

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgave 2014
30 stp

Bjelke-forbindelser til betongfylte stålsøyler under brannpåvirkning

Connection of beams to concrete-filled steel
columns under the influence of fire

Marianne Håheim

Summary

By filling steel columns with concrete, one may achieve high fire resistance without the use of external fire protection. In addition to this, the steel may be exposed, which is seen as an aesthetic gain. A concrete filled steel column requires a smaller cross-sectional area than a plain steel column, so additional floor space is gained. Column-beam connections are usually carried out by fixing the beam in the concrete core, to ensure the load transfer to the concrete.

In those cases where the beam cannot be attached to the concrete core, it will be attached to the steel section of the column. Due to the separation between the materials at high temperatures, one cannot assume that the load of the beam will be transferred to the concrete core. This paper investigates whether the steel column can carry a relatively small beam load alone under fire exposure. To protect the area around the connection, where the steel stress reaches its highest value, the column is simulated with fire protection. This corresponds to a thickness of 2 mm of fire protection paint and the area varies from 100 to 500 mm from the connection in the longitudinal direction, upwards and downwards.

The purpose of this study is to investigate how the steel temperatures changes with and without fire protection in the area of the connection, finding the maximum load for a selected concrete filled steel column at different fire resistance requirements, design the steel column for relatively low beam loads and assess whether it can carry these loads alone while under fire exposure.

The simulation program Abaqus, student version 6.13 – 2, is applied for thermal analysis of the steel section of the column, which is partially covered by fire protection. Temperatures are measured after 1 minute of simulation, due to problems with the input values and the version of the program. The values are used for the further evaluation of temperature changes and effects of fire protection. The calculation program Potfire V3.0 is used for design of a concrete filled steel column with two different amounts of bar reinforcement and four different fire opponent requirements.

Based on calculations and evaluations made in this thesis, 500 mm of fire paint is not sufficient protection. The part of the steel column which is not protected, is likely to achieve temperatures above the critical steel temperatures for the three utilization levels which are described in this thesis. Even if the concrete filled steel column can achieve a high fire resistance, the steel column alone will not achieve sufficient fire resistance to be able to carry the beam load alone during the whole fire sequence.

Please note that this thesis should only be considered as a preparation for further research on this extensive problem. Suggestions for further work are described at the end of the thesis.

Sammendrag

Ved å fylle stålsøyler med betong kan man oppnå en høy brannmotstand uten bruk av utvendig brannbeskyttelse. I tillegg til at man kan eksponere stålet, som blir sett på som en estetisk gevinst, blir også tverrsnittsarealet på søylen mindre enn ved bruk av en enkel stålsøyle og man sitter igjen med mer gulvareal. Søyle-bjelke-forbindelsen utføres vanligvis ved å feste bjelken inn i betongkjernen, for å sikre lastoverføringen til betongen.

I de tilfellene hvor man ikke kan feste bjelken i betongkjernen, festes den i ståldelen av søylen. Grunnet separasjon mellom materialene ved høye temperaturer kan man ikke regne med at lasten fra bjelken kan føres over til betongkjernen. I denne oppgaven undersøkes det om stålsøylen kan bære en relativ liten bjelkelast alene under brannpåvirkning. For å beskytte området rundt knutepunktet, hvor spenningen i stålet når sin høyeste verdi, simuleres søylen med brannbeskyttelse. Den tilsvarer en tykkelse på 2 mm brannmaling og området varierer fra 100 – 500 mm fra knutepunktet i lengderetningen, i hver retning.

Hensikten med denne oppgaven er å undersøke hvordan ståltemperaturene endrer seg med og uten brannbeskyttelse av området rundt knutepunktet, finne maksimal belastning for en valgt betongfylt stålsøyle ved ulike brannmotstandskrav, beregne stålsøylen for noen relativt lave bjelkelaster og vurdere om den kan bære disse lastene alene under brannpåvirkning.

Simuleringsprogrammet Abaqus student versjon 6.13-2 blir benyttet til termisk analyse av ståldelen av søylen, som er delvis dekket av brannbeskyttelse. Temperaturene leses av etter 1 minutt simulering, grunnet problemer med inndata og programversjon, og verdiene benyttes til en videre vurdering av temperaturendringer og effekten av brannbeskyttelsen. Beregningsprogrammet Potfire V3.0 blir benyttet til å beregne en betongfylt stålsøyle med to forskjellige mengder slakkarmoring og fire forskjellige brannmotstandskrav.

