

Bruk av FEM-modellering til kapasitetsundersøkelser av momentoverførende knutepunkter i stål

Eivind Ballestad



VEILEDER

Dmitry Vysochinskiy

Universitetet i Agder, 2021

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller taushetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering: JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)? JA NEI

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over? JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?
(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13) JA NEI

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap som en del masterprogrammet for Byggkonstruksjon ved Universitet i Agder. Masteroppgaven er den avsluttende oppgaven i emnet BYG508 og ble utarbeidet i det fjerde og siste semesteret i masterprogrammet.

Jeg vil benytte anledningen til å takke min veileder ved Universitet i Agder, Dmitry Vysochinskiy for alt engasjement, tett oppfølging og gode faglige innspill. Jeg vil også takke doktorgradsstipendiat Mohammad Ali Mahdavi pour for veiledning i modelleringsarbeidet med analyseprogrammet ABAQUS.

Målet med masteroppgaven er å undersøke hvordan kapasitetsundersøkelser av momentoverførende knutepunkter med skrueforbindelser kan gjennomføres ved bruk av FEM slik at sikkerhet mot brudd er ivaretatt.

Eivind Ballestad

Skien, 21.05.2021

Summary

Eurocode 3 provides a rough analytical method to estimate the capacity of a steel joint by deriving the overall behavior from its components. Numerical methods such as the finite element method (FEM) enable accurate simulation of joint behavior. However, there is no direct guidelines in the Eurocodes for utilizing numerical methods to document the capacity of moment-resisting steel joints. This master thesis investigates how FEM can be used to evaluate and document the capacity of such joints. A literature review that includes relevant normative documentation and research articles dealing with the use of FEM has been carried out and a semi-rigid steel joint has been investigated by numerical and analytical methods. The normative documentation investigated in this thesis allows for the use of non-linear FEM analyzes for capacity evaluations of steel components in ultimate limit state but are not directly intended for use on bolted joints. In a research context, there are no strict rules for how modeling using FEM must be carried out, but the common features of FEM models of joints used for research purposes includes modeling, calibration and validation to simulate the observed behavior from experimental tests. When comparing results from the use of FEM modeling after guidelines given in the normative documentation with results from the analytical methods in Eurocode 3, it becomes clear that the numerical method generally yields higher strength and lower stiffness. Modeling should be done in accordance with relevant normative documents so that it can be proven through documentation that the model has sufficient safety against statistical variations and other uncertainties. The use of FEM as a dimensioning tool requires that the engineer has knowledge about the finite element method and can utilize the relevant analysis software. Furthermore, the engineer is responsible for ensuring that the model is representative of the joint and can produce reliable results.

Innhold

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring	i
Publiseringsavtale	ii
Forord	iii
Summary	iv
Figurliste	viii
Tabelliste	x
1 Innledning	1
2 Samfunnsperspektiv	2
3 Teori	3
3.1 Krav til dokumentasjon	3
3.2 Dimensjonerende verdier	3
3.3 Stålets mekaniske egenskaper	4
3.3.1 Elastiske egenskaper	5
3.3.2 Plastiske egenskaper	6
3.3.3 Flytekriterium	6
3.3.4 Duktilitet	6
3.4 Knutepunkter i stål	7
3.4.1 Klassifisering av knutepunkter	7
3.4.2 Komponentmetoden	8
3.5 Elementmetoden	9
3.5.1 Lineær og ikke-lineær analyse	10
3.5.2 Anvendelse	10
4 Forskerspørsmål	11
5 Case/Materialer	12
5.1 Valg av knutepunkt	12
5.1.1 Knutepunktets utførelse	13
5.1.2 Eksperimentelle data	15
6 Metode	16
6.1 Litteraturstudie	16
6.1.1 Litteratursøk	16

6.2	Ikke-lineær elementanalyse i ABAQUS	17
6.2.1	Enheter	17
6.2.2	Implisitt og eksplisitt analyse	18
6.2.3	Moduler	18
6.2.4	Modellering av modell	21
6.2.5	Kvalitetssikring av modell	21
6.3	Beregning etter NS-EN 1993-1-8	22
6.3.1	Ekvivalent T-stykke påkjent av strekk	23
6.3.2	Basiskomponenter	24
6.3.3	Dimensjonerende momentkapasitet	27
6.3.4	Strekkbelastning av bjelkeflens	28
6.3.5	Rotasjonsstivhet	28
6.3.6	Stivhetskoeffisienter	29
6.4	Sammenligning av resultater	30
7	Resultater	32
7.1	Litteraturstudie	32
7.1.1	Normative dokumenter	32
7.1.2	Forskningsartikler	35
7.2	Utarbeiding av FEM-modell	39
7.2.1	Modellering av geometri	39
7.2.2	Modellering av materialegenskaper	40
7.2.3	Interaksjon mellom kontaktflater	41
7.2.4	Randbetingelser	43
7.2.5	Belastning	43
7.2.6	Elementinndeling av geometri	44
7.3	Sensitivitetsstudier	46
7.3.1	Eksplisitt analyse	47
7.3.2	Fin elementinndeling av bjelker og søyle	48
7.3.3	Inkludering av sveisens geometri	50
7.3.4	Modellering av opplager	52
7.3.5	Alternative materialkurver	54
7.3.6	Fullstendig geometri	55
7.4	Validering av FEM-modell	57
7.4.1	Sammenligning av kraft-forskyvningskurver	57
7.4.2	Sammenligning av bruddform	58
7.5	Kapasitet etter NS-EN 1993-1-8	59
7.5.1	Bruddform og momentkapasitet	60
7.5.2	Stivhetskoeffisienter og rotasjonsstivhet	60
7.6	Sammenligning av analytiske og numeriske resultater	61
7.6.1	Moment-rotasjon-relasjon	61
7.6.2	Momentkapasitet	63
7.6.3	Initialrotasjonsstivhet	64
8	Diskusjon	66
9	Konklusjon	72
10	Anbefalinger	74
	Referanser	75

Figurer

3.1	Sannsynlighetsfordeling for last og motstandsevne.	4
3.2	Eksempel på spenning-tøyningskurve for stål med benevnelser etter Eurokode 3.	5
3.3	Mulig utførelse av ensidige knutepunkter med tilhørende klassifisering.	7
3.4	Forholdet mellom moment, rotasjon og rotasjonsstivhet i et knutepunkt.	8
3.5	Identifisering av basiskomponenter i et ensidig skrudd knutepunkt med endeplate.	8
3.6	Illustrasjon av T-stykkets 3 bruddformer.	9
3.7	Eksempel på elementinndeling av H-bjelke med tredimensjonale solide elementer.	10
5.1	Knutepunkt fra de eksperimentelle testene utført av Grimsmo et al.	13
5.2	Endeplaten til knutepunkt fra de eksperimentelle testene utført av Grimsmo et al. sett forfra.	13
5.3	Tverrsnittsdimensjonene til H-profilene i knutepunktet.	14
5.4	Nominelle dimensjoner for M16-skruer med mutter.	14
5.5	Tverrstiver med antatte dimensjoner.	15
6.1	Forbindelsene i knutepunktet med nummererte skruerader.	22
6.2	Geometri og effektiv lengde av T-stykke.	23
6.3	Mulige flytemønster i T-stykke med skruer i gruppe og skruer som enkeltstående rad.	24
6.4	Søyleflensens geometriske parametere for beregning av effektive lengder	25
6.5	Idealisering av ekvivalent T-stykke for skruerad i utstikkende del av endeplate	26
6.6	Endeplatens geometriske parametere for beregning av effektive lengder.	27
6.7	Momentarmer for skruerad 1 og 2 i en av sidene i knutepunktet.	28
6.8	Momentarmen mellom trykk- og strekksenteret i knutepunktet.	29
6.9	Enkel statisk ubestemt ramme for illustrasjon av knutepunktets rotasjonsstivhet påvirkning på den globale lastfordelingen.	31
7.1	Illustrasjon av knutepunkt med de geometriske parameterene for beregningen av knutepunktets rotasjon presentert av Díaz et al.	37
7.2	Ferdig modellert geometri for skrue.	39
7.3	Speilsymmetrisk modell med hovedakser og plassering av referansepunkter.	40
7.4	Materialkurver med karakteristiske verdier og tøyningsfastning.	41
7.5	Interaksjonsflater definert for bjelke og endeplate.	42
7.6	Interaksjonsflater definert for søyle og stiver.	42
7.7	Flaten til venstre bjelkeende som er koblet til RP-2.	43
7.8	Modell med fremhevet symmetriplan.	43
7.9	Flaten knyttet til referansepunktet RP-1 som påføres forskyvningen.	44
7.10	Elementinndeling av endeplate, tverrstiver og Skrue.	45
7.11	Elementinndeling av søyle og bjelke.	45
7.12	Elementinndeling av knutepunktet sett forfra.	45
7.13	Sammenligning av timeglass- og intern energi i modellen.	46

7.14	Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for implisitt og eksplisitt løsningsmetode.	47
7.15	Sammenligning av kinetisk og intern energi i modellen.	48
7.16	Alternativ elementinndeling av søyle.	49
7.17	Alternativ elementinndeling av av bjelke.	49
7.18	Knutepunkt med alternativ elementinndeling, sett forfra.	50
7.19	Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for to ulike elementinndelinger.	50
7.20	Knutepunktets venstre forbindelse med modellert sveis.	51
7.21	Elementinndeling av sveis.	51
7.22	Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for modell med sveis mellom bjelker og endeplater og hovedmodell.	52
7.23	Geometri av stivt opplager med elementinndeling og referansepunkt (RP).	52
7.24	Modell med opplagere, hovedakser og plassering av referansepunkter.	53
7.25	Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for modell med opplagere og hovedmodell.	53
7.26	Materialkurver med sanne karakteristiske verdier og tøyingsfastning, samt modifisert tøyning i skruestål	54
7.27	Elastisk-perfekt plastiske materialkurver med karakteristiske verdier.	54
7.28	Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for tre ulike materialkurver.	55
7.29	Ferdig modellert geometri av hele knutepunktet.	56
7.30	Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for fullstendig modellert geometri og hovedmodell.	56
7.31	Materialkurver med sanne verdier fra fastningsuttrykket med inngangsverdier utledet av Grimsmo et al.	57
7.32	Kraft-forskyvningskurve fra QS-DLD-4 og FEM-modellene.	58
7.33	Spenninger i knutepunktet ved 23 mm forskyvning av søylen.	59
7.34	Plastisk tøyning i knutepunktet ved 23 mm forskyvning av søylen.	59
7.35	Beregning av moment i høyre forbindelse.	61
7.36	Statisk modell for nedbøyning av bjelke.	62
7.37	Sammenligning av moment-rotasjon-relasjon.	62
7.38	Beregnet motstandsevne og lastvirkning presentert i en sannsynlighetsfordeling	63
7.39	Moment-rotasjon-relasjon med idealisert metode for uthenting av forbindelsens initialrotasjonsstivhet.	64
7.40	Momentdiagram for ramme med bøyestiv forbindelse i node 3.	65
7.41	Momentdiagram for ramme med initialrotasjonsstivhet beregnet etter Eurokode 3.	65
7.42	Momentdiagram for ramme med initialrotasjonsstivhet beregnet med FEM (hovedmodell).	65

Tabeller

5.1	Karakteristiske verdier for konstruksjonsstålet og nominelle verdier for skruenes flytegrense og strekkfasthet.	15
6.1	Nøkkelord for litteratursøk på norsk og engelsk med synonymer	17
6.2	Størrelser med tilhørende enheter.	18
6.3	Relevante indeksbokstaver fra NS-EN 1993-1-8 med betydning	22
7.1	Timeglassenergi, intern energi og forholdet mellom dem for et utvalg punkter i belastningsperioden.	46
7.2	Kinetisk energi, intern energi og forholdet mellom dem for et utvalg punkter i første del av belastningsperioden.	48
7.3	Maksverdier for kraft med tilhørende forskyvning for QS-DLD-4, valideringsmodell og hovedmodell.	58
7.4	Kapasitet uten partialfaktorer for basiskomponentene i forbindelsen.	60
7.5	Kapasitet med partialfaktorer for basiskomponentene i forbindelsen.	60
7.6	Stivhetskoeffisienter.	60
7.7	Sammenligning av beregnet moment med og uten partialfaktorer.	63
7.8	Sammenligning av beregnet initialrotasjonsstivhet.	64

1 | Innledning

Implementering av bøyestive knutepunkter bidrar til avstivning av rammekonstruksjoner i stål, og knutepunktens momentoverførende egenskaper oppnås ved tilstrekkelig stivhet til å begrense rotasjonen i forbindelsen mellom stavene som sammenføyes. I dag er komponentmetoden etter Eurokode 3 den standardiserte metoden for å kontrollere kapasiteten til et knutepunkt. Metoden deler knutepunktet opp i flere mindre komponenter som kontrolleres hver for seg med en analytisk tilnærming, og vil samlet sett danne et grunnlag for utledning av den helhetlige kapasiteten til knutepunktet. Kapasitetsundersøkelser av momentoverførende knutepunkter med skrueforbindelser er ofte avansert på grunn av omfattende geometri, og lastvirkning på alle komponentene som er involvert. Analytiske beregningsmetoder er godt egnet for løsning av forenklete problemer, men når belastning, geometri eller materialeroppførsel blir komplisert, er nøyaktigheten av disse metodene begrenset.

Elementmetoden, også kalt FEM, er en numerisk beregningsmetode som innen flere ingeniørdisipliner har blitt standardisert som verktøy for løsning av en rekke problemer. Metoden gjør det mulig å simulere hvordan størrelser som deformasjoner, spenninger og tøyninger fordeler seg gjennom en geometri, men krever store mengder datakraft for løsning av selv enkle problemer. Datamaskinen er i dag en viktig ressurs for ingeniøren, og har åpnet dørene for avanserte modellerings- og beregningsoperasjoner som i sin natur er for omfattende å gjennomføre med pen og papir. Utviklingen av datamaskinen går fort fremover, og hastighet og kapasitet blir stadig bedre. Denne evolusjonen fører til at tyngre regneoperasjoner nå er mer allment innen rekkevidde. Også bruk av FEM kan gjøres for mer avanserte modeller.

Innen kapasitetsundersøkelser ved dimensjonering av konstruksjoner er metoden imidlertid mindre utbredt. Numeriske analyser muliggjør detaljert simulering av oppførselen til knutepunkter, og er samtidig et alternativ til omfattende eksperimentelle tester som er kostbart å gjennomføre. Likevel finnes det ingen direkte metode for bruk av FEM som dokumentasjon på kapasiteten til momentoverførende knutepunkter med skrueforbindelser etter Norsk standard. Økt bruk av FEM til kapasitetsundersøkelser av konstruksjonsdeler kan bidra til at den helhetlige oppførselen er bedre forstått, og det dermed bygges mer robuste konstruksjoner i fremtiden.

2 | Samfunnsperspektiv

Utvikling av teknologi og vitenskapelige metoder rettet mot å sikre menneskelige, økonomiske og miljømessige verdier, bidrar også til en samfunnsmessig bærekraftig utvikling. Dette krever en overordnet forståelse av effekten av det arbeidet som utføres, og for å sette denne oppgavens tema opp mot dagsaktuelle samfunnsmessige problemstillinger, er det her valgt å ta utgangspunkt i FN's bærekraftsmål [1], og hvordan kapasitetsundersøkelser av momentoverførende knutepunkter ved bruk av FEM kan bidra til å møte enkelte av disse målene.

Bærekraftsmål 9 omfatter industri, innovasjon og infrastruktur, hvor mer effektiv ressursbruk og styrking av vitenskapelig forskning er sentrale temaer. Målet omfatter også oppgradering av teknologi i næringslivssektoren. I forskningssammenheng fører bruk av digitale beregningsmodeller til et minsket behov for gjennomføring av kostbare og ressurskrevende fullskala laboratorietester. Dermed er bruk av FEM-modellering allerede med på å fremme mer effektiv ressursbruk og samtidig styrke vitenskapelig forskning. Videre kan utvikling og anvendelse av gode metoder for kapasitetsundersøkelser med FEM føre til en økt interesse for bruk av dedikerte og omfattende FEM-programvarer i næringslivssektoren.

Et av fokusområdene i bærekraftsmål 11 er å gjøre byer mer trygge og robuste. Fra et konstruksjonsmessig standpunkt kan dette tolkes som at bygninger og konstruksjoner utføres slik at tilstrekkelig motstandsevne til å unngå kollaps under katastrofe- og ulykkeshendelser er ivaretatt. Dette er spesielt viktig for byggverk med samfunnskritiske funksjoner og der hvor konsekvensen av kollaps vil kunne ha store følger. Under unormale og ekstreme lastsituasjoner er grundige undersøkelser av knutepunkters oppførsel grunnleggende for å sikre utførelse med tilfredsstillende robuste egenskaper. FEM-modellering er et godt og velprøvd verktøy for utvidet analyse av konstruksjonsdetaljer, og med gode retningslinjer og metoder for dokumentasjon og oppbygning av FEM-modeller, kan det oppføres byggverk hvor den helhetlige oppførselen er bedre forstått og tilpasset. Implementering av FEM-modellering for kapasitetsberegninger av knutepunkter i prosjekteringsarbeidet kan dermed ha samfunnsmessige effekter som økt vern av liv, helse og økonomiske verdier.

I dag er det kjent at klimaendringene er et resultat av menneskelig aktivitet, og at disse endringene har store innvirkninger i form av mer ekstremvær og høyere hyppighet av naturkatastrofer. Bærekraftsmål 13 er å stoppe klimaendringene og samtidig styrke evnen til å tilpasse og motstå konsekvensene av endringene som følge av at de allerede er fremtredende. Naturkatastrofer vil på lik linje med ulykkeshendelser, utsette konstruksjoner for unormale og ekstreme laster, og kan ofte opptre med avanserte lastmønstre. Derfor kan det også her være fordelaktig med bruk av FEM-analyser for kapasitetsberegninger av knutepunkt for å sikre en mer nøyaktig representasjon av konstruksjoners robusthet og duktile egenskaper under de mer ekstreme naturlastene som ventes å inntreffe som et resultat av klimaendringene og global oppvarming.

3 | Teori

I dette kapittelet presenteres relevant teoribakgrunn for oppgavens problemstilling.

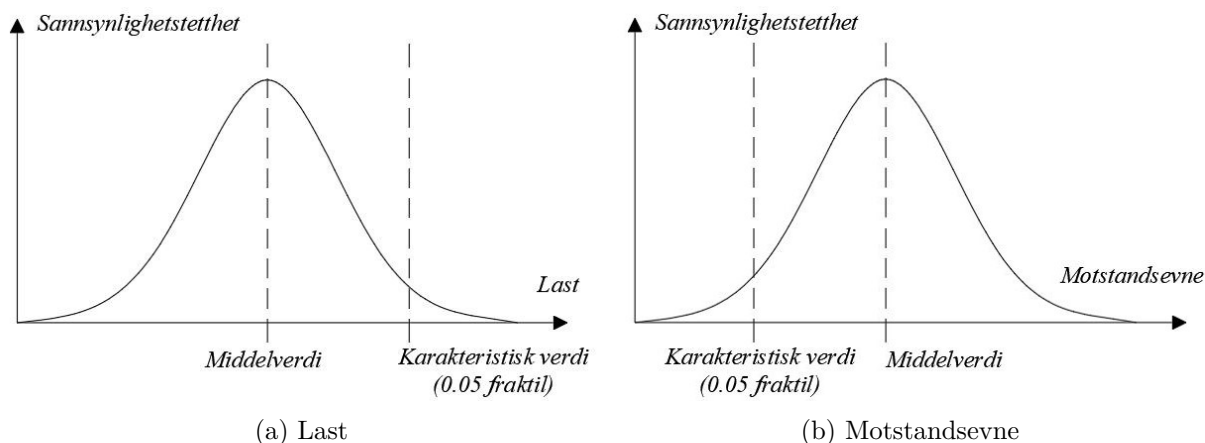
3.1 Krav til dokumentasjon

I forvaltningsloven er et dokument definert som «en logisk avgrenset informasjonsmengde som er lagret på et medium for senere lesing, lytting, fremføring, overføring eller lignende [2]». Dokumentasjon gjør det mulig å bevise at regelverk er fulgt, og at resultat av utført arbeid er etterprøvbart. Ved prosjektering og oppføring av bærende konstruksjoner kan feil og mangler få store konsekvenser, og dokumentering er et helt nødvendig verktøy for å sikre byggverkets integritet og kvalitetssikre det arbeidet som er utført gjennom interne kontroller og eksterne tredjepartskontroller. Krav til dokumentasjon av prosjekteringsarbeid i byggeprosjekter er derfor lovpålagt gjennom plan- og bygningsloven [3] ved at ansvarlig prosjekterende skal dokumentere at forutsetninger og valgte løsninger er gjort i samsvar med bestemmelsene i denne loven. Byggteknisk forskrift (TEK17) [4] som har hjemmel i plan- og bygningsloven, angir deretter minstekravene til konstruksjonssikkerhet i byggverk. Denne delen av forskriften skal sikre liv og helse, samt materiell og samfunnsmessige behov ved at «byggverk skal prosjekteres slik at det oppnås tilfredsstillende sikkerhet mot brudd og tilstrekkelig stivhet og stabilitet for laster som kan oppstå under forutsatt bruk». Videre henviser forskriften til dokumentasjon som «skriftlig eller digitalt materiale som tegninger, beskrivelser, analyser, beregninger, protokoller, sjekklister, fotografier osv. som samlet skal bevise at kravene i forskriften er oppfylt».

Minstekravene til prosjektering og konstruksjonssikkerhet i forskriften er oppfylt dersom prosjekteringen er gjennomført etter Norsk standard (NS-EN 1990-1999) med tilhørende nasjonale tillegg (NA). Bestemmelsene i byggteknisk forskrift gir også anledning til å benytte andre metoder for å dokumentere tilstrekkelig mekanisk motstandsevne og stabilitet, men stiller dermed krav til at oppnådd sikkerhet skal være på samme nivå som ved bruk av Norsk Standard. Det understrekkes også at slik dokumentasjon vil være svært krevende [5].

3.2 Dimensjonerende verdier

Prosjektering av konstruksjoner og konstruksjonsdeler etter Norsk standard gjøres etter partialfaktormetoden. Her ivaretas sikkerheten ved at den dimensjonerende lastvirkningen E_d skal være mindre eller lik den dimensjonerende kapasiteten R_d . Normalt skal karakteristiske verdier ligge til grunn for prosjekteringen, slik som vist på figur 3.1. For belastning hvor lav verdi er gunstig vil karakteristisk verdi være den øvre 5% fraktilen av fordelingen, og for motstandsevne hvor høy verdi er gunstig, vil karakteristisk verdi være 5% fraktilen av nedre del av fordeling. I enkelte tilfeller benyttes nominelle verdier som karakteristiske verdier. Disse er fastsatt på ikke-statistisk grunnlag og er basert på erfaringer og fysiske forhold [6].



Figur 3.1: Sannsynlighetsfordeling for last og motstandsevne [7, s. 8] [8].

I tillegg til karakteristiske verdier skal det benyttes partialfaktorer som tar hensyn til at det fortsatt er 5% sannsynlighet for at for at de karakteristiske verdiene ikke er tilstrekkelig. Partialfaktorer skal brukes både for å sikre eventuelle avvik ved belastning, og ved avvik knyttet til materialer og geometri. Partialfaktoren γ_f omfatter lastene, og øker den dimensjonerende lastvirkningen, E_k , ved at den multipliseres med de karakteristiske lastverdiene. Partialfaktoren γ_M gjelder for materialfasthet, men omfatter i tillegg usikkerhet ved modell og variasjon i tverrsnittsdimensjoner. Den karakteristiske kapasiteten, R_k , divideres med denne faktoren og reduserer den dimensjonerende motstandsevnen. Kapasitetskontrollen gjennomføres dermed ved at uttrykket i formel 3.1 skal påvises [9, s. 35].

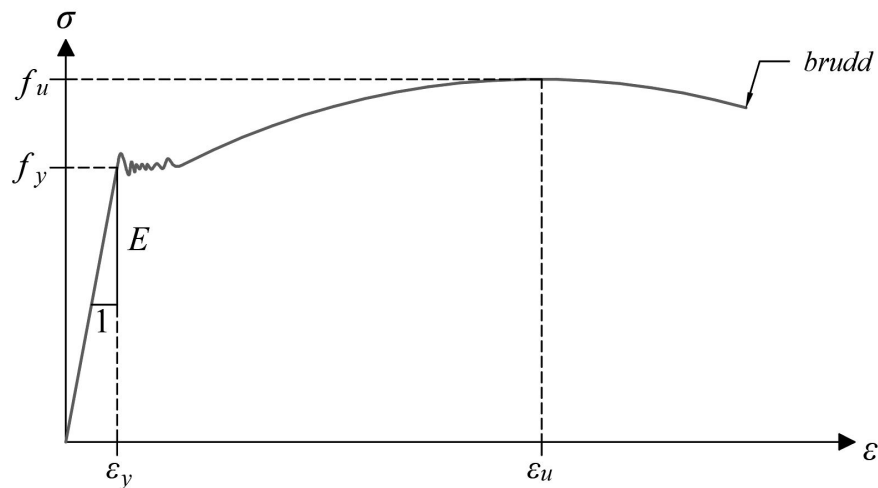
$$E_d = \gamma_f \cdot E_k \leq R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (3.1)$$

Partialfaktoren for materialet ved dimensjonering av stålkonstruksjoner avhenger av hva slags lastvirkning konstruksjonsdelen utsettes for. Under er de tre vanligste faktorene listet opp [10]:

- Tverrsnittskapasitet uansett tverrsnittsklasse, $\gamma_{M0} = 1.05$
- Stavens kapasitet mot instabilitet, $\gamma_{M1} = 1.05$
- Tverrsnittskapasitet mot brudd forårsaket av strekkspenninger, $\gamma_{M2} = 1.25$

3.3 Stålets mekaniske egenskaper

Grunnleggende forståelse av stålets mekaniske egenskaper er vesentlig for å forstå hvordan konstruksjoner i stål vil oppføre seg under et belastningsforløp. De mekaniske egenskapene kan fastsettes ved en-aksial strekkprøving hvor et prøvestykke av materialet plasseres i en testrigg og utsettes for strekkkrefter frem til brudd. Kraft-deformasjonsrelasjonen ($F - \Delta l$) fra strekkprøvingen omgjøres til spenning-tøyningsrelasjon ($\sigma - \varepsilon$) slik at resultatet blir uavhengig av prøvestykkets geometri, og presenteres deretter som en spenning-tøyningskurve med nominelle verdier som vist i figur 3.2. Nominell spenning, σ , er definert som den påførte kraften i et gitt øyeblikk i belastningsforløpet dividert på den originale tverrsnittsarealet til prøvestykket, og den nominelle tøyningen, ε er definert som lengdeendringen dividert på prøvestykkets originale lengde.



Figur 3.2: Eksempel på spenning-tøyningkurve for stål med benevnelser etter Eurokode 3 [10] [8].

Det skilles også mellom nominell (engineering) og sann (true) spenning og tøyning. Som vist i figur 3.2 virker det som at stålet blir svakere etter at spenningene når stålets strekkfasthet, men i virkeligheten skjer det motsatte som følge av tøyningfastning. Denne spenningsreduksjonen skyldes blant annet at de nominelle verdiene ikke hensyntar endringen av spenningsareal. I enkelte tilfeller kan det derfor være mer hensiktsmessig å bruke sann spenning og tøyning. Ved å utnytte at det ikke skjer en volumendring i materialet under belastningen, kan sann spenning og tøyning utledes fra de nominelle verdiene ved bruk av henholdsvis formel 3.2 og 3.3. Disse relasjonene anses som korrekte frem til innsnøring i teststykket og deformasjonen er ikke lengre homogen [11].

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.3)$$

Nøkkelværdier for mekaniske egenskaper er gitt i NS-EN 10025-2 [12] for varmvalset konstruksjonsstål, og i NS-EN ISO 898-1 [13] for skruerstål.

3.3.1 Elastiske egenskaper

Under strekkprøvingen vil stålet først ha et elastisk deformasjonsforløp, og dersom belastningen avtar vil stålet gå tilbake til sin opprinnelige form. Ved elastisk deformasjon vil spenning-tøyningforholdet være lineært og stigningstallet i denne lineære sammenhengen er elastisitetsmodulen, E . Strekk-tøyninger i en retning vil også medføre trykktøyning i akseretningene vinkelrett på strekkretningen, og Poissons tall, ν , beskriver denne sammenhengen i det elastiske området.

3.3.2 Plastiske egenskaper

Når spenningene i stålet når flytegrensen, f_y , vil videre deformasjon av stålet bli permanent. Dette kalles plastisk deformasjon. Etterhvert som stålet utsettes for større plastiske deformasjoner vil styrken til stålet få en mindre gradvis økning som følge av tøyningfastning, før ekstrem deformasjon i innsnringspunktet fører til brudd i materialet. Spenningene i stålet ved strekkbrudd beskriver stålets strekkfasthet, f_u . Ved trykkbelastning vil spenning-tøyingsforholdet være tilnærmet likt som ved strekkbelastning, men her er det ingen øvre grenseverdi og bruddformen vil være annerledes [11]. Plastisk kapasitet ved trykkbelastning er avhengig av tverrsnittets geometriske oppbygning og slankhet. Eurokode 3 håndterer dette ved bruk av tverrsnittsklasser rangert fra 1 til 4 hvor klasse 1 og 2 indikerer at konstruksjonsdelen tåler full plastisk påkjenning uten at lokal knekking oppstår, klasse 3 tåler akkurat å nå flyting og klasse 4 opplever lokal knekking før flytegrensen er nådd. De fleste tverrsnittsprofilene produsert i dag er designet for å havne i tverrsnittsklasse 1 [9, s. 107].

3.3.3 Flytekriterium

Under en-aksiale strekkprøver utsettes prøvestykket for endimensjonal strekkbelastning, og materialets flyte- og bruddspenning kan utledes fra testresultatene. For to- og tredimensjonale belastningssituasjoner vil en kombinasjon av spenningene i de forskjellige akseretningene føre til flyting, og det er nødvendig med et kriterium som uttrykker hvordan denne sammensetningen er. Det er utviklet en rekke forskjellige flytekriterier, og den mest brukte av disse for å påvise flyting i duktile metaller er von Mises flytekriterium, og er vist for tredimensjonal spenningstilstand i formel 3.4 hvor σ er normalspenningene og τ er skjærspenningene i akseretningene X, Y og Z. [9, s. 63].

$$f_y = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (3.4)$$

3.3.4 Duktilitet

Graden av plastisk deformasjon et materiale kan tåle før brudd inntreffer, beskriver hvor duktilt materialet er [11]. Stål med høy flytegrense har ofte liten grad av plastisk tøyning før brudd, mens stål med lavere flytegrense opplever større grad av plastisk tøyning, og har derfor også en mer duktil oppførsel. Duktilitet er ofte en fordelaktig egenskap ved stål brukt i konstruksjonsdeler siden det vil gi en forvarsel ved synlig deformasjon før bruddet inntreffer, og samtidig virker som en energiabsorberende mekanisme under store belastninger. Eurokode 3 stiller et sett med minimumskrav til konstruksjonsstålets duktilitet. Kravene omfatter forholdet mellom flytegrense, bruddforlengelse og tøyning i stålet ved oppnådd strekkfasthet, og er følgende [10]:

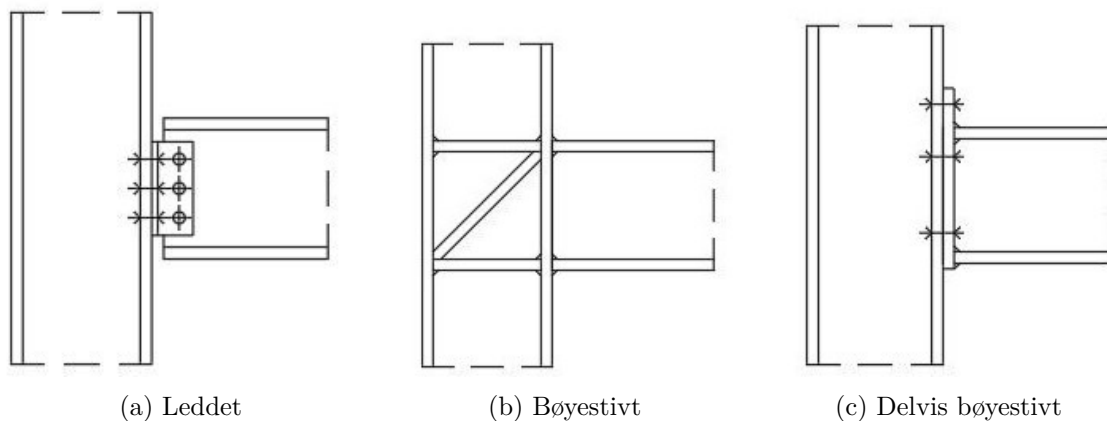
- $f_u/f_y \geq 1.10$
- Bruddforlengelse $\geq 15\%$
- Tøyningen, $\varepsilon_u \geq 15\varepsilon_y = 15f_y/E$

3.4 Knutepunkter i stål

Et knutepunkt i en rammekonstruksjon er der to eller flere staver møtes og er festet til hverandre, og det kan sies at det er knutepunktene som binder konstruksjonen sammen. Derfor er motstandsevnen til knutepunktene like viktig som motstandsevnene til stavene for å sikre den helhetlige kapasiteten til konstruksjonen. I stålkonstruksjoner kan stavene sammenføres ved bruk av sveiseforbindelser, skrueforbindelser eller en kombinasjon av disse. Skrudde forbindelser mellom søyler og bjelker i et bæresystem er ofte foretrukket siden de forenkler monteringsarbeidet ved at man får mindre og dermed mer håndterbare deler å arbeide med, og man unngår sveising på byggeplassen som kan være utfordrende. Prosjektering av stålkonstruksjoner er dekket av den norske standarden NS-EN 1993, også kalt Eurokode 3 eller bare EC3, hvor generelle bestemmelser er gitt i del 1-1 [10] og prosjektering av knutepunkter og forbindelser er dekket i del 1-8 [14].

3.4.1 Klassifisering av knutepunkter

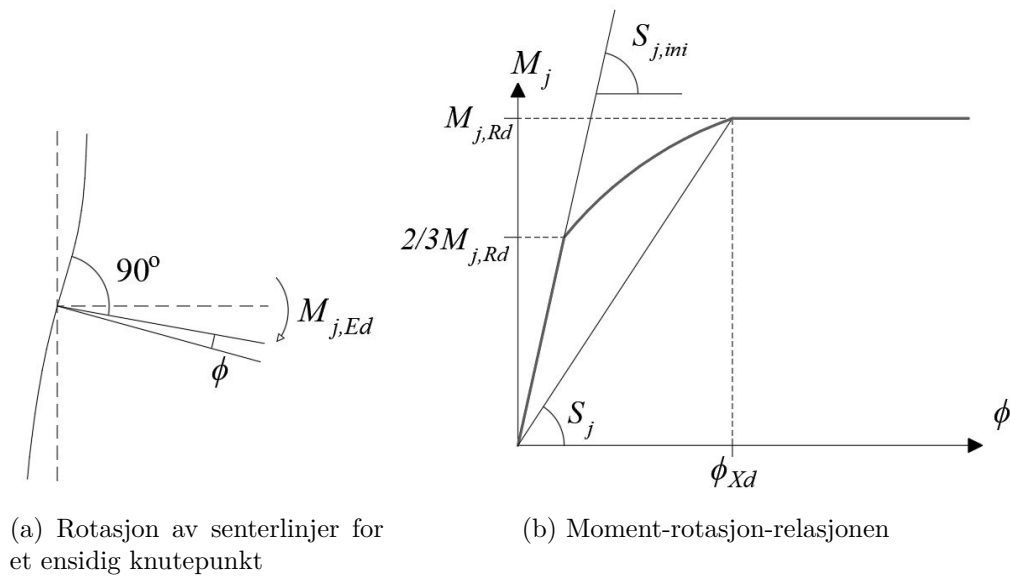
Standarden skiller mellom tre ulike knutepunktmodeller: leddet, bøyestivt, og delvis bøyestivt, og illustrasjon på utførelse av ensidige knutepunkter i disse tre klassene er vist i figur 3.3. Hvilken modell som velges bestemmer om moment-rotasjon-relasjonen til knutepunktet skal inngå i globalanalysen for fordeling av lastvirkningene i konstruksjonen, og klassifisering gjøres etter stivhet eller styrke. Ved klassifisering etter stivhet sammenlignes initialrotasjonsstivheten til knutepunktet med klassifiseringsgrenser som bestemmes med hensyn på geometriske parametere for nærliggende søyler og bjelker. Ved klassifisering etter styrke sammenlignes dimensjonerende momentkapasitet for knutepunktet med kapasiteten til stavene som forbindes. Leddede knutepunkter idealiseres som fritt til å rotere med vinkelen initiert av dimensjonerende belastning, og er kun i stand til å overføre skjær- og normalkrefter. Bøyestive knutepunkter er fastholt mot rotasjon og har tilstrekkelig stivhet til å overføre momenter. På figur 3.3b er søylesteget utstyrt med påsveiste plater kalt stivere som i dette tilfellet er med på å øke kapasiteten til søylesteget for tverrstrekk og -trykk, samt skjær i steget. Implementering av slike stivere bidrar til økt bøyestivhet i knutepunktet. For delvis bøyestive knutepunkter må moment-rotasjon-relasjonen undersøkes for å fastsette hvor store momenter som kan overføres mellom stavene som forbindes i knutepunktet.



Figur 3.3: Mulig utførelse av ensidige knutepunkter med tilhørende klassifisering [9, s. 425] [8].

Moment-rotasjon-relasjonen til et knutepunkt beskriver forholdet mellom det påførte momentet i knutepunktet og rotasjonen som oppstår mellom senterlinjene til stavene som forbindes. Forholdet slik det er beskrevet i Eurokode 3 er vist i figur 3.4. Initialrotasjonsstivheten, $S_{j,ini}$, er helningen for det elastiske området i kurven, og er lineært økende opp til momentpåkjenningen når $2/3M_{j,Rd}$.

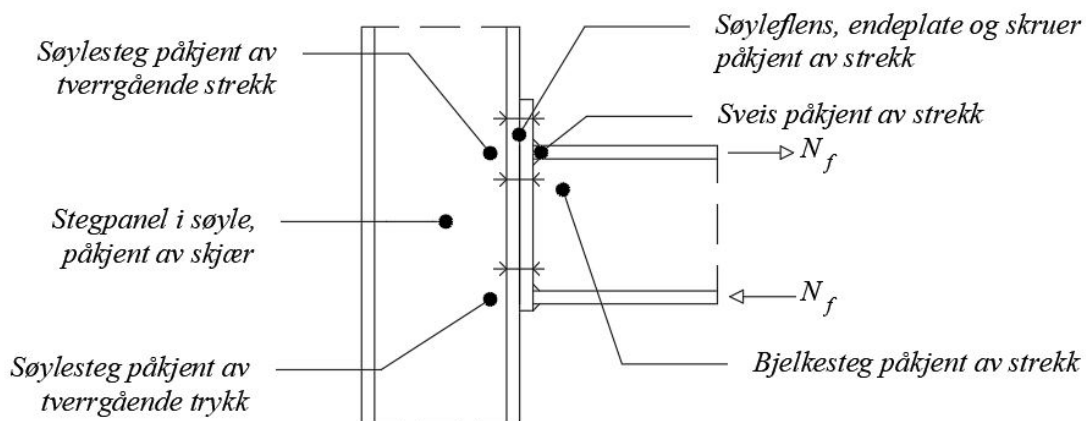
For området mellom det øvre punktet for det elastiske området og forbindelsens momentkapasitet, benyttes sekantstivheten S_j . Rotasjonen i forbindelsen ved fullt utnyttet momentkapasitet er ϕ_{Xd} .



Figur 3.4: Forholdet mellom moment, rotasjon og rotasjonsstivhet i et knutepunkt [14] [8].

3.4.2 Komponentmetoden

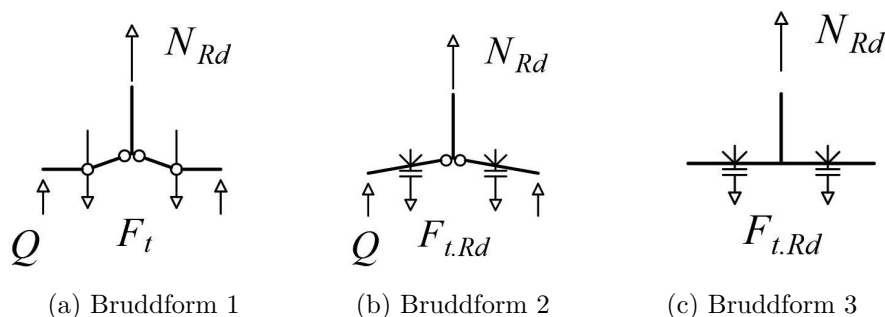
Kapasitetskontroll av knutepunkter etter Norsk standard gjøres analytisk ved bruk av komponentmetoden hvor knutepunktet deles opp i basiskomponenter basert på oppbygning og tilhørende belastning. Kapasiteten til hver enkelt komponent undersøkes individuelt før de samlet sett benyttes til å bestemme knutepunktets stivhet og styrke. Eksempler på basiskomponenter og deres plassering i knutepunktet er vist på figur 3.5. For denne typen knutepunkt er stegpanel i søyle påkjent av skjær, søylesteg påkjent av tverrgående strekk og trykk, søyleflens og endeplate påkjent av bøyning, og bjelkesteg, skruer og sveis påkjent av strekk de aktuelle basiskomponentene som må kontrolleres for å fastsette knutepunktets stivhet og styrke.



