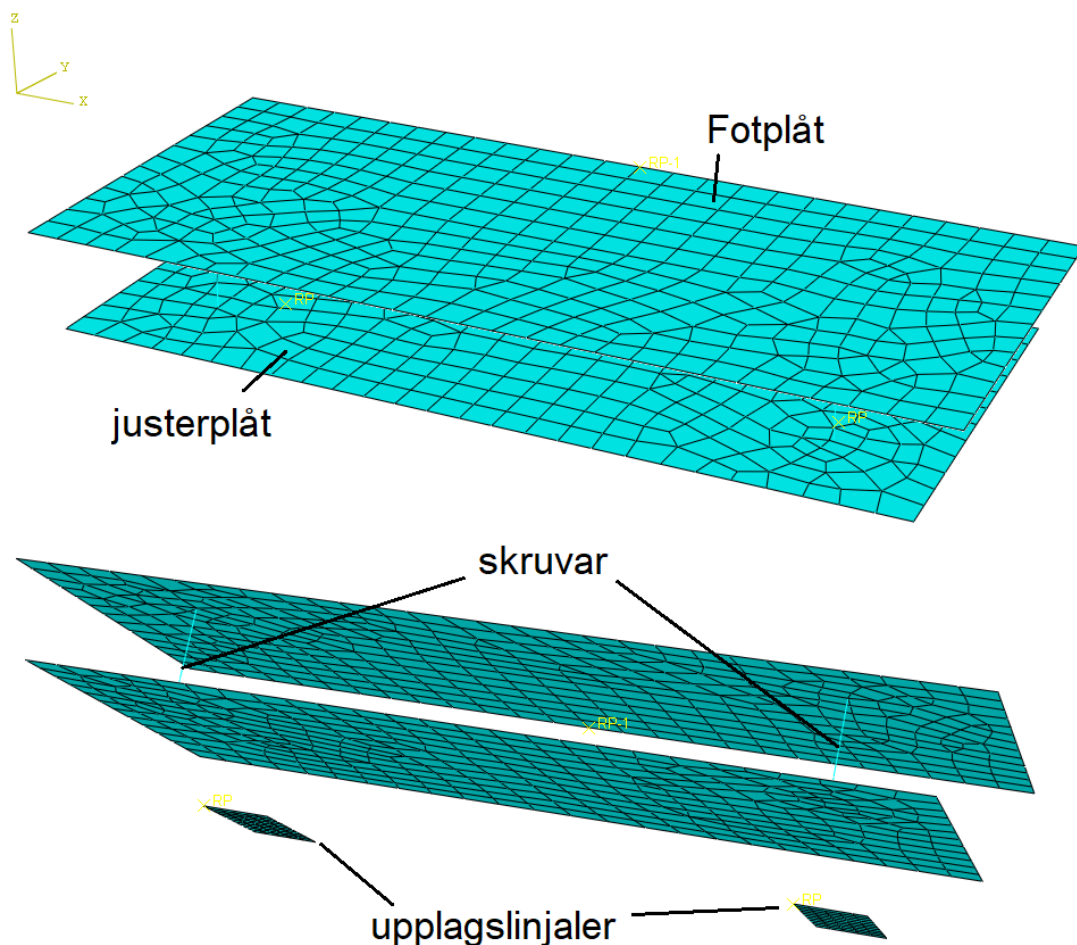
4.2 Geometri och elementnät

Infästningen består av en fotplåt och en justerplåt som modelleras med skalelement i nivå med plåtarnas insidor (mot skruvarna).

Skruvarna modelleras med balkelement med konstant tvärsnitt och en längd motsvarande det fria avståndet mellan muttrar.

Upplagslinjalerna modelleras som stela skal.

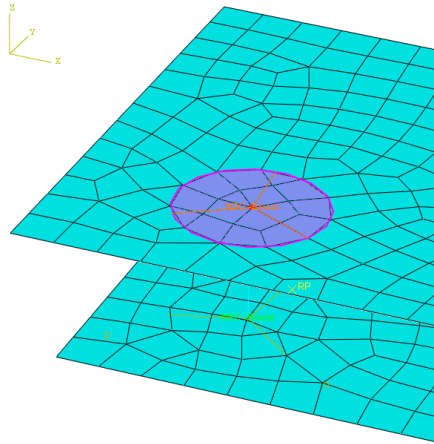
Symmetrin utnyttjas.