Ut fra beregningene og vurderingene som er gjort i denne oppgaven er ikke 500 mm brannmaling tilstrekkelig beskyttelse. Delen av stålsøylen som ikke er brannbeskyttet vil trolig oppnå temperaturer over de kritiske ståltemperaturene for de tre utnyttelsesgradene som er beskrevet i denne oppgaven. Selv om en betongfylt stålsøyle kan ha en høy brannmotstand, vil ikke stålsøylen alene oppnå en høy nok brannmotstand til å bære bjelkelasten alene gjennom hele brannen.

Det skal bemerkes at denne oppgaven kun bør regnes som et forarbeid til videre forskning rundt denne omfattende problemstillingen. Forslag til videre arbeid beskrives i slutten av oppgaven.

Innhold

Summary	1
Sammendrag	2
Forord	6
1. Innledning.....	7
1.1 Hensikt med oppgaven og praktisk relevans.....	7
1.2 Hypotese.....	7
2. Metoder.....	8
2.1 Prosedyrer i datasimuleringer og beregninger	8
2.2 Feilkilder	8
3. Litteraturstudium	9
3.1 Betongfylte stålsøyler.....	9
3.1.1 Kompositt	9
3.1.2 Tverrsnitt	9
3.1.3 Betongkjernen	10
3.1.4 Arkitektoniske gevinster	10
3.1.5 Ventilasjonshull	11
3.1.6 Utførelse.....	11
3.1.7 Lasttilfeller	11
3.1.8 Kraftoverføring	12
3.1.9 Søyle-bjelke-forbindelse.....	12
3.1.10 Knekking	13
3.1.11 Kostnader	15
3.2 Materialeegenskaper	16
3.2.1 Arbeidsdiagram	16
3.2.2 Spesifikk varmekapasitet.....	18
3.2.3 Varmeledningsevne.....	19
3.2.4 Termisk forlengelse	20
3.2.5 Reduksjonsfaktor.....	21
3.3 Brann	22
3.3.1 Brannforløp	22
3.3.2 Varmeledning	23
3.3.3 Brannkrav	23
3.3.4 Lastfordeling.....	23

3.3.5	Brannisolasjon	23
3.4	Brannlast.....	25
3.4.1	Stråling.....	25
3.4.2	Konveksjon	26
3.5	Branndimensjonering	27
3.5.1	Brannmotstand.....	27
3.5.2	Knekk lengde og knekklast	28
3.5.3	Kritisk temperatur	30
4.	Datasimulering og beregning	31
4.1	Modellen	31
4.2	FEM-analyse	31
4.3	Dataprogrammet Potfire	32
4.4	Manuelle beregninger	33
4.5	Sammendrag	33
5.	Resultater	34
5.1	Datasimulering	34
5.1.1	Stålsøyle med 10 mm filmlengde	35
5.1.2	Stålsøyle med 20 mm filmlengde	36
5.1.3	Stålsøyle med 30 mm filmlengde	37
5.1.4	Stålsøyle med 40 mm filmlengde	38
5.1.5	Stålsøyle med 50 mm filmlengde	39
5.1.6	Stålsøyle med film på hele legden.....	40
5.2	Dataprogrammet Potfire	41
5.3	Manuelle beregninger	42
5.4	Sammendrag	44
6.	Diskusjon	45
7.	Konklusjon	47
8.	Videre arbeid	48
9.	Lister	49
9.1	Figurliste	49
9.2	Tabelliste	50
9.3	Formelliste.....	51
10.	Referanser	52
11.	Vedlegg.....	54

11.1	Inndata datasimulering	54
11.2	Bøyenspenninger	55
11.3	Skjærspenninger	56
11.4	Potfire kalkulasjoner.....	57

Forord

Denne oppgaven er en avslutning av masterstudiet i Byggeteknikk og arkitektur på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) våren 2014. Oppgaven er på 30 studiepoeng. Ideen til oppgaven fikk jeg av Jorun Sandvik i Høyer Finseth AS. Problemstillingen har blitt diskutert flere ganger i konstruksjonsavdelingen, og det var nå på tide å ta et dypere dykk inn i problemet og se hvordan krefter og temperaturer opptrer i disse søylene.