Figur 3.5: Identifisering av basiskomponenter i et ensidig skrudd knutepunkt med endeplate [8].

T-stykkemodellen

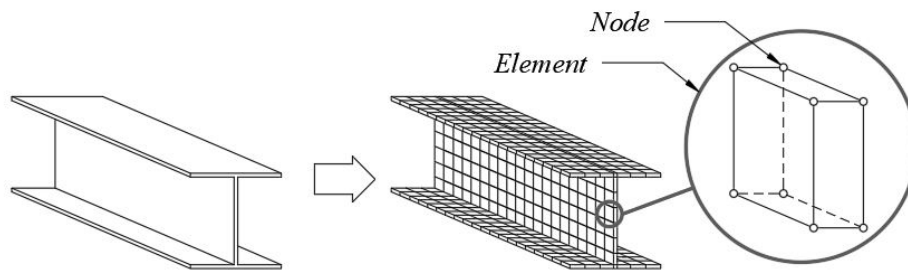
For knutepunkter med skruforbindelser hvor skruene utsettes for strekkrefter, benyttes ekvivalent T-stykkemodellen for kontroll av basiskomponenter idealisert som et T-profil med skruer i flensene og en påført strekkraft i steget. Søyleflens og endeplate utsatt for bøyning utgjør denne typen basiskomponenter for skrudedde knutepunkter med endeplate. T-stykker anses å ha tre bruddformer slik som vist på figur 3.6 som er styrende for hvor stor strekklast, N_{Rd} , et T-stykke vil tåle. Den første bruddformen oppstår når skruene har mye større kapasitet en flensen til T-stykket og strekkraften i steget fører til skruerkraften F_t og hevearmskraften Q som igjen fører til flyting i flensen. Neste bruddform oppstår når flensens og skruenes kapasitet er mer jevnstore, og kapasiteten er styrt av en kombinasjon av flyting i flensen og brudd i skruene ved skruerkraften $F_{t,Rd}$. Også her er hevearmeffekten opptredende. Den tredje bruddformen er kun brudd i skruene som følge av at kapasiteten av T-stykkets flens er mye større en kapasiteten til skruene.



Figur 3.6: Illustrasjon av T-stykkets 3 bruddformer [9, s. 390] [8].

3.5 Elementmetoden

Elementmetoden (finite element method), også referert til som FEM, er en numerisk beregningsmetode som matematisk beskrives med partielle differensialligninger for løsning av både to- og tredimensjonale problemer. I motsetning til analytiske beregningsmetoder som benyttes for å gi eksakte løsninger på forenklete problemstillinger, vil numeriske metoder som FEM gi en tilnærmet løsning, men kan til gjengjeld benyttes på mer komplekse problemer. Metodens natur gjør at det selv for enkle problemer, må gjennomføres et stort antall matematiske operasjoner, og håndberegninger vil være tidkrevende og ofte ikke tilstrekkelig. Dermed er anvendelse av datakraft vesentlig for effektiv anvendelse av FEM. Metoden fungerer ved at et område deles inn i et antall mindre elementer med noder i knutepunktene som knytter elementene sammen slik som vist på figur 3.7, og hver node har et sett med frihetsgrader som beskriver nodens tilstand. Elementene utgjør et elementnett, og størrelse og valg av elementertyper er styrende for å oppnå en god representasjon av detaljen som undersøkes. Bruk av gradvis tettere og tettere elementnett fører vanligvis til konvergens mot faktisk verdi, men driver også opp beregningskostnadene ved at flere matematiske operasjoner må gjennomføres [15]. Hvor nøyaktig den numeriske løsningen er, avhenger derfor av hvor godt modellen er tilpasset problemet.



Figur 3.7: Eksempel på elementinndeling av H-bjelke med tredimensjonale solide elementer [8].

3.5.1 Lineær og ikke-lineær analyse

Det skilles mellom lineære og ikke-lineære FEM-analyser, og hvilken type som skal benyttes avhenger av analysens krav til material- og geometriske egenskaper, definisjon av kontakt mellom forskjellige flater, temperatureffekter og lastvirkning. Ved lineær analyse forutsettes det at alle disse har lineære forhold gjennom belastningsforløpet. Med hensyn på materialegenskapene vil dette si at det kun forutsettes lineær-elastisk materialoppførsel og at det ikke tas hensyn til at materialet vil deformeres plastisk ved en gitt spenning. På samme måte vil de geometriske endringene under belastningsforløpet kun være lineære. Slike analyser har derfor et begrenset bruksområde, og er ikke egnet til plastiske kapasitetsundersøkelser. Så fort det introduseres parametere med ikke-lineære egenskaper, vil også analysen bli ikke-lineær. Denne typen analyser er mer tidkrevende å gjennomføre ved at både økt detaljeringsgrad i modelleringsarbeidet og økt analysetid, men riktig utført vil analyseformen gi en mer nøyaktig representasjon av konstruksjonsdelens helhetlige oppførsel.

3.5.2 Anvendelse

Elementmetoden er godt egnet når analytiske tilnærminger ikke er tilstrekkelig, og når mer detaljerte og omfattende analyser skal gjennomføres. FEM benyttes derfor innen en rekke ingeniørdisipliner som blant annet maskiningeniørfaget, marinteknikk og luftfartsteknikk. metoden anvendes også til prosjektering av byggverk, men er oftest begrenset til å finne lastvirkningen på bærekonstruksjoner og konstruksjonsdeler ved å løse statiske og dynamiske problemer, for så å benytte de analytiske metodene etter Norsk Standard til selve kapasitetskontrollen. Norsk standard gir få føringer for hvordan FEM skal benyttes ved kapasitetskontroll av stålkonstruksjoner, og er kun foreslått som løsningsmetode ved et par anledninger. Tillegg C i del 1-5 [16] av Eurokode 3, er et informativt dokument som gir en kortfattet veiledning av hvordan FEM kan benyttes til kontroll av platekonstruksjoner, og Eurokode 3 del 1-6 [17] gir føringer for hvordan numeriske analyser skal gjennomføres for skallkonstruksjoner. Utenom disse, gir ikke Norsk Standard føringer for hvordan FEM må benyttes i en kapasitetsundersøkelse av sammensatte konstruksjonsdetaljer i stål slik som knutepunkter. I offshoreindustrien benyttes FEM til kapasitetsundersøkelser i større grad som følge av mer avansert geometrisk utforming og komplekse belastningsmønstre. Derfor er det også utviklet veiledningsdokumentasjon for gjennomføring av kapasitetundersøkelser av konstruksjonsdeler rettet mot offshoreindustrien. DNV-RP-C208 [7] er en slik veiledning med anbefalt praksis for bestemmelse av konstruktiv kapasitet ved bruk av ikke-lineære FEM-analyser, og er utarbeidet av DNV GL, et «internasjonalt selskap innen kvalitetssikring og risikohåndtering» som blant annet er spesialisert på offshore konstruksjoner [18]. Innen forskning er FEM også mye brukt til å simulere oppførselen til konstruksjoner og konstruksjonsdeler i situasjoner hvor det er mangel på eksperimentell data. Dermed finnes et bredt utvalg vitenskaplige forskningsartikler som omhandler modellering og analyse ved bruk av FEM.

4 | Forskerspørsmål

Ved kapasitetsberegninger av momentoverførende knutepunkter etter Eurokode 3 brukes komponentmetoden hvor den helhetlige oppførselen utledes fra basiskomponentene knutepunktet er bygd opp av. Numeriske analyser muliggjør simulering og grundig undersøkelse av oppførselen til knutepunkter. Likevel finnes det ingen metode for bruk av FEM som dokumentasjon på kapasiteten til knutepunkter i Eurokode 3. I denne oppgaven blir FEM benyttet for analyse av et momentoverførende knutepunkt, og forskerspørsmålet er:

Hvordan kan FEM-analyser benyttes til å kontrollere og dokumentere kapasiteten til momentoverførende knutepunkter i stål?

For å kunne gi et godt svar på forskerspørsmålet er det valgt å inkludere tre underspørsmål. Først må det kartlegges hvilke føringer som legges av relevante normative dokumenter for gjennomføring av kapasitetsundersøkelser ved bruk av FEM. Med normative dokumenter menes standarder, veiledninger og annen anbefalt praksis, og følgende underspørsmål er inkludert:

Hvilke føringer legges for bruk av FEM til kapasitetsundersøkelser av relevante normative dokumenter?

Deretter undersøkes det hvordan FEM-modeller av knutepunkter med skrueforbindelser blir utarbeidet i forskningssammenheng, og følgende underspørsmål er valgt:

Hvordan utarbeides FEM-modeller for undersøkelser av knutepunkter med skrueforbindelser innen forskning?

Det er også av interesse å sammenligne resultater fra kapasitetsundersøkelser ved bruk av FEM med resultater etter beregningsmetodene i Eurokode 3, og det siste underspørsmålet er:

Hvordan samsvarer beregnet styrke og stivhet fra de numeriske analysene av knutepunktet med resultatene fra analytiske beregningsmetoder etter Eurokode 3? Er det avvik og hva er betydningen av avviket?

Målet med oppgaven er å undersøke hvordan kapasiteten til momentoverførende knutepunkter med skrueforbindelser kan kontrolleres og dokumenteres ved bruk av FEM-modellering slik at sikkerheten mot brudd er ivarettatt.

5 | Case/Materialer

I dette kapittelet presenteres knutepunktet som utgjør casen i denne oppgaven. Det er valgt å gjennomføre og dokumentere en kapasitetsundersøkelse av et knutepunktet ved hjelp av ikke-lineær FEM-analyse, i tillegg til kontroll med den analytiske beregningsmetoden i Eurokode 3. Knutepunktet som undersøkes skal inneholde skrueforbindelser, og det er lagt vekt på at knutepunktet skal være representativt for momentoverførende knutepunkter som er typisk for nordiske forhold. Videre er det også fordelaktig om det foreligger empiriske data av knutepunktets oppførsel som et sammenligningsgrunnlag for undersøkelsene som gjøres i denne oppgaven.

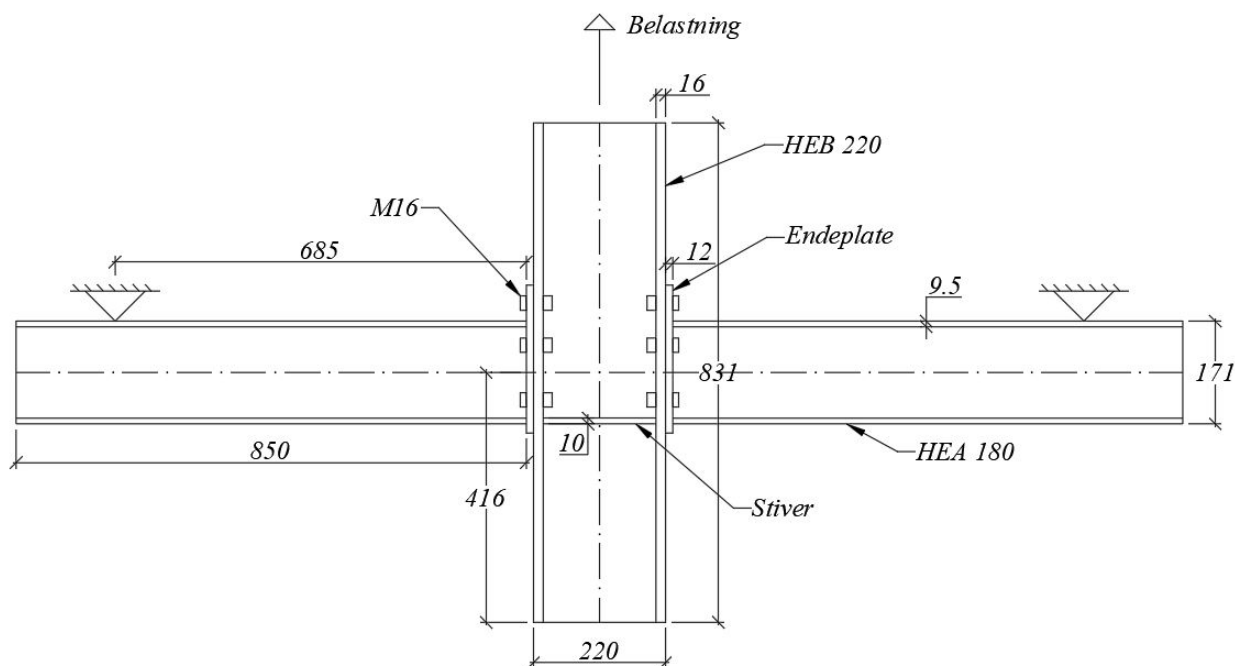
5.1 Valg av knutepunkt

Detaljhandboksens serie er en serie i syv deler som omfatter dimensjonering av knutepunkter og sammenføyninger i stålkonstruksjoner. Serien er skrevet av Wylliam Husson og Claes Fahleson, og først utgitt i 2011 av Stålbyggnadsinstituttet i Sverige. Like etter kjøpte Norsk Stålforbund rettighetene til bokserien og utga en norsk versjon i 2016. Publikasjon 185 [19] er en av delene i bokserien, og omhandler søyle-bjelke forbindelser. Her presenteres det beregningseksempler etter Eurokode 3 for syv typiske knutepunktutførelser. Blant disse er knutepunktet BP4 det eneste som er klassifisert som bøyestiv/momentoverførende, og består av to bjelker med påsveidde endeplater, festet til hver av flensene til en søyle ved hjelp av skruer plassert i rader fordelt over endeplaten høyde. Både søyle og bjelker er utført i H-profiler. På bjelkens strekkside er endeplaten forlenget slik at det er plass til en skrue på hver side av bjelkeflensen, og søylesteget er avstivet ytterligere med tverrstivere plassert parallelt i linje med bjelkeflensene.

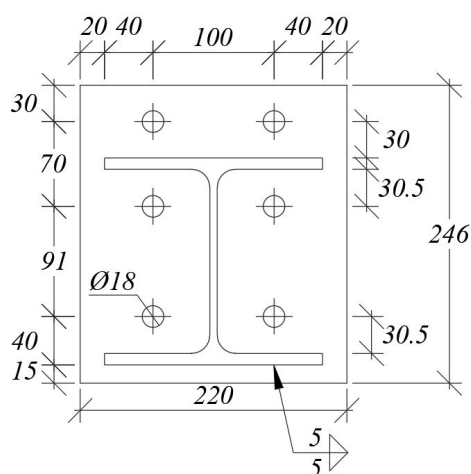
Grimsmo et al. har undersøkt et lignende knutepunkt [20] [21] som det i publikasjon 185 hvor det ble gjennomført eksperimentelle tester under dynamisk og kvasi-statisk belastning, og utarbeiding av en numerisk modell for videre undersøkelser av knutepunktet. Oppbygningen av denne FEM-modellen inngår også i litteraturstudiet i denne oppgaven. Med bakgrunn i det bøyestive knutepunktet presentert i publikasjon 185, velges dermed knutepunktet utsatt for kvasi-statisk belastning undersøkt og rapportert av Grimsmo et al. som utgangspunkt for casen i denne oppgaven. Det ble gjennomført to slike tester med ganske likt resultat, men resultatene fra testen ved navn QS-DLD-4 er mer detaljert beskrevet av Grimsmo et al., og vil være sammenligningsgrunnlaget i denne oppgaven. Knutepunktet er allerede grundig undersøkt av både Grimsmo et al. og en tidligere mastergruppe [22], og knutepunktets observerte oppførsel er godt dokumentert. Dermed er knutepunktet godt egnet til denne casen på grunn av aktuell oppbygning og det allerede foreligger et godt utgangspunkt for validering av FEM-modell. Mastergruppen rapporterte at knutepunktet klassifiseres som delvis momentstiv, og moment-rotasjons-relasjonen må tas hensyn til ved global analyse.

5.1.1 Knutepunktets utførelse

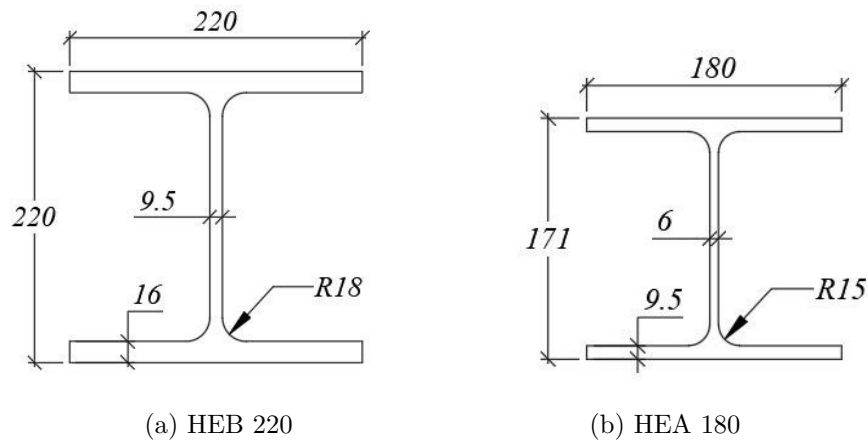
Knutepunktets utførelse med overordnede dimensjoner, randbetingelser og belastning slik det fremgår av eksperimentet gjennomført av Grimsmo et al. er vist på figur 5.1, og endeplate-dimensjoner med bjelke- og skrueplassering er vist på figur 5.2. Søylene er en HEB 220, og bjelkene er HEA 180 med dimensjoner som vist i figur 5.3.



Figur 5.1: Knutepunkt fra de eksperimentelle testene utført av Grimsmo et al. [20] [8].

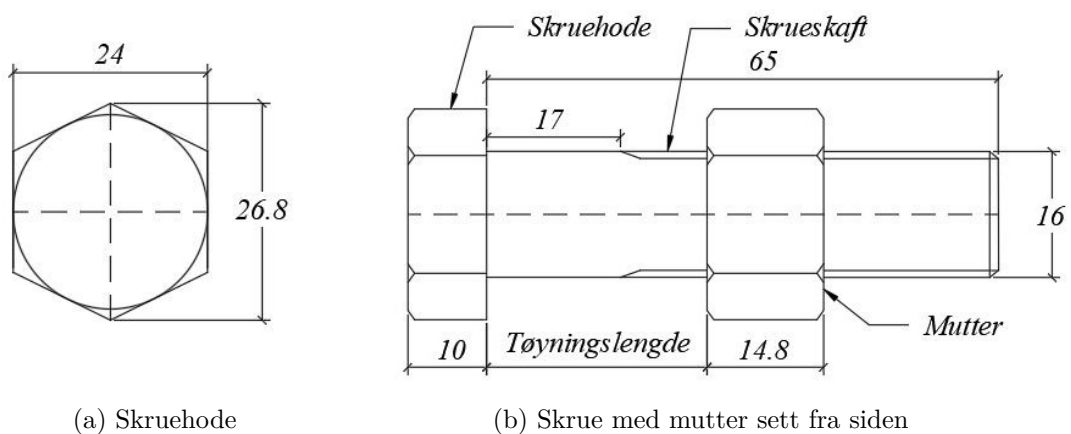


Figur 5.2: Endeplaten til knutepunkt fra de eksperimentelle testene utført av Grimsmo et al. sett forfra [20] [8].



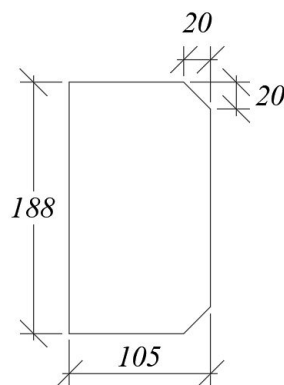
Figur 5.3: Tverrsnittsdimensjonene til H-profilene i knutepunktet [23] [8].

Skruene som ble benyttet er M16-skruer, og figur 5.4 viser denne skruetypens nominelle dimensjoner etter NS-EN ISO 4014 [24]. Den minste skaftlengden for M16-skruer i denne standarden er 65 mm, og tøyningens lengden vil være summen av tykkelsen til søylesteget og endeplaten. Den minste nominelle verdien for avstanden mellom skruehodet og begynnelsen på det gjengede området av skrueskaftet er 17 mm. Skruer i strekk som ikke er utsatt for hyppige variasjoner i strekkpåkjenningen havner i kategori D og trenger derfor ikke være forspente [14]. Skruene i eksperimentene gjennomført av Grimsmo et al. ble kun strammet til med et dreiemoment på 80 Nm. Det ble heller ikke benyttet mellomleggsskiver i eksperimentene.



Figur 5.4: Nominelle dimensjoner for M16-skruer med mutter [24] [8].

Utenom tykkelse på 10 mm, er ikke de øvrige dimensjonene til tverrstiveren gitt, og det antas her at stiveren har dimensjoner som vist i figur 5.5. Radiusen mellom Søylens flens og steg er 18 mm, og stiveren er derfor tilpasset med to utsparinger på 20 mm for bedre passform. Det er også antatt at stiverens bredde går helt ut til søyleflensens ytterkant.



Figur 5.5: Tverrstiver med antatte dimensjoner [8].

Konstruksjonsstål med fasthetsklasse S355 ble brukt for søylen, bjelkene, endeplatene og tverrstiverene, og fasthetsklasse 8.8 ble benyttet for skruene. Ved dimensjonering av knutepunkter etter Eurokode 3 skal karakteristiske materialverdier benyttes for konstruksjonsstål, og nominelle materialverdier skal brukes som karakteristiske verdier for skruestål. Verdier for flytegrense og strekkfasthet med tilhørende fasthetsklasse er listet opp i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Karakteristiske verdier for konstruksjonsstålet og nominelle verdier for skruenes flytegrense og strekkfasthet [10] [14].

Fasthetsklasse	Flytegrense [MPa]	Strekkfasthet [MPa]
S355	355	510
8.8	640	800

5.1.2 Eksperimentelle data

Her presenteres kort gjennomføring og resultater rapportert av Grimsmo et al. for eksperimentell testing av knutepunktet QS-DLD-4 [20]. Under gjennomføringen av eksperimentet ble knutepunktet utsatt for kvasi-statisk belastning ved gradvis økende strekkbelastning av søylen slik som vist i figur 5.1, med en belastningshastighet lik 0.05 mm/s. Bjelkene ble hindret forskyvning i retning av belastningen. Maksimumsverdi for den påførte strekkraften for QS-DLD-4 er 311 kN med en forskyvning av søylen lik 29 mm, og en total forskyvning ved brudd lik 36 mm. Under belastningen førte mindre avvik i testoppsettet til et usymmetrisk belastningsmønster. Dette førte igjen til en mindre forskjell i belastningen av knutepunktets to sider, og brudd oppstod kun i en av sidene. Resultatet ble fremdeles ansett som representativt for knutepunktets virkelige kapasitet. Grimsmo et al. designet knutepunktet på en slik måte at bruddformen vil være en kombinasjon av plastisk tøyning i endeplattens strekkside, og brudd i skruene utsatt for strekk. Idealiseres endeplatten som et T-stykke med bjelkens strekkflens som steg, vil dette tilsvare bruddform 2 i figur 3.6.

6 | Metode

I dette kapitlet presenteres metodene som er benyttet for å løse problemstillingen i denne oppgaven. Metodene omfatter litteraturstudie, ikke-lineær elementanalyse med beregningsprogrammet ABAQUS, beregninger etter NS-EN 1993-1-8 og sammenligning av resultater.

6.1 Litteraturstudie

Målet med litteraturstudiet var å identifisere hvilken føringer som gis av relevant normativ dokumentasjon for gjennomføring av kapasitetsundersøkelser av konstruksjonsdeler i stål ved bruk av FEM, og hvordan FEM-modeller av knutepunkter utarbeides i forskningssammenheng. Dette danner så et grunnlag for oppbygning og analyse av FEM-modell for kapasitetkontroll av knutepunktet presentert i kapittel 5. Litteraturstudiet er todelt hvor første del undersøker en veiledning og en anbefalt praksis, og andre del omhandler litteratursøk og undersøkelse av forskningsartikler fra vitenskapelige journaler. Første del omfatter de normative dokumentene NS-EN 1993-1-5 Tillegg C (informativt) «Beregning med elementmetoder (FEM)» [16] og DNV-RP-C208 «Determination of Structural Capacity by Non-linear FE analysis Methods» [7]. NS-EN 1993-1-6 «Skallkonstruksjoner» [17] viser også til kapasitetsundersøkelser med numeriske beregningsmetoder, men er ikke undersøkt her som følge av at den tar for seg skallkonstruksjoner. DNV GL har utviklet en rekke standarder og veiledninger knyttet til prosjektering og sikkerhet av offshoreinstallasjoner. Versjonen av DNV-RP-C208 som er benyttet i denne oppgaven er fra 2013, og ble valgt på grunn av sin relevans for oppgaven selv om den er utarbeidet for bruk på offshore konstruksjoner. Den anbefalte praksisen er ment for problemer hvor andre standarder ikke direkte kan benyttes, men vil i dette tilfellet være med på å danne et grunnlag for analyse av et knutepunkt hvor det finnes analytiske beregningsmetoder for bestemmelse av kapasitet.

6.1.1 Litteratursøk

For del to av studien må det først gjennomføres et litteratursøk for å finne relevant og kvalitetssikret litteratur. Ved litteratursøk skal det legges føringer for hvilken type informasjon som er av interesse, og hvor den hentes fra. Et godt litteratursøk bør gjøres med en kritisk tilnærming, ha et bredt omfang og samtidig være målrettet.

Validering og kvalitetssikring

Det er vesentlig med en kritisk tilnærming til informasjonen som samles inn for å sikre kvaliteten av det faglige innholdet. Hovedsakelig er fagfelleverderte forskningsartikler fra vitenskapelige journaler grunnlaget for litteraturstudiet siden kapasitetsundersøkelser av knutepunkter ofte blir utført med FEM i forskningssammenheng. Søket er gjennomført i Oria, en bibliotekatalog for Norske fagbibliotek, og Science Direct, en database for vitenskapelige artikler fra tidsskrifter og bøker utgitt av Elsevier. I tillegg er referanser i artiklene som er undersøkt, ettergodt ved hjelp av Scopus, en siteringsdatabase for vitenskapelig litteratur. Fagfellevurdering er en kvalitetssikringsmetode av

forskningsbidrag ved at innholdet blir evaluert av et utvalg personer med høy kompetanse innen det relevante faget før bidraget godkjennes og publiseres [25].

Målrettet søk

For et bredest mulig søk velges søkespråket til å være engelsk, og som nevnt i forrige avsnitt, søkes det i flere vitenskaplige databaser. Dette sikrer søkets omfang. Neste steg er å tilpasse og spisse søket slik at det begrenses til kun relevant litteratur. Et målrettet søk gjøres ved å identifisere og benytte nøkkelord og sammensetninger av nøkkelord som skal inngå i tittel, forord eller sammendrag i dokumentene det er ønskelig å finne. Nøkkelord for litteratursøket i denne oppgaven er vist i tabell 6.1. Sammensetning av nøkkelordene for søket gjøres med boolean-operatorene OG, ELLER, og IKKE. Søkeord som skal opptre i en bestemt rekkefølge settes i anførselstegn, og i tilfeller hvor det er ønskelig å oppnå flere alternative former av søkeordet, plasseres en asterisk (*) etter ordet. Utviklingen av programvare og kapasiteten til datamaskiner har vært stor etter århundreskiftet. Derfor begrenses søket også til litteratur publisert de siste 20 årene.

Tabell 6.1: Nøkkelord for litteratursøk på norsk og engelsk med synonymer

Nøkkelord på Norsk	Nøkkelord på Engelsk	Synonymer
Knutepunkt i stål	Steel joint	Steel connection
Søyle-bjelke forbindelse	Beam-to-column	Beam-column
Numerisk studie	Numerical study	FE-analysis, finite element method, FEM
Skrueforbindelse	Bolted connection	Bolted joints, bolts
Endeplate	End-plate	
T-stykke	T-stub	

6.2 Ikke-lineær elementanalyse i ABAQUS

Programmet som benyttes for FEM-analyse i denne oppgaven er Simula ABAQUS/CAE 2017, og tilgang til programmet er dekket av lisens tilhørende Universitetet i Agder. Programutviklerens online brukermanual for ABAQUS [26] er brukt som støttelitteratur for de tekniske aspektene rundt oppbygning av modell og gjennomføring av analyse slik det er presentert i dette kapitlet. Det produseres flere versjoner av FEM-modellen i denne oppgaven. Først utarbeides det en hovedmodell med utgangspunkt i resultatene fra litteraturstudiet. Det utarbeides også en valideringsmodell ved at hovedmodellen blir modifisert med mål om å reprodusere de eksperimentelle resultatene rapportert av Grimsmo et al. for å evaluere om modellen er representativ for knutepunktet.

6.2.1 Enheter

Programmet benytter ikke enheter, men opererer med forhold mellom størrelser. På den måten står man fritt til å velge enheter ut fra verdiene som først plottes inn, men det er helt vesentlig med en konsekvent tilnærming til videre input av verdier siden disse avhenger av den innledende størrelsen som velges. I denne oppgaven velges enheten millimeter som utgangspunkt, og tabell 6.2 lister opp enhetene til de påfølgende størrelsene.

Tabell 6.2: Størrelser med tilhørende enheter [26].

Størrelse	Enhet
Lengde	millimeter [mm]
Kraft	Newton [N]
Masse	tonn [10^3 kg]
Tid	sekund [s]
Spenning	Megapascal [MPa]
Energi	millijoule [10^{-3} J]
Tetthet	tonn per kvadratmillimeter [$\frac{10^3 \text{ kg}}{\text{mm}^3}$]

6.2.2 Implisitt og eksplisitt analyse

I beregningsprogrammet ABAQUS kan kvasi-statisk analyse gjennomføres med både implisitt og eksplisitt løsningsmetode, og begge metodene undersøkes i denne oppgaven. Brukermanualen [26] beskriver forskjellen mellom løsningsmetodene som følgende:

«Den Implisitte løsningsmetoden er stivhets-basert» [26] og bruker iterasjon for hvert tidsinkrement som gjennomføres slik at analysen alltid vil konverge mot riktig løsning. Metoden har derfor høy nøyaktighet og er ubetinget stabil. Dersom en analyse etter implisitt metode ikke klarer å konvergere et tidsinkrement på første forsøk, vil den redusere inkrementet til 1/4 av det opprinnelige, og prøve på nytt. Konvergerer ikke inkrementet etter 5 slike forsøk, avbryter ABAQUS analysen. Dårlig tilpasset elementinndeling, kompliserte kontaktbetingelser og store deformasjoner er faktorer som kan bidra til lang analysetid ved bruk av implisitt løsningsmetode ved at det må gjennomføres mange iterasjoner, og kan gjøre at analysen ikke lar seg gjennomføre.

«Eksplisitt løsningsmetode bruker ikke iterasjon, men anvender den kinematiske tilstanden fra slutten av forrige tidsinkrement for videre løsning» [26]. I motsetning til implisitt, er den eksplisitte løsningsmetoden betinget stabil ved at tidsinkrementene må være tilstrekkelig små, og det kreves ofte et større antall inkremerter for å gjennomføre analysen. Størrelsen på tidsinkrementene avhenger av den minste elementstørrelsen i modellen. Valg av belastningstid er styrende for både analysetiden på grunn av det nødvendige antallet tidsinkremerter, og om det opptrer dynamiske effekter i modellen. Kvasi-statisk påvirkning har ofte en vesentlig lengre belastningstid enn dynamiske støtbelastninger og lignende og fører dermed til et stort antall tidsinkremerter. Ved gjennomføring av kvasi-statisk belastning med eksplisitt analysemetode, kan analysen effektiviseres ved hjelp av masseskalering (mass scaling). Det vil si at massen til modellen skaleres slik av det nødvendige antallet tidsintervaller for analysen kan reduseres, men dette må gjøres uten at det oppstår betydelige tregghetskrefter i modellen. I ABAQUS gjøres dette ved bruk av en masseskalieringsfaktor, eller ved å definere en målverdi for tidsinkrementet i analysen.

6.2.3 Moduler

Ved oppstart av et nytt prosjekt i programmet, presenteres det en rekke moduler som må tildeles informasjon, og hele modellerings- og analyseprosessen foregår gjennom bruk av disse modulene. Under er de aktuelle modulene med tilhørende funksjoner presentert.

Del (part)

Her gjennomføres modellering av geometrien til de forskjellige delene som inngår i modellen. Før geometrien defineres, må det velges om delen skal være to- eller tredimensjonal, om den skal være stiv (discrete rigid) eller kunne deformeres, og hva slags form den skal ha. Tredimensjonale solide deler modelleres først ved å skissere et tverrsnitt, før man enten ekstruderer eller dreier tverrsnittet

til komponentens endelige form. Bjelke- og platedeler modelleres ved å ekstrudere tverrsnittet til delens endelige lengde, mens sylindriske deler som skurer modelleres ved at en halvdel av tverrsnittet skisseres og dreis 360 grader rundt delens senterakse. Når hovedgeometrien er definert, kan detaljer som utsparinger og hull modelleres. Dette gjøres ved å velge en flate på geometrien som skal endres, og dermed skissere og ekstrudere åpningene man ønsker. I denne modulen kan man også bruke en rekke forskjellige metoder for å bryte opp en del i flere celler. Celleinndeling bidrar til flere fordeler ved videre oppbygning av modellen: Delen får flere referansepunkter som gjør det enklere å koble de forskjellige delene sammen, overflate til en del blir delt opp slik at man kan gi spesifikke områder av flatene kontaktegenskaper og man får flere holdepunkter for styring av elementinndeling.

Egenskap (Property)

I denne modulen defineres materialegenskaper og seksjoner som så tilegnes de enkelte delene i modellen. Når materialegenskaper skal defineres velges det et sett med egenskaper som må til for at materialtets oppførsel skal være tilstrekkelig nøyaktig i forhold til analysetypen som gjennomføres. I denne oppgaven er det hovedsaklig mekaniske egenskaper som er nødvendig. Når materialegenskapene er bestemt kan disse legges til en seksjon, som så kan benyttes til å beskrive egenskapene til alle delene den tilegnes. Her blir kun homogene solide seksjoner benyttet. Elastiske og plastiske materialegenskaper defineres separat, og ABAQUS krever sanne verdier for spenning og tøyning i det plastiske området.

Montering (Assembly)

Etter at alle delene er modellert og tilegnet seksjoner, settes disse sammen til konstruksjonsdetaljen som skal undersøkes i monteringsmodulen. Her kan det legges inn flere av den samme delen slik at man unngår å måtte modellere den samme geometrien igjen dersom den forekommer flere ganger i den endelige modellen. Ved å utnytte celleinndelingen i del-modulen kan man enkelt plassere deler mot hverandre der hvor linjene fra celleinndelingen sammenfaller. Hver enkelt del kan også plasseres på sine respektive plasser ved å bruke koordinater i det globale koordinatsystemet til modellen.

Steg (step)

Her defineres de forskjellige belastningsstegene i analysen. Som standard ligger det inne et initielt steg hvor randbetingelser som beskriver modellens innledende tilstand, defineres. Deretter kan det legges inn steg for hver sekvens av analysen. For hvert steg som opprettes må det velges hva slags type belastning som skal inngå og varigheten til steget. Belastningstypen som velges er også styrende for hvilken løsningsmetode som programmet bruker for å løse steget. Kvasi-statisk belastning kan defineres både ved implisitt analyse (Static, general) eller ved eksplisitt analyse (dynamic, explicit) hvor masseskalering benyttes for å eliminere effekten av treghetskrefter. Det er ikke mulig å kombinere implisitte og eksplisitte steg i samme analyse, og det første steget som velges begrenser hvilken steg som kan legges til for videre analyse av modellen. For hvert steg man legger til i analysen må man også velge hva slags informasjon det er ønskelig å hente ut av modellen. Typisk informasjon som er interessant å inkludere er spenninger, elastisk og plastisk tøyning, reaksjonskrefter og forskyvninger. Det er også mulig å hente ut informasjon om de forskjellige energikvantitetene i modellen.

Interaksjon (interaction)

Modeller sammensatt av flere deler krever et sett med betingelser som beskriver hvordan delene skal oppføre seg når de er i kontakt med hverandre, og definisjon av interaksjon mellom, og sammenkobling av deler, gjøres i interaksjonsmodulen. Deler kan låses fast til hverandre, eller de kan tilegnes en kontakttype med et sett kontaktegenskaper som på forhånd er definert. Når interaksjon mellom to spesifikke flater defineres må det velges hvem av flatene som skal være «Master» og hvem som er «Slave». Ved deformasjon mellom flatene vil «Master»-flaten penetrere inn i «Slave»-flaten.

Brukermanualen til ABAQUS [26] viser til følgende retningslinjer for valg av «Master»-flate:

- Den største av flatene velges
- Dersom flatene er like store, bør den stivere av de to velges
- I tilfeller hvor både flatene er like store og har lik stivhet, bør flaten med den grovste elementinndelingen velges.

Flater eller nodesett kan også kobles sammen med referansepunkter som defineres i modelleringsrommet. På denne måten vil randbetingelser eller belastning som tilegnes referansepunktet, også påvirke de delene av modellen som er koblet til dette punktet. Interaksjonene som virker i modellen er avhengige av stegene som er opprettet i steg-modulen, og man kan på denne måten styre hvilken interaksjoner som er aktive i de forskjellige analyse-stegene.

belastning (load)

I denne modulen defineres både randbetingelsene og belastningene som inngår i modellen. Randbetingelsene tilegnes enten flater eller et nodesett, og kan bestå av en egendefinert sammensetning av fastholdning mot forskyvning i, og rotasjon om modellens tre hovedakser. Belastningen i modellen kan legges inn på flere forskjellige måter, blant annet som trykk (MPa), punktlast (N), forskyvning (mm) eller rotasjon (Nmm). Uavhengig av hvilken type belastning som velges, og om det gjennomføres implisitt eller eksplisitt analyse, må belastningsmønsteret defineres. Dette gjøres ved å legge inn en amplitude i programmet som beskriver hvordan belastningen blir påført gjennom tidsperioden til steget som belastningen opptrer i. I en kvasi-statisk belastningssituasjon påføres modellen belastningen med en lineær økning fra ubelastet tilstand til fullt belastet tilstand.

Elementinndeling (mesh)

Det finnes en rekke forskjellige typer elementer i ABAQUS, og for tredimensjonale solide elementer ligger elementtypen C3D8R inne som standard. Denne elementtypen er også et godt utgangspunkt for modellen i denne oppgaven. Den første bokstaven i navnet indikerer hvilken familie elementet tilhører, og i dette tilfellet brukes bokstaven C for solide (continuum) elementer. 3D indikerer at elementet er tredimensjonalt, og tallet 8 beskriver antallet noder i elementet. Til slutt står bokstaven R for redusert integrasjon, og indikerer at det kun er ett integreringspunkt for å integrere over volumet til hvert enkelt element. Når det anvendes elementer med kun et integrasjonspunkt slik som C3D8R, kan det i enkelte situasjoner oppstå problemer i analysen som følge av timeglass-effekten, hvor enkelte typer belastning av elementene kan gi store påkjenninger i nodene selv om summen av den beregnede tøyning i integrasjonspunktet er lik null. Som standard ligger det inne timeglasskontroll for C3D8R-elementer i ABAQUS. Elementinndeling gjøres for hver enkelt del i modellen, og gjøres i to operasjoner. Først brukes «Seed»-funksjonen i ABAQUS til å tilegne noder med en gitt avstand mellom hverandre til alle linjer som er definert på delen, så kan elementnettet genereres med utgangspunkt i disse nodeplasseringene. Egne områder på delen kan også tilegnes tilpassede elementstørrelser ved å bruke «Seed»-funksjonen kun for utvalgte linjer. På grunn av varierende geometri vil nodeavstanden som legges inn kun være styrende, og i tilfeller hvor lengder og nodeavstand ikke går opp, tilpasses nodeavstanden.

Analyse (job)

Når modellen er ferdig modellert med material- og kontakttegenskaper, randbetingelser, belastning og elementinndeling, kan den sendes til analyse. Dette gjøres i analyse-modulen, og man har mulighet til å observere fremgangen under hele analyseprosessen.

Resultater (Visualization)

Når analysen er fullført til resultatene være tilgjengelige i denne modulen. Her kan resultater hentes ut som tabulert data, grafer eller visuell fremvisning av modellen med fargeplott som viser fordeling av en gitt størrelse gjennom hele geometrien, og/eller med deformasjoner som følge av belastningen. Her vil utarbeiding av grafer med maksverdier for momentkapasitet av forbindelsene, og maksverdier for strekklast i søylen være resultatene som hentes ut av analysen. Dette gjøres ved å kombinere plott av verdier for forskyvninger og reaksjonskrefter i forskjellige noder eller nodesett.

6.2.4 Modellering av modell

Modellering av modellen gjøres ved bruk av modulene beskrevet i foregående underkapittel, og knutepunktets geometri og materialegenskaper presentert i kapittel 5 danner grunnlaget for modellen. Detaljert modellering av knutepunktet er styrt av resultatene fra litteraturstudiet, og valgene som tas i forbindelse med modelleringen anses derfor som resultater. Hovedaktivitetene ved utarbeiding av FEM-modellen deles inn slik det er listert opp under, og presenteres på denne måten i resultatkapittelet.