Figur 4.1 FE modell – geometri och elementnät.

4.3 Interaktion mellan skruv och plåt

Skruvarnas ändrar kopplas till plåtarna genom sk *Multiple Points Constraints* (MPC). Deformationer hos skruvens ändpunkt överförs till punkterna i ett område av plåten med hjälp av oändligt stela balkar. Det kopplade området motsvarar brickans yta med en diameter på 50 mm.



Figur 4.2 FE modell – exempel på plåtområde som kopplas till skruvänden.

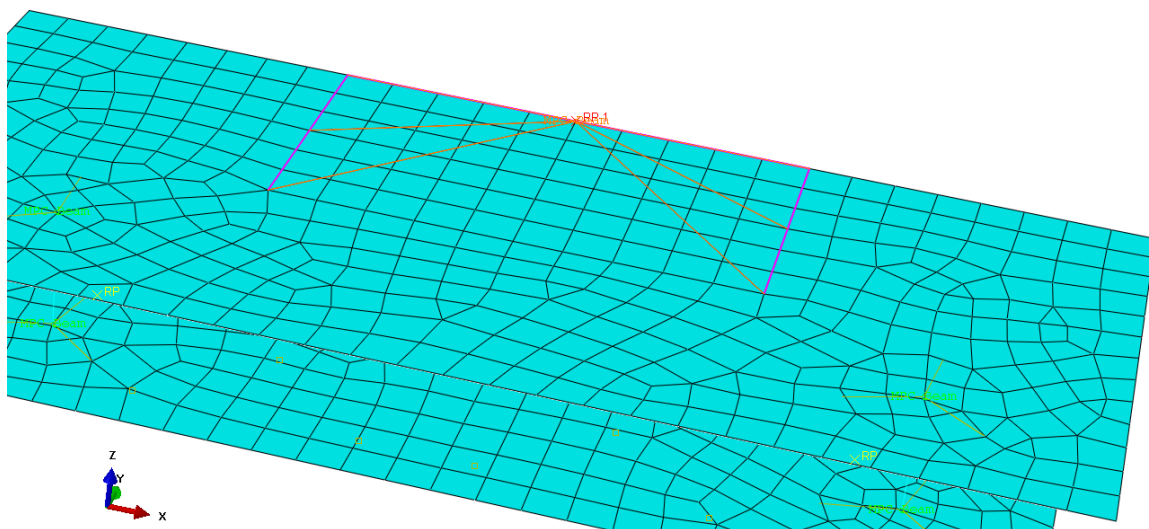
4.4 Kontakt mellan justerplåt och upplagslinjaler

En "hård" kontakt definieras mellan justerplåt och upplagslinjaler. Friktionskoefficienten antas oändlig, dvs ingen glidning tillåts så länge kontakten består, men tidigare kontakt kan brytas.

Kontakten mellan justerplåt och upplagslinjaler uppnås genom att först föreskriva en liten nedåtriktad förskjutning (steg 1) och sedan föreskriva en förspänningskraft på 150 kN (för halva infästningen) i en punkt mitt i justerplåten (steg 2). Förskjutningarna i denna punkt fryses i det sista steget när yttre belastning införs.

4.5 Belastning

Moment och tvärkraft införs i en punkt som kopplas med *MPC-beam* (se 4.3) till stolpens konturer på fotplåten.



Figur 4.3 FE modell – stolpens konturer där lasten införs.

5 Analys

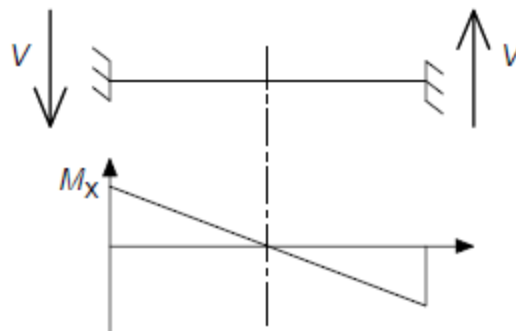
5.1 Moment, M_x

Momentet i skruvplanet M_x , påverkas av flera faktorer:

- Tvärkraft;
- Plåtarnas deformationer (själva beroende av normalkraften), och;
- Inspänningsförhållandet mellan plåt och skruvände.