Jeg har lært utrolig mye av å skrive en masteroppgave på tvers av flere fagområder. Det har vært veldig interessant å se hvor langt inne man kan gå i et generelt sett smalt emne. Og da jeg kom skikkelig inn i det var det på tide å runde av. I tillegg har det vært både spennende og utfordrende å lære seg et nytt simuleringsprogram på egenhånd.

Jeg vil takke de ansatte i Høyer Finseth AS for gode samtaler om relevante temaer, støtte og tips. Samt disponering av kontor og nødvendig datautstyr. Jeg vil også takke min veileder ved NMBU, Christian Sørensen, for god hjelp med oppgaveskrivingen. Og til slutt takker jeg venner, familie og samboeren min for gode ord og oppmuntringer underveis i prosessen.

Ås, juni 2014

Marianne Håheim

1. Innledning

1.1 Hensikt med oppgaven og praktisk relevans

Betongfylte stålsøyler har mange fordeler og gevinster i forhold til mer tradisjonelle materialer. Muligheten for å eksponere stål i de bærende konstruksjonsdelene, som vanligvis er kritisk med tanke på brann, er et aktuelt tema. Det er betongen, som bidrar som en kjølede kjerne, som er med på å muliggjøre dette. Vanligvis skal bjelker festes inn i betongkjernen i søylen, slik at kreftene kan fordeles over hele tverrsnittet, men det er ikke alltid mulig. Flere artikler setter det som et kriterie og går ikke videre inn på det. I denne oppgaven ser jeg på muligheten for å feste en bjelke kun i stålet. Dette vil være aktuelt i prosjekter der det er flere bjelker i et knutepunkt som kan resultere i plassmangel. Eller bjelker som skal settes opp i ettertid, eventuelt kom inn i et for sent tidspunkt i prosjekteringen.

I denne oppgaven skal jeg undersøke om dette er mulig ved å brannbeskytte området nærmest knutepunktet, der hvor kreftene gir de høyeste spenningene.

For å ikke miste gevinstene ved bruk av en betongfylt stålsøyle ønsker man ikke store områder med brannbeskyttelse, da velges en annen søyle. Etter samtale med Jorun Sandvik settes maksimalverdien til 500 mm brannbeskyttelse fra knutepunktet.

Er opptil 500 mm brannbeskyttelse rundt knutepunktet tilstrekkelig for en betongfylt stålsøyle med bjelkelast festet kun i ståldelen av tverrsnittet?

1.2 Hypotese

Antar at betongen vil ha en kjølede effekt på stålet, og dermed vil en betongfylt stålsøyle ha bedre brannmotstand enn en stålsøyle alene. Antar at brannisolasjonen vil redusere temperaturen i stålet betraktelig, og holde stålet under kritisk ståltemperatur.

Forventer at brannbeskyttelse av knutepunktet vil redusere temperaturene tilstrekkelig i det aktuelle området, men ikke i resten av søylen. Antar derfor at søylen ikke vil klare en brannmotstand på 60 minutter.

2. Metoder

Det utføres først et litteraturstudium hvor det samles kunnskap om blant annet betong, stål, komposittsøyler og brannforløp. Og videre hvordan materialene opptrer ved ulike temperaturer og belastninger. Dette for å legge et grunnlag for videre forskning av problemstillingen i denne oppgaven, kunne utføre en termisk analyse og beregninger for å kartlegge egenskapene og kapasiteten til slike søyler.

2.1 Prosedyrer i datasimuleringer og beregninger

Til datasimulering benyttes FEM-programmet Abaqus student versjon 6.13-2. Det utføres en termisk analyse og resultatene er med på å legge grunnlag for vurderinger gjort i denne oppgaven.

- Tegner en modell av søylen (Part)
- Definerer materialegenskaper (Property)
- Velger sammensetting av deler (Assembly)
- Definerer type og tidsrom for stegene i analysen (Step)
- Definerer interaksjoner i modellen (Interaction)
- Setter på laster og opplagerbetingelser (Load)
- Deler inn modellen i elementer og noder (Mesh)
- Opprett en jobb for stegene i analysen (Job)
- Leser av resultatene (Visualization)

Til beregning av kapasitet benyttes design-programmet Potfire V3.0. Resultatene er med på å legge grunnlag for vurderinger gjort i denne oppgaven.