- Modellering av geometri
- Modellering av materialegenskaper
- Interaksjon mellom kontaktflater
- Randbetingelser
- Belastning
- Elementinndeling av geometri

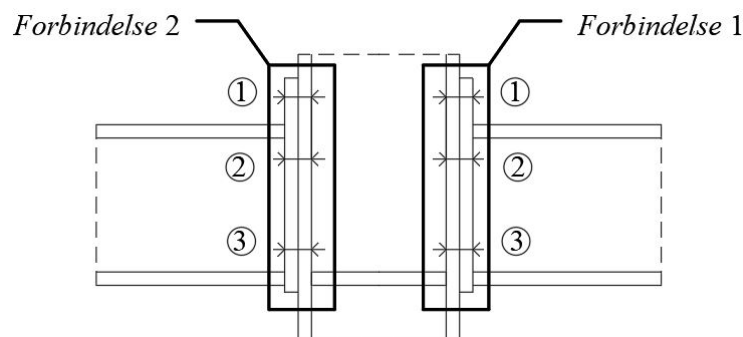
6.2.5 Kvalitetssikring av modell

Skal det med tilstrekkelig sikkerhet kunne sies at FEM-modellen er representativ for knutepunktet som undersøkes, må den kvalitetssikres. I denne oppgaven gjøres dette gjennom sammenligning av analyseresultater mot eksperimentelle data, og ved bruk av eventuelle kvalitetssikringsaktiviteter vist til i den normative dokumentasjonen. Ved sammenligning av forskjellige analyseresultater og eksperimentelle data er det nødvendig med et godt sammenligningsgrunnlag. Grimsno et al. [20] presenterer resultatene fra eksperimentet QS-DLD-4 som en kraft-forskyvningskurve, disse blir valgt for sammenligning i denne oppgaven. I ABAQUS utarbeides slike kurver ved å kombinere plot for forskyvning og kraft i søyle over belastningstiden. I tillegg kontrolleres det at den avgjørende bruddformen for knutepunktet i FEM-analysene, er det samme som er observert i eksperimentene. Grimsno et al. presenterer kurvene fra de to utførte kvasi-statiske fullskala eksperimentene samt kraft og forskyvning for fire ulike stadier i belastningen. Kraft-forskyvningskurven for QS-DLD-4 som inngår i sammenligningsgrunnlaget i denne oppgaven er basert på disse inngangsverdiene.

Målet med oppgaven er å undersøke hvordan FEM kan benyttes til kapasitetskontroll av et momentoverførende knutepunkt, og det forventes derfor å observere et avvik mellom FEM-modellen og eksperimentelle data under valideringen. For valideringen er det også valgt å utarbeide en modifisert versjon av FEM-modellen for å se om endring av utvalgte nøkkelparametere gjør modellen i stand til å reproducere resultatet fra eksperimentene utført av GRimsno et al. På denne måten kan det verifiseres at modellen er representativ for knutepunktet, og det kan undersøkes hvordan endringene mellom FEM-modellene påvirker analyseresultatet.

6.3 Beregning etter NS-EN 1993-1-8

I dette kapitlet vises metode for beregning av knutepunktets stivhet og styrke etter Eurokode 3 [14] som danner et sammenligningsgrunnlag for den numeriske kapasitetsundersøkelsen. Beregningene gjøres etter komponentmetoden og er utført med programmet PTC MathCAD Express Prime 3.0, med lisens tilhørende Universitetet i Agder. Programmet gjør det mulig å sette opp matematiske uttrykk for gjennomføring av lengre beregningssekvenser med mulighet for enkelt å gjøre endringer underveis. I tillegg gjør MathCAD det mulig å presentere arbeidet på en oversiktlig måte hvor alle utregninger kan ettergås og kontrolleres. Knutepunktet i casen til denne oppgaven er tosidig, men etter komponentmetoden undersøkes bjelke-søyleforbindelsene hver for seg slik som vist på figur 6.1. Forbindelsene på hver side av knutepunktet er like, og det er kun nødvendig å undersøke et av disse for å bestemme kapasiteten til knutepunktet. I likhet med beregningseksempel 11.2 av et ensidig momentoverførende knutepunkt med skrudd endeplate i boken *Dimensjonering av stålkonstruksjoner* av P. K. Larsen [9, s. 442], antas det også her at skruene på strekksiden (skruerad 1 og 2) kun vil ta opp strekkrefter som følge av momentbelastning, og skruene på trykksiden tar opp skjærkreftene i forbindelsen.



Figur 6.1: Forbindelsene i knutepunktet med nummererte skruerader [8].

Identifisering av parametere

Eurokode 3 avhenger av en rekke indeksbokstaver for å skille de forskjellige parameterene og faktorene som inngår i beregningene. For eksempel vil søylens stegtykkelse refereres til som t_{wc} . I tabell 6.3 er de mest relevante indeksbokstavene for denne oppgaven med betydning listet opp. Enkelte av disse kan ha flere betydninger, men sammenhengen de benyttes i gjør det likevel enkelt å skille mellom de forskjellige betydningene.

Tabell 6.3: Relevante indeksbokstaver fra NS-EN 1993-1-8 med betydning

Indeks	Betydning på Engelsk	Betydning på Norsk
Rd	Resistance design value	Designverdi for motstandsevne
b	Beam/Bolt	Bjelke/Skrue
c	Column/Compression	Søyle/Trykk
f	Flange	Flens
w	Web/Weld	Steg/Sveis
eff	Effective	Effektiv
t/T	Tension	Strekk
pl	Plastic	Plastisk
cp	Circular pattern	Sirkulært flytemønster
nc	Non-circular	Ikke-sirkulært flytemønster

6.3.1 Ekvivalent T-stykke påkjent av strekk

En helt essensiell modell for beregning av knutepunkter med skrudd endeplate-forbindelse etter komponentmetoden er den ekvivalente T-stykke modellen. Her brukes ekvivalent T-stykket påkjent av strekk til å beregne kapasiteten av både søyleflens og endeplate utsatt for bøyning. Kapasitet av strekkpåkjent T-stykke for bruddformene vist i figur 3.6 er lik det som er vist henholdsvis i formel 6.1, 6.2 og 6.3. Alle bruddformene beregnes for hvert tilfelle, og bruddformen som gir det mest konservative resultatet velges som styrende for kapasiteten.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (6.1)$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} \quad (6.2)$$

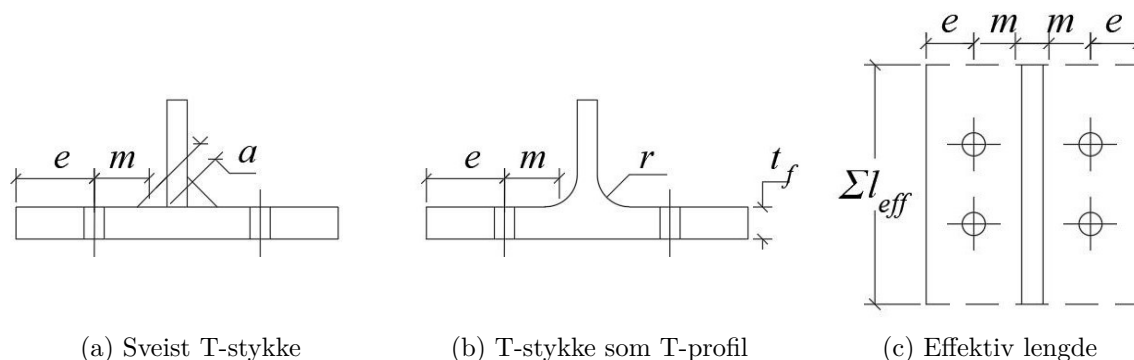
$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (6.3)$$

$F_{t,Rd}$ er strekkkapasiteten til én skrue, og de plastiske momentene i T-stykket for henholdsvis Bruddform 1 og 2 er vist i formel 6.4 og 6.5.

$$M_{pl,1,Rd} = 0.25 \sum l_{eff,1} t_f^2 \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.4)$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0.25 \sum l_{eff,2} t_f^2 \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.5)$$

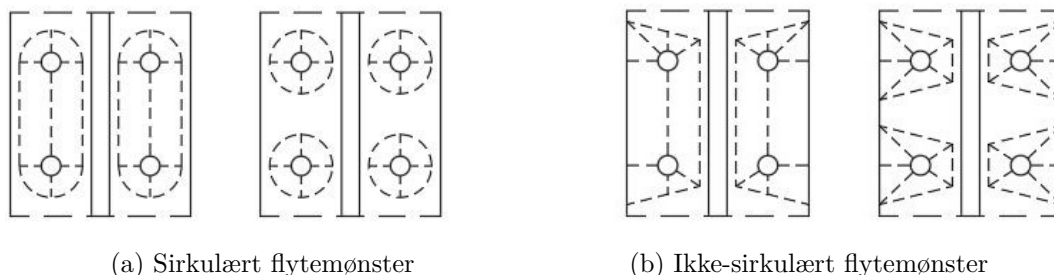
Videre er det en rekke geometriske parametere som må tilegnes verdier, og utgangspunktet for disse er vist i figur 6.2. Her er t_f flensstykkelsen og e er horisontal avstand mellom senter av skruehull og flensende. Videre er m avstanden mellom senter av skruehull og T-stykkets steg, minus $0.8r$ eller $0.8a\sqrt{2}$ dersom T-stykket henholdsvis er en T-profil hvor r er radien, eller en sveist profil hvor a er rotmålet til sveisen. Verdien n er avstanden mellom skruehull og angrepspunktet til hevearmskraften Q som har betydning for bruddform 2, og settes lik den minste av e_{min} og $1.25m$. I dette knutepunktet er endeplatens bredde lik søyleflensens bredde, og verdien e_{min} kan settes lik e .



Figur 6.2: Geometri og effektiv lengde av T-stykke [14] [8].

Den siste geometriske parameteren som må bestemmes er T-stykkets effektive lengde l_{eff} , og er en idealisert beregningsmessig verdi. Denne avhenger av hvilken basiskomponent og skruegrad som

undersøkes, og hvilken flytemønster som kan oppstå. Sirkulære og ikke-sirkulære flytemønster i T-stykke med skruer som del av en gruppe og enkeltstående skruerad er vist i figur 6.3. Ved beregning av plastisk moment i T-stykket for bruddform 1 velges $\sum l_{eff,1}$ lik $\sum l_{eff,cp}$ men ikke større enn $\sum l_{eff,nc}$, og for bruddform 2 velges $\sum l_{eff,2}$ lik $\sum l_{eff,nc}$.



Figur 6.3: Mulige flytemønster i T-stykke med skruer i gruppe og skruer som enkeltstående rad [9] [8].

6.3.2 Basiskomponenter

Her presenteres de forskjellige basiskomponentene som inngår i knutepunktet med tilhørende formel for bestemmelse av kapasitet. Komponentene undersøkes i systematisk rekkefølge som følge av at verdier for enkelte beregnede parametere går igjen for flere komponenter. Først kontrolleres de mindre komponentene som skruer og sveis, før søyleflens og steg undersøkes. Deretter kontrolleres endeplaten og til slutt kontrolleres bjelkesteget.

Skrue påkjent av strekk

Strekkekapasiteten til én skrue beregnes etter formel 6.6 hvor $f_{u,b}$ er skruens nominelle strekkfasthet og $A_{s,b}$ er skruens spenningsareal.

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9f_{u,b}A_{s,b}}{\gamma_{M2}} \quad (6.6)$$

Sveis påkjent av strekk

Sveis mellom strekkutsatt bjelkeflens og endeplate må undersøkes, og sveisens kapasitet for strekkpåkjenninger er vist i formel 6.7.

$$F_{w,fb,Rd} = \frac{f_{u,w}A_w}{\sqrt{2}\gamma_{M2}\beta_w} \quad (6.7)$$

Korrelasjonsfaktoren $\beta_w = 0.9$ for sveis mellom komponenter med fasthetsklasse S355, $f_{u,w}$ er sveisens bruddfasthet og A_w er den strekkutsatte delen av sveisens effektive areal, og beregnes etter formel 6.8 for sveisen rundt bjelkens strekkflens.

$$A_w = aL_{eff} = a(2b_b - (t_{wb} + 2r_b) + 2t_{fb}) \quad (6.8)$$

Søyleflens påkjent av bøyning

Kapasiteten og bruddformen til søyleflensen utsatt for bøyning bestemmes med T-stykkemodellen, og det er nødvendig å finne de effektive lengdene. For skruerad betraktet som en enkeltstående

rad, beregnes effektiv lengde med sirkulært flytemønster med formel 6.9 og med formel 6.10 for ikke-lineært flytemønster.

$$l_{eff,cp} = 2\pi m \quad (6.9)$$

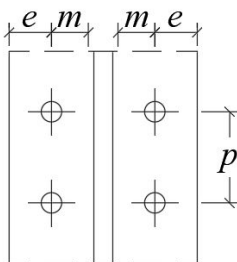
$$l_{eff,nc} = 4m + 1.25e \quad (6.10)$$

For skruerad betraktet som del av en gruppe, beregnes effektiv lengde med sirkulært flytemønster med formel 6.11 og med formel 6.12 for ikke-lineært flytemønster.

$$l_{eff,cp} = 2\pi m + p \quad (6.11)$$

$$l_{eff,nc} = 2m + 0.625e + 0.5p \quad (6.12)$$

De effektive lengdene for skruerad betraktet som del av en skruegruppe avhenger også av avstanden p mellom skurehull i forskjellige skruerader slik som vist på figuren 6.4. Når strekkapasiteten til T-stykkene er beregnet for alle bruddformene velges den minste verdien for henholdsvis enkelstående rad og rad i gruppe som dimensjonerende verdier for søyleflensens strekkapasitet under bøyning.



Figur 6.4: Søyleflensens geometriske parametere for beregning av effektive lengder [14] [8].

Søylesteg påkjent av tverrgående trykk

Den trykkutsatte delen av søylesteget er avstivet med en tverrgående stiver. Kapasiteten til planelignende komponenter utsatt for trykk er styrt av komponentens evne til å motstå knekking, og implementering av en tverrstiver i søylestegets trykksone øker denne kapasiteten betraktelig siden søylesteget ikke lenger er tillatt å knekke. Dersom tverrstiveren er innenfor slankhetskravet til tverrsnittsklasse 3, antas det at den vil tåle full flytespenning, og videre kontroll er ikke nødvendig som følge av at basiskomponenten vil ha vesentlig høyere kapasitet enn de resterende komponentene. Slankhetskravet for utstikkende tverrsnittsdeler utsatt for trykk i tverrsnittsklasse 3, er gitt i formel 6.13 [10].

$$\frac{c}{t} = 14\varepsilon \quad (6.13)$$

c og t er henholdsvis stiverens bredde og tykkelse, og ε er gitt i formel 6.14.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.14)$$

Søylesteg påkjent av tverrgående strekk

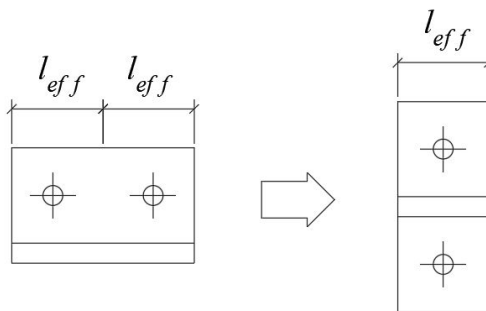
For et uavstivet søylesteg påkjent av tverrstrekk, bestemmes kapasiteten etter formel 6.15.

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (6.15)$$

Reduksjonsfaktoren ω anvendes for å ta hensyn til interaksjon med skjær i søylesteget. Som følge av at knutepunktet er tosidig og momentbelastningen i hver av forbindelsene vil være lik men motsatt rettet, vil det ikke oppstå betydelige skjærkrefter i søylesteget, og reduksjonsfaktoren kan settes til 1.0. Den effektive bredden til søylesteget utsatt for tverrgående strekkbelastning, anvendes den minste effektive lengden beregnet for søyleflensens T-stykke. Skrueradene betraktes som enkeltstående rader og som del av en gruppe med skruer.

Endeplate påkjent av bøyning

I likhet med Søylesteget blir også endeplatens kapasitet og bruddform bestemt ved hjelp av T-stykkemodellen, Men her betraktes skruerad 1 og 2 hver for seg som henholdsvis utstikkende og indre skruerader. Den utstikkende delen idealiseres som et T-stykke slik som vist på figur 6.5.



Figur 6.5: Idealisering av ekvivalent T-stykke for skruerad i utstikkende del av endeplate [14] [8].

Effektiv lengde for skruerad i utstikkende del beregnes etter som den minste verdien av uttrykkene i formel 6.16 for sirkulært flytemønster, og etter den minste verdien av uttrykkene i formel 6.17 for ikke-lineært flytemønster.

$$l_{eff,cp} = \min \begin{cases} 2\pi m_x \\ \pi m_x + w \\ \pi m_x + 2e \end{cases} \quad (6.16)$$

$$l_{eff,nc} = \min \begin{cases} 4m_x + 1.25e_x \\ e + 2m_x + 0.625e_x \\ 0.5b_p \\ 0.5w + 2m_x + 0.625e_x \end{cases} \quad (6.17)$$

Effektiv lengde for indre skruerad beregnes etter formel 6.18 for sirkulært flytemønster, og etter formel 6.19 for ikke-lineært flytemønster.

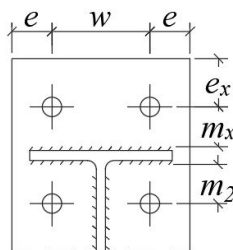
$$l_{eff,cp} = 2\pi m \quad (6.18)$$

$$l_{eff,nc} = \alpha m \quad (6.19)$$

Verdien for α leses av en graf på figur nummerert 6.11 i NS-EN 1993-1-8, og avhenger av verdiene for λ_1 og λ_2 som beregnet etter formel 6.20.

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} \quad \text{og} \quad \lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} \quad (6.20)$$

T-stykkenes effektive lengder avhenger av et sett med geometriske parametere som er tilpasset bjelkens plassering på endeplaten som vist på figur 6.6. w er avstanden mellom senter av skruehullene. Avstandene m_x og m_2 beregnes på samme måte som m .



Figur 6.6: Endeplatens geometriske parametere for beregning av effektive lengder [14] [8].

kapasiteten til endeplaten med hensyn på skrue radene som del av en gruppe kan bestemmes ved å legge sammen kapasiteten til endeplaten for hver av skrue radene.

Bjelkesteg påkjent av strekk

Bjelkestegets strekkkapasitet i en skrudd endeplate-forbindelse er vist i formel 6.21.

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} t_{wb} \frac{f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} \quad (6.21)$$

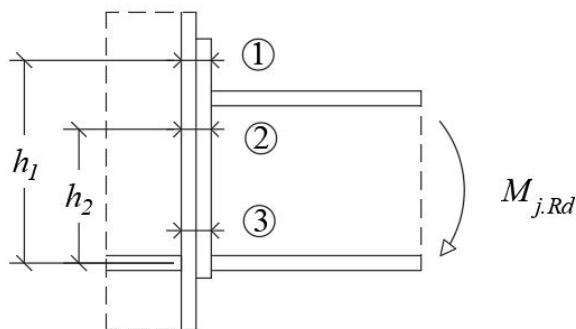
Her skal den effektive bredden settes lik den effektive lengden av ekvivalent T-stykke for skrue rad 2 fra beregning av endeplate under bøyning.

6.3.3 Dimensjonerende momentkapasitet

Den dimensjonerende momentkapasiteten til en skrudd endeplate-forbindelse er gitt i formel 6.22.

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (6.22)$$

Her er $F_{tr,Rd}$ strekkkapasiteten til skrue rad r , og h_r er momentarmen mellom trykksenteret og skrue rad r slik som vist på figur 6.7. Den dimensjonerende verdien for strekkkapasiteten til en skrue rad settes lik den minste av basiskomponentene søylesteg i strekk, søyleflens med bøyning, endeplate med bøyning eller bjelkesteg med strekk. Verdien for en av skrue radene må reduseres ytterligere dersom skrue radenes samlede kapasitet er større enn skruegruppen som helhet.



Figur 6.7: Momentarmer for skruerad 1 og 2 i en av sidene i knutepunktet [8].

6.3.4 Strekkbelastning av bjelkeflens

Sveisen strekkapasitet kontrolleres mot den opptredende strekkbelastningen som oppstår i bjelkeflensen som følge av momentet ved fullt utnyttet momentkapasitet i forbindelsen. Denne strekklasten kan beregnes ved bruk av formel 6.23, og skal være mindre eller lik kapasitetsformelen for sveisen.

$$N_{fb,Ed} = \frac{M_{j,Rd}}{h_b - t_{bf}} \quad (6.23)$$

6.3.5 Rotasjonsstivhet

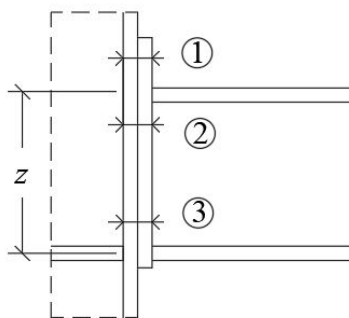
Rotasjonsstivheten beskriver forholdet mellom det påførte momentet i en knutepunktforbindelse og rotasjonen mellom søylen og bjelken som forbindes. Formel 6.24 viser det generelle uttrykket for rotasjonsstivhet.

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (6.24)$$

Her er z momentarmen mellom trykk- og strekksenteret i forbindelsen slik som vist på figur 6.8, og μ er stivhetsforholdet. Det antas at rotasjonsstivheten til knutepunktet forblir uendret frem til $2/3$ av momentkapasiteten er utnyttet ved at $\mu = 1.0$, og betegnes som initialrotasjonsstivheten, $S_{j,ini}$. Når momentpåkjenningen overgår $2/3$ av forbindelsens momentkapasitet, vil rotasjonsstivheten reduseres ved at stivhetsforholdet endres slik som vist i formel 6.25 frem til brudd ($M_{j,Ed} = M_{j,Rd}$).

$$\mu = \left(1.5 \frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}}\right)^\psi \quad (6.25)$$

For en skrudd endeplate-forbindelse vil koeffisienten $\psi = 2.7$. Den samlede rotasjonsstivheten til et knutepunkt avhenger også av summen av stivhetskoeffisientene til alle basiskomponentene som bidrar til knutepunktets kapasitet, og k_i er stivhetskoeffisienten til basiskomponent i som bidrar til rotasjonsstivhet i knutepunktet.



Figur 6.8: Momentarmen mellom trykk- og strekksenteret i knutepunktet [8].

6.3.6 Stivhetskoeffisienter

Hver av basiskomponentene tildeles egne stivhetskoeffisienter som sammen gjør det mulig å beregne den samlede stivheten til en forbindelse. For tosidige knutepunkter med skrudde endeplateforbindelser, to skruerader i strekk og like og motstående momenter, er det nødvendig å ta hensyn til en stivhetskoeffisient for søylesteget utsatt for tverrtrykk (k_2) og en ekvivalent stivhetskoeffisient som hensyntar både skruerad 1 og 2 utsatt for strekk (k_{eq}). Som følge av at den trykkutsatte delen av søyletverrsnittet er avstivet med en tverrstiver, vil $k_2 = \infty$. den ekvivalente stivhetskoeffisienten beregnes etter formel 6.26.

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} \quad (6.26)$$

Det må beregnes en effektiv stivhetskoeffisient, $k_{eff,r}$, for hver av de strekkutsatte skrueradene etter formel 6.27. Verdiene for h_r er de samme som er vist i figur 6.7, og den ekvivalente momentarmen, z_{eq} , beregnes etter formel 6.28.

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}} \quad (6.27)$$

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} \quad (6.28)$$

Stivhetskoeffisientene som inngår i $\sum k_{i,r}$ for hver av de strekkpåkjennte skrueradene i forbindelsen er søylesteg påkjent av tverrstrekk (k_3), momentbelastet søyleflens (k_4), momentbelastet endeplate (k_5) og strekkpåkjennte skruer (k_{10}). Disse stivhetskoeffisientene beregnes henholdsvis etter formel 6.29, 6.30, 6.31 og 6.32.

$$k_3 = \frac{0.7 b_{eff,t,wc} t_{wc}}{d_c} \quad (6.29)$$

Effektiv bredde, $b_{eff,t,wc}$, for tverrstrekk av søylesteg settes lik den minste av verdiene for skrueradene betraktet enkeltvis eller som del av en gruppe, og d_c er høyden av steget med tykkelsen t_{wc} .

$$k_4 = \frac{0.9 l_{eff} t_{fc}^3}{m^3} \quad (6.30)$$

$$k_5 = \frac{0.9l_{eff}t_p^3}{m^3} \quad (6.31)$$

Effektiv lengde, l_{eff} , for søyleflens eller endeplate påkjent av bøyning settes lik den minste av de effektive lengdene beregnet for den respektive komponentens ekvivalente T-stykke.

$$k_{10} = 1.6 \frac{A_{s,b}}{L_b} \quad (6.32)$$

I uttrykket for stivhetskoeffisienten til strekkpåkjennte skruer, er L_b skruens tøyninglengde og tilsvarer summen av tykkelsen til søyleflensen og endeplaten, samt halve tykkelsen til skruhodet og mutter.

6.4 Sammenligning av resultater

Etter Eurokode 3 skal momentoverførende knutepunkter kontrolleres for stivhet og styrke, og det helhetlige resultatet kan presenteres som en moment-rotasjonskurve for én av forbindelsene i knutepunktet slik som vist på figur 3.4. Ut fra denne kurven kan man lese knutepunktets momentkapasitet for kontroll av styrke lokalt, og stigningstallet i kurven representerer knutepunktets rotasjonsstivet for kontroll ved global rammeanalyse. Moment-rotasjon-relasjonen for knutepunktet i tillegg til momentkapasitet og initialstivhet skal derfor benyttes for sammenligning av analyseresultatene fra FEM-modellen og beregningsresultatene etter Norsk standard.

Moment-rotasjon-relasjonen

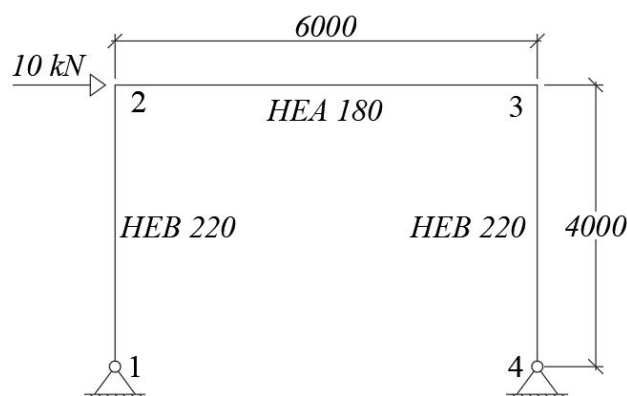
Ved beregning etter komponentmetoden utledes moment-rotasjon-relasjonen ved bruk av momentkapasiteten, initialrotasjonsstivheten og stivhetsforholdet slik det er beskrevet i kapittel 6.3. I ABAQUS hentes moment-rotasjonskurven ut ved å kombinere plott for rotasjon og moment i forbindelsen.

Momentkapasitet

Momentkapasiteten tilsvarer det totale momentet som kan overføres i en av forbindelsene, og er et mål på knutepunktets styrke. Momentkapasiteten beregnet med de forskjellige analysemetodene kan sammenlignes som tallverdier.

Initialrotasjonsstivhet

Initialrotasjonsstivheten til et knutepunkt idealiseres som stivheten til knutepunktet i det lineær-elastiske området i momentbelastningen, og vil etter Eurokode 3, være frem til 2/3 av momentkapasiteten er nådd. For å illustrere hvilken effekt rotasjonsstivheten til et knutepunkt kan ha på lastfordelingen i en lineær-elastisk globalanalyse, velges det her å gjennomføre en enkel parametrisk studie av en statisk ubestemt ramme med oppbygning som vist i figur 6.9. Rammen består av fire nummererte noder, og tre staver i form av to søyler og en bjelke med samme tverrsnitt profiler som knutepunktet beskrevet i kapittel 5. Node 1 og 4 er festet til hvert sitt leddlager, og node 2 idealiseres som et momentstivt knutepunkt. Belastningen i rammen vil være en vertikal punktlast med angrepspunkt i node 2. Det gjennomføres tre beregninger av rammen, med varierende rotasjonsstivhet i node 3. Noden vil først idealiseres som momentstiv for å danne grunnlaget for undersøkelsen. Deretter vil den tilegnes rotasjonsstivheten beregnet med henholdsvis analytisk og numerisk metode.



Figur 6.9: Enkel statisk ubestemt ramme for illustrasjon av knutepunktets rotasjonsstivhet påvirkning på den globale lastfordelingen [8].

Analysen av rammen gjøres i beregningsprogrammet Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021, med tilhørende studentlisens. Programmet bruker FEM for å løse statisk ubestemte problemer som rammekonstruksjoner ved å dele stavene inn i bjelkeelementer, og deretter beregne lastvirkningene for den gitte belastningen. Rammen tegnes inn i et todimensjonalt modelleringsplan, og stavene tildeles sine respektive tverrsnitt. Begge opplagerene legges inn med fastholdning mot forskyvning i planets to akseretninger, men er fritt til å rotere. Alle forbindelser mellom staver vil defineres automatisk til å være bøyestive, og må endres manuelt. Dette gjøres ved hjelp av «releases»-funksjonen. I tillegg til å kunne definere forbindelsene mellom staver som ledd med denne funksjonen, kan det også legges inn rotasjonsstivhet i form av en «elastic coefficient» med enheten kNm/rad. Robot krever også at «DSC»-algoritmen er aktivert for å kunne gjennomføre analyse av rammekonstruksjoner med elastiske forbindelser. Algoritmen legger inn et elastisk element i enden av stav som tilegnes elastisk rotasjonsstivhet som gjør det mulig å løse problemet [27].

7 | Resultater

7.1 Litteraturstudie

7.1.1 Normative dokumenter

NS-EN 1993-1-5 Tillegg C

Tillegg C i del 1-5 [16] av Eurokode 3 er en kortfattet veiledning for bruk av FEM for påvisning av kapasitet i brudd-, bruks og utmattelsestilstand for platekonstruksjoner. Dette omfatter i hovedsak platedeler, tverrsnitt sammensatt av plater og stivere, og her presenteres føringene som gis i denne veiledningen. Programvaren som velges for FEM-analysen skal være egnet og gi pålitelige resultater, og det vises til at inndata og resultater skal dokumenteres slik at det kan reproduseres og etterprøves av en uavhengig tredjepart. For inndata blir finhetsgrad av elementnettet, belastning og randbetingelser nevnt. Veiledning anbefaler at modelleringsarbeidet deles opp i følgende underoppgaver:

- Modellering av knutepunkt og randbetingelser
- Modellering av materialegenskaper
- Modellering av lastpåvirkning
- Modellering av kriterier for grensetilstand
- Bruk av sikkerhetsfaktorer

Modellering kan gjøres enten ved å kun modellere komponenten som undersøkes, eller en detalj som igjen er del av en større konstruksjon. Uavhengig av hvilken av disse som benyttes skal randbetingelsene velges slik at resultatene ender på den konservative siden. Nominelle verdier brukes for geometriske egenskaper. Det vises også til at det bør implementeres geometriske og spenningsmessige imperfeksjoner i modellen i form av henholdsvis formfeil og restspenninger. Materialelegenskapene bør settes lik de karakteristiske verdiene til materialene som velges, og det vises til fire idealiserte materialkurver: elastisk-perfekt plastisk, elastisk-plastisk med en liten helning av flyteplataet, elastisk-plastisk med lineær tøyingsfastning og en sann spennings-tøyingskurve tilpasset resultatene fra en-aksiale strekkprøvinger. For elastisk-plastisk kapasitet i bruddgrensetilstand forutsettes det her både ikke-lineære materialegenskaper og geometriske egenskaper. For validering av modellen foreslås det her å utføre sensitivitetssprøving med økende finhetsgrad av elementnett.

Grensetilstandskriteriene bestemmes som oppnåelse av maksimal last for knekking av plater under trykkbelastning, og grenseverdi for hovedmembrantøyninger for plater utsatt for strekkpåkjenninger. Det vises også til at andre kriterier som flytekriteriet også kan benyttes. Mer sammensatte grensetilstandskriterier nevnes ikke.

For valg av partialfaktor vises det til at lastforstørrelsesfaktoren, α_u , for bruddgrensetilstand skal være tilstrekkelig for å oppnå påliteligheten som kreves. Denne er uttrykt i formel 7.1. Faktoren

skal velges større enn faktoren, α_1 , som skal dekke usikkerhet ved FEM-modellen og kan utledes fra tillegg D i NS-EN 1990 [6], multiplisert med faktoren, α_2 , for å dekke spredning ved last- og kapasitetsmodeller og settes lik partialfaktoren for materialegenskaper som også tar hensyn til modellusikkerheter. α_2 velges å være partialfaktoren γ_{M1} dersom knekking er dimensjonerende eller partialfaktoren γ_{M2} for tilfeller hvor brudd er dimensjonerende. Dermed blir partialfaktorer kun lagt til på belastningssiden, og kapasiteten bestemmes med karakteristiske verdier.

$$\alpha_u > \alpha_1 \cdot \alpha_2 \quad (7.1)$$

DNV-RP-C208

DNV-RP-C208 [7] er en anbefalt praksis for bestemmelse av karakteristisk motstandsevne for konstruksjonsdeler med ikke-lineær FEM-analyse slik at kapasitetskravene i DNV offshore-standardene er overholdt. Denne anbefalte praksisen er utarbeidet for bruk på marine og offshore konstruksjoner i stål med flytegrense opp til og med 500 MPa. Det er forventet at stålet er tilpasset til maritimt bruk, og at konstruksjonen blir utsatt for forhold som er spesifisert i offshore-standardene. Den omfatter brudd-, ulykkes- og utmattningsgrensetilstand, og tar for seg bruddformene: strekkbrudd, brudd som følge av gjentakende flyting, akkumulert plastisk tøyning, knekking og repeterende knekking. FEM-modellen må med tilstrekkelig nøyaktighet representere den ikke-lineære oppførselen til alle komponentene som bidrar til bruddmekanismen. Modellen må i tillegg representere alle bruddformene som skal kontrolleres i den gitte analysen, og det må komme tydelig frem hvilke bruddformer som skal undersøkes med analysen, og hvilke som skal undersøkes med andre metoder. En nøyaktig definisjon av brudd må fastsettes for hver enkelt analyse, og må gjenspeile funksjonen til konstruksjonen eller konstruksjonsdelen som undersøkes. For grensetilstandene som omfattes her vil hovedsaklig den totale lastbæreevnen være funksjonen, og definisjonen på brudd må beskrive hvilke maksverdier som må overskrides for at lastbæreevnen ikke lenger opprettholdes.

Det stilles krav til at programvaren som brukes er godt dokumentert og egnet for formålet, og at brukeren har gode kunnskaper om både FEM og ikke-lineære analyser. Implisitt og eksplisitt analysemetode kan benyttes for kapasitetsundersøkelser av ikke-lineære modeller. Ved bruk av masseskalering i eksplisitte analyser for undersøkelse av kvasi-statisk respons skal det dokumenteres at den kinetiske energien i modellen er ubetydelig i forhold til interne energien. Vanligvis settes det en grense hvor den kinetiske energien ikke skal være mer enn 1% av den totale interne energien.

Det understrekes at det ved bruk av FEM til kapasitetskontroll er viktig å inkludere den statistiske variasjonen av de forskjellige parameterene som inngår i analysen slik at resultatene vil være på sikker side. Det er derfor nødvendig å validere analysen ved en av de følgende metodene: velge alle parametere til å være karakteristiske eller konservative verdier, validering mot verdier vist i relevante standarder eller validering mot tester. For den første valideringsmetoden skal alle parametere velges til å være på sikker side slik at analysen blir mest mulig konservativ. For den andre metoden utarbeides det en valideringscase hvor kapasitet beregnes i henhold til relevant standard, og deretter velges de parametriske verdiene for FEM-modellen slik at analysen oppnår den samme sikkerheten for valideringscasen som ved beregningene etter standarden. Her er det også viktig at valideringscasen representerer de samme bruddformene som FEM-modellen skal brukes til å undersøke. Ved bruk av den siste metoden utarbeides det en modell hvor parametriske verdier velges slik at kapasiteten blir mindre eller lik det som er målt i en eller flere fysiske tester som er representative for konstruksjonsdelen som undersøkes. Også her er det vesentlig at testene har de samme bruddformene som skal undersøkes med den validerte FEM-modellen. Det må også tas hensyn til den statistiske variasjonen ved bruk av den siste metoden slik at kapasiteten til FEM-modellen innehar den samme sikkerheten som etter dimensjonering ved prøving beskrevet i NS-EN 1990 tillegg C [6].

Sammen med material- og geometriske parameterene, må også elementtype og størrelse velges under valideringen. Dersom modellen inneholder elementer med redusert integrasjon og timeglasskontroll

anvendes, bør timeglassenergien sammenlignet med den totale interne energien i modellen være mindre enn 5%. Ved evaluering av duktilitet må området som utsettes for plastisk tøyning ha et tilstrekkelig antall elementer. Det er viktig å være nøye med overganger mellom forskjellige elementtettheter, og hva som skal undersøkes og hvordan laster blir påført er med på å styre elementstørrelsen. Det bør også gjennomføres en sensitivitetsstudie for å fastsette nødvendig finhetsgrad av elementnettet. Geometrien i en FEM modell kan forenkles slik at god regularitet i elementnettet opprettholdes og slik at analysen blir mer konservativ. Forenklinger kan være at sveiser ikke er modellert og at sveisede komponenter er sammenføyet ved hjelp av kontaktoverflater.

Materialmodellen som velges må kalibreres mot empirisk data, og for metalliske materialer er den tidsuavhengige elastisk-plastiske modellen ofte brukt. Hovedkomponentene i denne modellen er: et flytekriterie, en fastningsmodell og en flyteregulering som definerer økningen av plastisk tøyning som endringene i spenninger gir. Ved definisjon av materialkurver for kapasitetsanalyser, bør karakteristisk materialdata benyttes, og det understrekes at den idealiserte materialkurven ikke må være en nøyaktig representasjon av materialet så lenge resultatene som produseres er konservative. Det vises til idealiserte materialkurver for stål med utgangspunkt i de europeiske standardene EN-10025 og EN-10225 som gjelder tekniske leveringsbetingelser for henholdsvis «varmvalsede produkter av konstruksjonsstål» og «sveisbart konstruksjonsstål for faste konstruksjoner til havs». Kurvene omfatter stål i fasthetsklasser fra S235 til S460. Alternativt kan bi-lineære kurver benyttes for knekkingsanalyser.

Randbetingelsene må være representative for de virkelige betingelsene slik at resultatet er tilstrekkelig nøyaktig eller konservativt. I enkelte tilfeller kan det også her være nødvendig med en sensitivitetsstudie for å fastsette randbetingelsene. Belastningssekvensen ved ikke-lineære analyser er viktig for den endelige responsen til konstruksjonen eller konstruksjonsdelen, og belastningen må påføres slik det forventes å skje i situasjonen som undersøkes.

Bruk av last- og materialsikkerhetsfaktorer (partialfaktorer) ved ikke-lineære analyser er vanskelig fordi reduserte materialegenskaper vil kunne endre bruddform for modellen og dermed føre til en mindre nøyaktig analyse. Dette kan for eksempel skje hvis en materialfaktor reduserer flytegrensen så mye at strekkbelastning blir avgjørende selv om det i utgangspunktet var knekking av andre komponenter i modellen som var avgjørende for kapasiteten. Det er derfor mer praktisk å ha en modell for kapasitetsberegninger som representerer den ønskede karakteristiske kapasiteten for alle bruddformene som skal analyseres, og deretter legge til sikkerhetsfaktorene kun på belastningssiden slik det er vist i formel 7.2. Her er S_k den karakteristiske lastvirkningen.

$$R_k = S_k \cdot \gamma_{last} \cdot \gamma_{material} \quad (7.2)$$

DNV-RP-C208 viser også til hva som bør inngå i dokumentasjon av kapasitet ved bruk av FEM. Hovedsaklig skal dokumentasjonen være så detaljert at analysen kan gjenskapes, og dermed bør følgende fremgå av dokumentasjonen:

- Formålet med analysen
- Bruddkriterie
- Geometrisk modell med referanse til tegninger brukt for å lage modellen
- Grensebetingelser
- Elementtype og elementinndeling
- Materialmodell og egenskaper
- Last og eventuell lastsekvens

- Analysens fremgangsmetode
- Anvendelse av sikkerhetsfaktorer
- Resultater
- Diskusjon av resultater og konklusjon
- Sensitivitetsstudier og andre kontrollaktiviteter knyttet til analysen

7.1.2 Forskningsartikler

FEM-analyser benyttes i stor grad til forskning på oppførselen til både konstruksjoner, konstruksjonsdeler og enkeltkomponenter, og er en av de mest populære metodene for å undersøke oppførselen til et knutepunkt. Grunnen til dette er at det er et relativt enkelt og billig alternativ til fullskala tester, det gir mulighet for å undersøke lokale effekter det er vanskelig å måle under eksperimenter og når man har en validert modell, kan man gjennomføre større parametriske studier uten at arbeidet blir for omfattende og ressurskrevende [28]. Delvis og helt bøyestive knutepunkter med skrueforbindelser har blitt studert ved hjelp av FEM for en rekke forskjellige lastsituasjoner. Blant annet har Dinu et al. [29] og Barmaki et al. [30] undersøkt kapasitet av knutepunkter under et progressivt kollapsscenario av en rammekonstruksjon ved at en bærende søyle tas ut av rammen (column loss). Qiang et al. [31] har undersøkt kapasitet av knutepunkter utsatt for brann, og Grimsmo et al. [21] har undersøkt oppførselen til et knutepunkt under støtbelastning. I dette delkapittelet blir det presentert et utvalg forskningartikler hvor FEM er benyttet til kapasitetsundersøkelse av knutepunkter med skrueforbindelser og knutepunktrelaterte komponenter, og hvordan FEM-modellene er bygd opp for å tilpasses analysen som gjennomføres.