Vid dimensionering antas normalt att tvärkraften fördelas jämt mellan skruvarna och att skruvändarna är fast inspända (ingen relativ rotation möjlig). Tvångsdeformationer försummas.

Enligt denna enkla modell förblir momentet mitt emellan plåtarna noll oavsett belastning.



Figur 5.1 Momentfördelning längs skruvstam – enkel beräkningsmodell.

Provningsresultat visar dock att detta inte stämmer i praktiken där momentet i skruvarna mitt emellan plåtarna varierar på ett komplicerat sätt. Två olika faser kan definieras beroende på den yttre kraftens storlek och bör studeras var för sig.

Vid små yttre krafter uppstår först måttliga moment som varierar linjärt. När en viss yttre kraft uppnås ändras beteendet och båda skruvarna utsätts för ett ökande moment inåt (positivt för Skruv 1 och negativt för Skruv 2).

Övergången mellan faserna kan hänföras till justerplåten som till en början har kontakt med båda uppplagslinjalerna men lyfts sedan på dragsidan. Justerplåtens böjstyvhet ändras markant vilket påverkar rotationer i skruvändarna och momentfördelningar längs skruvstammarna.

Detta fenomen är komplext och den enkla numeriska modellen tillämpas är tyvärr otillräcklig för att simulera det tillfredsställande.

Andra faser kan vara aktuella för dimensionering i brottgränstillstånd men då tillåts plasticering av komponenter. Vi kan anta att flytleader bildas i skruvarna intill fot- och justerplåt och att momentfördelningen följer dimensioneringsmodellen ovan, se figur 5.1.

Infästningarna dimensioneras för att klara brukslasterna utan att justerplåten förlorar kontakten med linjalerna. Beteendet i första faser är således det som påverkar utmattningslastfallet och ska analyseras närmare.

Om momentet i skruvplanet uppstod på grund av plåtdeformationer enbart skulle momenten i Skruv 1 och Skruv 2 visa samma trend vilket inte är fallet. Med ett plåtavstånd på 100 mm (provning nr 1 till 3) visar momentet i Skruv 1 och Skruv 2 konsekventa motsatta trender. I andra provningsserien (provning nr 4 till 6) med ett plåtavstånd på 120 mm kan inget konsekvent mönster urskiljas.

Inget mönster kan heller urskiljas utifrån mätpunkternas läge längs skruvstammen.

Det är troligt att momenten uppstår på grund av geometriska imperfektioner och/eller fel vid mätning, bl a osäkerheter kring töjningsgivarnas läge.

Momentvidden är dock relativt liten jämfört med momentet ut ur planet: för en lastcykel mellan +/- 8 kN är momentvidden ca 40 kNm.

Momentvidden för momentet från tvärkraft kan bestämmas med samma modell som tidigare, se figur 5.1

Vid samma lastcykel på +/- 8 kN är momentvidden från tvärkraft 80 kNm (avstånd mellan plåtar: 100 mm).