- Velger tverrsnitt (Section)
- Velger armering (Reinforcement bars)
- Velger knekk lengde (Buckling length)
- Definerer materialegenskapene (Material characteristics)
- Definerer kalkulasjonen med ulykkeslast brann (Fire Calculation)
- Velger brannmotstand for kalkulasjonen (Fire duration)
- Definerer materialfaktorer (Partial safety factors)
- Leser av resultatene (Result)

Manuelle beregninger er gjort ut i fra Sintef Byggforsk, ISO, Norsk Standard og Eurocode.

2.2 Feilkilder

Det er flere mulige feilkilder knyttet til denne oppgaven.

- Mangel på tilstrekkelig kunnskap innen fagområdet brann
- Mangel på tilstrekkelig kunnskap innen fagområdet konstruksjon
- Mangel på tilstrekkelig kunnskap rundt simulerings- og designprogrammene
- Feil bruk av simulerings- og designprogrammene
- Feil tolkning og valg av inndataverdier
- Forenklet modell med begrenset mesh
- Ufullstendig brannforløp i termisk analyse
- Feiltolkning av resultater

3. Litteraturstudium

3.1 Betongfylte stålsøyler

3.1.1 Kompositt

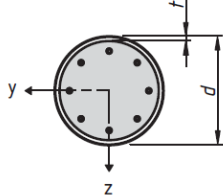
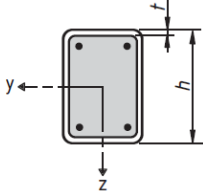
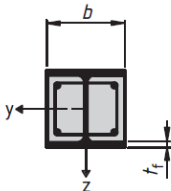
Når to eller flere materialer virker sammen som et materiale kalles det en kompositt. Ved å kombinere ulike typer materialer kan man bringe frem de beste kvalitetene i de forskjellige materialene, og sitte igjen med et spesialtilpasset produkt. En populær kompositt er blandingen av stål og betong. Stål kan brukes som armering i betongkonstruksjoner, og betong kan brukes som fyllmiddel i stålkonstruksjoner.

3.1.2 Tverrsnitt

Betongfylte stålsøyler kan ha ulike tverrsnitt. Bruk av stålprofiler, sirkulære og firkantet ståltverrsnitt er vanlig. Stålprofiler kan plasseres i kjernen på en sirkulær søyle, eller delvis boksset inn av betong [1].

Det stilles krav til forholdet mellom diameteren/høyden/bredden og tykkelsen på den ytre ståldelen. Figur 1 beskriver hvilke maksverdier man kan bruke ved dimensjonering av komposittsøylene.

Videre i denne masteroppgaven vil det kun bli fokusert på sirkulære ståltverrsnitt. Og dette begrenses ytterligere til frittstående søyler med jevn brannpåkjenning rundt hele søylen.

Tverrsnitt	Maks (d/t), maks (h/t) og maks (b/t _f)
Sirkulært hulprofil 	Maks $(d/t) = 90 \frac{235}{f_y}$
Rektangulært hulprofil 	Maks $(h/t) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
Delvis bokset inn I-profil 	Maks $(b/t_f) = 44 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

Figur 1. Maksimal verdier for (d/t), (h/t) og (b/t_f) med f_y i N/mm² [1]

3.1.3 Betongkjernen

Det skiller hovedsakelig mellom tre typer betongkjerner i betongfylte stålsøyler. Ren betong, slakkarmert betong og fiberarmert betong [2].

En ren betongkjerne inneholder ikke armering. I tilfeller med lav last og/eller ingen brannkrav kan denne kjernen ha tilstrekkelig kapasitet. I følge et forskningsforsøk vil den ikke gi et like stort bidrag til brannmotstanden i søylen som slakkarmert og fiberarmert betong [2]. Søylen med en ren betongkjerne vil trolig gå direkte til brudd grunnet knekking etter 1 til 2 timer [2].