T-stykke

Bezerra et al. [32] gjennomførte eksperimentelle tester og ikke-lineær FEM-analyse i ABAQUS av strekkbelastete T-stykker for å undersøke et fenomen kalt hevarmeffekten hvor kontaktrykk mellom enden av T-stykkets flens og underlaget bidrar til større belastning av skruene. Det ble gjennomført en parametriske studie hvor målet var å undersøke hvilken effekt forskjellige flenstykkelser hadde på kontaktspenningsfordelingen mellom flens og underlag, hevarmeffekten på skruene og skjærspenninger i skruene. FEM-modellen ble kalibrert og validert opp mot resultatene fra de eksperimentelle testene. Valideringen bestod av sammenligning av bruddlast, elastisk stivhet og plastisk stivhet.

Materialmodellen bestod av von Mises flytekriterium benyttet sammen med den tilhørende flyte-regelen, og isotropisk fastning. Videre ble materialet modellert til å ha en tri-lineær spennings-tøyningskurve med henholdsvis elastisk område, plastisk område med tøyningsfastning og et flyte-platå. Middelveier for de mekaniske materialeegenskapene fra strekkprøving av de forskjellige komponentene ble benyttet for å bestemme stigningstallene og knekkpunktene på kurven. Grunnet speilsymmetrisk geometri og belastning, ble kun den ene halvdel modellert og et ekstra sett med randbetingelser måtte implementeres som forhindret forskyvning normalt på symmetriplanet. Dette er en teknikk som halverer antallet nødvendige elementer i modellen, og bidrar til kortere analysetid. Dette medførte også at kun halvparten av belastningen fra testene ble påført. Alle komponenter ble modellert med solide C3D8R elementer, og elementnettets ble hovedsakelig uniformt tilpasset de forskjellige komponentene, men en tettere konsentrasjon av elementer ble brukt for den øvre delen av skrueskaftet rett under skruehodet. Disse elementene hadde en størrelse på omtrent 2 mm og var ment for større nøyaktighet for kontakt mellom T-stykke og skrue. Kontakt mellom komponentene ble modellert med tangentiell kontaktoppførsel som beskriver friksjon mellom flatene ved bruk av «penalty»-algoritmen og en friksjonskoeffisient og normal kontaktoppførsel som beskriver kontaktrykk.

Ensidig knutepunkt med skrueforbindelse

Díaz et al. [28] har utarbeidet en FEM-modell av et ensidig knutepunkt med skrueforbindelse med analyseprogrammet ANSYS. Knutepunktet er delvis bøyestivt, og basert på eksperimenter gjennomført av Janss et al. [33] på 80-tallet som også er benyttet som valideringsgrunnlag for modellen. Knutepunktet besto av en gjennomgående H-profilert søyle med leddede opplagere i hver ende og en I-profilert bjelke med en påsveiset endeplate skrudd fast til en av søylens flenser. Videre var det plassert to skruerader på bjelkens strekkside og en rad på trykksiden, og bjelken var avstivet med stivere i angrepspunktet til belastningen, en gitt avstand fra skrueforbindelsen. Målet med analysen var å produsere en nøyaktig modell for fastsetting av moment-rotasjon-relasjon som igjen anvendes for å finne knutepunktets rotasjonsstivhet og momentkapasitet.

Det ble også her implementert en tri-lineær materialkurve hvor første del er elastisk, og andre og tredje del beskriver det plastiske området med henholdsvis tøyingsfastning og redusert tøyingsfastning av materialet. Den plastiske oppførselen ble modellert med von Mises flytekriterium og isotropisk fastning. Materialfastheter ble også hentet fra eksperimentelle data. Skrueregjenger og skiver ble ikke modellert som følge av forenklinger i modelleringsarbeidet, og kun en av de speil-symmetriske sidene av knutepunktet ble modellert. Flatene mot symmetriplanet ble så fastholdt mot forskyvning i planets normalretning. Elementtypene benyttet var solide kileformede elementer for profilradius, skruehoder/mutter og sveis, og kubiske fullintegrasjons-elementer med 8 noder for den resterende geometrien. Modellen hadde omtrent 89 000 elementer, og disse var i størrelsesorden 5-20 mm i selve knutepunktene, og 20-60 mm for områdene utenfor. I ANSYS legges kontakt mellom komponentene inn som egne elementer som definerer hvilken type kontakt som vil oppstå mellom flatene. På denne måten ble friksjonskontakt med «penalty»-algoritmen og en friksjonskoeffisient på 0.5, samt forspenning av skruene, modellert. Opplagerne ble modellert som plater med en lineær materialoppførsel hvor elastisitetsmodulen ble valgt 100 ganger større enn de resterende materialene. Belastningen ble påført som en punktlast med trinnvis økende styrke.

Moment-rotasjon-relasjonen til knutepunktet kan ikke hentes ut direkte fra programmet, men må utledes fra knutepunktets geometri, belastning og deformasjon. Momentet i forbindelsen ble definert som kraften påført i bjelkeenden multiplisert med lengden fra kraftens angrepspunkt til utsiden av endeplaten som vist i formel 7.3.

$$M_j = P \cdot L_{Load} \quad (7.3)$$

Ved definisjon av den tilhørende rotasjonen i forbindelsen må det tas hensyn til rotasjonen, θ_c , i selve forbindelsen, i tillegg til rotasjonen, γ , som følge av skjærdeformasjon i søylesteget. Rotasjonen i knutepunktet vil dermed kunne uttrykkes som vist i formel 7.4.

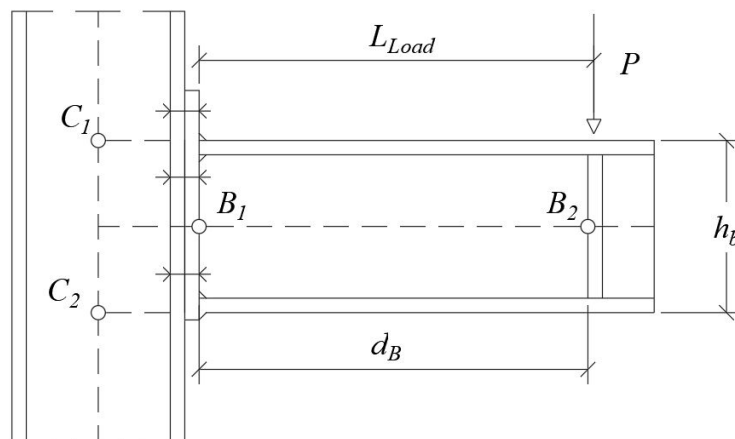
$$\phi_j = \theta_c + \gamma \quad (7.4)$$

Disse rotasjonsvinklene utledes ved bruk av trigonometriske sammenhenger mellom forskyvninger i spesifikke referansepunkter i modellen, men det må også tas hensyn til at bjelken og søylen kan utsettes for elastisk bøyning under belastningen. Rotasjon som følge av elastisk bøyning i bjelken, $\theta_{el,b}$, og søylen, $\theta_{el,c}$, som forbindes i knutepunktet må derfor trekkes fra den totale rotasjonen. Dermed kan rotasjonen i knutepunktet beregnes etter formel 7.5. rotasjonen knyttet til skjærdeformasjonen i søylesteget beregnes isolert sett med formel 7.6.

$$\phi_j = \arctan\left(\frac{V_{B1} - V_{B2}}{d_B}\right) - \theta_{el,c} - \theta_{el,b} \quad (7.5)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{U_{C1} - U_{C2}}{h_B}\right) - \theta_{el,c} \quad (7.6)$$

Her er V_{B1} og V_{B2} vertikal forskyvning, og U_{C1} og U_{C2} er horisontal forskyvning av de korresponderende punktene vist i figur 7.1. Figuren viser også avstandene d_B og h_b , samt parametere knyttet til beregningen av momentet i knutepunktet.



Figur 7.1: Illustrasjon av knutepunkt med de geometriske parameterene for beregningen av knutepunktets rotasjon presentert av Díaz et al. [28] [8].

Modellen ble kalibrert mot de eksperimentelle dataene ved hjelp av to metoder: tilpassing av momentkapasitet og rotasjonstivhet, og tilpassing av moment-rotasjonskurven. Dette ble gjort ved finjustering av parameterne for materialets tøyingsfasthet, elementstørrelse, tillatt elastisk glidefaktor og en «penalty»-stivhetsfaktor. Modellen ble så validert mot tre lignende eksperimenter med et utvalg forskjellige søyledimensjoner.

Tosidig knutepunkt med skrueforbindelser

Som nevnt i kapittel 5, har Grimsmo et al. gjennomført eksperimentelle [20] og numeriske [21] analyser for å undersøke dynamisk og kvasi-statisk oppførsel til et tosidig knutepunkt med skrudde endeplate-forbindelser. Selve skrueforbindelsen var fokusområdet for forskningsprosjektet, og knutepunktet var på forhånd dimensjonert etter Eurokode 3 på en slik måte at plastisk tøyning av endeplaten sammen brudd i skruene ville være den dimensjonerende bruddformen. Knutepunktet ble belastet ved at søylen ble utsatt for strekklast under kvasi-statisk testing, og støtlast under dynamisk testing. Bjelkene var fritt opplagt en gitt avstand fra knutepunktet slik at de holdt igjen for belastningen.

Eksperimentet danner også grunnlag for validering av en numerisk modell for videre undersøkelser hvor effekten av forskjellige endeplatetykkelser, påføring av aksialbelastning i bjelkene og treghetskrefter fra en dekkekonstruksjon ble undersøkt. Det understrekes at «en pålitelig numerisk undersøkelse krever validering av beregningsmodellen slik at den er i stand til å fange opp både den globale og lokale responsen til knutepunktet i tillegg til korrekt bruddform» [21]. FEM-modelleringen ble utført i ABAQUS og samsvarte godt med hva som ble observert under testene, inkludert bruddform. Valideringen ble gjort ved å sammenligne bruddform, kraft-forskyvning og hastighet-tidskurver. For en helhetlig validering, ble også modellen kontrollert opp mot de kvasi-statiske testene ved hjelp av implisitt analyse i ABAQUS. En usymmetrisk oppførsel ble registrert under testingen av knutepunktene under kvasi-statisk last, og derfor ble det også ulik plastisk deformasjon av endeplatene.

Dette førte til et mindre avvik mellom modell og test i form av endeplatedeformasjon og påført kraft, men bruddlast var lik i begge tilfeller.

Materialene ble modellert med lineær elastisitet, von Mises flytekriterium med den tilhørende flyte-regelen, ikke-lineær isotropisk fastning, tøyingsrate-fastning og termisk mykning som følge av oppvarming. De to sistnevnte materialeegenskapene var inkludert for å fange effekten av den dynamiske belastningen. Fastningskurvene til konstruksjonsstålet og skruestålet ble formltilpasset med mekaniske materialeegenskaper fra strekkprøving og den utvidede Voce fastningsregelen. Sveisene ble gitt de samme materialparameterne som bjelkene, og stiveren fikk samme materialparameterne som søylen. Et tøyingsrate-sensitivt bruddkriterium utarbeidet av Cockraft og lathem ble brukt for å simulere når selve bruddet skjer i de mest strekkutsatte skruene. Denne sier at brudd inntreffer når integralet over plastisk tøyning for maks hovedspenning når en kritisk verdi. Den kritiske verdien viste seg å være veldig sensitiv for elementinndelingen, og krevde bruk av veldig fin elementinndeling for skruer og endeplater. Endeplatene hadde 3 mm store elementer som ga 4 elementer over platens tykkelse. Skruene ble tildelt 1 mm store elementer i skrueskaftet, og 3 mm for skruhode/mutter. Til slutt ble søyle og bjelker delt inn i 4 mm store elementer. For å unngå dårlig kvalitet på elementinndelingen ble ikke gjengene på skruene modellert. Alle delene i modellen ble modellert med solide C3D8R-elementer, unntatt sveis mellom bjelke og endeplate som hadde kileformede C3D6-elementer. På samme måte som modellen for T-stykket og det ensidige knutepunktet, er kun en speilsymmetrisk side av knutepunktet modellert, og antall elementer reduseres kraftig. Likevel bestod modellen av omtrent 310 000 elementer. «Tie constraint» ble brukt til å feste sveis, endeplate og bjelker, og normal og tangensiell kontakt mellom de resterende komponentene ble moddelert med henholdsvis «Hard contact» og «penalty»-algoritmene. Skruene i eksperimentene ble strammet til med et dreiemoment på 80 Nm, men det viste seg at det ikke var nødvendig å legge til denne innstrammingen i FEM-modellen som følge av at det ikke hadde innvirkning på analyseresultatet.

En mastergruppe [22] utarbeidet også en FEM-modell av knutepunktet med mål om å gjenskape knutepunktets eksakte kvasi-statiske oppførsel, for så å gjennomføre et sett med parametriske studier. Oppbygningen av materialmodellene ble gjort i likhet med Grimsmo et al. ved at strekkprøving dannet grunnlaget for materialenes fastningskurver. Modellen ble også forenklet ved å utnytte speilsymmetri, men her om begge av knutepunktets symmetriakser, og medførte at kun 1/4 av det opprinnelige knutepunktet inngikk i modellen. Gruppen gjennomførte en parameterstudie hvor det ble konkludert med at elementstørrelse på 2 mm for skruene og 3 mm for endeplaten var tilstrekkelig for den kvasi-statiske analysen. Videre ble stiveren og delene av søylen og bjelken i nærheten av forbindelsen tilegnet 10 mm elementer, og de resterende delene av søylen og bjelken fikk 20 mm elementer. Mastergruppen gjennomførte også beregninger av knutepunktet etter Eurokode 3, men benyttet testspesifikke materialverdier.

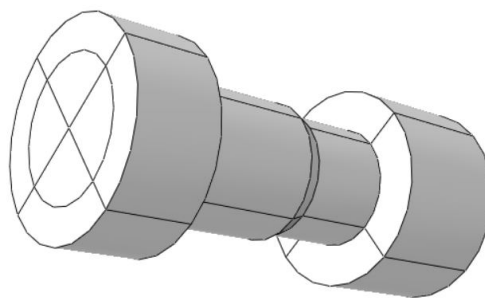
7.2 Utarbeiding av FEM-modell

Her presenteres den grunnleggende oppbygningen av FEM-modellen til knutepunktet beskrevet i kapittel 5, og vil refereres til som hovedmodellen videre i rapporten. En rekke valg i forbindelse med utarbeiding av modellen er basert på resultatene fra litteraturstudiet, og vil bli begrunnet fortløpende. DNV-RP-C208 viste til tre mulige metoder for å validere FEM-modeller. Som følge av det foreligger både eksperimentelle testresultater og gjennomføres analytiske kapasitetsberegninger av knutepunktet, kan alle valideringsmetodene brukes i denne oppgaven. Her blir hovedmodellen modellert ved å velge parameterene slik at kapasiteten styres mot sikker side, og der det er usikkerhet knyttet til valg av parameter er det gjennomført sensitivitetsstudier. Den helhetlige valideringen av modellen gjøres opp mot de eksperimentelle resultatene, samt at det til slutt gjøres en sammenligning av kapasiteten beregnet med numeriske og analytiske metoder. Implisitt løsningsmetode ble valgt for hovedmodellen, men undersøkelse av eksplisitt løsningsmetode inngår i sensitivitetstudiet.

7.2.1 Modellering av geometri

Det inngår totalt 5 forskjellige deler i knutepunktet: Søyلة, bjelke, endeplate, skrue og stiver. Selve sveisens geometri mellom delene som er sveiset til hverandre er ikke modellert. Nominelle verdier er benyttet, og for å gjøre modellen mer generell ble det valgt å ikke modellere opplagerne eller strekkforbindelsen til søylen som stive (discrete rigid) deler, men heller legge inn randbetingelser direkte mot bjelke- og søyleleddene. Forenklingen gjør også at det ikke er nødvendig å inkludere delen av bjelken som vil ligge forbi opplagerene, og bjelkenes lengder reduseres til 685 mm.

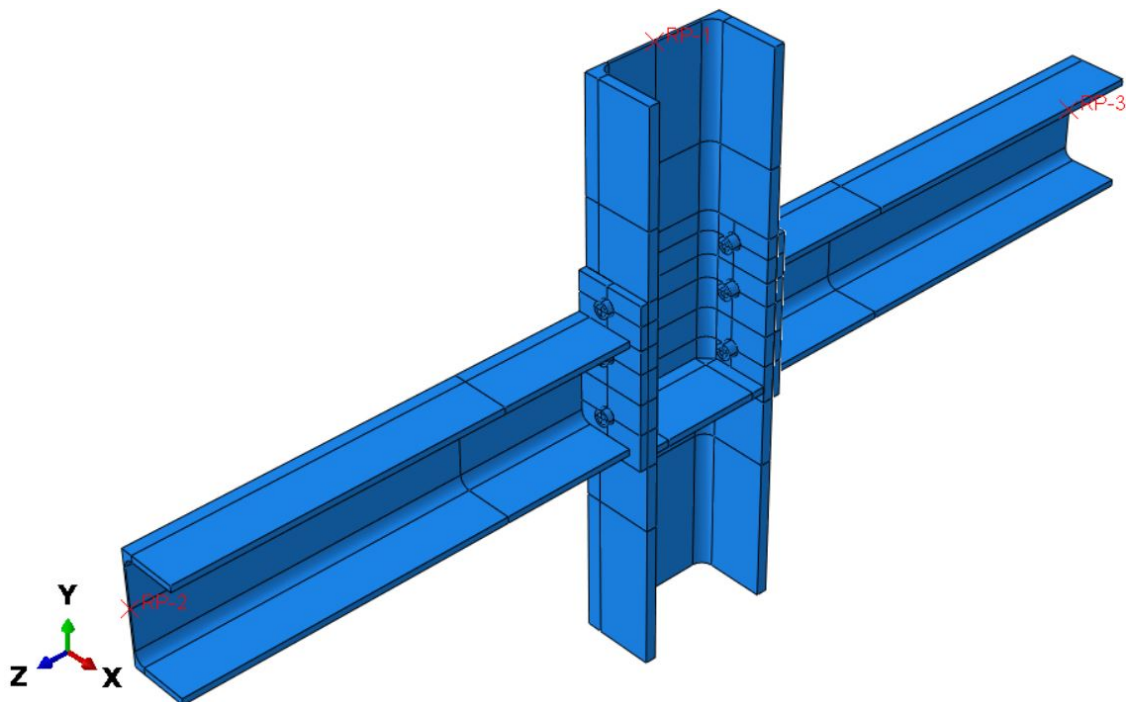
Skrues geometri er basert på figur 5.4, men er forenklet på flere måter. Skrue og mutter er modellert som en sammenhengende komponent, og i likhet med modellene i litteraturstudiet, er ikke gjengene modellert. Delen av skrueskaftet som går forbi mutteren, og dermed ikke bidrar til skrues kapasitet, er heller ikke tatt med i modellen. Skruehode og mutter er modellert sirkulære med diameter på 24 mm, som tilsvarer den minste diameteren (nøkkelvidden) til skruehode/mutter. M16 skruer har en nominell diameter på 16 mm, men det nominelle spenningsarealet spesifiseres til å være 157mm^2 etter NS-EN ISO 898 [13]. Det gir en diameter på 14.1 mm for den gjengede delen av skrueskaftet, som begynner 19 mm fra skruehodet. Lengden av den ugjengede delen av skrueskaftet er 17 mm, og overgangen mellom disse har derfor en lengde på 2 mm. Skrues modellerte geometri er vist i figur 7.2.



Figur 7.2: Ferdig modellert geometri for skrue. Skjermdump fra ABAQUS.

Det ble valgt å gjennomføre analysen på samme måte som Grimsmo et al. [21] med en speilsymmetrisk side av knutepunktet med randbetingelser mot et symmetriplan. Dermed ble modellens geometri slik som vist på figur 7.3, og antallet elementer i modellen ble kraftig redusert. Figuren viser også modelleringsrommets tre hovedakser, samt referansepunktene i modellen. Referansepunktet RP-1 er plassert i toppen av søylen, og RP-2 og RP-3 er plassert i endene av henholdsvis venstre

og høyre bjelke.



Figur 7.3: Speilsymmetrisk modell med hovedakser og plassering av referansepunkter. Skjermdump fra ABAQUS.

7.2.2 Modellering av materialeegenskaper

I likhet med alle FEM-modellene presentert i litteraturstudiet, blir det også her valgt å modellere materialene med lineær elastisitet, von Mises flytekriterie med den tilhørende flyteregelen og isotropisk fastning. I motsetning til Grimsmo et al. blir det her utarbeidet en tidsuavhengig materialmodell. De normative dokumentene viser til at karakteristiske verdier skal benyttes for materialeegenskaper, og at partialfaktorene for materialene legges til på belastningssiden. Dermed vil materialmodellen i denne oppgaven bygge på de karakteristiske verdiene til konstruksjonsstålet i fasthetsklasse S355, og de nominelle verdiene til skruestålet i fasthetsklasse 8.8.

Elastiske egenskaper

De elastiske egenskapene velges etter NS-EN 1993-1-1 [10] hvor verdiene til elastisitetsmodulen og Poissons tall for konstruksjonsstål er fastsatt til å være henholdsvis $E = 210000\text{N/mm}^2$ og $\nu = 0.3$. Ved beregning av rotasjonsstivheten til knutepunktet etter NS-EN 1998-1-8, anvendes formel 6.24. Formelen er gjeldende for alle stivhetskoeffisientene til knutepunktet, inkludert de for skruene, men benytter kun en felles verdi for elastisitesmodulen. Dermed kan det antas at verdiene for elastisitetsmodul og Poissons tall til konstruksjonsstålet er generelle, og er representative for skruestålet.

Plastiske egenskaper

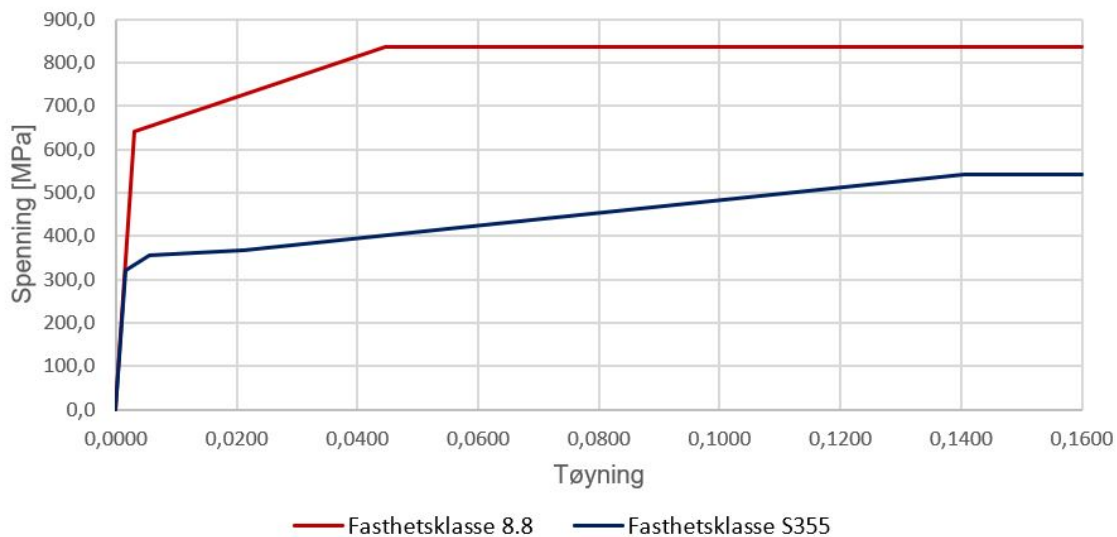
Modellering av materialoppførsel forbi det elastiske området krever at det defineres et forhold mellom plastiske tøyninger og spenninger i stålet. DNV-RP-C208 [7] presenterer en idealisert oppbygning av en sann materialkurve for konstruksjonsstål i fasthetsklasse S355 som inneholder flytegrense, flyteplata og tøyningfastning frem til spenningene i stålet når en kritisk verdi. Denne modellen bygger på leveringsbetingelsene for varmvalset konstruksjonsstål beskrevet i NS-EN 10025-2 [12],

og gjelder spesielt for geometri med tykkelse opp til og med 16 mm. DNV-RP-C208 er kun gjeldene for konstruksjonsstål opp til fasthetsklasse S460, og foreslår derfor ikke materialkurver for skruestålet. En egen modell for skruestålet etter materialkravene for skruer i fasthetsklasse 8.8 må derfor utarbeides. NS-EN ISO 898-1 [13] gir nominelle verdier og minstekrav til mekaniske egenskaper for skruestål, og viser til at skruestålets flytegrense og strekkfasthet slik de er presentert i tabell 5.1. I tillegg presenterer denne standarden en minimumsverdi for skruestålets totale bruddlengde på 12%, men gir ingen videre informasjon om stålets tillatte tøyning ved strekkfasthet. Dersom man benytter duktilitetskravet for konstruksjonsstål etter Eurokode 3 slik det er presentert i kapittel 3.3.4, kan det utledes en minimumsverdi for tillatt tøyning ved strekkfasthet i skruestålet slik som vist i formel 7.7.

$$\varepsilon_u = 15 \cdot \frac{f_y}{E} = 15 \cdot \frac{640 \text{ MPa}}{210000 \text{ MPa}} = 4.6\% \quad (7.7)$$

Grimsmo et al. rapporterte en tøyning ved strekkfasthet på ca. 6% under strekktesting av skruestålet [20], en verdi som ikke er langt fra den beregnede minimumsverdien for tøyningen etter formel 7.7 som samtidig havner på den konservative siden. Med utgangspunkt i den beregnede bruddtøyningen og skruestålets nominelle flytegrense og strekkfasthet ble det utarbeidet en kurve med to knekkpunkter og sanne verdier beregnet etter formel 3.2 og 3.3.

Materialkurvene for konstruksjonsstålet og skruestålet er vist i figur 7.4. Her vises det også at kurvene flater ut etter at materialenes strekkfasthet er nådd, og denne oppførselen vil indikere at stålet ikke kan ta opp større spenninger enn dette. Implementering av et bruddkriterie i materialmodellene er også ansett som unødvendig som følge av at materialets oppførsel etter at strekkfasthet er nådd ikke er interessant for å bestemme knutepunktets kapasitet. Tabulerte verdier for spenning-tøyningskurvene er vist i vedlegg A.

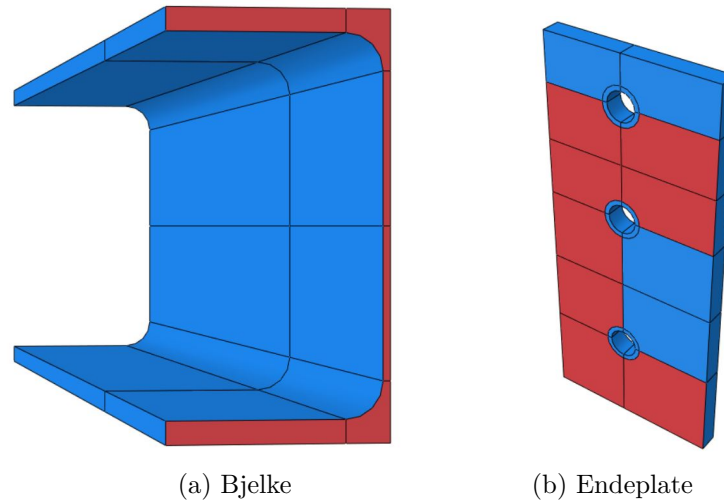


Figur 7.4: Materialkurver med karakteristiske verdier og tøyningsfastning. Skjermdump fra Microsoft Excel.

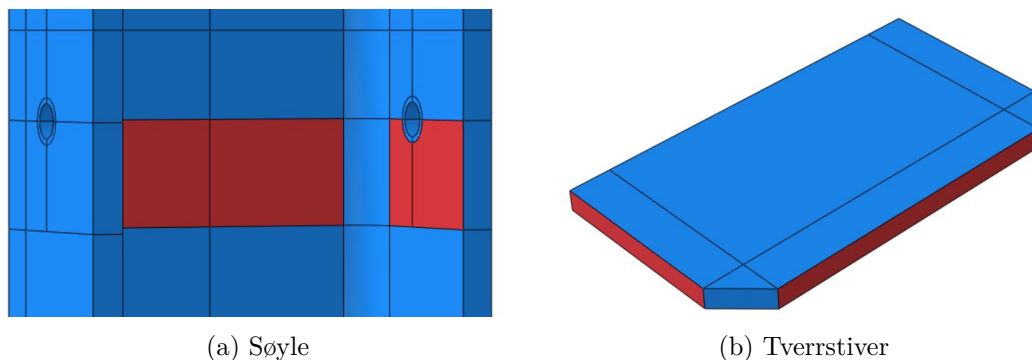
7.2.3 Interaksjon mellom kontaktflater

Det er to typer interaksjon som må modelleres for knutepunktet: kontakt mellom sveisede komponenter og kontakt mellom flatene i skruforbindelsen. Valg av kontaktbetingelser for knutepunktet er basert på resultatene fra litteraturstudiet.

For kontakt mellom endeplate og bjelkeende, samt tverrstiver og søyleliv, velges «Tie constraint» som låser de forskjellige delene sammen. Denne typen sammenkobling av komponenter krever at man definerer de aktuelle flatene, samt hvilken flater som tilegnes «Master»-rollen. Endeplatens og søylelivets flater velges som «Master». Bjelkeendens og endeplatens flater er markert i rødt på figur 7.5 og defineres for hver av de to sidene til knutepunktet. Flatene for kontakt mellom søyleliv og tverrstiver er markert i rødt på figur 7.6. Her er ikke alle flatene synlige grunnet geometri.



Figur 7.5: Interaksjonsflater definert for bjelke og endeplate. Skjermdump fra ABAQUS.

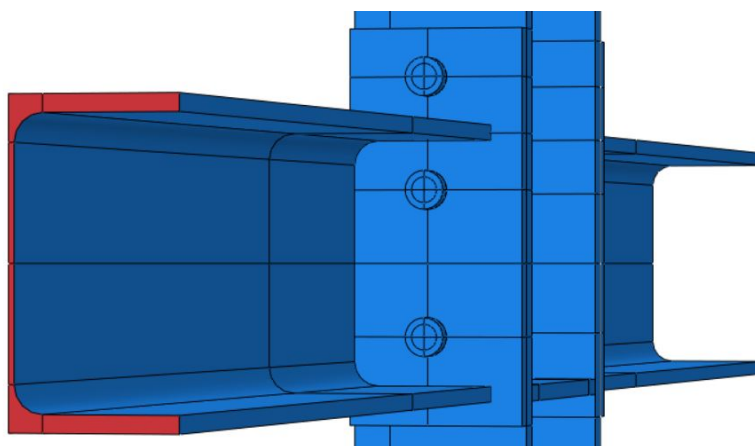


Figur 7.6: Interaksjonsflater definert for søyle og stiver. Skjermdump fra ABAQUS.

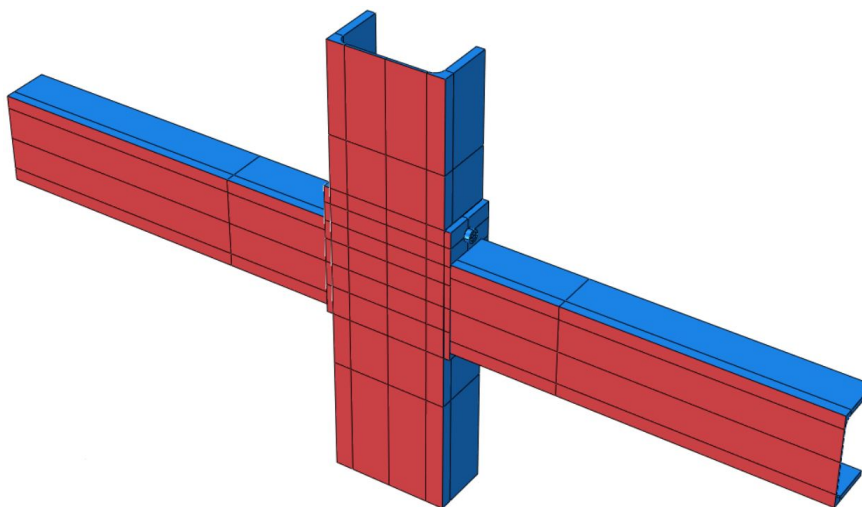
Det ble først forsøkt å anvende «Surface-to-surface contact» for å modellere kontakt mellom skruer, endeplate og søyleflens. Kontakttypen krever imidlertid definisjon av et stort antall kontaktflater som gjorde modelleringsarbeidet omfattende og førte til konvergeringsproblemer med den implisitte løsningsmetoden. Derfor ble mekanisk kontakt mellom endeplate, søyleflens og skruer modelleres med «General contact»-algoritmen som er gjeldende for hele modellen og krever derfor ikke definisjon av hvilken flater som kommer i kontakt med hverandre. Her evaluerer også ABAQUS selv hvilken flater som tilegnes «Master»-rollen. Kontakttegenskapene modelleres med «Penalty»-algoritmen og omfatter glidning mellom flater (tangensiell kontakt) ved bruk av «Penalty»-metoden, og trykk (normal kontakt) ved bruk av «Hard contact». Den tangentielle interaksjonstypen beskriver at friksjon mellom flatene er delvis forhindret, og krever informasjon om friksjonen er retningsbestemt og en tallverdi for beregningsmessig friksjonskoeffisient [26]. Dermed velges en uniform friksjonskoeffisient lik $\mu = 0.20$ som tilsvarer friksjon mellom konstruksjonsstål med valsede og ubehandlede overflater [9, s. 369].

7.2.4 Randbetingelser

Randbetingelsene legges inn som fastholdning mot rotasjon og forskyvninger direkte i modellen som følge av at det ikke er modellert stive (Discrete rigid) deler for å simulere randbetingelsene fra de eksperimentelle testene utført av Grimsmo et al. [20]. Bjelkeendenes tverrsnitt er koblet til hvert sitt referansepunkt (RP-2 og RP-3) som så er fastholdt mot forskyvning i Y-retning. Venste bjelkeendens flate er vist markert i rødt på figur 7.7. Som følge av at symmetrien til knutepunktet utnyttes for å effektivisere analysetiden, er det også definert et symmetriplan med fastholdning mot rotasjon om Y- og Z-aksene, og forskyvning normalt på planet, som i dette tilfellet er X-retning. Modell med symmetriplan markert i rødt er vist på figur 7.8.



Figur 7.7: Flaten til venstre bjelkeende som er koblet til RP-2. Skjermdump fra ABAQUS.



Figur 7.8: Modell med fremhevet symmetriplan. Skjermdump fra ABAQUS.

7.2.5 Belastning

Det opprettes et eget belastningssteg for modellen hvor alle interaksjoner og randbetingelser holdes slik de er definert i foregående underkapitler. Belastningen legges inn som forskyvning av søylen med angrepspunkt knyttet til et referansepunktet RP-1 plassert sentrisk i toppen av søylesteget. Dette punktet er så koblet sammen med flaten i toppen av søylen som er markert i rødt på figur 7.9. I det initielle steget fastholdes referansepunktet mot forskyvning i Y- og Z-retning, før det i

belastningssteget forskyves 36 mm i Y-retning. Den implisitte løsningsmetoden tar ikke høyde for dynamiske virkninger og er uavhengig av belastningstiden. Derfor velges det å påføre forskyvningen lineært økende med belastningsperioden 1.0. Forskyvning lik 36 mm velges som følge av at Grismo et al. rapporterte 36 mm forskyvning av søylen før brudd under testingen av QS-DLD-4 [20].



Figur 7.9: Flaten knyttet til referansepunktet RP-1 som påføres forskyvningen. Skjermdump fra ABAQUS.

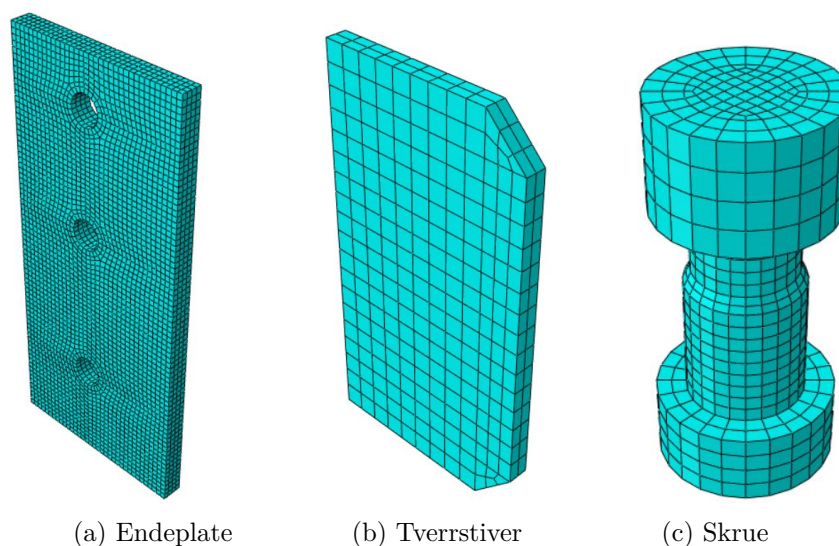
I eksperimentet ble skruene etterstrammet med et dreiemoment på 80 Nm, men Grismo et al. rapporterte at dreiemomentet ikke var stort nok til at det utgjorde en forskjell om det ble medtatt i modellen eller ikke [21]. Etter NS-EN 1993-1-8 kan skrueforbindelsen i dette knutepunktet plasseres i kategori D som følge av at forbindelsen ikke forutsettes å bli utsatt for varierende strekkbelastning, og det er heller ikke krav til forspenning av skruene [14]. På dette grunnlaget er det valgt å ikke inkludere forspenning av skruene i denne modellen.

7.2.6 Elementinndeling av geometri

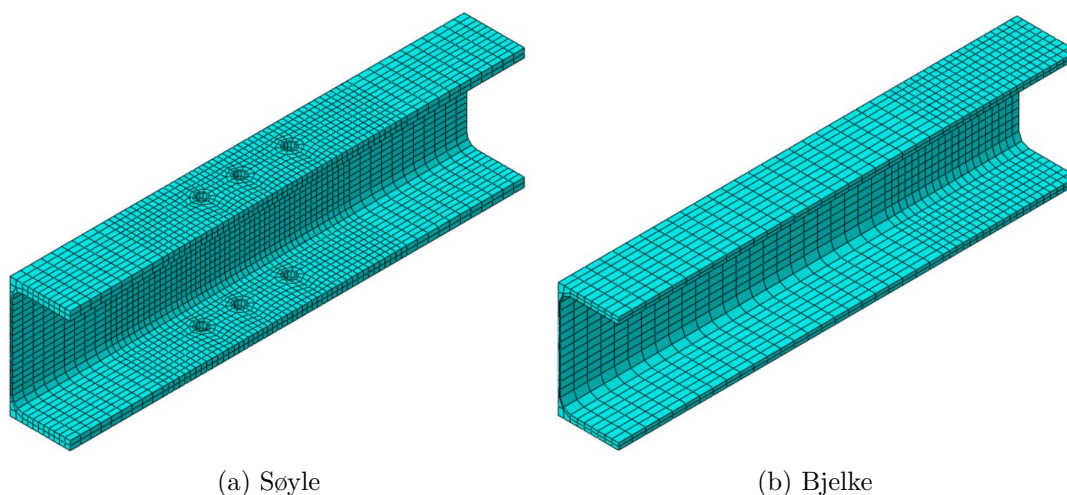
Litteraturstudiet viste at elementtypen C3D8R, som også er standard for solide geometrier, er foretrukket for modellering av knutepunkter i ABAQUS, og elementtypen blir anvendt i denne modellen. Litteraturstudiet viste også at selve forbindelsene i knutepunktene inkludert områdene i søyle og bjelke i nærheten av forbindelsen, ble utstyrt med større elementtetthet. Særlig ble skrueskaftene utført med tett elementinndeling. Den foreslåtte elementinndelingen av knutepunktet til mastergruppen [22] ble brukt som utgangspunkt, men et par endringer ble gjort. Endringene inkluderer anvendelse av 4 elementer over skruehodet og mutterens høyde, og 2 elementer over stiverens høyde. Elementinndelingen av de forskjellige komponentene i knutepunktet er listet opp under:

- **Skrue** - elementstørrelse på 2 mm i skrueskaftet, og 4 elementer fordelt over skruehodets og muttenens høyde.
- **Endeplate** - elementstørrelse på 3 mm som gir 4 elementer i platens tykkelse.
- **Tverrstiver** - elementstørrelse på 10 mm, men det ble valgt å ha 2 elementer i stiverens tykkelse.
- **Bjelke** - elementstørrelse på 10 mm i en avstand 200 mm fra endeplaten, og 20 mm for den resterende delen av bjelken. Dette ga 2 elementer over bjelkeflensens tykkelse.
- **Søyle** - elementstørrelse på 10 mm for hver av flensene i området hvor søylen er i kontakt med endeplatene, samt i en avstand på 100 mm ut fra endeplaten i hver av ende av søylen. elementstørrelse på 20 mm ble tilegnet den resterende delen av søylen. Også her førte elementinndelingen til 2 elementer over flenstykkelsen.