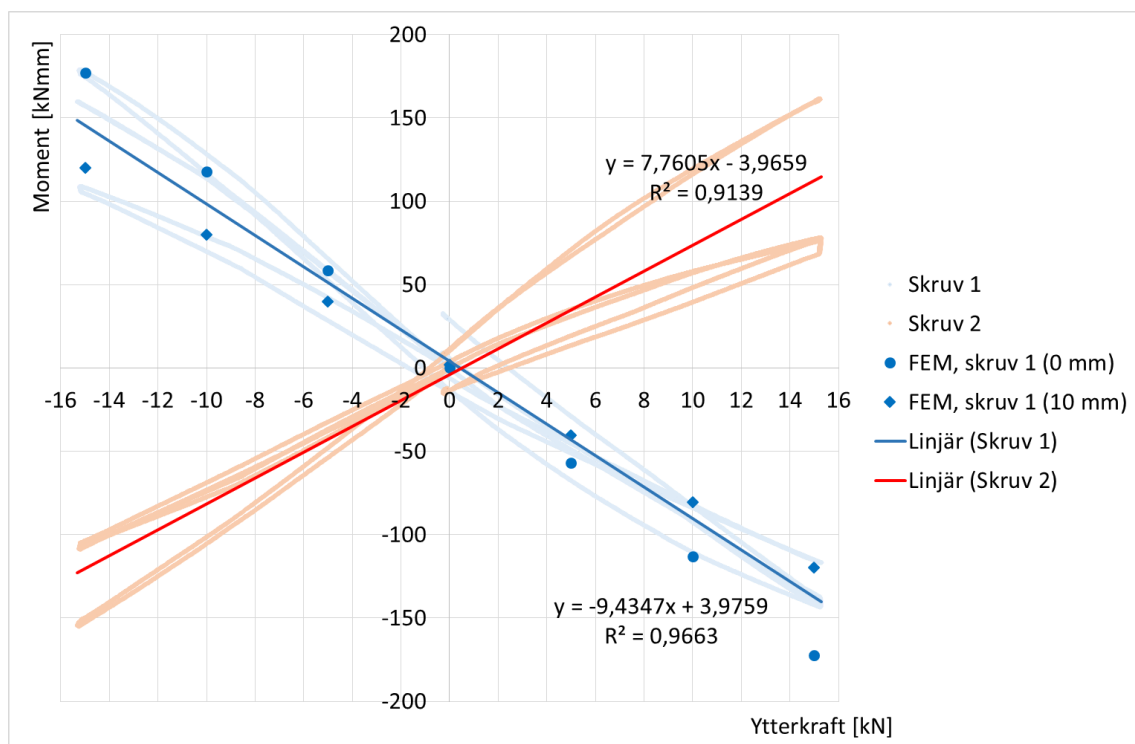
Den totala momentvidden kan därmed uppskattas på säkra sidan till momentvidden från tvärkraft multiplicerad med en faktor 1,5 för att beakta tvångsmomenten.

5.2 Moment, M_y

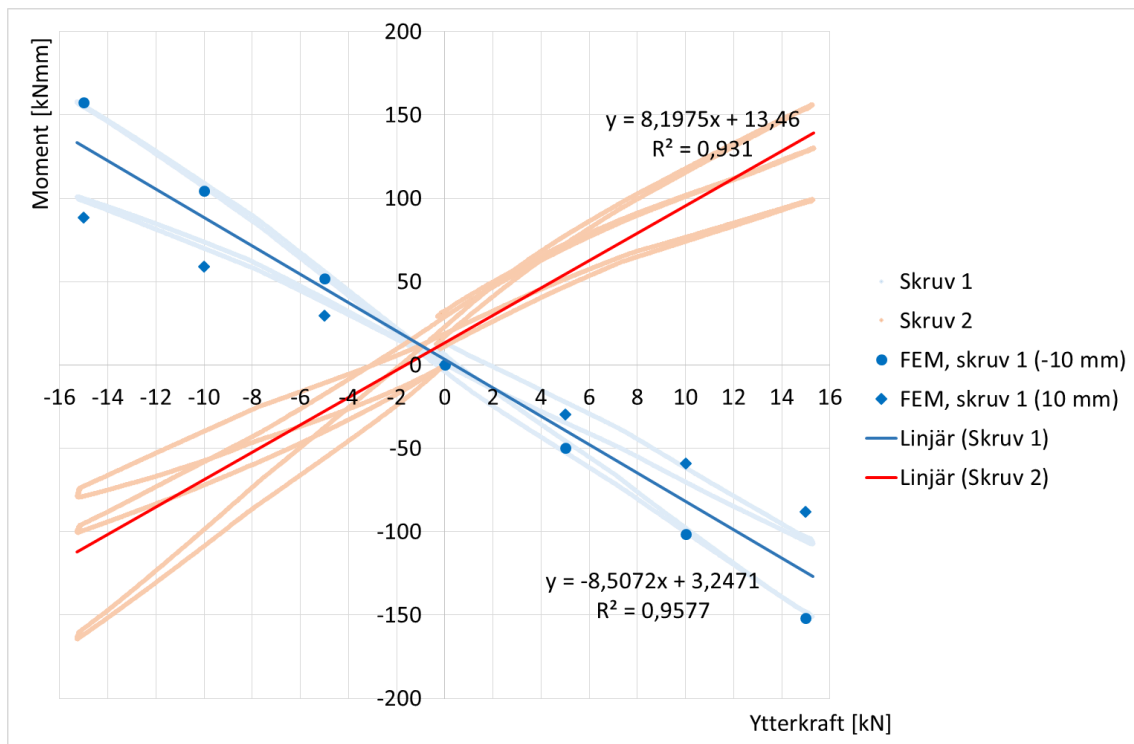
Momentet ut ur planet kan antas uppstå på grund av tvångsdeformationer: fotplåt och justerplåt har en större böjstyvhet än skruvarna och när de deformeras (böjning av tryck- respektive dragkraft i skruvarna) tvingas skruvändarna att rotera och ett moment uppstår.