En slakkarmert betongkjerne inneholder armeringsjern. Antallet, plasseringen og størrelsen varierer etter ønsket tverrsnitt, lastsituasjon og brannmotstand av søylen. Det kan være en tidkrevende jobb å binde armeringsjernene, så denne kjernen kan ha en høyere kostnad enn de to andre betongkjernene ved et tilsvarende tverrsnitt og belastning [3]. Den har derimot en høyere brannmotstand og bæreevne enn den rene betongkjernen [2]. Det kan være problematisk å fylle søylen med betong hvis innholdet av armering blir for stort og det blir trangt om plassen. Det er derfor viktig at søylene blir fylt på riktig måte, slik at det ikke oppstår hulrom i betongen. Noe som kan redusere bæreevnen betraktelig på grunn av redusert betongtverrsnitt og mangel på heft mellom betongen og stålet i det aktuelle området. Betong av høy kvalitet med lavt vanninnhold og superplastiserende stoffer kan bidra til en lettere bearbeidelig betong, og kan kompensere for denne risikoen [4].

En fiberarmert betongkjerne inneholder små metallfibrer som fungerer som armering. Dette er en sterk kjerne som kan klare mye last når ståldelen av søylen begynner å miste sin styrke [2]. Metallfibrene er ferdig blandet i betongen før den pumpes i søylen. Dette er en rask og effektiv måte å armere søylene på [2].

Både slakkarmerte og fiberarmerte betongkjerner forventes å ha et seigt brudd. Søyler med slike kjerner kan være motstandsdyktige mot brann i opptil 3 timer [2].

Det er flere faktorer, blant annet tverrsnittsareal, slankhet og armering, som virker inn på motstandsevnen mot brann. Hver søyle må dimensjoneres for den konstruksjonsbelastning den er utsatt for, og verdiene i dette delkapittelet er kun en veiledning.

Videre i oppgaven beskrives kun søyler med slakkarmert betongkjerne hvor armeringsmengden benevnes i prosentandel av tverrsnittet.

3.1.4 Arkitektoniske gevinster

Det er flere arkitektoniske gevinster med betongfylte stålsøyler. I de tilfellene hvor brannisolasjon kan sløyfes helt, vil man kunne eksponere stålet. Dette kan være med på å gi det utseende arkitekten er ute etter. Det å eksponere materialer på den måten vil kunne gi et naturlig og ekte inntrykk, noe som kan ses på som et stort designmessig spillerom.

Under samme last og brannpåkjenning vil betongfylte stålsøyler ha et mindre tverrsnitt enn en enkel stålsøyle [3]. Dette er et pluss for blant annet arkitekten som nå får frigjort mer gulvareal.

I forhold til en ren stålkonstruksjon kan man ved bruk av betongfylte stålsøyler beholde samme tverrsnitt nedover i etasjene i fleretasjes bygg. Dette grunnet økt bæreevne på grunn av betongkjernen [3]. Man oppnår dermed en mer helhetlig estetikk.

Forholdet mellom betongkjernen og ståldelen av søylen endres ikke proporsjonalt med stigende belastning av søylen. Når lasten øker skal betongkjernen ha en større prosentvis andel av tverrsnittet enn ståldelen. Det blir ofte benyttet betongfylte stålsøyler med samme utvendig dimensjon og tverrsnitt i fleretasjesbygg. Det kan være av estetiske grunner, eller praktiske grunner som utforming av knutepunkt og lignende. De nederste søylene har mest sannsynlig større belastning enn de over, dette vil justeres med en større betongkerne, og kan være en god løsning økonomisk sett [5].

3.1.5 Ventilasjonshull

Under høye temperaturer, som under brannpåvirkning, vil betongen gi fra seg vann. Dette vannet vil etterhvert gå over til vanddamp og danne et høyt trykk. Det må være ventilasjonshull i ståldelen av søylen for å unngå sprengningsfare [5].

Det bør plasseres et hull i hver ende av søylen. Plassering, antall og størrelse må avgjøres for den enkelte konstruksjon [2]. Det er viktig at hullene plasseres et sted hvor de ikke vil bli dekket til, unngå etasjeskillere, vinduer og lignende. Det bør også være et dreneringshull ved bunnen av søylen. Hvis søylen skal monteres og etterfylles på byggeplass, vil vann og lignende kunne renne ut før fylling av betong. Dreneringshullet i bunn kan være et av ventilasjonshullene [5].