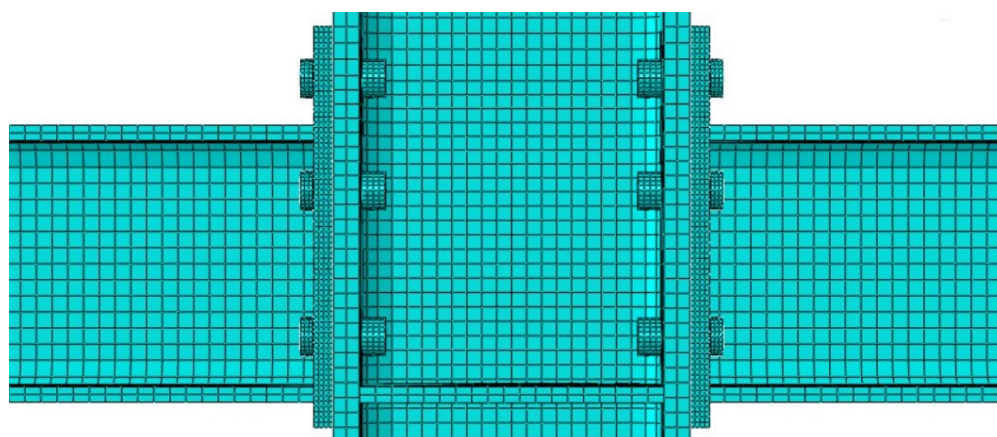
Denne elementinndelingen av geometrien ga omtrent 44 000 elementer totalt i modellen. Elementinndeling av endeplate, stiver og skrue er vist i figur 7.10, og søyle og bjelke er vist i figur 7.11. Selve knutepunktet sett forfra er vist i figur 7.12.



Figur 7.10: Elementinndeling av endeplate, tverrstiver og Skruer. Skjermdump fra ABAQUS.

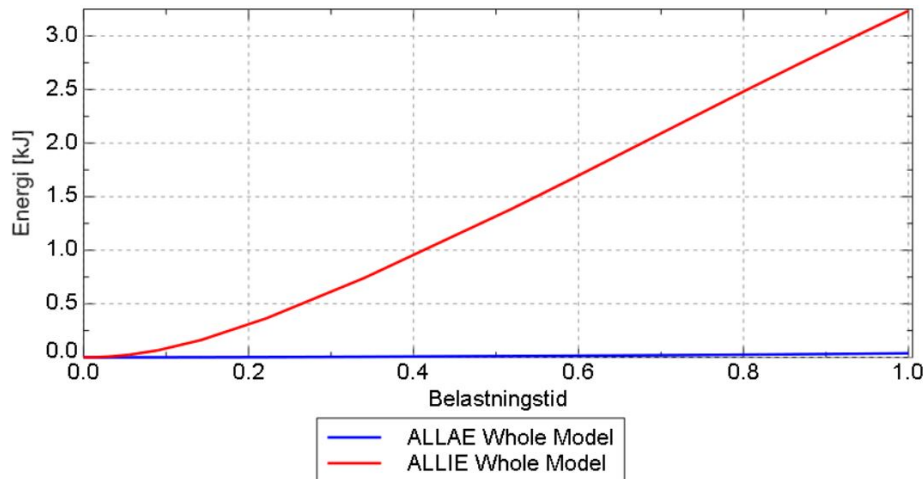


Figur 7.11: Elementinndeling av søyle og bjelke. Skjermdump fra ABAQUS.



Figur 7.12: Elementinndeling av knutepunktet sett forfra. Skjermdump fra ABAQUS.

DNV-RP-C208 viser til at det bør gjennomføres en kontroll av timeglassseffekten når elementer med redusert integrasjon og timeglasskontroll anvendes i analysen. Dette innebærer en sammenligning av timeglassenergi og intern energi i modellen for å kontrollere a forholdet mellom disse er under 5% [7]. Figur 7.13 og tabell 7.1 viser at timeglassenergien (ALLAE) er vesentlig mindre enn den interne energien (ALLIE), og at kravet er innfridd.



Figur 7.13: Sammenligning av timeglass- og intern energi i modellen. Skjermdump fra ABAQUS.

Tabell 7.1: Timeglassenergi, intern energi og forholdet mellom dem for et utvalg punkter i belastningsperioden.

Belastningstid	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
ALLAE [J]	0	2.5	9.1	16.3	24.7	38.1
ALLIE [J]	0	364	1062	1737	2435	3234
Forhold	0	0.68%	0.86%	0.94%	1.01%	1.18%

7.3 Sensitivitetsstudier

De normative dokumentene undersøkt i denne oppgaven viste til bruk av sensitivitetsstudier som en viktig del av modelleringsarbeidet. I denne oppgaven har det blitt gjennomført flere sensitivitetsstudier for å kvalitetssikre analyseresultatene ved å låse alle parametere slik de er beskrevet fra kapittel 7.2.1 til kapittel 7.2.6, så ble parameteren som undersøkes justert for å kartlegge hvilken effekt den eventuelle endringen vil ha på analyseresultatet. Effekten undersøkes ved å sammenligne kraft-forskyvningskurven til den modifiserte modellen med hovedmodellen. På bakgrunn av litteraturstudiet og modelleringsarbeidet er det bestemt at følgende parametere skal undersøkes:

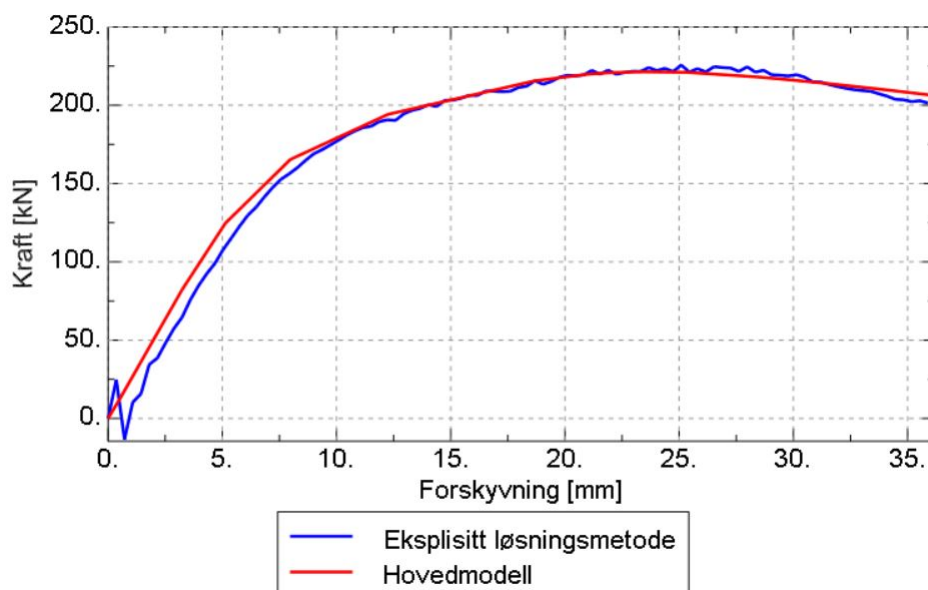
- Bruk av eksplisitt løsningsmetode med masseskalering
- Økt finhetsgrad for elementinndeling av bjelker og søyle
- Inkludering av geometrien til sveis mellom bjelker og endeplater
- Inkludering av opplager slik de fremgår i eksperimentet
- Bruk av materialkurve for skruestål med økt plastisk tøyning
- Bruk av elastisk-perfekt plastiske materialkurver for både konstruksjon- og skruestål
- Modellering av knutepunktets fullstendige geometri

7.3.1 Eksplisitt analyse

Implisitt løsningsmetode ble valgt for hovedmodellen, men det er også mulig å gjennomføre kvasi-statiske analyser i ABAQUS ved bruk av eksplisitt løsningsmetode. Overgangen mellom metodene krever at det gjøres flere endringer i modellen.

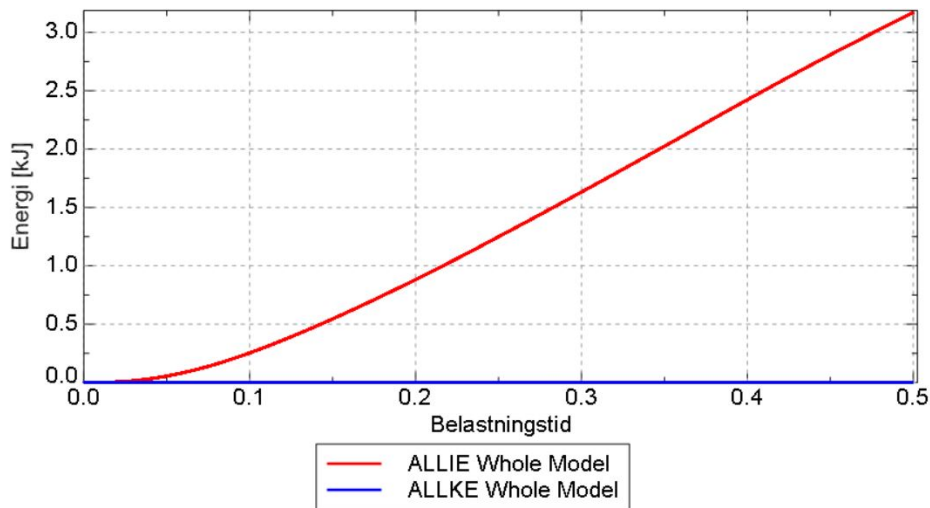
Eksplisitt løsningsmetode vil ta hensyn til dynamiske effekter i analysen, og avhenger derfor av materialets massetetthet og den valgte belastningstiden. Første endring som må gjøres er å implementere stålets massetetthet i materialmodellene. Standarden for leveringsbetingelser for varmvalset konstruksjonsstål angir stålets massetetthet til å være $7.85 \cdot 10^{-9} \text{ tonn/mm}^3$ [12]. Det antas at verdien for massetetthet er generell, og vil også være representativ for skruestålet. Grimsmo et al. rapporterte en belastningshastighet lik 0.05 mm/s og at forskyvningen av søylen ved brudd var 36 mm [20]. Den totale belastningstiden vil da være omtrent 12 minutter, og ville gjort analysetiden urimelig lang. Denne velges derfor vesentlig lavere, og det bør helst gjennomføres en parameterstudie for å finne en godt egnet belastningsperiode. Her velges belastningsperioden kun til å være 0.5 (halvering av perioden brukt i hovedmodellen), og et vilkårlig målinkrement lik $1.0 \cdot 10^{-6}$ blir lagt inn som masseskalering for å redusere analysetiden ytterligere. Fremdeles krever eksplisitt løsningsmetode et stort antall inkremerter for å gjennomføre analysen, og analysetiden er vesentlig lengre enn for hovedmodellen.

Kraft-forskyvningskurvene for den eksplisitte analysen og hovedmodellen er vist i figur 7.14. Her blir det tydelig at det opptrer dynamiske effekter i den innledende delen av belastningen. Forskjellen mellom kurvene er størst frem til omtrent 8 mm forskyvning, og for den resterende forskyvningen samsvarer kurvene godt.



Figur 7.14: Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for implisitt og eksplisitt løsningsmetode. Skjermdump fra ABAQUS.

DNV-RP-C208 viser til at det ved bruk av eksplisitt løsningsmetode for kvasi-statiske undersøkelser bør kontrolleres at den kinetiske energien i modellen er under 1% av den interne energien i modellen [7]. Figur 7.15 og tabell 7.2 viser forholdet mellom kinetisk og intern energi i modellen frem til 0.10 av belastningstiden er gjennomført.



Figur 7.15: Sammenligning av kinetisk og intern energi i modellen. Skjermdump fra ABAQUS.

Tabell 7.2: Kinetisk energi, intern energi og forholdet mellom dem for et utvalg punkter i første del av belastningsperioden.

Belastningstid	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
ALLKE [J]	0	0.50	0.45	0.47	0.47	0.47
ALLIE [J]	0	4.3	31.7	83.9	158.7	253.4
Forhold	0	11.6%	1.4%	0.6%	0.3%	0.2%

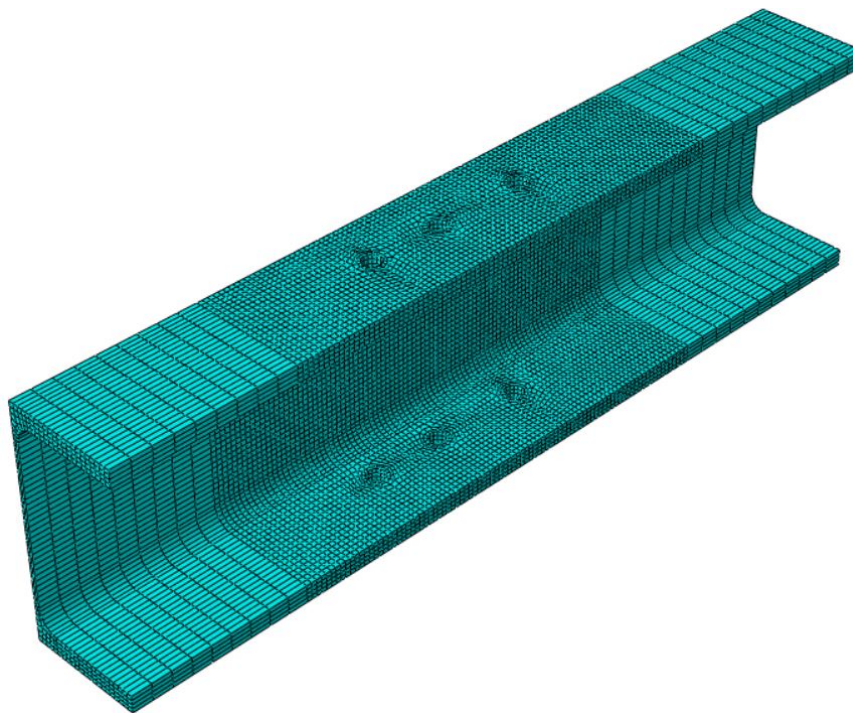
Fra figuren er det vanskelig å se om kravet i DNV-RP-C208 er innfridd for hele belastningsforløpet, men fra tabellen kan det avleses at forholdet mellom kinetisk og intern energi er 1.4% ved belastningstiden 0.04. Det er først etter denne belastningstiden, som tilsvarer ca. 3 mm forskyvning av søylen, at forholdet mellom energikvantitetene havner under 1%. Det vil si at kravet ikke er overholdt for området mellom starten av belastningen og frem til etter belastningstiden 0.04, og at det vil opptre dynamiske effekter av betydning i dette området. Ved å se kraft-forskyvningskurvene vist i figur 7.14 i lys av kravet i DNV-RP-C208, kan det antas at differansen mellom kurvene den første delen av belastningen skyldes opptredende treghetskrefter i den eksplisitte analysen.

7.3.2 Fin elementinndeling av bjelker og søyle

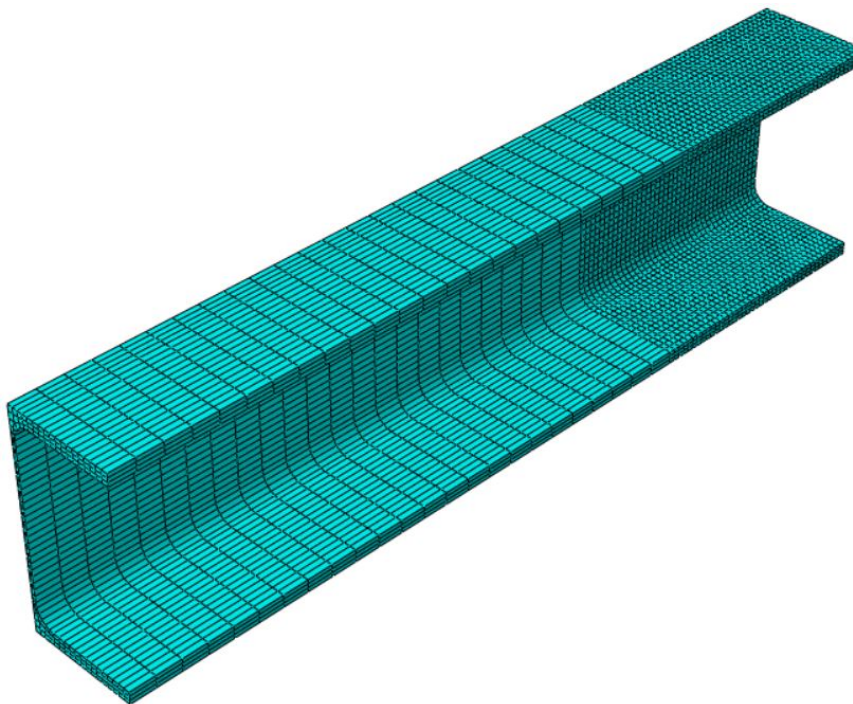
Elementene i endeplatene og skruene er vesentlig mindre enn elementene i de resterende delene som utgjør knutepunktet. Bakgrunnen for dette er at endeplatene og skruene utsettes for de største deformasjonene, og krever fint elementnett for å nøyaktig fange opp virkningene av belastningen. I motsetning har de resterende delene relativt grov elementinndeling, og det er valgt å undersøke hvordan finere elementinndeling av bjelker og søyle vil påvirke analyseresultatet. Dermed forblir elementinndeling av endeplater, skruer og stiver slik som beskrevet i kapittel 7.2.6, mens bjelker og søyle tildeles følgende:

- **Bjelke** - elementstørrelse på 5 mm i en avstand 200 mm fra endeplaten, og 20 mm for den resterende delen av bjelken. I tillegg ble det lagt inn 3 elementer over bjelkeflensens tykkelse.
- **Søyle** - elementstørrelse på 5 mm for i området hvor søylen er i kontakt med endeplatene, samt i en avstand på 100 mm fra endeplaten i hver av ende. Også her ble det benyttet 20 mm for de resterende delene. Det ble også valgt å plassere 4 elementer over søyleflensens tykkelse.

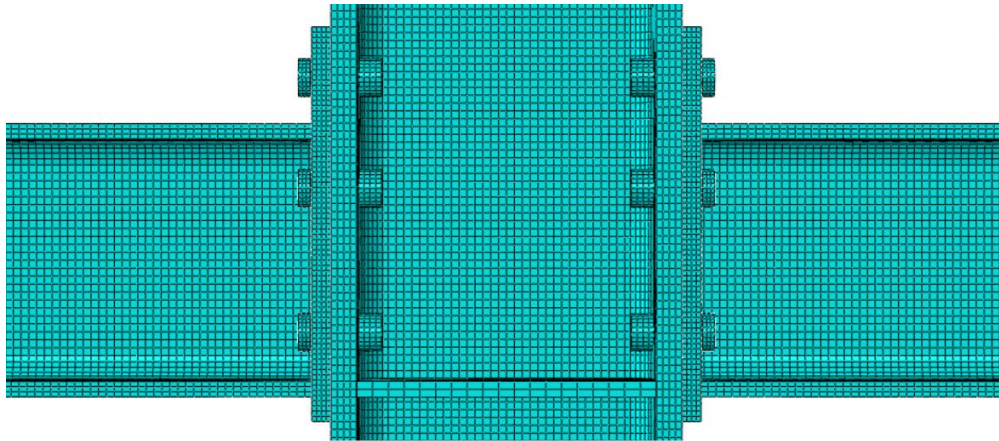
Denne elementinndelingen av geometrien ga totalt 82 000 elementer i modellen, nesten en dobling fra hovedmodellen. Økt finhetsgrad i elementinndeling av søylen og bjelken er vist i henholdsvis figur 7.16, og figur 7.17. Knutepunktet sett forfra med den alternative elementinndelingen er vist i figur 7.18.



Figur 7.16: Alternativ elementinndeling av søyle. Skjermdump fra ABAQUS.

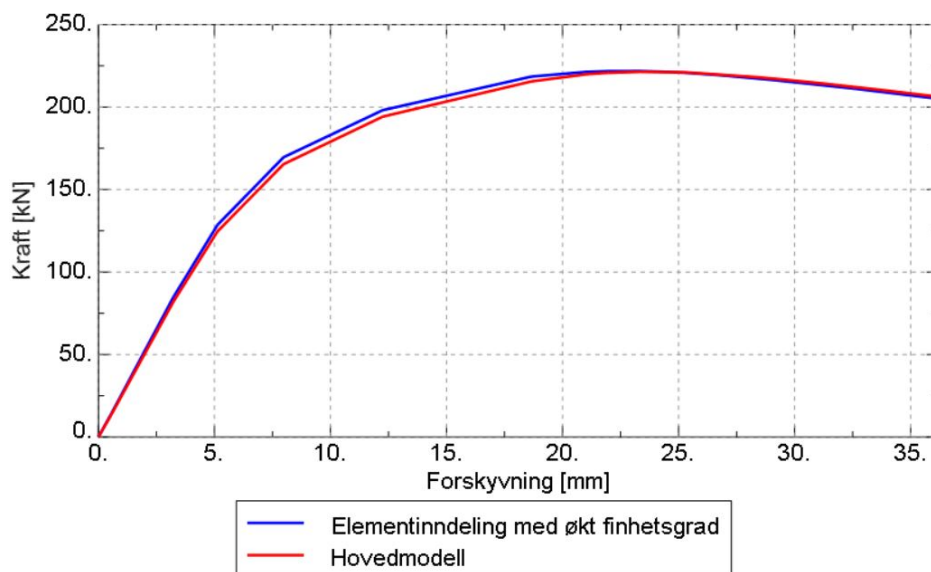


Figur 7.17: Alternativ elementinndeling av av bjelke. Skjermdump fra ABAQUS.



Figur 7.18: Knutepunkt med alternativ elementinndeling, sett forfra. Skjermdump fra ABAQUS.

Sammenligning av kraft-deformasjonskurvene for hovedmodell og modell med oppjustert finhetsgrad av elementinndeling er vist i figur 7.19. Her vises det at den økte finhetsgraden i elementinndelingen av søyle og bjelker vil gi en minimal økning av kraft i søylen fra rundt 5 til 20 mm forskyvning. Forskjellen er så liten at elementinndelingen til hovedmodellen anses å være tilstrekkelig. Analysetiden ved bruk av oppjustert finhetsgrad i elementinndelingen økte med omtrent 60% fra hovedmodellen.

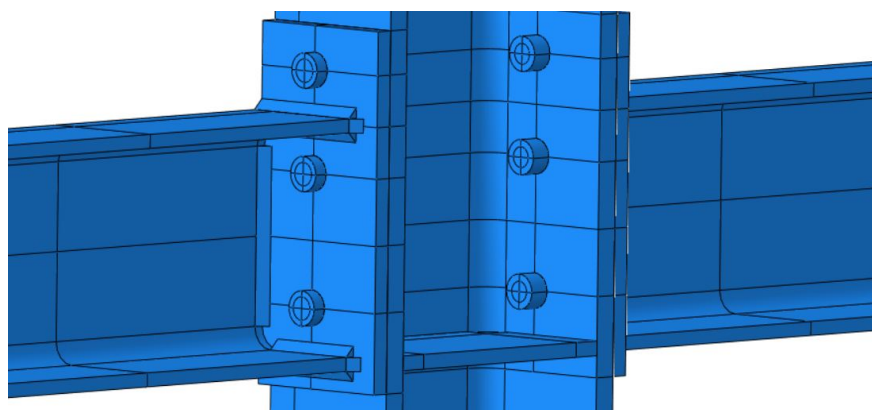


Figur 7.19: Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for to ulike elementinndelinger. Skjermdump fra ABAQUS.

7.3.3 Inkludering av sveisens geometri

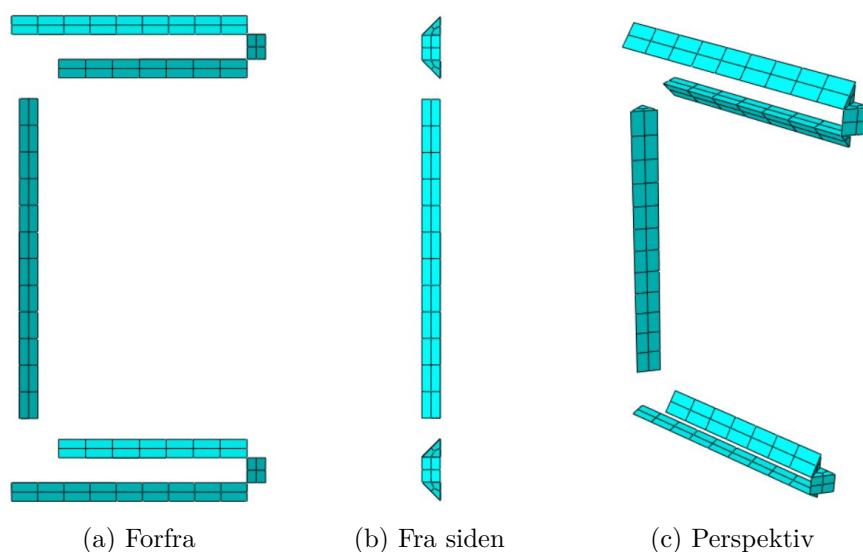
DNV-RP-C208 viser til at det kan gjøres forenklinger i modelleringsarbeidet dersom endringene fører resultatet mot sikker side [7]. Det å ikke inkludere sveis mellom bjelker og endeplater i modellen er en slik forenkling som er gjort i hovedmodellen, men for å undersøke hvordan selve sveisen påvirker analyseresultatet, er det valgt å gjennomføre en analyse som inkluderer sveis rundt bjelkeflensene og langs bjelkesteget med et rotmål på 5 mm slik som vist på figur 5.2. Sveisen ble ikke inkludert i det avrundede området i overgangen mellom bjelkens steg og flens. En av forbindelsene

i knutepunktet med sveis er vist på figur 7.20.



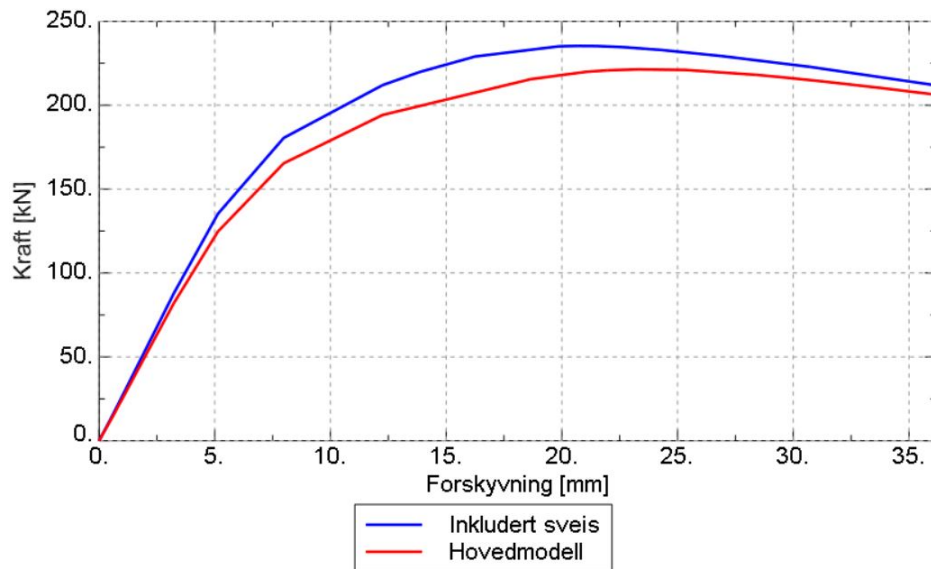
Figur 7.20: Knutepunktets venstre forbindelse med modellert sveis. Skjermdump fra ABAQUS.

Implementering av sveis i modellen gjør at det må defineres et sett med nye flater for kontakt mellom bjelke og sveis, og på sveis for kontakt mot endeplatens flate som allerede er definert. Deretter ble kontakttypen «Tie constraint» benyttet, hvor flatene tilhørende sveisene fikk «Slave»-rollen. Sveisene tildeles også samme materialetegenskapene som konstruksjonsstålet. Elementinndelingen av sveisene ble gjort med den samme elementtypen som for resten av modellen, med en størrelse på 10 mm. Sveis med elementinndeling er vist på figur 7.21.



Figur 7.21: Elementinndeling av sveis. Skjermdump fra ABAQUS.

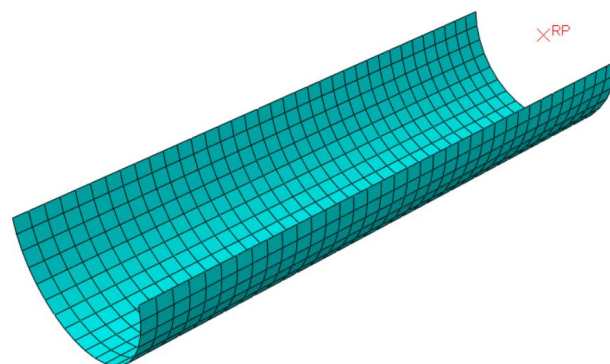
Figur 7.22 viser at implementering av sveisens geometri gjør det mulig å påføre en større kraft i søylen. Kurven til modellen med sveis ligger i overkant av hovedmodellen over hele belastningsforløpet, og forskjellen er størst i det midtre området. Forskjellen mellom kurvene viser at det å ekskludere sveisen er en konservativ forenkling som sparer modelleringstid og fører analyseresultatet mot sikker side med hensyn til styrke.



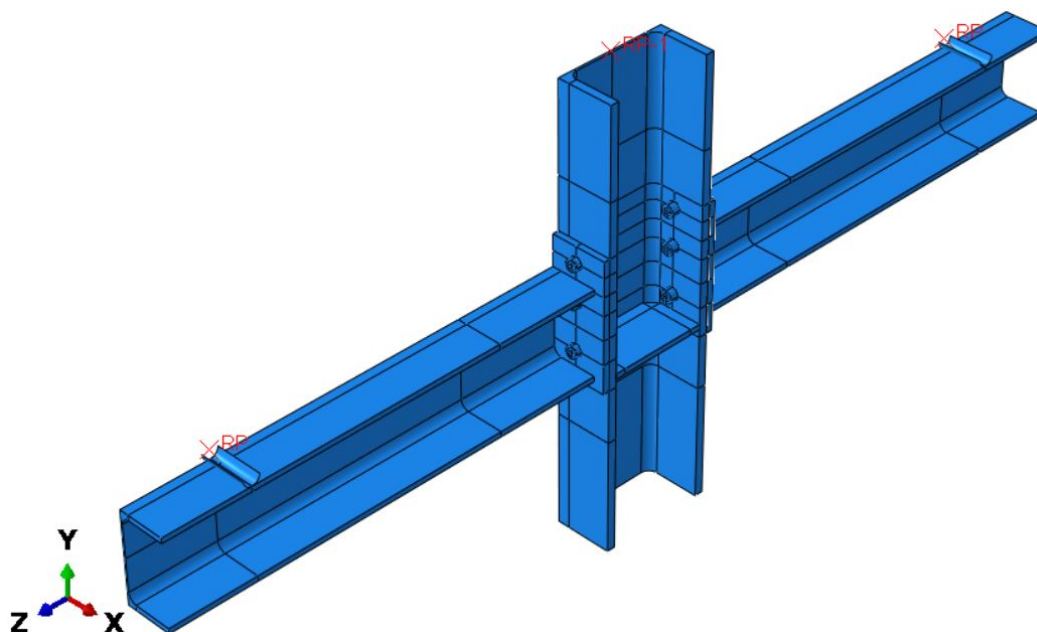
Figur 7.22: Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for modell med sveis mellom bjelker og endeplater og hovedmodell. Skjermdump fra ABAQUS.

7.3.4 Modellering av opplager

I hovedmodellen ble randbetingelsene mot bjelkeendene lagt inn i modellen som fastholdning mot forskyvning i Y-retning. For å undersøke hvordan denne forenklede tilnærningen til randbetingelsene i modellen påvirker analyseresultatet, gjennomføres det her en analyse hvor opplagerene fra eksperimentet utført av Grimsmo et al. [20] inkluderes i modellen som stive (descrete rigid) skallgeometrier. Slike deler idealiseres til å ha uendelig stivhet, og vil ikke deformeres under belastning. De trenger heller ikke å tilegnes egendefinerte materialegenskaper, og vil alltid tilegnes «Master»-rollen ved kontakt. Geometrien ble modellert som en halvsirkel med en vilkårlig valgt diameter lik 30 mm. Lengden ble valgt lik det speilsymmetriske bjelketverrsnittets bredde. Opplageret tilegnes et referansepunkt (RP), og det er manipulasjon av dette referansepunktet som styrer opplagerets oppførsel. Her blir referansepunktet fastholdt mot forskyvninger i alle akseretninger og rotasjon om alle akser gjennom hele belastningsforløpet. Til slutt ble opplageret tilegnet en elementinndeling med 2.5 mm store elementer. Opplagerets geometri med elementinndeling og referansepunkt er vist i figur 7.23. I tillegg måtte bjelkene forlenges til sin opprinnelige lengde lik 850 mm slik det er vist i 5.1, for at bjelken kunne forskyves under belastningen uten å miste kontakt med opplageret. Modellen med modellererte opplager er vist i figur 7.24.

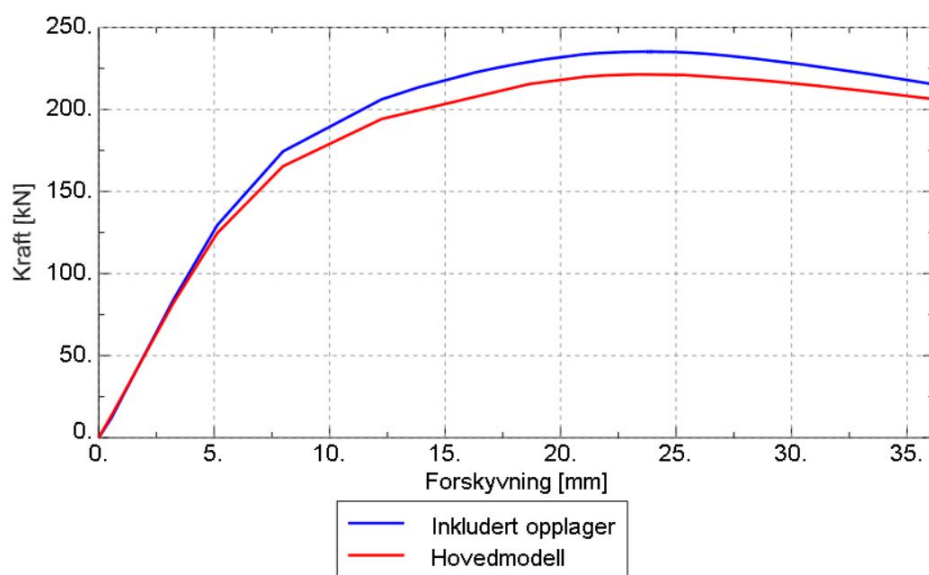


Figur 7.23: Geometri av stivt opplager med elementinndeling og referansepunkt (RP). Skjermdump fra ABAQUS.



Figur 7.24: Modell med opplagere, hovedakser og plassering av referansepunkter. Skjermdump fra ABAQUS.

Når opplagerene inkluderes i modellen på denne måten, kompliseres interaksjonen i modellen ved at det oppstår glidning mellom overkant av øvre bjelkeflens og opplager. Dette medførte at den implisitte løseren trengte flere inkrementer for å konvergere og gjennomføre analysen, og analys tiden ble doblet.

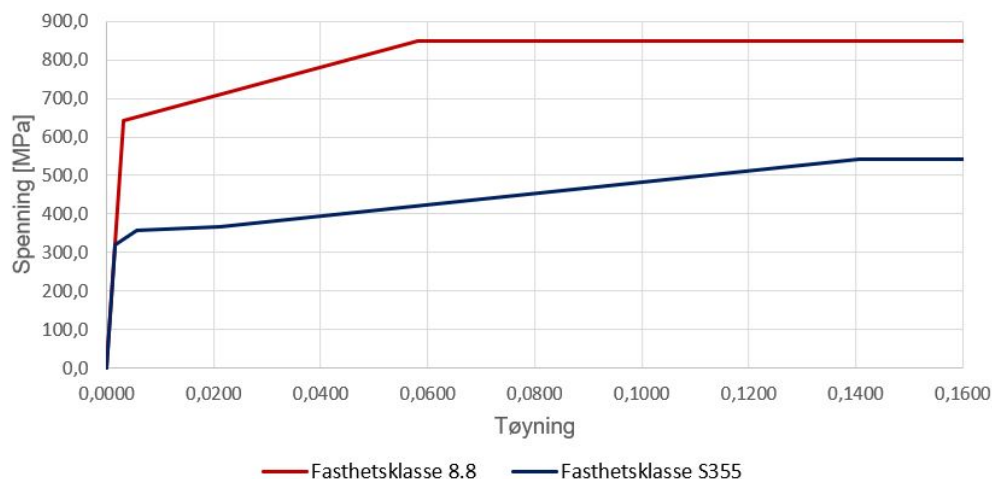


Figur 7.25: Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for modell med opplagere og hovedmodell. Skjermdump fra ABAQUS.

I likhet med inkludering av sveisens geometri, er det tydelig at forenklingen av randbetingelsene mot bjelkeendene i hovedmodellen bidrar til et mer konservativt analyseresultat med hensyn til styrke. Utenom de første 5 mm med søyleforskyvning, ligger hovedmodellen under modellen med modellerte opplager.

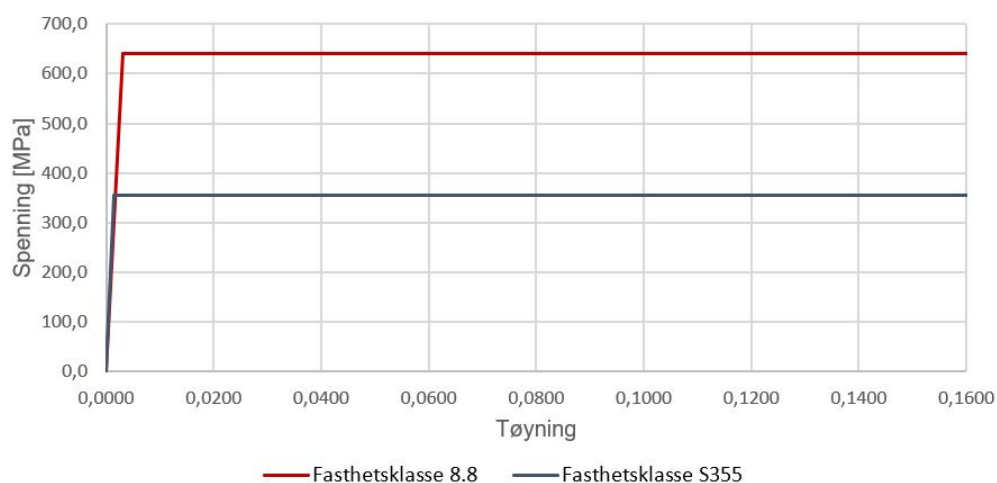
7.3.5 Alternative materialkurver

I materialmodellen for fasthetsklasse 8.8 ble tøyning ved nominell strekkfasthet satt til minstekravet gitt i kapittel 3.3.4, og ble beregnet til å være 4.6%. Grimsmo et al. rapporterte samme tøyning til å være ca. 6% etter strekktesting av skruetålet [20], og det velges å undersøke hvordan denne tøyningen påvirker analyseresultatet. En alternativ materialkurve ble utarbeidet etter samme metode som vist i kapittel 7.2.2, og en analyse med materialkurver som vist i figur 7.26 ble gjennomført. Tabulerte materialdata er vist i vedlegg A.



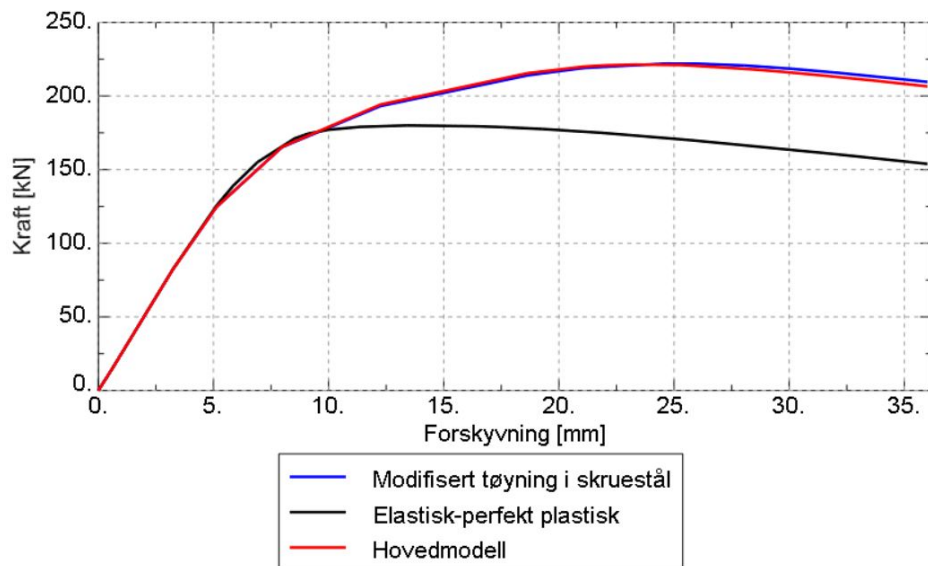
Figur 7.26: Materialkurver med sanne karakteristiske verdier og tøyningsfastning, samt modifisert tøyning i skruetålet. Skjermdump fra Microsoft Excel.