Provningsresultaten visar ett elastiskt beteende med en spridning utan tydligt mönster mellan värdena för olika lägen längs skruvstammen. I figur 5.2 och figur 5.3 nedan har resultaten för de olika lägena längs skruvstammen grupperats och interpolerats till en linjär kurva. Provningsresultat jämförs även med resultat från den numeriska modellen ovan vid extremlägen för Skruv 1.

FE-modellen ger tillfredsställande resultat inom en intervall på +/- 10 mm runt mittenplanet mellan fotplåt och justerplåt.

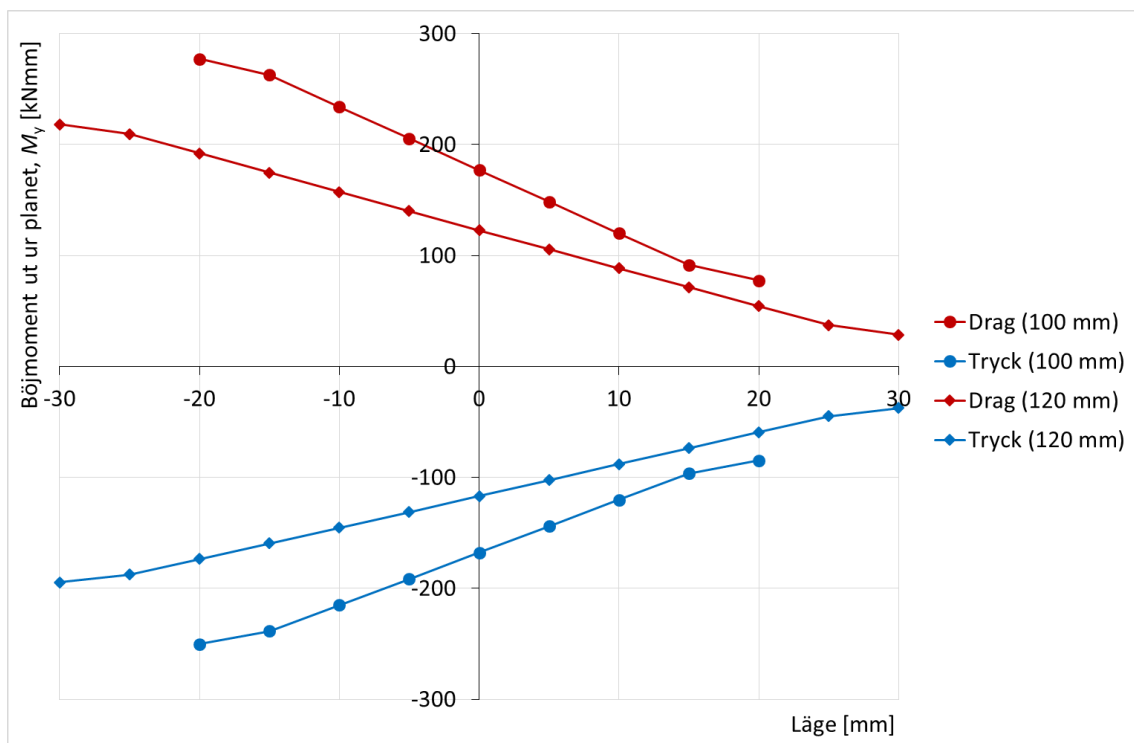


Figur 5.2 Moment ut ur planet, M_y , som funktion av den yttre kraften vid 100 mm avstånd mellan plåtarna – provningsresultat (provning nr1 till nr3), linjär interpolation och resultat från FEM.



Figur 5.3 Moment ut ur planet, M_y , som funktion av denyttre kraften vid 120 mm avstånd mellan plåtarna – provningsresultat (provning nr4 till nr6), linjär interpolation och resultat från FEM.

Med hjälp av den numeriska modellen kan resultaten extrapoleras för att bestämma momentfördelningen längs hela skruvstammen, se figur 5.4.