NS-EN 1993-1-5 tillegg C viser til at det også kan brukes mer forenklede materialmodeller, hvor den mest konservative av disse er en elastisk-perfekt plastisk kurve med knekkpunkt lik materialets karakteristiske flytegrense [16]. For å undersøke hvordan denne tilnærmingen til materialoppførselen påvirker resultatet, ble det gjennomført en analyse med elastisk-perfekt plastiske materialkurver slik som vist i figur 7.27. Tabulerte materialdata er vist i vedlegg A.



Figur 7.27: Elastisk-perfekt plastiske materialkurver med karakteristiske verdier. Skjermdump fra Microsoft Excel.

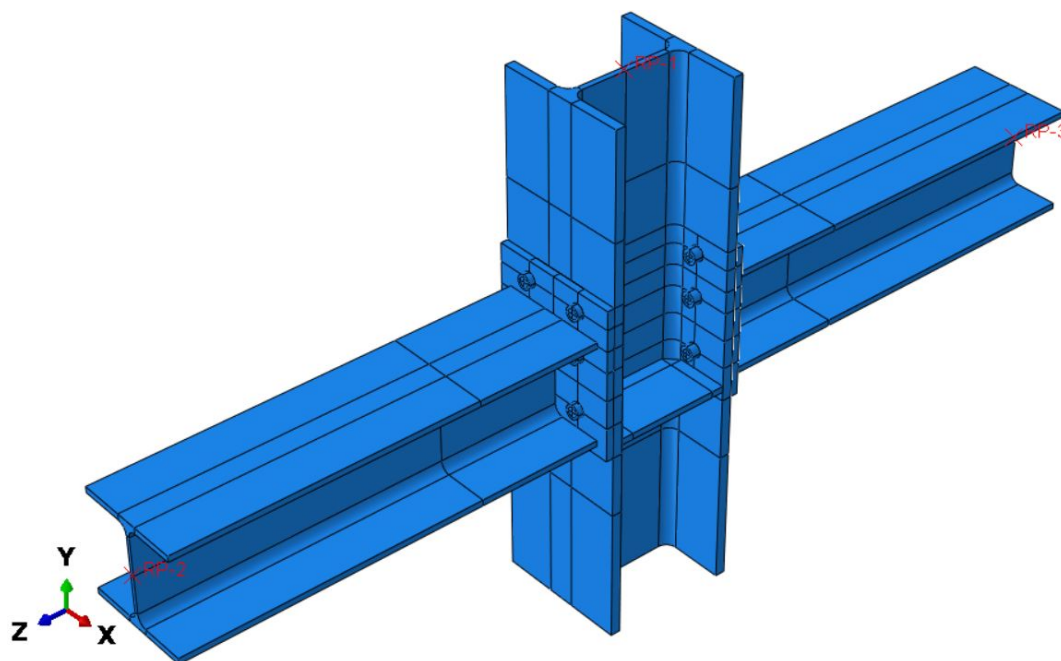
Sammenligningen av kraft-forskyvningskurvene til hovedmodellen og modellene med forskjellige materialkurver er vist i figur 7.28. Alle kurvene har tilnærmet likt forløp frem til 10 mm forskyvning av søylen, deretter vil mangel på tøyingsfastning i modellen med elastisk-perfekt plastiske materialkurver gjøre at knutepunktet ikke kan ta opp mer last, og kraften i søylen avtar gradvis videre i belastningsforløpet. Resultatet blir en mindre maksimal kraft i søylen, samtidig som at denne kraften opptrer mye tidligere i belastningsforløpet. Differansen mellom hovedmodell og modell med modifisert tøyning av skruetålet blir først synlig etter at maksimum kraft i søylen er oppnådd, og selv da er forskjellen minimal. Den lille økningen av tøyning ved strekkfasthet i skruetålet har derfor minimal påvirkning på analyseresultatet.



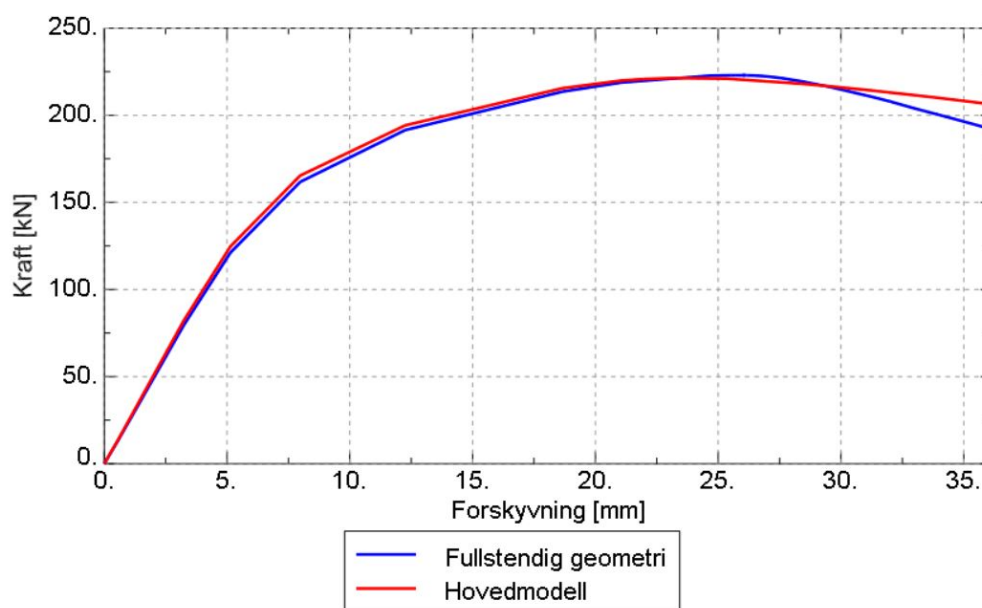
Figur 7.28: Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for tre ulike materialkurver. Skjermdump fra ABAQUS.

7.3.6 Fullstendig geometri

Geometrien i hovedmodellen er forenklet ved hjelp av speilsymmetri for å redusere analysetid med mål om å effektivisere analyseprosessen, slik det er gjort i alle forskningsartiklene undersøkt i litteraturstudiet. Metoden gjør også at man blir tvunget til å utelukke enkelte potensielle bruddformer. Eksempel på dette er basiskomponenter fastholdt i symmetriplanet som i realiteten er utsatt for knekking. For å undersøke om speilsymmetri har en betydelig effekt på analyseresultatet, er det valgt å gjennomføre en analyse av den fullstendige geometrien av knutepunktet slik som vist i figur 7.29. Modellen har totalt 84 000 elementer. Endringer av elementinndeling er gjort spesielt i H-profilenes steg for bedre tilpassing til den fullstendige geometrien. symmetriplanet bidrar til fastholdning av modellen i X-retning, og for å kompensere for dette ble det lagt inn randbetingelser mot forskyvning i X-retning i alle referansepunktene. Modellen har omtrent like mange elementer som modellen med økt finhetsgrad, men analysetiden økte med over fire ganger fra hovedmodellen. Sammenligning av kraft-forskyvningskurvene til hovedmodellen og modell med fullstendig geometri er vist i figur 7.30. Også her er differansen liten, men kraften i søylen avtar noe fortere de siste 6 mm med forskyvning i modellen uten utnyttelse av symmetri.



Figur 7.29: Ferdig modellert geometri av hele knutepunktet. Skjermdump fra ABAQUS.

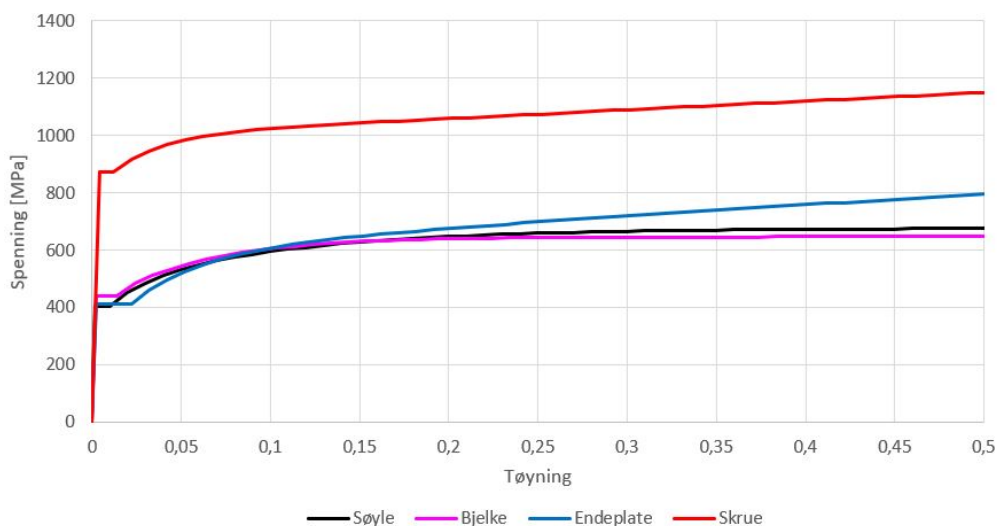


Figur 7.30: Sammenligning av kraft-forskyvningskurver for fullstendig modellert geometri og hovedmodell. Skjermdump fra ABAQUS.

7.4 Validering av FEM-modell

Modifiseringer av hovedmodellen er nødvendig for å ha en mer representativ modell for sammenligning mot eksperimentelle data, og er utarbeidet en valideringsmodell for å undersøke om modellen kan reprodusere de eksperimentelle resultatene rapportert av Grimsmo et al. [20].

Hovedmodellen er utstyrt med forenklete materialkurver med utgangspunkt i karakteristiske materialverdier, og det ble valgt å gjenskape fastningskurvene for søyle, bjelke, endeplate og skrue utarbeidet og rapportert av Grimsmo et al. [21]. Strekktesting av materialene danner grunnlaget for fastningskurver utarbeidet med den utvidede Voce fastningsregelen, og Grimsmo et al. rapporterte både selve fastningsuttrykket og de utledede inngangsverdiene for de forskjellige delene [21]. Her velges det å låse leddene i uttrykket for tøyingsrate-sensitivitet og termisk mykning til 1.0, og deretter bruke de resterende inngangsverdiene i fastningsuttrykket. Fastningskurvene for de forskjellige materialene utledes ved å beregne de ekvivalente spenningene for et sett med tilhørende plastisk tøyning. I dette tilfellet ble spenningene beregnet fra enden av flyteplataet med tøyingsinkremer lik 0.01 frem til ca. 50% plastisk tøyning, og på grunn av antallet verdier som produseres er beregningene gjennomført i Microsoft Excel. Resultatet er de forenklete spenning-tøyingskurvene vist i figur 7.31. I likhet med oppbygning av modell rapportert av Grimsmo et al. [21] fikk tverrstiveren tildelt samme egenskaper som søylen, og sveisene fikk tildelt samme materialegenskaper som bjelken. Tabulerte verdier for materialkurvene er vist i vedlegg A.

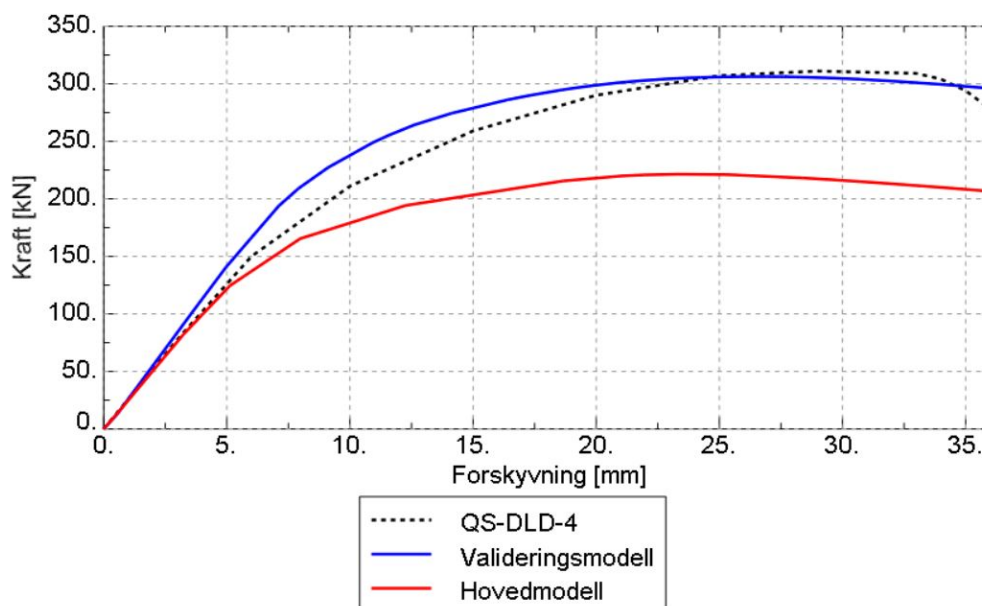


Figur 7.31: Materialkurver med sanne verdier fra fastningsuttrykket med inngangsverdier utledet av Grimsmo et al. [20]. Skjermdump fra Microsoft Excel.

I sensitivitetsstudiet ble det klart at det var spesielt to geometriske endringer som ga hovedmodellen en mer konservativ oppførsel: ekskludering av sveisens geometri og forenklete randbetingelser. Dermed ble både sveis og opplager inkludert i valideringsmodellen.

7.4.1 Sammenligning av kraft-forskyvningskurver

Kraft-forskyvningskurven fra eksperimentet QS-DLD-4 rapportert av Grimsmo et al. [20] sammen med kurvene fra valideringsmodellen og hovedmodellen er vist i figur 7.32. Kurven fra eksperimentet er plottet ved bruk av verdiene for maksimal belastning og belastning ved brudd med tilhørende forskyvning, samt et ekstra sett med punkter i grafen avlest direkte fra kraft-forskyvningskurven rapportert av Grimsmo et al.



Figur 7.32: Kraft-forskyvningskurve fra QS-DLD-4 og FEM-modellene. Skjermdump fra ABAQUS.

Kurven til valideringsmodellen ligger noe over kurven til QS-DLD-4 frem til omtrent 25 mm forskyvning, men havner nær maksverdien for kraft i søylen slik den er observert i eksperimentet. Denne oppførselen samsvarer også med hva Grimsmo et al. rapporterte ved sammenligning av resultater fra FEM-modell og eksperiment ved kvasi-statisk belastning [21]. Hovedmodellen og QS-DLD-4 ser ut til å samsvare bedre i det elastiske området frem til omtrent 5 mm forskyvning av søylen, men hovedmodellen ligger klart under fra dette punktet, og forskjellen blir større utover belastningsforløpet. Størst påført kraft i søylen med tilhørende forskyvning for de tre kurvene er vist i tabell 7.3.

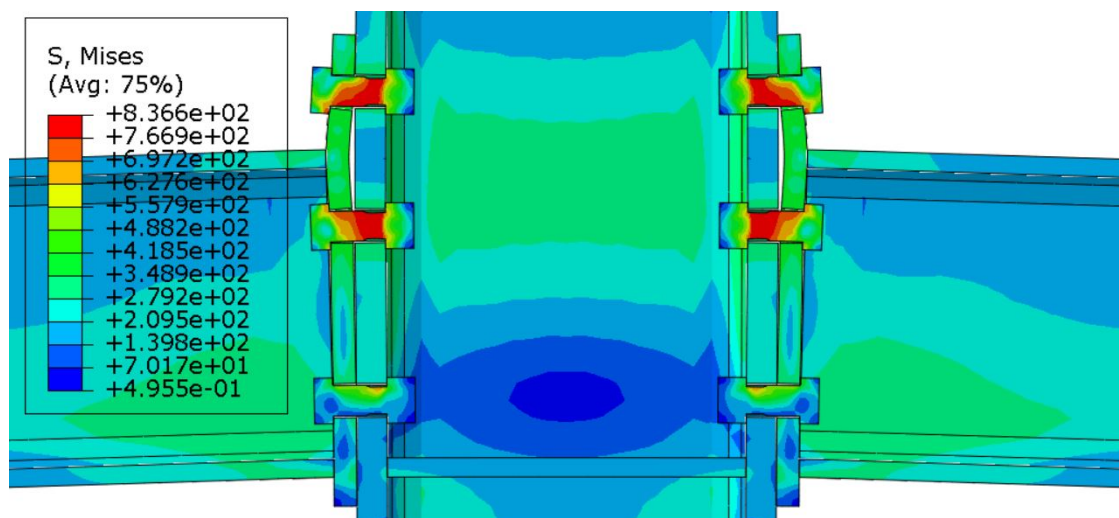
Tabell 7.3: Maksverdier for kraft med tilhørende forskyvning for QS-DLD-4, valideringsmodell og hovedmodell.

Knutepunkt	Kraft [kN]	Forskyvning [mm]
QS-DLD-4	311	29
Valideringsmodell	306	27
Hovedmodell	221	23

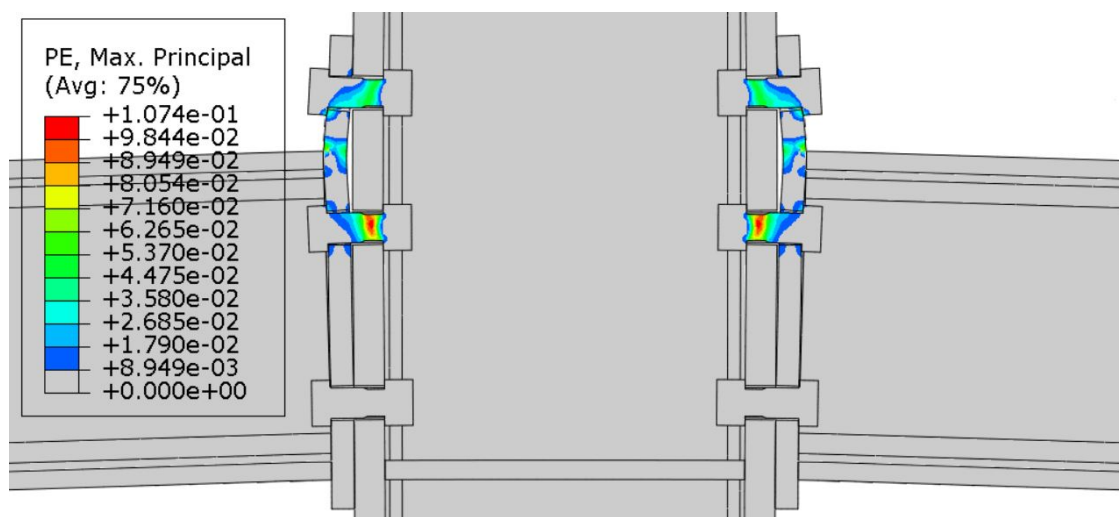
7.4.2 Sammenligning av bruddform

Grimsmo et al. rapporterte at knutepunktets avgjørende bruddform er strekkbrudd i skruer, kombinert med plastisk deformasjon i endeplaten. Det er hovedmodellen som er utarbeidet for bruk til kapasitetskontroll, og det er bruddformen i denne modellen som blir kontrollert. Figur 7.33 viser spenningsfordeling ved 23 mm forskyvning hvor spenningsene i knutepunkter er presentert i et fargeplott. I tillegg er det lagt inn et avskjæringsplan gjennom senter av skruene som gjør det mulig å se spenningsfordelingen i skrueskiftene. Her blir det synlig at de største spenningsene opptrer i skruene på strekksiden av forbindelsene. Begrensningen med en slik fremvisning av spenningsfordelingen i knutepunktet er at fargeplottet ikke er normalisert i forhold til flytegrensene til de forskjellige fasthetsklassene. Figur 7.34 viser plastisk tøyning i knutepunktet ved 23 mm forskyvning med fargeplott og områdene som ikke opplever plastisk tøyning er presentert i grått. Figuren viser tydelig at det har oppstått permanent deformasjon i både strekkpåkjennte skruer og endeplate som følge av plastisk tøyning. Deformasjonene i begge figurene er normalisert. Disse sett

i sammenheng med hvor plastisk tøyning og de største spenningene opptrer, er det rimelig å si at brudd i skruer i strekksonen med plastisk tøyning i endeplaten er den avgjørende bruddformen for FEM-modellen.



Figur 7.33: Spenninger i knutepunktet ved 23 mm forskyvning av søylen. Skjermdump fra ABAQUS.



Figur 7.34: Plastisk tøyning i knutepunktet ved 23 mm forskyvning av søylen. Skjermdump fra ABAQUS.

7.5 Kapasitet etter NS-EN 1993-1-8

Her presenteres resultatene fra kapasitetsundersøkelsene av knutepunktet beskrevet i kapittel 5 etter komponentmetoden i Eurokode 3. I FEM-modellen ble det benyttet karakteristiske materialverdier uten partialfaktorer for materialene siden partialfaktorene ble tenkt plassert på belastningsiden. Derfor er det valgt å gjennomføre beregninger uten partialfaktorer for direkte sammenligning mot de numeriske beregningene, samt beregninger med partialfaktorer for å fastsette knutepunktets dimensjonerende kapasitet slik den bestemmes etter Norsk standard. Detaljerte beregninger uten partialfaktorer er vist i vedlegg B og beregninger med partialfaktorer er vist i vedlegg C.

7.5.1 Bruddform og momentkapasitet

Kapasitet for hver av basiskomponentene i forbindelsen som er styrende for momentkapasiteten er presentert i henholdsvis tabell 7.4 og 7.5. Her betraktes skruerad 1 og 2 hver for seg og som gruppe, og den avgjørende bruddformen for bøyning av søyleflens og endeplate idealisert som T-stykker presentert i parentes.

Tabell 7.4: Kapasitet uten partialfaktorer for basiskomponentene i forbindelsen.

Basiskomponent	Rad 1 [kN]	Rad 2 [kN]	Gruppe [kN]
Søyleflens påkjent av bøyning	226 (3)	226 (3)	427 (2)
Søylesteg påkjent av tverrgående strekk	654	654	904
Endeplate påkjent av bøyning	177 (2)	207 (2)	384 (2)
Bjelkesteg påkjent av strekk	-	553	553

Tabell 7.5: Kapasitet med partialfaktorer for basiskomponentene i forbindelsen.

Basiskomponent	Rad 1 [kN]	Rad 2 [kN]	Gruppe [kN]
Søyleflens påkjent av bøyning	181 (3)	181 (3)	362 (3)
Søylesteg påkjent av tverrgående strekk	623	623	861
Endeplate påkjent av bøyning	149 (2)	180 (2)	330 (2)
Bjelkesteg påkjent av strekk	-	527	527

Ved sammenligning av basiskomponentene blir det klart at endeplaten er det svakeste punktet i forbindelsen, og at det er bruddform 2 slik som vist på figur 3.6 som vil være avgjørende. Denne bruddformen stemmer overens med hva som ble rapportert av Grimsmo et al. [20] og bruddformen til FEM-modellen utarbeidet i denne oppgaven. Beregning med eller uten partialfaktorer ser heller ikke ut til å endre den avgjørende bruddform for knutepunktet. Med utgangspunkt i de avgjørende verdiene for kapasiteten av endeplatene som vist i tabell 7.4 og 7.5, beregnes forbindelsens momentkapasiteten til å være 60.8 kNm uten partialfaktorer, og 52.1 kNm med partialfaktorer.

7.5.2 Stivhetskoeffisienter og rotasjonsstivhet

Beregning av stivhet avhenger kun av nominelle geometriske verdier, og blir ikke påvirket av partialfaktorene for materialene. Stivhetskoeffisientene tilhørende en av forbindelsene til knutepunktet er listet opp i tabell 7.6. Høy verdi gir større stivhet i forbindelsen. Søylesteget er avstivet i trykksonen med en tverrstiver og bidrar ikke til å redusere stivheten. Initialrotasjonsstivheten til forbindelsen ble beregnet til å være 22985 kNm/rad.

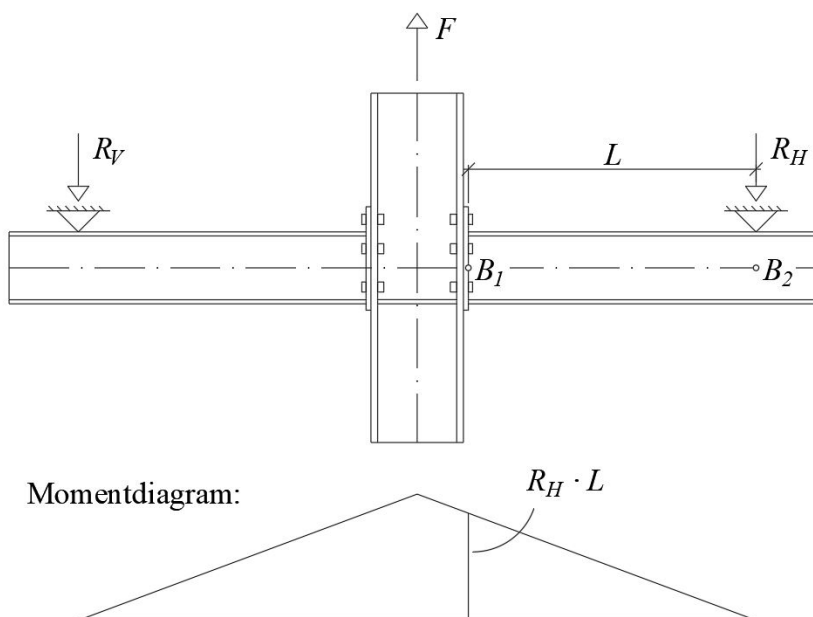
Tabell 7.6: Stivhetskoeffisienter [mm].

Søylesteg påkjent av trykk	k_2	∞
Søylesteg påkjent av strekk (rad 1)	$k_{3,1}$	5,9
Søylesteg påkjent av strekk (rad 2)	$k_{3,2}$	5,9
Søyleflens påkjent av bøyning (rad 1)	$k_{4,1}$	16,8
Søyleflens påkjent av bøyning (rad 2)	$k_{4,2}$	16,8
Endeplate påkjent av bøyning (rad 1)	$k_{5,1}$	11,9
Endeplate påkjent av bøyning (rad 2)	$k_{5,2}$	5,9
Skruer påkjent av strekk (rad 1)	$k_{10,1}$	6,2
Skruer påkjent av strekk (rad 2)	$k_{10,2}$	6,2

7.6 Sammenligning av analytiske og numeriske resultater

7.6.1 Moment-rotasjon-relasjon

I litteraturstudiet ble det presentert oppbygning av et ensidig delvis momentstivt knutepunkt hvor målet var å produsere en FEM-modell for fastsetting av knutepunktets moment-rotasjon-relasjon [28]. I artikkelen ble det vist en metode for å hente ut momentet i forbindelsen og den tilhørende rotasjonen ved å eliminere rotasjonene forårsaket av elastisk bøyning av bjelken og søylen som forbindes i knutepunktet. I denne oppgaven er metoden modifisert og anvendt til å hente ut moment-rotasjon-relasjonen til FEM-modellen i ABAQUS. Knutepunktet i denne oppgaven er tosidig, og det tas utgangspunkt i høyre forbindelse ved utledning av moment-rotasjon-relasjonen. Beregning av momentet i forbindelsen gjøres ved å multiplisere opplagerkraften i høyre opplager, med lengden mellom opplager og endeplate, som vist i figur 7.35. Dermed kan momentet i forbindelsen uttrykkes som i formel 7.8.



Figur 7.35: Beregning av moment i høyre forbindelse [8].

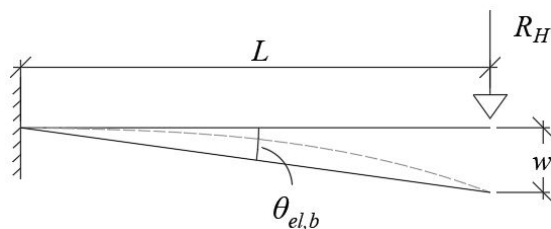
$$M_j = R_H \cdot L \quad (7.8)$$

Knutepunktets oppbygning og belastning gjør at de opptredende momentene i hver av knutepunktets forbindelser vil være tilnærmet like men virke i motsatt retning av hverandre. Resultatet gjør at det ikke oppstår nevneverdig skjærdeformasjon i søylesteget eller elastisk bøyning av søylen som vil bidra til rotasjon i knutepunktet. Beregning av rotasjonsvinkelen, ϕ_j , mellom senterlinjene til søylen og bjelken på høyre side kan derfor sies å være lik rotasjonen i selve forbindelsen. Med utgangspunkt i formel 7.5, kan rotasjonen uttrykkes som i formel 7.9.

$$\phi_j = \arctan\left(\frac{V_{B1} - V_{B2}}{L}\right) - \theta_{el,b} \quad (7.9)$$

Her er V_{B1} og V_{B2} vertikal forskyvning av punktene B_1 og B_2 . Bjelken er ikke uendelig stiv, og deler av forskyvningen i søylen vil bidra til å bøye bjelken slik som vist på figur 7.36. Rotasjonen

som følge av denne bøyningen kan utledes slik som vist i formel 7.10 [23]. I dette uttrykket settes arealtreghetsmomentet til bjelken lik $I_b = 25.1 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$ [23].



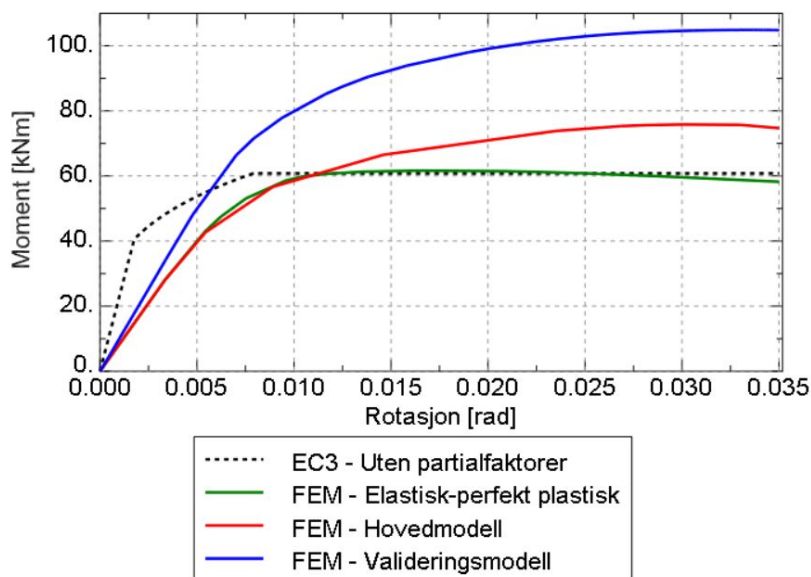
Figur 7.36: Statisk modell for nedbøyning av bjelke [8].

$$\theta_{el,b} = \arctan\left(\frac{w}{L}\right) = \arctan\left(\frac{R_H L^2}{3EI_b}\right) \quad (7.10)$$

Ved å legge uttrykket for bjelkerotasjon inn i formel 7.9, vil den endelige rotasjonen i knutepunktet være som vist i formel 7.11.

$$\phi_j = \arctan\left(\frac{V_{B1} - V_{B2}}{L}\right) - \arctan\left(\frac{R_H L^2}{3EI_b}\right) \quad (7.11)$$

I uttrykket er både vertikalforskyvningene og opplagerkraften variabler som endres med belastningstiden. I starten av analysen er forskyvningen og dermed også kraften lik null, og det er ingen rotasjon i forbindelsen. Som beskrevet i kapittel 6.4 blir både hovedmodell og valideringsmodell sammenlignet med kapasitetsberegningene etter NS-EN 1993-1-8 uten partialfaktorer. I sensitivitetstudiet ble det gjennomført en FEM-analyse med elastisk-perfekt plastiske materialegenskaper med karakteristiske verdier. Moment-rotasjonskurvene fra disse testene er også interessante å undersøke siden Eurokoden i hovedsak neglisjerer virkningen av fastning av materialet i kapasitetsformlene.



Figur 7.37: Sammenligning av moment-rotasjon-relasjon. Skjermdump fra ABAQUS.

7.6.2 Momentkapasitet

Den normative dokumentasjonen viser til at partialfaktoren for materialet skal legges til på belastningsiden ved bruk av FEM til kapasitetsundersøkelser. Dersom man benytter en lastforstørrelsesfaktor direkte mot momentbelastningen i knutepunktet, og setter den lik materialfaktoren for strekkpåkjennte tverrsnittsdeler, vil den maksimale dimensjonerende lastvirkningen kunne utledes som vist i formel 7.12.

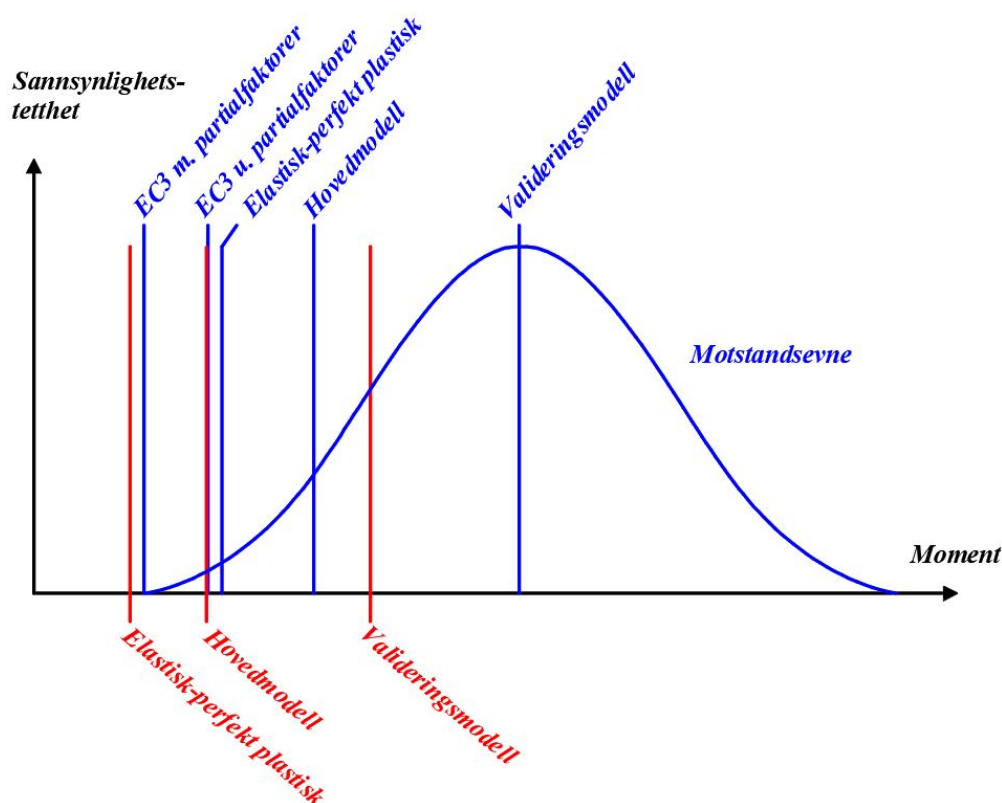
$$M_{j,Rk} = M_{j,Ed} \cdot \gamma_{M2} \rightarrow M_{j,Ed} = \frac{M_{j,Rk}}{\gamma_{M2}} \quad (7.12)$$

I tabell 7.7 er momentkapasitet beregnet med de tre FEM-modellene uten partialfaktorer og maksimal lastvirkning med partialfaktor som vist i formel 7.12. Beregnet momentkapasitet med og uten partialfaktorer etter Eurokode 3 er også listet opp.

Tabell 7.7: Sammenligning av beregnet moment med og uten partialfaktorer.

Analyse	Uten partialfaktor [kNm]	Med partialfaktor [kNm]
FEM (Valideringsmodell)	104.8	83.8
FEM (Hovedmodell)	75.8	60.6
FEM (Elastisk-perfekt plastisk)	62.7	50.2
Eurokode 3	60.9	52.1

Figur 3.1b presenterer en sannsynlighetsfordeling for motstandsevne med middelerdi og karakteristisk verdi. Med utgangspunkt i denne er verdiene i tabell 7.7 presentert i en fiktiv fordeling vist på figur 7.38. Denne er kun ment for å illustrere fordelingen av de beregnede momentene, og bygger ikke på en virkelig sannsynlighetsfordeling for knutepunktets motstandsevne.

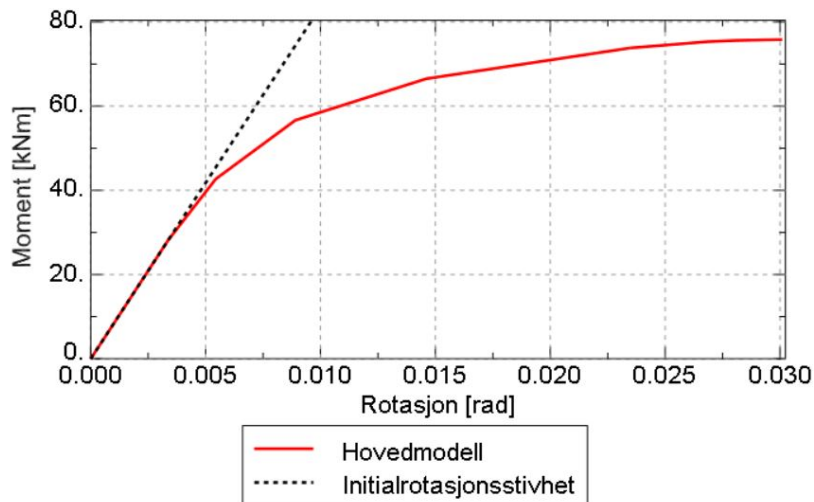


Figur 7.38: Beregnet motstandsevne og lastvirkning presentert i en sannsynlighetsfordeling [8].

Alt markert i blått representerer motstandsevne i form av momentkapasitet, og det markert i rødt representerer lastvirkningene. Valideringsmodellen er tilegnet materialmodeller rapportert av Grimsmo et al. [21] som bygger på testspesifikke materialverdier som er mest representative som middelveidier. Valideringsmodellen er utarbeidet for å gjenskape oppførselen observert i eksperimentet rapportert av Grimsmo et al. [20], og momentkapasiteten utledet fra denne modellen anses her å være representativ som middelveidien for knutepunktets motstandsevne. Samtidig anses karakteristisk kapasitet beregnet etter Eurokoden å være 5% fraktilen, og dimensjonerende kapasitet etter Eurokoden er valgt som den nedre grensen i fordelingen.

7.6.3 Initialrotasjonsstivhet

I henhold til Eurokode 3 er initialrotasjonsstivheten til knutepunktet gjeldende for det elastiske området i moment-rotasjon-relasjonen. Settes initialrotasjonsstivheten lik stigningen av det lineær-elastiske området på moment-rotasjonskurven for hovedmodellen slik som vist på figur 7.39, kan den beregnes til å være 8355 kNm/rad. Initialrotasjonsstivhetene beregnet etter numerisk og analytisk metode er listet opp i tabell 7.8.

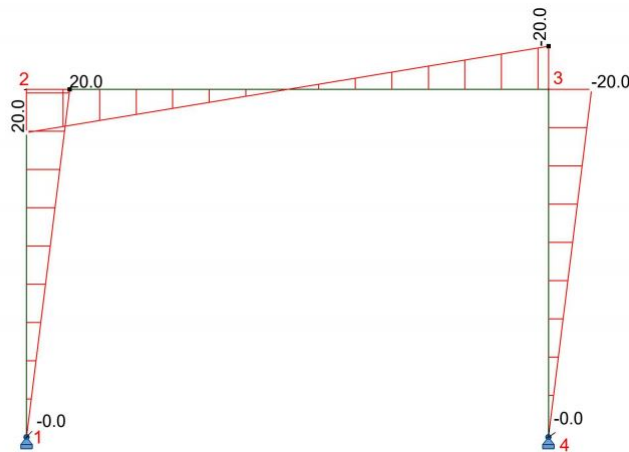


Figur 7.39: Moment-rotasjon-relasjon med idealisert metode for uthenting av forbindelsens initialrotasjonsstivhet. Skjermdump fra ABAQUS.

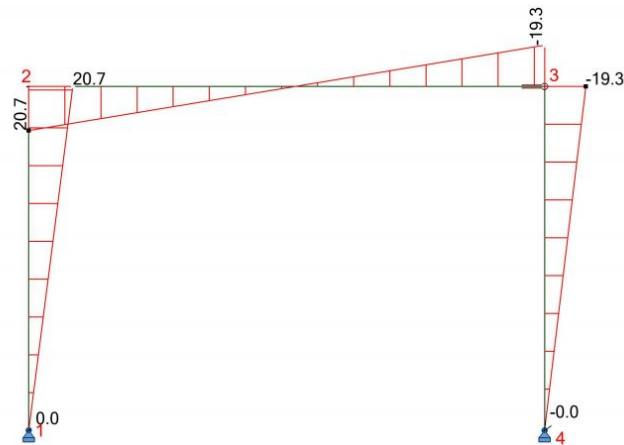
Tabell 7.8: Sammenligning av beregnet initialrotasjonsstivhet.