Figur 5.4 Momentfördelning (M_y) längs skruvstammen för en yttre kraft på 15 kN.

Momentet är direkt kopplat till normalkraften i skruven. Skruv 1 och 2 betar sig lika vid en given kraft.

När avståndet mellan plåtarna minskar ökar skruvarnas böjstyvhet vilket leder till större tvångsmoment. Enligt modellen blir momentvidden (skillnad mellan max och min moment för en symmetrisk lastcykel) större närmare justerplåten.

I tabell 5.1 anges momentvidden vid olika lägen längs skruvstammen för en lastcykel mellan +/- 15 kN. Värden för andra laster kan beräknas genom linjär interpolation.

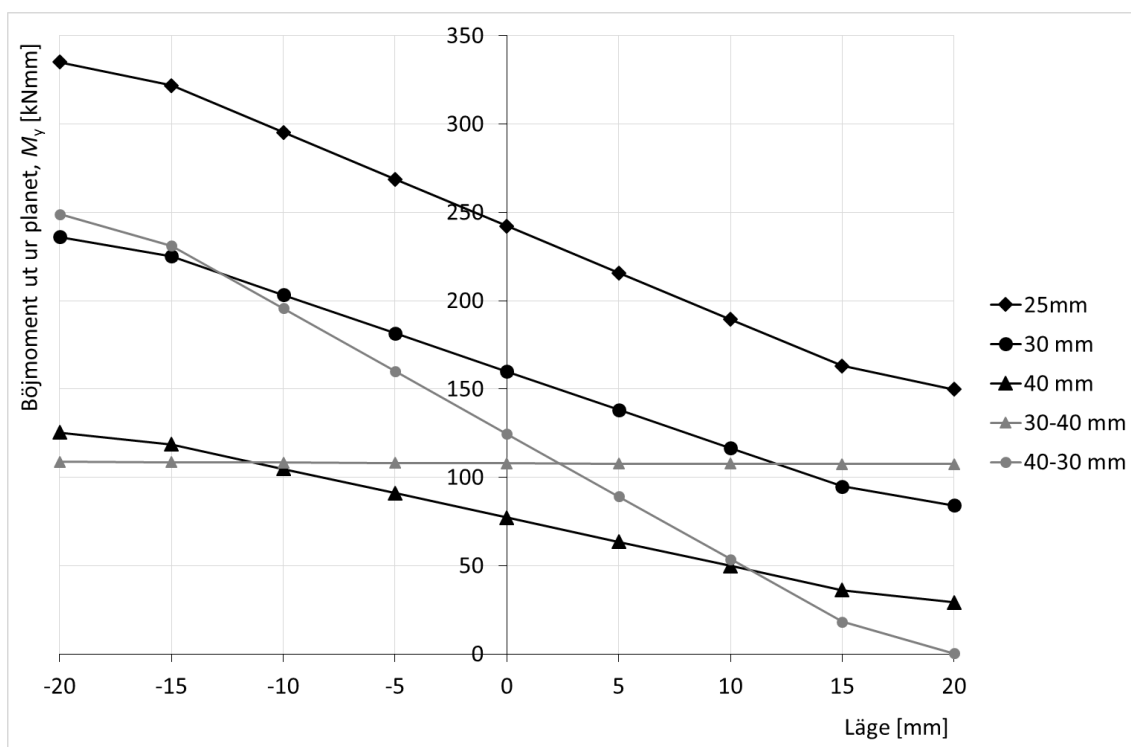
Tabell 5.1 Momentvidd i kNmm för en lastcykel mellan +/- 15 kN

Avstånd mellan plåtarna	Läge längs skruvstammen		
	Intill justerplåten	Mitt emellan plåtarna	Intill fotplåten
100 mm	530	345	160
120 mm	420	240	60

Den numeriska modellen kan också användas för att undersöka effekterna av andra plåttjocklekar. I figur 5.5 presenteras momentfördelningen längs skruvstammen för olika kombinationer av tjocklekar hos fot- och justerplåt. Den yttre kraften är 10 kN och skruvstammen har en diameter på 24,2 mm (utifrån spänningsarean för M27 skruvar).

När båda plåtarna har samma tjocklek (svarta kurvor) ökar momentet nästan jämt över hela skruvlängden med fallande tjocklek.