Analyse	Initialrotasjonsstivhet [kNm/rad]
FEM (Hovedmodell)	8355
Eurokode 3	22985

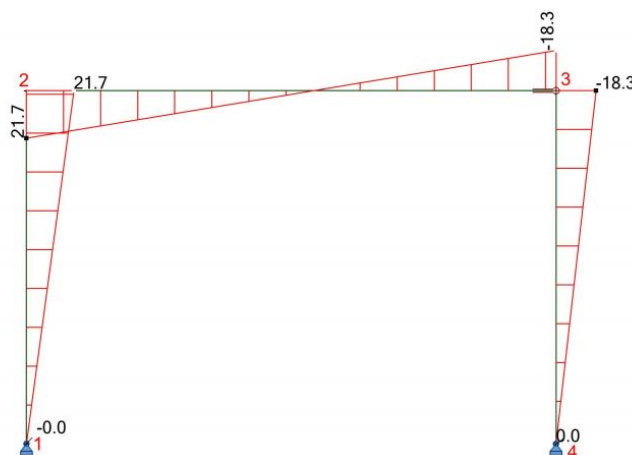
For å illustrere hvordan et knutepunktets rotasjonsstivhet kan påvirke lastvirkningen i en ramme-konstruksjon, er det valgt å gjøre en parametrisert lineær-elastisk analyse av en enkel statisk ubestemt ramme med beregningsprogrammet Autodesk Robot. Resultatet presenteres som momentdiagrammer for rammen med de forskjellige rotasjonsstivhetene. Momentdiagram for rammen med kun bøyestive rammehjørner er vist i figur 7.40, og momentdiagram fra analysene med initialrotasjonsstivhet etter analytisk og numerisk beregningsmetode er vist i henholdsvis figur 7.41 og 7.42. I den første analysen hvor begge rammehjørnene har bøyestive forbindelser, fordeler momentene seg likt. Sammenligning av alle momentdiagrammene viser at knutepunktene med større stivhet utsettes for større momentbelastninger.



Figur 7.40: Momentdiagram [kNm] for ramme med bøyestiv forbindelse i node 3. Skjermdump fra Autodesk Robot.



Figur 7.41: Momentdiagram [kNm] for ramme med initialrotasjonsstivhet beregnet etter Eurokode 3. Skjermdump fra Autodesk Robot.



Figur 7.42: Momentdiagram [kNm] for ramme med initialrotasjonsstivhet beregnet med FEM (hovedmodell). Skjermdump fra Autodesk Robot.

8 | Diskusjon

Relevant normativ dokumentasjon som er undersøkt i denne oppgaven er NS-EN 1993-1-5 tillegg C og DNV-RP-C208. Ingen av disse er utarbeidet direkte for bruk til kapasitetsundersøkelser av knutepunkter med skrueforbindelser, men gir likevel grunnleggende føringer for hvordan slike undersøkelser kan gjennomføres og dokumenteres for konstruksjonsdeler i stål. Tillegg C er kortfattet sammenlignet med DNV-RP-C208, men føringer gitt i begge dokumenter stemmer godt overens. Mye av informasjonen i denne dokumentasjonen viste seg nyttig i arbeidet med oppgaven.

Litteratursøket viser at FEM er en utbredt metode for å studere oppførselen til knutepunkter i stål med skrueforbindelser utsatt for en rekke forskjellige belastningsscenarier. Som en konsekvens av dette finnes det mye informasjon om hvordan FEM-modeller for slike konstruksjonsdeler blir utarbeidet. Her blir det kun undersøkt tre slike modeller, men alle har fellestrekk som her tolkes som en rød tråd for utarbeiding av FEM-modell av knutepunkter med skrueforbindelser og andre relaterte konstruksjonsdeler.

Eldre versjoner av både analyseprogrammet ABAQUS, brukermanualen til ABAQUS og DNV-RP-C208 er benyttet i denne oppgaven som følge av tilgjengelighet. Men med utgangspunkt i resultatene, virker det ikke som at dette medvirker til å redusere kvaliteten på det arbeidet som er gjort.

Gjennom arbeidet ble det utarbeidet en FEM-modell med utgangspunkt i føringene gitt i den normative dokumentasjonen og typisk oppbygning av knutepunkt med skrueforbindelser slik det fremgår av forskningsartiklene. Modellen fikk tilnavnet hovedmodell og var grunnlaget for modellene som ble produsert i forbindelse med sensitivitetsstudiene. Som en del av valideringen ble det også utarbeidet en valideringsmodell. I tillegg til hovedmodellen og valideringsmodellen ble det, i forbindelse med sensitivitetsstudiet, produsert 7 versjoner av hovedmodellen med endring i utvalgte parametere for å undersøke hvilken effekt disse har på analyseresultatet. Disse modellene er:

- Modell med eksplisitt løsningsmetode og masseskalering
- Modell med økt finhetsgrad av elementinndeling
- Modell inkludert sveisgeometri
- Modell inkludert opplager som stive skallgeometrier
- Modell med modifisert materialkurve for skruestål
- Modell med elastisk-perfekt plastiske materialkurver
- Modell med fullstendig geometri (ingen utnyttelse av speilsymmetri)

Den første av sensitivitetsstudiene er en undersøkelse av hvordan eksplisitt analyse påvirker analyseresultatet. Undersøkelsen viser at det hovedsaklig er to parametere som styrer validiteten av en kvasi-statisk analyse ved bruk av eksplisitt løsningsmetode: belastningstiden og masseskaleringen.

Her ble det, på grunn av mangel på tid, kun kontrollert en belastningsperiode med en masseskalering. Dette reduserer omfanget og kvaliteten på den gjennomførte studien betraktelig, og det er uklart om det er den valgte belastningstiden, masseskaleringen eller en kombinasjon av disse som gir de dynamiske virkningene i den innledende delen av belastningen. For et mer nøyaktig resultat med eksplisitt løsningsmetode bør det gjennomføres studier av et sett med belastningstider for å finne tiden som gir de minste dynamiske effektene. Deretter kan det gjennomføres en studie for å finne en masseskalering som reduserer analysetiden tilstrekkelig uten å redusere analysens validitet. Ved å undersøke kraft-forskyvningskurven til den eksplisitte analysen på figur 7.14 kan det observeres en spesielt taggete karakteristikk de første millimeterene med forskyvning. Dette skyldes antagelig differansen mellom skruehullens og skrueskaftenes diameter på 2 mm, og den dynamiske virkningen gjør at friksjonskontakten mellom søyleflenser og endeplater ikke opprettholdes. Dermed vil skruehullene i søylen og endeplatene bli slått mot skrueskaftet fra hver sin side over en forskyvning tilsvarende differansen mellom hull- og skaftdiameter. Utover i belastningsforløpet avtar de dynamiske effektene, og når det kommer til den maksimale kraften i søylen ved bruk av eksplisitt løsningsmetode samsvarer resultatet godt med hovedmodellen. Selv om analysen i denne oppgaven er mindre nøyaktig, blir det fortsatt klart at ved riktig fremgangsmåte kan det benyttes eksplisitt analysemetode for kapasitetsundersøkelser av knutepunktet dersom energikravet gitt i DNV-RP-C208 er innfridd.

Gjennomføring av parametriske studier for å finne en nøyaktig, men samtidig også beregningsmessig økonomisk elementinndeling, fremheves som en viktig del av modelleringsarbeidet av både den normative dokumentasjonen og forskningsartiklene. I denne oppgaven ble elementinndeling av geometrien rapportert av en tidligere mastergruppe valgt som utgangspunkt. Mastergruppen hadde, i likhet med Grimsmo et al., undersøkt knutepunktets faktiske oppførsel ved bruk av FEM, og gjennomførte en parameterstudie for å undersøke forskjellig finhetsgrad av elementinndeling for utvalgte deler. Elementinndelingen av bjelke og søyle fremstod grov sammenlignet med endeplate og skrue, og det ble i denne oppgaven valgt å gjennomføre en sensitivitetsstudie for å undersøke hvordan dette påvirket analysen. Finere elementinndeling av bjelke og søyle påvirket imidlertid analyseresultatet minimalt samtidig som analysetiden økte. Ved undersøkelse av deformasjonene som oppstår i knutepunktet ved maksimal kraft i søylen som vist på figur 7.34, blir det klart at søylen og bjelkene kun opplever minimale elastiske deformasjoner som igjen ikke krever tette elementkonsentrasjoner for å representeres med tilstrekkelig nøyaktighet.

Elementinndeling av mer avanserte geometrier som rundt skruehull, radien mellom steg og flens og selve skruene kan være utfordrende. Ved å kombinere celleinndeling av delene og manipulering av «Seed»-funksjonen i ABAQUS, kan det gjøres finjustering av elementinndelingen for utvalgte områder. Dette krever imidlertid at ingeniøren har god forståelse av hvordan elementene tildeles geometrien i analyseprogrammet som anvendes. Til tross for at modellen består av en rekke avrundede og sirkulære geometrier kunne elementtypen C3D8R brukes for alle deler, inkludert sveis. Dette illustrerer allsidigheten til denne elementtypen.

Knutepunkter med skrueforbindelser har en avansert sammensetning av kontaktflater som gjør definisjon av interaksjon til en viktig del av modelleringsarbeidet. Bruk av «General contact» viste seg å være den mest effektive måten å implementere mekanisk kontakt, men gjør at det kun kan defineres én type kontakt (utenom «Tie constraint») for hele modellen. Denne begrensningen har imidlertid liten betydning som følge av antagelsen om at de valgte kontaktegenskapene er representative for alle interaksjonene i modellen.

I hovedmodellen ble det lagt inn forenklede randbetingelser hvor bjelkeendene ble fastholdt mot vertikale forskyvninger. Det ble også gjennomført et sensitivitetsstudie hvor opplagerene ble modellert som stive deler med kontakt mot bjelkeflensene. Gjennom belastningsforløpet oppstod det større glidninger mellom kontaktflatene, og resulterte i lenger analysetid, jevnt over større kraft i

søylen og dermed høyere kapasitet. Selv om denne metoden for å implementere randbetingelsene mot bjelkene samsvarer bedre med hvordan eksperimentet rapportert av Grimsmo et al. ble gjennomført, kan det argumenteres for at ingen av metodene nødvendigvis gir de eksakte betingelsene for knutepunktet som del av en større konstruksjon. Det er mange faktorer som spiller inn, og randbetingelsene er kun en forenkling av virkeligheten for å gjøre problemstillingen håndgripelig.

En av de største tekniske forskjellene mellom FEM-modellene utarbeidet for bruk i forskning og FEM-modeller utarbeidet for dimensjoneringsmessige kapasitetsundersøkelser, er de beregningsmessige verdiene for materialegenskapene. I forskning blir modellene kalibrert og validert opp mot eksperimentelle resultater og det brukes testspesifikke materialverdier. Den normative dokumentasjonen viser derimot til at karakteristiske verdier skal brukes. Utover dette ble det klart at lineær elastisitet, von Mises flytekriterium med den tilhørende flyteregelen samt isotropisk fastning var representativ for oppbygning av materialmodeller til begge formål. Implementering av bruddkriterium ble antatt å ikke være nødvendig siden eksperimentet viste at brudd inntreffer en gitt forskyvning etter at maksimal kraft i søylen er oppnådd. Delen av belastningen mellom maks kraft og brudd er ikke interessant for kapasitetsundersøkelsen fordi den beskriver knutepunktets oppførsel etter at kapasiteten er nådd.

Under utarbeiding av hovedmodellen ble det valgt å bruke materialkurven for S355 presentert av DNV-RP-C208, men siden denne anbefalte praksisen ikke viste til kurver representative for skruestålet, ble det utarbeidet en egen kurve med lineær elastisitet frem til sann flytegrense uten flyteplatå, og lineær fastning frem til sann strekkfasthet. Blant usikkerhetsmomentene ved utarbeiding av denne kurven var tøyningen i stålet ved strekkfasthet. Verdien rapportert av Grimsmo et al. ga en indikasjon på hva denne kunne være, men siden de rapporterte materialegenskapene er mer representative for materialverdiens middelværdi, ble det valgt å undersøke tøyningen med andre metoder. Kravet om minste tøyning ved strekkfasthet i konstruksjonsstål ble brukt som utgangspunkt, selv om denne ikke er direkte ment for bruk på skruestål. Sensitivitetsstudiet viste imidlertid at forskjellen i de to tøyningene ga lite utslag på analyseresultatet.

Den normative dokumentasjonen åpner også for å bruke bi-lineære materialkurver, men DNV-RP-C208 presiserte at dette var hovedsaklig i situasjoner hvor knekking er avgjørende bruddform. NS-EN 1993-1-5 tillegg C har en mer simplifisert tilnærming til definisjon av materialkurver, og hovedtyngden av kurvene som blir foreslått er bi-lineære. Den mest konservative av disse er den elastisk-perfekt plastiske materialkurven. Som følge av at Eurokode 3 ikke hensyntar fastning av stålet i styrkeberegningene, var det interessant å undersøke hvordan disse materialkurvene ville påvirke analyseresultatet. Neglisjering av fastning i materialet medvirket til lavere momentkapasitet og mindre rotasjon i forbindelsen, og samsvarte dermed bedre med de analytiske beregningresultatene.

Analysetid kan være stor utfordring ved bruk av FEM til modellering av større og mer komplekse konstruksjonsdetaljer slik som knutepunkter med skrueforbindelser. Kompleksitet øker både analysetiden og muligheten for å gjøre feil i oppbygningen av modellen. Analysen må ofte gjennomføres før man finner eventuelle feil i input-dataene, og videre arbeid blir en iterativ prosess hvor endringer i modell og analyser gjøres om hverandre. Denne fremgangsmetoden øker antallet nødvendige analyser for å produsere et valid analyseresultat. Det kreves derfor, slik de normative dokumentene understreker, at konstruktøren har god kjennskap til FEM som analyseform slik at man kan ta de nødvendige grepene for å effektivisere analysetiden, uten at det går utover det endelige resultatet.

Analysens nøyaktighet og analysetid henger ofte sammen. Mange av modelleringsvalgene som er gjort for FEM-modellene i forskningsartiklene er med på å drive analysetiden opp siden målet er en mest mulig nøyaktig representasjon av knutepunktets eller knutepunkt-delens oppførsel. Målet med kapasitetsundersøkelser i dimensjoneringsammenheng er å kunne med tilstrekkelig sikkerhet

fastslå at den faktiske kapasiteten til en konstruksjon eller konstruksjonsdel ligger på eller over den beregnede kapasiteten. Samtidig vil det i et byggeprosjekt bli satt av en begrenset mengde ressurser til de forskjellige arbeidsoppgavene som må gjennomføres, og tid er ofte en styrende faktor. Derfor vil det være hensiktsmessig å legge mer vekt på å redusere analysetiden for å effektivisere modelleringsprosessen enn å utarbeide en mest mulig nøyaktig FEM-modell. Modellen må fortsatt være i stand til å produsere representative resultater, men tidsbesparende tiltak bør implementeres dersom det kan bevises at disse fører resultatet mot sikker side, eller har minimal påvirkning på analysen.

I alle forskningsartiklene undersøkt i denne oppgaven er utnyttelse av speilsymmetri benyttet for å effektivisere analyseprosessen, men metoden begrenser også analysens omfang ved at man forhindrer enkelte bruddformer i å kunne opptre. Ved å dele knutepunktet langs symmetriaksen er det ikke mulig å kontrollere knekking av hverken søylesteget eller bjelkesteget siden disse er fastholdt i symmetriplanet av randbetingelsene. Antagelig er dette også bakgrunnen for at Grimsmo et al. valgte å implementere tverrstivere i den trykkpåkjennte delen av søylesteget i eksperimentet. I sensitivitetstudiet ble det gjennomført en analyse av knutepunktet med fullstendig geometri, og resultatet viste liten forskjell fra modellen med anvendelse av speilsymmetri samtidig som analysetiden økte kraftig. Basert på dette kan det antas at utnyttelse av knutepunktets symmetri er et godt metode for å effektivisere analysetiden dersom det kan påvises at den kritiske bruddformen skyldes strekkbelastning og ikke knekking.

En svakhet ved utarbeiding av modellen kan være bruk av kraft-forskyvningskurven som sammenligningsgrunnlag i sensitivitetstudiene og validering istedenfor moment-rotasjon-relasjonen. Kraft-forskyvning av søylen ble brukt på grunn av at denne relasjonen enkelt kan hentes ut av ABAQUS og sammenlignes, i tillegg til at knutepunktets rapporterte oppførsel fra eksperimentet QS-DLD-4 er presentert i en slik kurve. Momentet er direkte knyttet til kraften i søylen, og endring i kraft tilsvarende endring i moment. Fra moment-rotasjonskurvene vist i figur 7.37 kommer det frem at valideringsmodellen har en større initialrotasjonsstivhet enn hovedmodellen. Ved sammenligning av kraft-forskyvningskurvene til de samme modellene i figur 7.32 blir det klart at valideringsmodellen, som har høyere rotasjonsstivhet, tar opp en større last i søylen helt fra begynnelsen av belastningsforløpet. Med bakgrunn i resultatet fra den forenklede rammeanalysen hvor større rotasjonsstivhet tiltrekker mer last, kan sammenligning av kraft-forskyvningskurver også brukes til å evaluere forskjell i rotasjonsstivhet til knutepunkter selv om den ikke undersøkes direkte.

Valideringsprosessen viser at hovedmodellen er i stand til å produsere samme bruddform som er observert i eksperimentet gjennomført av Grimsmo et al. Det elastiske området av kraft-forskyvningskurven samsvarer godt med eksperimentet samtidig som det plastiske området ligger på sikker side både for kraft i søylen og forskyvning ved maksimal kraft. Med bakgrunn i at eksperimentelle data for knutepunktet var tilgjengelig, ble det valgt å undersøke om hovedmodellen kunne reprodusere kraft-forskyvningskurven fra eksperimentet ved å gjøre justeringer av enkelte parametere. Valideringsmodellen inkluderte sveis- og opplagergeometri, samt flytegrenser og fastningskurver utarbeidet av Grimsmo et al. som var tilpasset eksperimentet. Resultatet er en kraft-forskyvningskurve med samme karakteristikk som kurven fra FEM-modellen utarbeidet og rapportert av Grimsmo et al. Kurven treffer godt på maksimal kraft i søylen, men overestimerer kraften i deler av belastningsforløpet. Dette viser at modellen kan produsere en kraft-forskyvningskurve som gir representative verdier for maksimal kraft i søylen, og forsterker påstanden om at forenklingene og endringene som er gjort i hovedmodellen fører resultatet mot sikker side uten å radikalt endre knutepunktets oppførsel.

Ved beregning av knutepunktets momentkapasitet etter Eurokode 3 ble det antatt at kun skruerad 1 og 2 tar opp strekkrefter og at skruerad 3 vil være på trykksiden av belastningen og dermed kun ta opp skjærkrefter. Figur 7.33 viser at også skruerad 3 i hovedmodellen utsettes for strekkspenninger

og vil dermed bidra til økt momentkapasitet, men er langt fra å være like belastet som de øvrige skrueradene. Dette tyder på at selv om forenklingene som gjøres i de analytiske beregningene fører kapasiteten mot sikker side, samsvarer ikke nødvendigvis denne forenklingen med knutepunktets oppførsel. Som vist i kapittel 6.3.2 er det kun skrue og sveis påkjent av strekk hvor strekkfasthet er dimensjonerende verdi for bestemmelse av komponentens kapasitet. For de resterende komponentene som undersøkes, inkludert komponentene som idealiseres som T-stykker etter metoden i kapittel 6.3.1, er det materialets flytegrense som er dimensjonerende. Partialfaktorene som omfatter materialene innarbeidet i de analytiske kapasitetsformlene varierer også i størrelse for de forskjellige basiskomponentene. Som vist i kapittel 3.2 og 6.3.2 skal partialfaktoren $\gamma_{M0} = 1.05$ brukes for komponenter som utgjør deler av søyle, bjelke eller endeplate, og partialfaktoren $\gamma_{M2} = 1.25$ brukes for skrue og sveis påkjent av strekk. Det vil si at komponentene som tillattes å utnytte kapasitet utover plastisk tøyning og opp til komponentens strekkfasthet, også får den største kapasitetsreduksjonen ved bruk av partialfaktorer.

Ifølge den normative dokumentasjonen kan bruk av partialfaktorer på kapasitetssiden bidra til avvikende og urealistisk materialoppførsel. Dermed bør partialfaktorene for materialene legges til på belastningssiden, og det vises til flere metoder å gjøre dette på. NS-EN 1995-1-5 tillegg C viser til at en lastreduksjonsfaktor som inneholder parametere for å dekke usikkerhet ved modell og materialegenskaper. Den varierende bruken av partialfaktorer i de analytiske beregningene gjør det også vanskelig å inkludere partialfaktorene på en tilstrekkelig måte ved bruk av FEM som analysemetode. I denne oppgaven ble det kun brukt partialfaktor for komponenter utsatt for strekkbrudd til å undersøke reduksjon i dimensjonerende lastvirkning. Faktoren som skal dekke usikkerhet ved selve FEM-modellen og kan utledes fra tillegg D i NS-EN 1990, ble ikke undersøkt. Likevel blir det ansett at metoden brukt i denne oppgaven er tilstrekkelig for å illustrere hvordan partialfaktoren kan brukes til å øke momentbelastningen. Som følge av at partialfaktorene ikke skal benyttes ved beregning av knutepunktets motstandsevne ved bruk av FEM, ble momentkapasitet bereget etter Eurokoden gjennomført både med og uten partialfaktorer. Dermed kunne det gjennomføres sammenligning av moment-rotasjonskurver med karakteristiske verdier, samtidig som at den dimensjonerende momentkapasiteten etter Eurokode 3 kan brukes som et grunnlag for hvilken sikkerhet som er iboende i metodene etter Norsk standard.

Moment-rotasjonskurver kan ikke hentes ut direkte fra ABAQUS, men krever en sammensetning av plot for forskyvninger og kraft. I litteraturstudiet ble det presentert en metode for å hente ut moment og tilhørende rotasjon for et ensidig knutepunkt i analyseprogrammet ANSYS. I denne oppgaven ble det valgt å modifisere metoden for bruk på et tosidig knutepunkt. Selve momentet kan enkelt hentes ut, men den tilhørende rotasjonen er mer komplisert. Belastningen i knutepunktet gir likt men motsatt rettet moment i forbindelsene, og det oppstår dermed ikke skjærdeformasjoner i søylesteget som bidrar med rotasjon i forbindelsen. Av samme grunn ble det heller ikke ansett å være opptredende elastisk bøyning av betydning i søylen. Rotasjonen som følge av momentpåkjenningene i knutepunktet ble derfor kun utledet med utgangspunkt i vertikale forskyvninger og elastisk bøyning i bjelken. De variable kvantitetene som var nødvendige for å beregne rotasjonen lot seg enkelt hente ut av ABAQUS.

Ved sammenligning av moment-rotasjon-relasjonen til de forskjellige FEM-modellene og beregningen etter Eurokoden, kommer det tydelig frem at den numeriske metoden tilater en vesentlig større rotasjon i forbindelsen før momentkapasiteten er nådd. I tillegg er momentkapasiteten generelt sett større og stivheten mindre ved bruk av FEM. Det er først ved bruk av elastisk-perfekt plastiske materialkurver at momentkapasiteten er sammenlignbar med kapasiteten beregnet etter Eurokoden.

Det er også en forskjell mellom rotasjonsstivheten til hovedmodellen og valideringsmodellen i det elastiske området av moment-rotasjonskurvene. Som følge av at begge modellene har like elastiske

egenskaper, virker det sannsynlig at denne forskjellen kommer av inkludering av sveisens og opplagerenes geometri i valideringsmodellen. Sett i lys av resultatene fra sensitivitetsstudiene blir det tydelig at forenklingene i hovedmodellen reduserer både forbindelsenes momentkapasitet og rotasjonsstivhet. Det ble også gjennomført analyser av en horisontalt belastet statisk ubestemt ramme hvor formålet var å illustrere hvordan initialrotasjonsstivheten til en forbindelse kan påvirke lastfordelingen i en rammekonstruksjon. Oppbygningen av rammen er svært enkel med kun to leddlager, tre staver og to rammehjørner. Selv om initialrotasjonsstivheten beregnet for hovedmodellen og Eurokode 3 er benyttet i rammeanalysen, er ikke rammehjørnene representative for knutepunktets oppbygning eller belastning. Dette antas likevel ikke å være av betydning som følge av at formålet med analysen er mer generelt. Ettersom rotasjonsstivheten i det venstre rammehjørnet ble redusert, ble også mer av momentbelastningen overført til det høyre rammehjørnet som fortsatt var bøyestivt. Dette indikerer at forbindelser med høy rotasjonsstivhet tiltrekker seg mer last og vil få en større belastning enn forbindelser med lavere rotasjonsstivhet. På dette grunnlaget kan det sies at overestimering av knutepunktets rotasjonsstivhet også vil trekke mer last til knutepunktet. Ved en isolert undersøkelse av knutepunktets styrke vil dette være konservativt. Inkludering av sveisens geometri i modellen kan på dette grunnlaget være problematisk. Sensitivitetsstudiet viser at sveisen bidrar til økt momentkapasitet som trekker resultatet bort fra sikker side, samtidig som den øker stivheten i forbindelsen som bidrar til større belastning. Det fremkommer likevel at økning i momentkapasitet som følge av sveisen har større påvirkningskraft enn den økte stivheten, og å utelate sveisens geometri i modelleringsarbeidet kan fortsatt anses å være konservativt.

Både NS-EN 1993-1-5 tillegg C og DNV-RP-C208 viser til hva som bør inngå i dokumentasjonen av kapasitetsundersøkelsen, og felles for dem er at dokumentasjonen skal være så omfattende at undersøkelsen skal kunne gjenskapes av en uavhengig tredjepart, forutsatt at parten har tilstrekkelig kompetanse innen konstruksjonsanalyse og FEM som analyseform, samt er i besittelse av aktuell programvare. Generelt bør dokumentasjonen av kapasitetsundersøkelsen bestå av følgende: hva som undersøkes og hvorfor, modellens geometri og oppbygning, materialmodellenes oppbygning, resultatene av analysene med beregnede kapasiteter og sensitivitetsstudier og andre kontrollaktiviteter som understøtter valgene som er gjort i modelleringsarbeidet.

9 | Konklusjon

Målet med denne oppgaven var å undersøke hvordan kapasiteten til momentoverførende knutepunkter med skrueforbindelser kan kontrolleres og dokumenteres ved bruk av FEM-modellering slik at sikkerheten mot brudd er ivaretatt. En litteraturstudie som omfattender relevant normativ dokumentasjon og forskningsartikler er gjennomført, og et knutepunkt er undersøkt med numeriske og analytiske beregningsmetoder. Resultatene sett i lys av problemstillingen og forskerspørsmålet med tilhørende underspørsmål danner grunnlag for følgende konklusjon.

Hvilke føringer legges for bruk av FEM til kapasitetsundersøkelser av relevante normative dokumenter?

Med normative dokumenter menes standarder, veiledninger og anbefalt praksis. Dokumentene som er undersøkt i denne oppgaven er NS-EN 1993-1-5 tillegg C, en kortfattet veiledning for bruk av FEM til kapasitetsundersøkelser av platekonstruksjoner, og DNV-RP-C208, en anbefalt praksis for bruk av ikke-lineær FEM-analyse til kapasitetsundersøkelser av konstruksjonsdeler, og er rettet mot offshoreindustrien. Begge dokumentene åpner for bruk av ikke-lineære FEM-analyser til kapasitetsundersøkelser av konstruksjonsdeler i stål ved bruddgrensetilstand, men understreker at programvaren som anvendes skal være godt egnet til formålet og at konstruktøren bør ha tilstrekkelig kompetanse innen FEM og ikke-lineære analyser. I likhet med analytiske beregningsmetoder benyttes karakteristiske materialverdier og nominelle geometriske verdier, men partialfaktor for materialene legges til på belastningssiden fremfor å redusere motstandsevnen. Sensitivitetsstudier og andre relevante kontrollaktiviteter er en helt essensiell del av modelleringsarbeidet for å kvalitetssikre modellen og understøtte valg som gjøres i modelleringsarbeidet. DNV-RP-C208 er mer utfyllende, og viser til at både implisitt og eksplisitt løsningsmetode kan anvendes. Den anbefalte praksisen sier også at validering bør gjøres ved sammenligning mot standardisert løsning av et lignende problem, mot eksperimentelle resultater eller ved at alle parametere velges slik at resultatet føres mot sikker side.

Hvordan utarbeides FEM-modeller for undersøkelser av knutepunkter med skrueforbindelser innen forskning?

Innen forskning brukes FEM-modellering av knutepunkter for å undersøke et bredt spekter av problemer. Selv om det ikke foreligger spesifikke føringer for hvordan FEM-modeller av knutepunkter skal utarbeides, har den kumulative effekten av forskningsprosessen bidratt til at det finnes mye informasjon og gode retningslinjer for utarbeiding av FEM-modeller til undersøkelse av knutepunkter. Fellestrekkene ved FEM-modellene som utarbeides i forskningssammenheng er modellering, kalibrering og validering etter utførte eksperimentelle tester med mål om å gjenskape den observerte oppførselen til knutepunktet som studeres for deretter å gjennomføre mer omfattende undersøkelser som vanskelig lar seg gjøre eksperimentelt. Oppbygningen av modellene gjøres derfor med testspesifikke materialverdier, og kalibrerings- og valideringsprosessen gir den ferdige FEM-modellen stor grad av nøyaktighet for det spesifikke tilfellet som studeres. Hvor avanserte modellene er, henger tett sammen med kompleksiteten av problemene som undersøkes. Dette, kombinert med implemen-

tering av sofistikerte matematiske modeller for simulering av kompleks materialoppførsel, vitner om et høyt kompetansenivå innen forskningsmiljøet.

Hvordan samsvarer beregnet styrke og stivhet fra de numeriske analysene av knutepunktet med resultatene fra analytiske beregningsmetoder etter Eurokode 3? Er det avvik og hva er betydningen av avviket?

Ved sammenligning av moment-rotasjon-relasjonen til FEM-modellene utarbeidet i denne oppgaven og fra beregningene etter Eurokoden, kommer det tydelig frem at den numeriske metoden gir knutepunktet større momentkapasitet, lavere stivhet og tillater en vesentlig større rotasjon i forbindelsen før momentkapasiteten er nådd. Dermed er det generelt lite samsvar mellom beregnet stivhet og styrke ved sammenligning av de forskjellige analysemetodene. Det er først ved bruk av alternative materialmodeller som neglisjerer økningen i motstandsevne som følge av plastiske effekter, at momentkapasiteten har godt samsvar med kapasiteten beregnet etter Eurokoden. Momentkapasiteten beregnet med FEM-modellen utarbeidet for å simulere den observerte oppførselen til knutepunktet viser at de analytiske beregningene har en betydelig konservativ tilnærming til knutepunktets styrke. Den beregnede stivheten etter Eurokoden er vesentlig høyere enn ved bruk av FEM. Høyere stivhet trekker mer last til knutepunktet, og dermed kan det også her antydes at Eurokoden er konservativ. Samtidig kan det antydes at den numeriske metoden underestimerer knutepunktets stivhet. Dette kan føre til at knutepunktet blir underbelastet i en global rammenanalyse.

Hvordan kan FEM-analyser benyttes til å kontrollere og dokumentere kapasiteten til momentoverførende knutepunkter i stål?

Ved anvendelse av FEM til kontroll av knutepunktets kapasitet skiftes formålet med analysen fra å gjenskape den observerte oppførselen til knutepunktet slik det gjøres i forskning, til å fastsette en generell kapasitet med tilstrekkelig sikkerhet mot brudd. Relevante normative dokumenter bør være styrende for modelleringsarbeidet slik at det kan bevises gjennom dokumentasjon at modellen innehar tilstrekkelig sikkerhet mot statistiske variasjoner og andre usikkerhetsmomenter knyttet til materialer, geometri og belastning. Det er også knyttet usikkerhet til selve FEM-modellen, og gjennomføring av nødvendige kontrollaktiviteter er avgjørende for å eliminere tvil rundt modellens oppbygning. Samtidig åpnes det for å gjøre forenklinger i modelleringsprosessen dersom det kan bevises at endringene styrer kapasiteten mot sikker side. Slike endringer er utfordrende ved undersøkelse av momentoverførende knutepunkter fordi virkningene kan gi motstridende utslag på sikkerheten knyttet til knutepunktets stivhet og styrke. Ikke-lineære forhold for materialer, geometri og kontakt er avgjørende for en representativ simulering av knutepunktets oppførsel, og krever at FEM-analysen er ikke-lineær. Konstruktøren er ansvarlig for at den utarbeidede modellen er representativ for knutepunktet som undersøkes og kan produsere pålitelige resultater. I tillegg til grunnleggende ingeniørfaglige og konstruksjonsmessige ferdigheter, krever derfor bruk av FEM som dimensjoneringsverktøy at konstruktøren har tilstrekkelig kompetanse om elementmetodens virkemåte, løsningsmetoder og analyseformer, samt kan anvende relevant analyseprogram. FEM-analyser av knutepunkter kan være tidkrevende å gjennomføre og kunnskap om tiltak som kan anvendes for å effektivisere analysetiden uten å forringe resultatene, kan hindre at analysetiden blir en begrensende faktor. Selve kapasitetsundersøkelsen bør dokumenteres med detaljerte beskrivelser av hva som undersøkes, hvordan modellen er bygd opp og begrunnelser for valgene som er gjort slik at analysen kan gjenskapes av en uavhengig tredjepart.

10 | Anbefalinger

I denne oppgaven er det vist at teknologien og metodene er tilgjengelige for å anvende FEM som et dimensjoneringsverktøy for å fastsette kapasiteten til sammensatte konstruksjonsdetaljer i stål. Å øke kompetansen for bruk av FEM som metode for kontroll og dokumentasjon av kapasitet innen rådgivningsbransjen er et tiltak som kan føre til en mer utvidet bruk av FEM i fremtiden. I tillegg kan implementering av mer omfattende føringer i Norsk standard bidra til å styrke metodens egnethet til dimensjonering.

Her er det lagt vekt på hvordan knutepunktets stivhet og styrke kan bestemmes ved bruk av moment-rotasjon-relasjonen. I videre arbeid kan det også undersøkes hvordan kapasitet for andre påkjenninger som skjær og normalkrefter kan undersøkes ved bruk av FEM. Sveisens kapasitet er heller ikke undersøkt ved bruk av FEM-modellering i denne oppgaven, og hvordan kontroll kan gjennomføres for sveiseforbindelser kan også undersøkes.

Undersøkelsen av eksplisitt løsningsmetode for analyse av knutepunkt med kvasi-statisk belastning er kraftig forenklet i denne oppgaven. Her er det også kun kvasi-statisk belastning av knutepunktet som er undersøkt. I videre arbeid kan det derfor gjøres en mer omfattende studie av hvordan eksplisitt løsningsmetode kan anvendes til kapasitetsundersøkelser av knutepunkter i dimensjoneringssammenheng, både for kvasi-statisk og dynamisk lastvirkning.

Bibliografi

- [1] De forente nasjoner, “FNs Bærekraftsmål.” [Online] Hentet fra <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (08.02.2021).
- [2] Lov om behandlingsmåten i forvaltningssaker. [Online] Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1967-02-10>, 1967.
- [3] Lov om planlegging og byggesaksbehandling. [Online] Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71>, 2008.
- [4] Forskrift om tekniske krav til byggverk. [Online] Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840>, 2017.
- [5] Direktoratet for byggkvalitet, “Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning - § 10-2. Konstruksjonssikkerhet - veiledning til tredje ledd.” [Online] Hentet fra <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/10/10-2/>, 2017.
- [6] *Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*, NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016, 2016.
- [7] *Determination of Structural Capacity by Non-linear FE analysis Methods*, DNV-RP-C208, 2013.
- [8] *Egenproduserte illustrasjoner av Eivind Ballestad*.
- [9] P. K. Larsen, *Dimensjonering av Stålkonstruksjoner*. Bergen: Fagbokforlaget, 3. utgave, 2020.
- [10] *Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*, NS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015, 2015.
- [11] W. D. Callister, jr og D. G. Rethwisch, «Mechanical properties of metals,», i *Materials Science and Engineering*. Hoboken NJ: John Wiley & Sons Inc, 9 ed., 2014.
- [12] *Varmvalsede produkter av konstruksjonsstål - Del 2: Tekniske leveringsbetingelser for ulegerte konstruksjonsstål*, NS-EN 10025-2:2019, 2019.
- [13] *Mekaniske egenskaper for festelementer av karbonstål og stållegeringer - Del 1: Skruer og panneskruer med spesifiserte fasthetsklasser - Grovgjenger og fingjenger (ISO 898-1:2013)*, NS-EN ISO 898-1:2013, 2013.
- [14] *Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser*, NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009, 2009.
- [15] R. W. Meyer, “Elementmetoden,” *Store Norske Leksikon*, 2019.
- [16] *Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-5: Plater påkjent i plateplanet*, NS-EN 1993-1-5:2006+AC+A1:2017+A2:2019+NA:2019, 2019.

- [17] *Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-6: Skallkonstruksjoner*, NS-EN 1993-1-6:2007+NA:2009, 2009.
- [18] DNV GL, “Om DNV GL.” [Online] Hentet fra <https://www.dnvgl.no/om/index.html> (14.03.2021).
- [19] W. Husson og C. Fahleson, *Publikasjon 185 Bjelke-søyleforbindelser*. Detaljhåndboken.
- [20] E. L. Grimsno, A. H. Clausen, M. L. og A. Aalberg, “An experimental study of static and dynamic behaviour of bolted end-plate joints of steel,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 85, pp. 132–145, November 2015.
- [21] E. L. Grimsno, A. H. Clausen, A. Aalberg og M. Langseth, “A numerical study of beam-to-column joints subjected to impact,” *Engineering Structures*, vol. 120, pp. 103–115, August 2016.
- [22] G. Båsen og T. Nordgård, “Bjelke-søyle-forbindelser påkjent av statisk og dynamisk last,” *Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet*, Trondheim, 2014.
- [23] P. K. Larsen, A. H. Clausen og A. Aalberg, *Stålkonstruksjoner - Profiler og formler*. Bergen: Fagbokforlaget, 3. utgave, 2017.
- [24] *Sekskantbolter - Utførelsesklasse A og B (ISO 4014:2011)*, NS-EN ISO 4014:2011, 2011.
- [25] F. Svartdal, “Fagfellelvurdering,” *Store Norske Leksikon*, 2021.
- [26] Dassault Systèmes, “Abaqus documentation,” 2016.
- [27] Autodesk, “Releases in bars - dsc elements.” [Online] Hentet fra <https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-16BFFEDB-D4E0-496D-B002-C361E21FEF87-htm.html> (10.05.2021).
- [28] C. Díaz, M. Victoria, P. Martí og O.M. Querin, “Fe model of beam-to-column extended end-plate joints,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, pp. 1578–1590, Oktober 2011.
- [29] F. Dinu, I. Marginean, D. Dubina, og I. Petran, “Experimental testing and numerical analysis of 3d steel frame system under column loss,” *Engineering structures*, vol. 113, pp. 59–70, April 2016.
- [30] S. Barmaki, M.R. Sheidaii, og O. Azizpour, “Progressive collapse resistance of bolted extended end-plate moment connections,” *International journal of steel structures*, vol. 20, pp. 1165–1179, August 2020.
- [31] X. Qiang, F.S.K. Bijlaard, H. Kolstein og X. Jiang, “Behaviour of beam-to-column high strength steel endplate connections under fire conditions – part 2: Numerical study,” *Engineering structures*, vol. 64, pp. 39–51, April 2014.
- [32] L. M. Bezerra, J. Bonilla, W. A. Silva og W. T. Matias, “Experimental and numerical studies of bolted t-stub steel connection with different flange thicknesses connected to a rigid base,” *Engineering Structures*, vol. 218, September 2020.
- [33] J. Janss, J.P. Jaspart og R. Maquooi, “Experimental study of the non-linear behaviour of beam-to-column bolted joints,” pp. 26–32, 1987.

Vedlegg

Vedlegg A - Tabulerte materialdata

Vedlegg B - Kapasitetsberegning etter NS-EN 1993-1-8 uten partialfaktorer

Vedlegg C - Kapasitetsberegning etter NS-EN 1993-1-8 med partialfaktorer

Vedlegg A - Tabulert materialdata

Her presenteres materialdata for spenning-tøyningsskurvene utarbeidet for FEM-modellene.

Karakteristiske materialverdier for konstruksjonsstål S355:

Sann spenning-tøyning for fasthetsklasse S355 (DNV-RP-C208)			
Spenning [MPa]	Elastisk tøyning	Plastisk tøyning	Total tøyning
0.0	0.0000	0.0000	0.0000
320.0	0.0015	0.0000	0.0015
357.0	-	0.0040	0.0055
366.1	-	0.0197	0.0212
541.6	-	0.1391	0.1406
Elastisk-perfekt plastisk spenning-tøyning for fasthetsklasse S355			
Spenning [Mpa]	Elastisk tøyning	Plastisk tøyning	Total tøyning
0.0	0.0000	0.0000	0.0000
355.0	0.0017	0.0000	0.0017

Karakteristiske materialverdier for skruestål 8.8:

Nominell spenning-tøyning for fasthetsklasse 8.8 (4.6% tøyning)			
Spenning [MPa]	Elastisk tøyning	Plastisk tøyning	Total tøyning
0.0	0.0000	0.0000	0.0000
640.0	0.0030	0.0000	0.0030
800.0	-	0.0427	0.0457
Sann spenning-tøyning for fasthetsklasse 8.8 (4.6% tøyning)			
Spenning [MPa]	Elastisk tøyning	Plastisk tøyning	Total tøyning
0.0	0.0000	0.0000	0.0000
642.0	0.0031	0.0000	0.0031
836.6	-	0.0416	0.0447
Nominell spenning-tøyning for fasthetsklasse 8.8 (6.0% tøyning)			
Spenning [MPa]	Elastisk tøyning	Plastisk tøyning	Total tøyning
0.0	0.0000	0.0000	0.0000
640.0	0.0030	0.0000	0.0030
800.0	-	0.0570	0.0600

Sann spenning-tøyning for fasthetsklasse 8.8 (6.0% tøyning)			
Spenning [MPa]	Elastisk tøyning	Plastisk tøyning	Total tøyning
0.0	0.0000	0.0000	0.0000
642.0	0.0031	0.0000	0.0030
848.0	-	0.0552	0.0600
Elastisk-perfekt plastisk spenning-tøyning for Fasthetsklasse 8.8			
Spenning [MPa]	Elastisk tøyning	Plastisk tøyning	Total tøyning
0.0	0.0000	0.0000	0.0000
640.0	0.0030	0.0000	0.0030

Testspesifikke fastningskurver for materialmodellene utledet fra fastningsuttrykket rapportert av Grimsmo et al.:

Søyle		Bjelke		Endeplate		Skrue	
Spenning [MPa]	Plastisk tøyning	Spenning [MPa]	Plastisk tøyning	Spenning [MPa]	Plastisk tøyning	Spenning [MPa]	Plastisk tøyning
404.1	0.0000	438.8	0.0000	413.7	0.0000	874.0	0.0000
404.1	0.0080	438.8	0.0120	413.7	0.0200	874.0	0.0080
450.7	0.0180	482.5	0.0220	459.4	0.0300	915.6	0.0180
485.0	0.0280	510.6	0.0320	495.8	0.0400	945.6	0.0280
511.2	0.0380	532.9	0.0420	525.0	0.0500	967.5	0.0380
531.9	0.0480	551.4	0.0520	548.7	0.0600	983.6	0.0480
548.8	0.0580	566.8	0.0620	568.0	0.0700	995.8	0.0580
562.9	0.0680	579.8	0.0720	584.1	0.0800	1005.3	0.0680
574.9	0.0780	590.6	0.0820	597.5	0.0900	1012.7	0.0780
585.4	0.0880	599.7	0.0920	609.0	0.1000	1018.9	0.0880
594.5	0.0980	607.3	0.1020	618.9	0.1100	1024.1	0.0980
602.7	0.1080	613.6	0.1120	627.6	0.1200	1028.6	0.1080
609.9	0.1180	618.9	0.1220	635.3	0.1300	1032.7	0.1180
616.4	0.1280	623.4	0.1320	642.3	0.1400	1036.5	0.1280
622.2	0.1380	627.1	0.1420	648.7	0.1500	1040.0	0.1380
627.5	0.1480	630.3	0.1520	654.7	0.1600	1043.4	0.1480
632.2	0.1580	632.9	0.1620	660.3	0.1700	1046.7	0.1580

Søyle		Bjelke		Endeplate		Skrue	
Spenning [MPa]	Plastisk tøyning	Spenning [MPa]	Plastisk tøyning	Spenning [MPa]	Plastisk tøyning	Spenning [MPa]	Plastisk tøyning
636.4	0.1680	635.1	0.1720	665.7	0.1800	1049.9	0.1680
640.3	0.1780	636.9	0.1820	670.8	0.1900	1053.0	0.1780
643.7	0.1880	638.4	0.1920	675.7	0.2000	1056.1	0.1880
646.9	0.1980	639.7	0.2020	680.4	0.2100	1059.2	0.1980
649.7	0.2080	640.8	0.2120	685.1	0.2200	1062.3	0.2080
652.3	0.2180	641.7	0.2220	689.6	0.2300	1065.3	0.2180
654.6	0.2280	642.4	0.2320	694.1	0.2400	1068.4	0.2280
656.7	0.2380	643.1	0.2420	698.5	0.2500	1071.4	0.2380
658.6	0.2480	643.6	0.2520	702.8	0.2600	1074.4	0.2480
660.3	0.2580	644.0	0.2620	707.0	0.2700	1077.4	0.2580
661.8	0.2680	644.4	0.2720	711.2	0.2800	1080.4	0.2680
663.2	0.2780	644.7	0.2820	715.4	0.2900	1083.5	0.2780
664.5	0.2880	645.0	0.2920	719.5	0.3000	1086.5	0.2880
665.6	0.2980	645.2	0.3020	723.6	0.3100	1089.5	0.2980
666.7	0.3080	645.4	0.3120	727.6	0.3200	1092.5	0.3080
667.6	0.3180	645.5	0.3220	731.6	0.3300	1095.5	0.3180
668.4	0.3280	645.6	0.3320	735.6	0.3400	1098.5	0.3280
669.2	0.3380	645.8	0.3420	739.5	0.3500	1101.5	0.3380
669.9	0.3480	645.8	0.3520	743.4	0.3600	1104.5	0.3480
670.5	0.3580	645.9	0.3620	747.2	0.3700	1107.5	0.3580
671.1	0.3680	646.0	0.3720	751.1	0.3800	1110.5	0.3680
671.6	0.3780	646.0	0.3820	754.8	0.3900	1113.6	0.3780
672.1	0.3880	646.1	0.3920	758.6	0.4000	1116.6	0.3880
672.5	0.3980	646.1	0.4020	762.3	0.4100	1119.6	0.3980
672.9	0.4080	646.1	0.4120	766.0	0.4200	1122.6	0.4080
673.2	0.4180	646.2	0.4220	769.7	0.4300	1125.6	0.4180
673.5	0.4280	646.2	0.4320	773.3	0.4400	1128.6	0.4280
673.8	0.4380	646.2	0.4420	777.0	0.4500	1131.6	0.4380

Søyle		Bjelke		Endeplate		Skrue	
Spenning [MPa]	Plastisk tøyning	Spenning [MPa]	Plastisk tøyning	Spenning [MPa]	Plastisk tøyning	Spenning [MPa]	Plastisk tøyning
674.0	0.4480	646.2	0.4520	780.5	0.4600	1134.6	0.4480
674.3	0.4580	646.2	0.4620	784.1	0.4700	1137.6	0.4580
674.5	0.4680	646.2	0.4720	787.6	0.4800	1140.6	0.4680
674.6	0.4780	646.3	0.4820	791.1	0.4900	1143.6	0.4780
674.8	0.4880	646.3	0.4920	794.6	0.5000	1146.6	0.4880
675.0	0.4980	646.3	0.5020	798.0	0.5100	1149.6	0.4980
675.1	0.5080	646.3	0.5120	801.4	0.5200	1152.6	0.5080

Kapasitetsberegninger etter NS-EN 1993-1-8 (komponentmetoden) uten partialfaktorer

Partialfaktorer: $\gamma_{M0} := 1.0$ $\gamma_{M2} := 1.0$

Materialekonstanter: $E := 210000 \text{ MPa}$

Bjelke (HEA 180-S355):

Geometri: $h_b := 171 \text{ mm}$ $b_b := 180 \text{ mm}$ $t_{wb} := 6 \text{ mm}$ $t_{fb} := 9.5 \text{ mm}$

$r_b := 15 \text{ mm}$ $A_b := 4530 \text{ mm}^2$

Flytespenning: $f_{y,b} := 355 \text{ MPa}$

Søyle (HEB 220-S355):

Geometri: $h_c := 220 \text{ mm}$ $b_c := 220 \text{ mm}$ $t_{wc} := 9.5 \text{ mm}$ $t_{fc} := 16 \text{ mm}$

$r_c := 18 \text{ mm}$ $A_c := 9100 \text{ mm}^2$

Flytespenning: $f_{y,c} := 355 \text{ MPa}$

Endeplate (12x220x246mm-S355):

Geometri: $t_p := 12 \text{ mm}$ $b_p := 220 \text{ mm}$

Flytespenning: $f_{y,p} := 355 \text{ MPa}$

Skruer (M16-8.8):

Geometri: $A_{s,b} := 157 \text{ mm}^2$

Strekfasthet: $f_{u,b} := 800 \text{ MPa}$

Sveis:

Geometri: $a := 5 \text{ mm}$

Strekfasthet: $f_{u,w} := 510 \text{ MPa}$

Anmerkninger:

Overskrift for hvert avsnitt inneholder referanse til relevant kapittel i NS-EN 1993-1-8.

Bregnede kapasiteter inneholder indeksen "d" for dimensjonerende selv om partialfaktorene er satt til 1.0.

Kapasitet av skrue i strekk (3.6.1):

Senkskruer er ikke benyttet: $k_2 := 0.9$

$$F_{t.Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{u.b} \cdot A_{s.b}}{\gamma_{M2}} = 113 \text{ kN}$$

Kapasitet av sveis i strekk (4.5.3):

Korrelasjonsfaktor: $\beta_w := 0.9$

Sveisesnittets areal: $A_w := a \cdot (2 \cdot b_b - (t_{wb} + 2 \cdot r_b) + 2 \cdot t_{fb}) = 1715 \text{ mm}^2$

$$F_{w.fb.Rd} := \frac{f_{u.w} \cdot A_w}{\sqrt{2} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} = 687 \text{ kN} \quad (\text{Sveis rundt bjelkens strekkflens})$$

Søyleflensens kapasitet i bøyning (6.2.6.4):

Parametere for beregning av ekvivalent T-stykke:

$$e_{min} := 60 \text{ mm} \quad \text{og} \quad e := e_{min} = 60 \text{ mm} \quad (\text{Endeplaten har lik bredde som søyleflensen})$$

$$m := \frac{1}{2} \cdot (100 \text{ mm} - t_{wc}) - 0.8 \cdot r_c = 31 \text{ mm}$$

$$p := 30 \text{ mm} + 30.5 \text{ mm} + t_{fb} = 70 \text{ mm}$$

$$n := \min(e_{min}, 1.25 \cdot m) = 39 \text{ mm}$$

Skruerad betraktet som en enkeltstående rad:

$$\text{Sirkulært flytemønster: } l_{eff.cp} := 2 \cdot \pi \cdot m = 194 \text{ mm}$$

$$\text{Ikke-sirkulært flytemønster: } l_{eff.nc} := 4 \cdot m + 1.25 \cdot e = 198 \text{ mm}$$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff.cp}, l_{eff.nc}) = 194 \text{ mm} \quad \text{og} \quad l_{eff.2} := l_{eff.nc} = 198 \text{ mm}$$

$$M_{pl.1.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.1} \cdot t_{fc}^2 \cdot \frac{f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 4.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.2.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.2} \cdot t_{fc}^2 \cdot \frac{f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 4.51 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Bruddform 1: } F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m} = 571 \text{ kN}$$

$$\text{Bruddform 2: } F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t.Rd}}{m + n} = 255 \text{ kN}$$

Bruddform 3: $F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 226 \text{ kN}$

Strekkapasitet av enkelt T-stykke:

$$F_{t.fc.Rd.enkel} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 226 \text{ kN}$$

Skruerad betraktet som del av en gruppe med skruer:

Sirkulært flytemønster: $l_{eff.cp} := \pi \cdot m + p = 167 \text{ mm}$

Ikke-sirkulært flytemønster: $l_{eff.nc} := 2 \cdot m + 0.625 \cdot e + 0.5 \cdot p = 134 \text{ mm}$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff.cp}, l_{eff.nc}) = 134 \text{ mm} \quad \text{og} \quad l_{eff.2} := l_{eff.nc} = 134 \text{ mm}$$

$$M_{pl.1.Rd} := \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot l_{eff.1} \cdot t_{fc}^2 \cdot \frac{f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 6.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.2.Rd} := \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot l_{eff.2} \cdot t_{fc}^2 \cdot \frac{f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 6.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Bruddform 1: $F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m} = 791 \text{ kN}$

Bruddform 2: $F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n \cdot 4 \cdot F_{t.Rd}}{m + n} = 427 \text{ kN}$

Bruddform 3: $F_{T.3.Rd} := 4 \cdot F_{t.Rd} = 452 \text{ kN}$

Strekkapasitet av T-stykker i gruppe:

$$F_{t.fc.Rd.gruppe} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 427 \text{ kN}$$

Steg i søyle med tverrtrykk (Avstivet):

Tverrsnittsklassifisering av stiver etter NS-EN 1993-1-1, tabell 5.2:

$$c := 105 \text{ mm} - \sqrt{2} \cdot a = 98 \text{ mm} \quad t := 10 \text{ mm} \quad \varepsilon := \sqrt{\frac{235}{355}} = 0.814$$

$$\frac{c}{t \cdot \varepsilon} = 12.036 < 14 \quad \rightarrow \quad \text{Tverrsnittsklasse 3}$$

Stiveren tåler full flytespenning, forhindrer søylesteget i å knekke og bidrar til økt tverrsnittsareal for opptak av trykkbelastning. Videre undersøkelser av søylestegets kapasitet mot tverrtrykk er derfor ansett som ikke nødvendig.

Steg i søyle med tverrstrekk (6.2.6.3):

Overføringsparameter for tosidig forbindelse med like bjelkemomenter (tabell 5.4): $\beta := 0$

Reduksjonsfaktor for interaksjon med skjær i søylesteget (tabell 6.2): $\omega := 1$

Skruerad betraktet individuelt:

Effektiv bredde: $b_{eff.t.wc} := 194 \text{ mm}$

Strekkapasitet for en skruerad:

$$F_{t.wc.Rd.enkel} := \frac{\omega \cdot b_{eff.t.wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 654 \text{ kN}$$

Skruerad betraktet som del av gruppe:

Effektiv bredde: $b_{eff.t.wc} := 134 \text{ mm}$ (Minste effektive lengde av T-stykke for søyleflens)

Strekkapasitet for skrueradbetraktet som del av en gruppe:

$$F_{t.wc.Rd.gruppe} := \frac{\omega \cdot 2 \cdot b_{eff.t.wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 904 \text{ kN}$$

Endeplate påkjent av bøyning (6.2.6.5):

Parametere for beregning av ekvivalent T-stykke:

$$e := 60 \text{ mm} \quad w := 100 \text{ mm} \quad e_x := 30 \text{ mm}$$

$$m := 0.5 \cdot (w - t_{wb}) - 0.8 \cdot a \cdot \sqrt{2} = 41 \text{ mm}$$

$$m_x := 30 \text{ mm} - 0.8 \cdot a \cdot \sqrt{2} = 24 \text{ mm} \quad \text{og} \quad n_x := \min(e_x, 1.25 m_x) = 30 \text{ mm}$$

$$m_2 := 30.5 \text{ mm} - 0.8 \cdot a \cdot \sqrt{2} = 25 \text{ mm}$$

Utstikkende ekvivalent T-stykke (Skruerad 1):

Sirkulært flytemønster:

$$l_{eff.cp} := \min(2 \cdot \pi \cdot m_x, \pi \cdot m_x + w, \pi \cdot m_x + 2 \cdot e) = 153 \text{ mm}$$

Ikke-sirkulært flytemønster:

$$l_{eff.nc} := \min(4 \cdot m_x + 1.25 \cdot e_x, e + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x, 0.5 \cdot b_p, 0.5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x)$$

$$l_{eff.nc} = 110 \text{ mm}$$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff.cp}, l_{eff.nc}) = 110 \text{ mm} \quad \text{og} \quad l_{eff.2} := l_{eff.nc} = 110 \text{ mm}$$

$$M_{pl.1.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.1} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 1.41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.2.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.2} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 1.41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Bruddform 1: $F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m_x} = 231 \text{ kN}$

Bruddform 2: $F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n_x \cdot 2 \cdot F_{t.Rd}}{m_x + n_x} = 177 \text{ kN}$

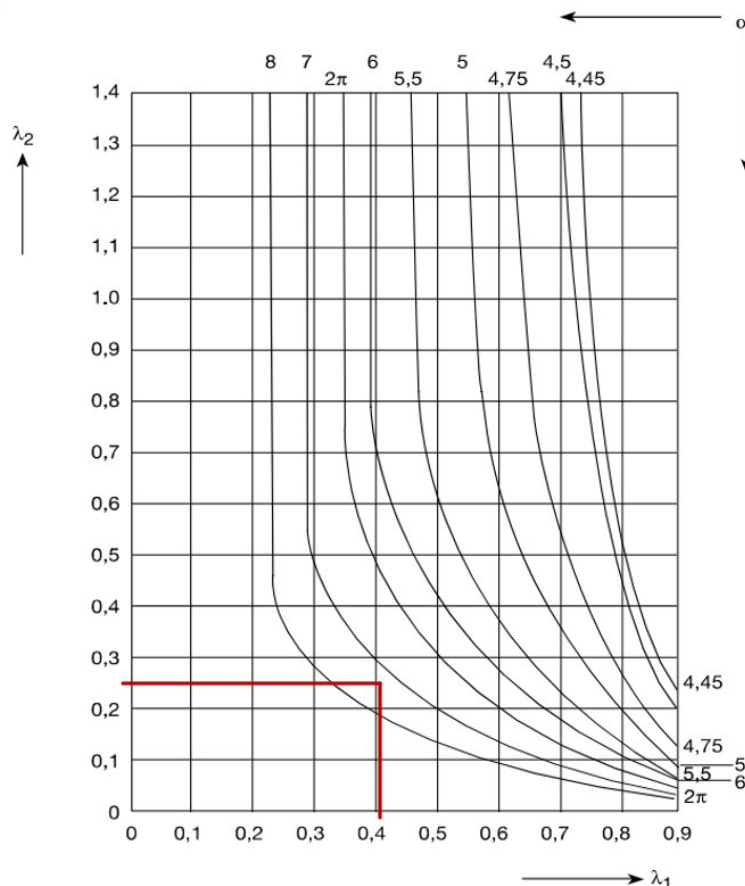
Bruddform 3: $F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 226 \text{ kN}$

Momentkapasitet av utstikkende ekvivalent T-stykke:

$$F_{t.ep.Rd.Over} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 177 \text{ kN}$$

Indre ekvivalent T-stykke (Skruerad 2):

$$\lambda_1 := \frac{m}{m+e} = 0.41 \quad \lambda_2 := \frac{m_2}{m+e} = 0.25 \quad \alpha := 7.4 \quad (\text{Avleses fra figuren under})$$



NS-EN 1993-1-8, figur 6.11
- metode for å bestemme α for avstivede søyleflenser og endeplater.

Sirkulært flytemønster:

$$l_{eff.cp} := 2 \cdot \pi \cdot m = 260 \text{ mm}$$

Ikke-sirkulært flytemønster:

$$l_{eff.nc} := \alpha \cdot m = 306 \text{ mm}$$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff.cp}, l_{eff.nc}) = 260 \text{ mm} \quad \text{og} \quad l_{eff.2} := l_{eff.nc} = 306 \text{ mm}$$

$$M_{pl.1.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.1} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 3.32 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.2.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.2} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 3.91 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Bruddform 1: $F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m} = 321 \text{ kN}$

Bruddform 2: $F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t.Rd}}{m + n} = 207 \text{ kN}$

Bruddform 3: $F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 226 \text{ kN}$

Momentkapasitet av indre ekvivalent T-stykke:

$$F_{t.ep.Rd.under} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 207 \text{ kN}$$

Kapasitet av gruppe:

$$F_{t.ep.Rd.gruppe} := F_{t.ep.Rd.over} + F_{t.ep.Rd.under} = 384 \text{ kN}$$

Bjelkesteg påkjent av strekk (6.2.6.8):

Effektiv bredde: $b_{eff.t.wb} := l_{eff.1} = 260 \text{ mm}$ (Effektiv lengde av ekvivalent T-stykke for skruerad 2 for endeplate under bøyning)

$$F_{t.wb.Rd} := b_{eff.t.wb} \cdot t_{wb} \cdot \frac{f_{y.b}}{\gamma_{M0}} = 553 \text{ kN}$$

Forbindelsens dimensjonerende momentkapasitet (6.2.7.2):

Rad 1: $F_{t1.Rd} := \min(F_{t.fc.Rd.enkel}, F_{t.wc.Rd.enkel}, F_{t.ep.Rd.over}) = 177 \text{ kN}$

Rad 2: $F_{t2.Rd} := \min(F_{t.fc.Rd.enkel}, F_{t.wc.Rd.enkel}, F_{t.ep.Rd.under}, F_{t.wb.Rd}) = 207 \text{ kN}$

Sum rad 1 og 2: $F_{t1.Rd} + F_{t2.Rd} = 384 \text{ kN}$

Gruppe: $F_{gruppe.Rd} := \min(F_{t.fc.Rd.gruppe}, F_{t.wc.Rd.gruppe}, F_{t.ep.Rd.gruppe}, F_{t.wb.Rd}) = 384 \text{ kN}$

Sum av kapasitetene til skrueradene er lik gruppens samlede kapasitet, og det er ikke behov for å redusere kapasiteten til en av skrueradene.

$$\text{Momentarm for skruerad 1: } h_1 := h_b - \frac{1}{2} \cdot t_{fb} + 30 \text{ mm} = 196 \text{ mm}$$

$$\text{Momentarm for skruerad 2: } h_2 := h_b - \frac{3}{2} \cdot t_{fb} - 30.5 \text{ mm} = 126 \text{ mm}$$

Dimensjonerende momentkapasitet til hver av forbindelsene i knutepunktet.

$$M_{j.Rd} := F_{t1.Rd} \cdot h_1 + F_{t2.Rd} \cdot h_2 = 60.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kontroll av strekkpåkjent sveis:

Strekraft i bjekeflens som følge av fullt utnyttet momentkapasitet:

$$N_{fb.Ed} := \frac{M_{j.Rd}}{h_b - t_{fb}} = 376 \text{ kN} < F_{w.fb.Rd} = 687 \text{ kN} \quad \text{Sveisen tåler strekkpåkjenningen som og er ikke begrensenden for momentkapasiteten}$$

Rotasjonsstivhet (6.3):

Stivetskoeffisienter for knutepunktets basiskomponenter:

Søylesteg påkjent av trykk:

$$k_2 := \infty \quad (\text{Avstivet})$$

Effektiv bredde for tverrstrekk settes lik den minste av verdiene for skrueradene betraktet alene eller som del av gruppe:

$$b_{eff.t.wc} = 134 \text{ mm} \quad (\text{gruppe})$$

$$d_c := h_c - 2 \cdot (t_{fc} + r_c) = 152 \text{ mm}$$

Søylesteg påkjent av strekk for skruerad 1:

$$k_{3.1} := \frac{0.7 \cdot b_{eff.t.wc} \cdot t_{wc}}{d_c} = 5.9 \text{ mm}$$

Søylesteg påkjent av strekk for skruerad 2:

$$k_{3.2} := \frac{0.7 \cdot b_{eff.t.wc} \cdot t_{wc}}{d_c} = 5.9 \text{ mm}$$

Den minste av skrueradens effektive lengde: $l_{eff} := 134 \text{ mm}$

$$m := \frac{1}{2} \cdot (100 \text{ mm} - t_{wc}) - 0.8 \cdot r_c = 31 \text{ mm}$$

Søyleflens påkjent av bøyning for skruerad 1:

$$k_{4.1} := \frac{0.9 \cdot l_{eff} \cdot t_{fc}^3}{m^3} = 16.8 \text{ mm}$$

Søyleflens påkjent av bøyning for skruerad 2:

$$k_{4.2} := \frac{0.9 \cdot l_{eff} \cdot t_{fc}^3}{m^3} = 16.8 \text{ mm}$$

Effektiv lengde for skruerad 1: $l_{eff} := 110 \text{ mm}$

$$m_x = 24 \text{ mm} \quad (\text{for utstikkende del av endeplate skal } m = m_x)$$

Endeplate påkjent av bøyning for skruerad 1:

$$k_{5.1} := \frac{0.9 \cdot l_{eff} \cdot t_p^3}{m_x^3} = 11.9 \text{ mm}$$

Effektiv lengde for skruerad 2: $l_{eff} := 260 \text{ mm}$

$$m := 41 \text{ mm}$$

Endeplate påkjent av bøyning for skruerad 2:

$$k_{5.2} := \frac{0.9 \cdot l_{eff} \cdot t_p^3}{m^3} = 5.9 \text{ mm}$$

Skruens tøyingslengde (total godslengde pluss halve summen av skruhodet og mutterhøyde):

$$L_b := t_p + t_{fc} + 0.5 \cdot (10 + 14.8) \text{ mm} = 40.4 \text{ mm}$$

Skruer påkjent av strekk for skruerad 1:

$$k_{10.1} := 1.6 \cdot \frac{A_{s.b}}{L_b} = 6.2 \text{ mm}$$

Skruer påkjent av strekk for skruerad 2:

$$k_{10.2} := 1.6 \cdot \frac{A_{s.b}}{L_b} = 6.2 \text{ mm}$$

Effektiv stivhetskoeffisient for skruerad 1:

$$k_{eff.1} := \frac{1}{\frac{1}{k_{3.1}} + \frac{1}{k_{4.1}} + \frac{1}{k_{5.1}} + \frac{1}{k_{10.1}}} = 2.1 \text{ mm}$$

Effektiv stivhetskoeffisient for skruerad 2:

$$k_{eff.2} := \frac{1}{\frac{1}{k_{3.2}} + \frac{1}{k_{4.2}} + \frac{1}{k_{5.2}} + \frac{1}{k_{10.2}}} = 1.8 \text{ mm}$$

Ekvivalent momentarm:

$$z_{eq} := \frac{k_{eff.1} \cdot h_1^2 + k_{eff.2} \cdot h_2^2}{k_{eff.1} \cdot h_1 + k_{eff.2} \cdot h_2} = 171.6 \text{ mm}$$

Ekvivalent stivhetskoeffisient:

$$k_{eq} := \frac{k_{eff.1} \cdot h_1 + k_{eff.2} \cdot h_2}{z_{eq}} = 3.7 \text{ mm}$$

Initialstivheten til knutepunktet ($\mu := 1$):

Bidrag fra avstivet søylesteg påkjent av trykk: $\frac{1}{k_2} = 0$

$$S_{j.ini} := \frac{E \cdot z_{eq}^2}{\mu \cdot \left(0 + \frac{1}{k_{eq}}\right)} = 22985 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Rotasjonsstivhet ved fullt utnyttet momentkapasitet: $M_{j.Ed} := M_{j.Rd}$

Koeffisienten for skrudd endeplate: $\psi := 2.7$

$$\mu := \left(1.5 \cdot \frac{M_{j.Ed}}{M_{j.Rd}}\right)^\psi = 2.99$$

Rotasjonsstivhet ved fullt utnyttet momentkapasitet:

$$S_j := \frac{S_{j.ini}}{\mu} = 7691 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Kapasitetsberegninger etter NS-EN 1993-1-8 (komponentmetoden) med partialfaktorer

Partialfaktorer: $\gamma_{M0} := 1.05$ $\gamma_{M2} := 1.25$

Materialkonstanter: $E := 210000 \text{ MPa}$

Bjelke (HEA 180-S355):

Geometri: $h_b := 171 \text{ mm}$ $b_b := 180 \text{ mm}$ $t_{wb} := 6 \text{ mm}$ $t_{fb} := 9.5 \text{ mm}$

$r_b := 15 \text{ mm}$ $A_b := 4530 \text{ mm}^2$

Flytespenning: $f_{y,b} := 355 \text{ MPa}$

Søyle (HEB 220-S355):

Geometri: $h_c := 220 \text{ mm}$ $b_c := 220 \text{ mm}$ $t_{wc} := 9.5 \text{ mm}$ $t_{fc} := 16 \text{ mm}$

$r_c := 18 \text{ mm}$ $A_c := 9100 \text{ mm}^2$

Flytespenning: $f_{y,c} := 355 \text{ MPa}$

Endeplate (12x220x246mm-S355):

Geometri: $t_p := 12 \text{ mm}$ $b_p := 220 \text{ mm}$

Flytespenning: $f_{y,p} := 355 \text{ MPa}$

Skruer (M16-8.8):

Geometri: $A_{s,b} := 157 \text{ mm}^2$

Strekfasthet: $f_{u,b} := 800 \text{ MPa}$

Sveis:

Geometri: $a := 5 \text{ mm}$

Strekfasthet: $f_{u,w} := 510 \text{ MPa}$

Anmerkninger:

Overskrift for hvert avsnitt inneholder referanse til relevant kapittel i NS-EN 1993-1-8.

Kapasitet av skrue i strekk (3.6.1):

Senkskruer er ikke benyttet: $k_2 := 0.9$

$$F_{t.Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{u.b} \cdot A_{s.b}}{\gamma_{M2}} = 90 \text{ kN}$$

Kapasitet av sveis i strekk (4.5.3):

Korrelasjonsfaktor: $\beta_w := 0.9$

Sveisesnittets areal: $A_w := a \cdot (2 \cdot b_b - (t_{wb} + 2 \cdot r_b) + 2 \cdot t_{fb}) = 1715 \text{ mm}^2$

$$F_{w.fb.Rd} := \frac{f_{u.w} \cdot A_w}{\sqrt{2} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} = 550 \text{ kN} \quad (\text{Sveis rundt bjelkens strekkflens})$$

Søyleflensens kapasitet i bøyning (6.2.6.4):

Parametere for beregning av ekvivalent T-stykke:

$$e_{min} := 60 \text{ mm} \quad \text{og} \quad e := e_{min} = 60 \text{ mm} \quad (\text{Endeplaten har lik bredde som søyleflensen})$$

$$m := \frac{1}{2} \cdot (100 \text{ mm} - t_{wc}) - 0.8 \cdot r_c = 31 \text{ mm}$$

$$p := 30 \text{ mm} + 30.5 \text{ mm} + t_{fb} = 70 \text{ mm}$$

$$n := \min(e_{min}, 1.25 \cdot m) = 39 \text{ mm}$$

Skruerad betraktet som en enkeltstående rad:

$$\text{Sirkulært flytemønster: } l_{eff.cp} := 2 \cdot \pi \cdot m = 194 \text{ mm}$$

$$\text{Ikke-sirkulært flytemønster: } l_{eff.nc} := 4 \cdot m + 1.25 \cdot e = 198 \text{ mm}$$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff.cp}, l_{eff.nc}) = 194 \text{ mm} \quad \text{og} \quad l_{eff.2} := l_{eff.nc} = 198 \text{ mm}$$

$$M_{pl.1.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.1} \cdot t_{fc}^2 \cdot \frac{f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 4.19 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.2.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.2} \cdot t_{fc}^2 \cdot \frac{f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 4.29 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Bruddform 1: } F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m} = 544 \text{ kN}$$

$$\text{Bruddform 2: } F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t.Rd}}{m + n} = 224 \text{ kN}$$

Bruddform 3: $F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 181 \text{ kN}$

Dimensjonerende strekkapasitet av enkelt T-stykke:

$$F_{t.fc.Rd.enkel} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 181 \text{ kN}$$

Skruerad betraktet som del av en gruppe med skruer:

Sirkulært flytemønster: $l_{eff.cp} := \pi \cdot m + p = 167 \text{ mm}$

Ikke-sirkulært flytemønster: $l_{eff.nc} := 2 \cdot m + 0.625 \cdot e + 0.5 \cdot p = 134 \text{ mm}$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff.cp}, l_{eff.nc}) = 134 \text{ mm} \quad l_{eff.2} := l_{eff.nc} = 134 \text{ mm}$$

$$M_{pl.1.Rd} := \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot l_{eff.1} \cdot t_{fc}^2 \cdot \frac{f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 5.81 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.2.Rd} := \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot l_{eff.2} \cdot t_{fc}^2 \cdot \frac{f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 5.81 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Bruddform 1: $F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m} = 753 \text{ kN}$

Bruddform 2: $F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n \cdot 4 \cdot F_{t.Rd}}{m + n} = 368 \text{ kN}$

Bruddform 3: $F_{T.3.Rd} := 4 \cdot F_{t.Rd} = 362 \text{ kN}$

Dimensjonerende strekkapasitet av T-stykker i gruppe:

$$F_{t.fc.Rd.gruppe} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 362 \text{ kN}$$

Steg i søyle med tverrtrykk (Avstivet):

Tverrstiveren er i tverrsnittsklasse 3 og tåler full flytespenning, forhindrer søylesteget i å knekke og bidrar til økt tverrsnittsareal for opptak av trykkbelastning. Videre undersøkelser av søylestegets kapasitet mot tverrtrykk er derfor ansett som ikke nødvendig (Se vedlegg B for kontroll av tverrsnittsklasse).

Steg i søyle med tverrstrekk (6.2.6.3):

Overføringsparameter for tosidig forbindelse med like bjelkemomenter (tabell 5.4): $\beta := 0$

Reduksjonsfaktor for interaksjon med skjær i søylesteget (tabell 6.2): $\omega := 1$

Skruerad betraktet individuelt:

Effektiv bredde: $b_{eff.t.wc} := 194 \text{ mm}$

Dimensjonerende strekkapasitet for en skruerad:

$$F_{t.wc.Rd.enkel} := \frac{\omega \cdot b_{eff.t.wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 623 \text{ kN}$$

Skruerader betraktet som del av gruppe:

Effektiv bredde: $b_{eff.t.wc} := 134 \text{ mm}$ (Minste effektive lengde av T-stykke for søyleflens)

Dimensjonerende strekkapasitet for skrueradbetraktet som del av en gruppe:

$$F_{t.wc.Rd.gruppe} := \frac{\omega \cdot 2 \cdot b_{eff.t.wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{y.c}}{\gamma_{M0}} = 861 \text{ kN}$$

Endeplate påkjent av bøyning (6.2.6.5):

Parametere for beregning av ekvivalent T-stykke:

$$e := 60 \text{ mm} \quad w := 100 \text{ mm} \quad e_x := 30 \text{ mm}$$

$$m := 0.5 \cdot (w - t_{wb}) - 0.8 \cdot a \cdot \sqrt{2} = 41 \text{ mm}$$

$$m_x := 30 \text{ mm} - 0.8 \cdot a \cdot \sqrt{2} = 24 \text{ mm} \quad \text{og} \quad n_x := \min(e_x, 1.25 m_x) = 30 \text{ mm}$$

$$m_2 := 30.5 \text{ mm} - 0.8 \cdot a \cdot \sqrt{2} = 25 \text{ mm}$$

Kapasitet av utstikkende ekvivalent T-stykke (Skruerad 1):

Sirkulært flytemønster:

$$l_{eff.cp} := \min(2 \cdot \pi \cdot m_x, \pi \cdot m_x + w, \pi \cdot m_x + 2 \cdot e) = 153 \text{ mm}$$

Ikke-sirkulært flytemønster:

$$l_{eff.nc} := \min(4 \cdot m_x + 1.25 \cdot e_x, e + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x, 0.5 \cdot b_p, 0.5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x)$$

$$l_{eff.nc} = 110 \text{ mm}$$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff.cp}, l_{eff.nc}) = 110 \text{ mm} \quad \text{og} \quad l_{eff.2} := l_{eff.nc} = 110 \text{ mm}$$

$$M_{pl.1.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.1} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 1.34 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.2.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.2} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 1.34 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Bruddform 1: $F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m_x} = 220 \text{ kN}$

Bruddform 2: $F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n_x \cdot 2 \cdot F_{t.Rd}}{m_x + n_x} = 149 \text{ kN}$

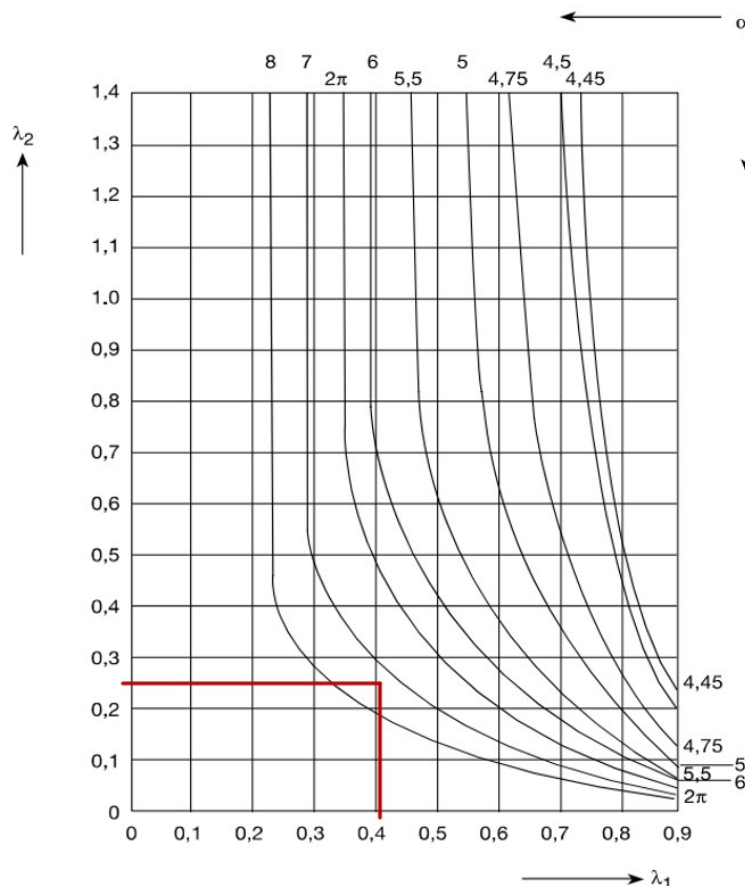
Bruddform 3: $F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 181 \text{ kN}$

Dimensjonerende momentkapasitet av utstikkende ekvivalent T-stykke:

$$F_{t.ep.Rd.over} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 149 \text{ kN}$$

Kapasitet av indre ekvivalent T-stykke (Skruerad 2):

$$\lambda_1 := \frac{m}{m+e} = 0.41 \quad \lambda_2 := \frac{m_2}{m+e} = 0.25 \quad \alpha := 7.4 \quad (\text{Avleses fra figuren under})$$



NS-EN 1993-1-8, tabell
6.11 - metode for å
bestemme α for avstivede
søyleflenser og endeplater.

Sirkulært flytemønster:

$$l_{eff.cp} := 2 \cdot \pi \cdot m = 260 \text{ mm}$$

Ikke-sirkulært flytemønster:

$$l_{eff.nc} := \alpha \cdot m = 306 \text{ mm}$$

$$l_{eff.1} := \min(l_{eff.cp}, l_{eff.nc}) = 260 \text{ mm}$$

$$l_{eff.2} := l_{eff.nc} = 306 \text{ mm}$$

$$M_{pl.1.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.1} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 3.16 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{pl.2.Rd} := \frac{1}{4} \cdot l_{eff.2} \cdot t_p^2 \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 3.72 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Bruddform 1: $F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m} = 306 \text{ kN}$

Bruddform 2: $F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t.Rd}}{m + n} = 180 \text{ kN}$

Bruddform 3: $F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 181 \text{ kN}$

Dimensjonerende momentkapasitet av indre ekvivalent T-stykke:

$$F_{t.ep.Rd.under} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 180 \text{ kN}$$

Dimensjonerende kapasitet av gruppe:

$$F_{t.ep.Rd.gruppe} := F_{t.ep.Rd.over} + F_{t.ep.Rd.under} = 330 \text{ kN}$$

Bjelkesteg påkjent av strekk (6.2.6.8):

Effektiv bredde: $b_{eff.t.wb} := l_{eff.1} = 260 \text{ mm}$ (Effektiv lengde av ekvivalent T-stykke for skruerad 2 for endeplate under bøyning)

$$F_{t.wb.Rd} := b_{eff.t.wb} \cdot t_{wb} \cdot \frac{f_{y.b}}{\gamma_{M0}} = 527 \text{ kN}$$

Forbindelsens dimensjonerende momentkapasitet (6.2.7.2):

Rad 1: $F_{t1.Rd} := \min(F_{t.fc.Rd.enkel}, F_{t.wc.Rd.enkel}, F_{t.ep.Rd.over}) = 149 \text{ kN}$

Rad 2: $F_{t2.Rd} := \min(F_{t.fc.Rd.enkel}, F_{t.wc.Rd.enkel}, F_{t.ep.Rd.under}, F_{t.wb.Rd}) = 180 \text{ kN}$

Sum rad 1 og 2: $F_{t1.Rd} + F_{t2.Rd} = 330 \text{ kN}$

Gruppe: $F_{gruppe.Rd} := \min(F_{t.fc.Rd.gruppe}, F_{t.wc.Rd.gruppe}, F_{t.ep.Rd.gruppe}, F_{t.wb.Rd}) = 330 \text{ kN}$

Sum av kapasitetene til skrueradene er lik gruppens samlede kapasitet, og det er ikke behov for å redusere kapasiteten til en av skrueradene.

$$\text{Momentarm for skruerad 1: } h_1 := h_b - \frac{1}{2} \cdot t_{fb} + 30 \text{ mm} = 196 \text{ mm}$$

$$\text{Momentarm for skruerad 2: } h_2 := h_b - \frac{3}{2} \cdot t_{fb} - 30.5 \text{ mm} = 126 \text{ mm}$$

Dimensjonerende momentkapasitet til hver av forbindelsene i knutepunktet.

$$M_{j.Rd} := F_{t1.Rd} \cdot h_1 + F_{t2.Rd} \cdot h_2 = 52.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kontroll av strekkpåkjent sveis:

Strekraft i bjekeflens som følge av fullt utnyttet momentkapasitet:

$$N_{fb.Ed} := \frac{M_{j.Rd}}{h_b - t_{fb}} = 322 \text{ kN} < F_{w.fb.Rd} = 550 \text{ kN} \quad \text{Sveisen tåler strekkpåkjenningen som og er ikke begrensenden for momentkapasiteten}$$