De två gråa kurvorna gäller för olika plåttjocklekar där det första värdet är tjockleken på fotplåten. Vid en given tjocklek är justerplåten något vekare jämfört med fotplåten som svetsas på stolpen. När justerplåten görs lite tjockare än fotplåten minskar skillnaden och momentet jämnas ut längs skruvstammen. Å andra sidan, om fotplåten görs tjockare ökar skillnaden. Det genomsnittliga momentet minskar men max värdet är i stort sett opåverkat.



Figur 5.5 Momentfördelning (M_y) längs skruvstammen för olika kombinationer av plåttjocklekar och en yttre kraft på 10 kN.

Numeriska analyser visar att tjockare plåt minskar deformationerna och därmed även tvångsmomenten ut ur skruvplanet. För att minska momenten är det mer effektivt att öka justerplåtens tjocklek.

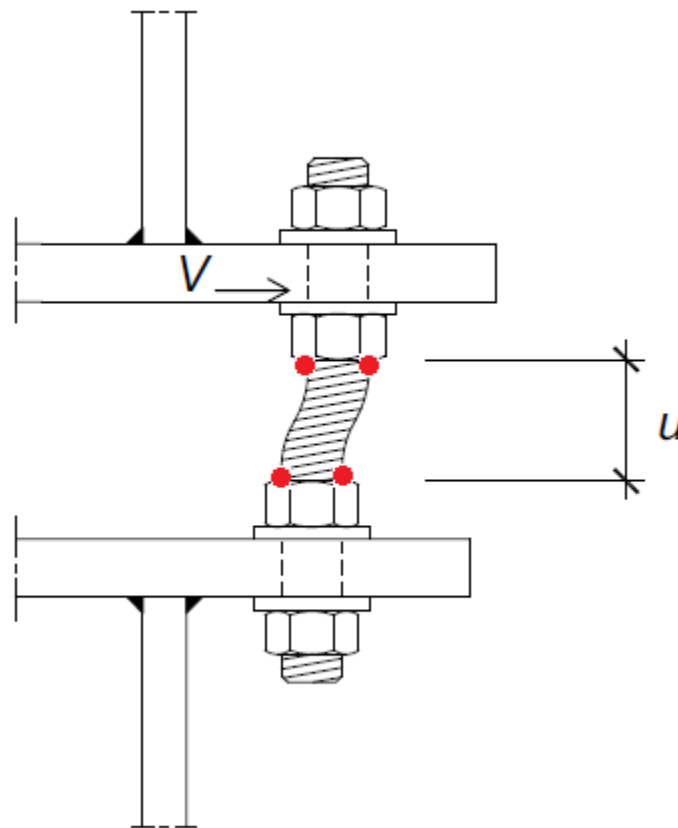
5.3 Utmattning

Resultaten från utmattningsprovningar jämförs här med resultat från beräkningar enligt EN 1993-1-9 med olika modeller: normal dimensionering med handberäkningsmodeller utan hänsyn till eventuella tvångsmoment, dimensionering med hjälp av enkel FEM och full hänsyn tagen till tvångsmomenten, kontroll i en punkt utifrån experimentella mätningar.

5.3.1 Normal dimensionering

Normalt dimensioneras skruvarna för spänningsvidden av kombinerade normalspänningar från normalkraft och moment i skruvplanet, M_x . Momentet i skruvplanet antas uppstå på grund av tvärkraft enbart.

Den kritiska punkten är vid övergången till muttern, se nedan.



Figur 5.6 Läge för kritiska punkter.

$$\Delta M_x = \frac{\Delta V u}{2}$$

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta M_x}{W_s} + \frac{\Delta N}{A_s}$$

Spänningsvidden blir 222 och 277 MPa vid en yttre kraft på 12 respektive 15 kN.

Enligt EN 1993-1-9 får tryckspänningar reduceras med en faktor 0,6. Spänningsvariationerna är symmetriska, dvs tryckspänningarna är lika stora som dragspänningarna. Den effektiva spänningsvidden blir således 80% av spänningsvidden ovan, dvs 177 respektive 222 MPa.

För skruvar och stänger gäller förbandsklass $\Delta\sigma_c = 50$ MPa vid 2 miljoner lastcykler och S-N kurvan för normalspänningar har en lutning på 1/3.

Den karakteristiska livslängden (med $\gamma_{Mf} = 1,0$ och $\gamma_{Ff} = 1,0$) blir 45 000 respektive 23 000 lastcykler.

Den faktiska livslängden är därmed 2-3 gånger längre än vad normal dimensionering utan hänsyn till tvångsmoment förutser.

5.3.2 Dimensionering med hänsyn till tvångsmoment

Förutom spänningar från normalkraft och moment av tvärkraft beaktas här även spänningar från tvångsmoment in i och ut ur skruvplanet.

Tvångsmoment in i skruvplanet beaktas genom en förstoringfaktor på 1,5 och spänningsvidden blir:

$$\Delta\sigma_{M_x} = 1,5 \frac{\Delta M_x}{W_S}$$

Tvångsmoment ut ur skruvplanet bestäms enligt tabell 5.1 och blir 424 respektive 530 kNm. Spänningsvidden blir 306 respektive 382 MPa.

Dessa moment verkar runt olika axlar som bildar en rättvinkel. Normalspänningar runt skruvens stam blir en kombination av spänningarna från båda och max spänning beräknas enligt:

$$\Delta\sigma_M = \sqrt{\Delta\sigma_{M_x}^2 + \Delta\sigma_{M_y}^2}$$

Max normalspänningsvidd av kombinerade moment blir slutligen 332 respektive 415 MPa.

Spänningsvidden av normalkraft är oförändrad, se 5.3.1.

Efter reduktion för tryckspänningar enligt ovan blir den karakteristiska livslängden 4 800 respektive 2 500 lastcykler.

Genom beaktandet av tvångsmomenten förkortas den beräknade livslängden med en faktor 9. Den faktiska livslängden är därmed mer än 20 gånger längre än vid beräkningar, vilket avses allt för säkert.

5.3.3 Dimensionering utifrån statistiska provningar

Vid statistisk provning uppmätes den största spänningsvidden i punkt 2. Vid en lastcykel på +/- 15 kN blev det minsta värdet 350 MPa för Skruv 2 under provning nr 3. Efter reduktion för tryckspänningar blir den karakteristiska livslängden 11 400 cykler.

Den faktiska livslängden för utmattningsprovet nr 2 där brott skede i samma punkt var 6 gånger längre

6 Slutsatser

Statiska försök visar att tredimensionella plåtdeformationer ger upphov till betydliga tvångsmoment i skruvarna i stolpens veka riktning, ut ur skruvplanet (M_y).

Även momentet i stolpens styva riktning, in i skruvplanet (M_x), som uppstår på grund av tvärkraften påverkas av tvångsdeformationer.

En enkel finit elementmodell visar sig fungera för att uppskatta tvångsmomentet i stolpens veka riktning. Tvångsmomentet i stolpens styva riktning är svårare att simuleras med enkla medel. I det här fallet kan det uppskattas på säkra sidan till 50 % av momentet från tvärkraft.

Trots att den normala handberäkningsmetoden inte beakta dessa fenomen är den uppskattade livslängden säker. Livslängden vid utmattningsförsök är nämligen 2 till 3 gånger längre än vad de enkla beräkningarna förutser. Om tvångsmomenten beaktas förkortas den beräknade livslängden med en faktor 9 vilket är för konservativt.

En möjlig förklaring är allt för säkra modeller för utmattning av böjda skruvar i EN 1993-1-9. Skruvar upptar normalt huvudsakligen normalkrafter som ger en jämn spänningsfördelning i tvärsnittet. Vid böjning är de höga spänningarna dock koncentrerade till ett litet område vilket kan ha en gynnsam effekt.

I normala fall med utformningar liknande den i denna rapport rekommenderar vi att använda handberäkningsmodellen utan hänsyn till tvångsmoment. Spänningsvidden består av spänningar från normalkraft samt moment av excentrisk tvärkraft. Skruvarna antas fast inspända i båda ändar och momentfördelningen är linjär och symmetrisk. Utmattningskontrollen görs för en kritisk punkt intill mutterns fria sida där momentet är störst.

Vid osäkerhet kan en enkel finit elementmodell användas för att bedöma storleken på tvångsmomentet i stolpens veka riktning. Ger detta större spänningsvidder än vad normalkraft och excentricitetsmoment ger tillsammans, behöver plåttjocklekarna ökas. I så fall är det mer effektivt att öka justerplåtens tjocklek först.