3.1.6 Utførelse

Det er ulike metoder for å sette opp betongfylte stålsøyler. For å spare tid blir søylene som regel klargjort med armering før de ankommer byggeplassen. Søylen kan fylles med betong før eller etter montering. Ståldelen av søylen er beregnet for å bære konstruksjonslasten i de tilfellene hvor søylene støpes ut etter montering. Dette for å spare ytterligere med tid på å slippe å vente med belastning til betongen har herdet [5].

Ved betongfylling på byggeplassen er det viktig å se til at dreneringshullene ikke er tettet igjen, og søylen er fri for f.eks. vann [5]. Søylen kan fylles fra toppen eller bunnen. Det er viktig å bruke riktig fallhøyde/trykk og utføre tiltak mot dannelse av uønskede luftbobler. Dette er særs viktig i betongfylte stålsøyler siden man ikke kan utføre visuellkontroll i ettertid som på en vanlig betongsøyle [2].

Ved betongfylling på fabrikk vil man kunne sette opp en ferdig søyle. En prefabrikkert søyle kan settes opp i allslags vær, og kan dermed spare byggetid [3].

3.1.7 Lasttilfeller

Søylen kan bli belastet på ulike måter. For en kompositt-søyle er det optimalt å påføre belastningen vertikalt og sentrert midt over søylen gjennom en topplate. Da vil kreftene fordele seg jevnt mellom de forskjellige materialene. Videre får man en god lastoverføring mellom materialene etter hvert som temperaturen øker og materialene reagerer på hver sin måte [2].

Ved eksentrisk vertikallast må lastflaten reduseres. Videre vil utbredningsområdet også bli redusert, og lasten vil opptre som en større belastning for søylen enn en tilsvarende sentrisk vertikallast [5].

En utfordrende lastsituasjon for betongfylte stålsøyler under brannpåvirkning er horisontallaster fra bjelker. Ved plassmangel eller knutepunkt med for mange bjelker i et punkt kan man ikke alltid feste bjelken i betongkjernen. Det kan også være en bjelke som har blitt glemt under dimensjoneringen,

eller har kommet inn i bildet på et senere tidspunkt. Da må man feste den i ståldelen av søylen og føre kreftene over på en annen måte. Problemet med slike løsninger oppstår under brannpåvirkning når de forskjellige materialene begynner å opptre ulikt. Her er det viktig å ha kontroll på hvordan kreftene føres over fra bjelken til søylen på en forsvarlig måte [2].

3.1.8 Kraftoverføring

Hvis søylen er belastet jevnt, til eksempel, gjennom en topplate vil kraftfordelingen avhenge av materialenes E-moduler og arealforholdet. Problemene og utfordringene oppstår når søylene blir utsatt for en ulykkeslast som f.eks. brann. Da vil ikke kraftoverføringen forgå på samme måte, se delkapittel 3.3.4. Det er derfor viktig å bevisstgjøre og kartlegge kraftoverføringen. Dette for å vite med sikkerhet at konstruksjonsdelene klarer belastningene, og oppfyller brannkravene, som er satt.

Når stålsøylen fylles med betong får man en kompositt. I en betongfylt stålsøyle i romtemperatur vil en stor del av kraftoverføringen mellom materialene forgå gjennom heft. Når betongen er ferdig herdet er materialene forbundet både kjemisk og ved friksjon. Skjærmotstanden mellom betongoverflaten og innsiden av stålsøylen er beregnet til $0,55 \text{ N/mm}^2$ [5].

3.1.9 Søyle-bjelke-forbindelse

Vanligvis vil man benytte en innslisset plate, eller en tilsvarende løsning, ved utforming av et bjelke-søyle-knutepunkt i en betongfylt stålsøyle. Dette for å føre kreftene fra bjelken inn i betongkjernen i søylen. Ved innfestning kun i stålet kan vinkelstål, stålplater, bolter og/eller sveising benyttes [6].

Videre i oppgaven, på grunn av begrenset tid, vil kun bjelke-forbindelser festet i ståldelen av søylen beskrives. Det fokuseres på en momentoverførende forbindelse ved blant annet bruk av stålplater for å unngå lokal-utbøyning av stålet i søylen. Bjelkeforbindelsen danner et moment og en aksialkraft i søylen.

Ende-momentet for en fast innspent bjelke med jevnt fordelt last

Formel 1:

$$M = \frac{ql^2}{12} \text{ [kNm]}$$

Skjærkraften i bjelken, som blir en del av aksialkraften i søylen, for en fast innspent bjelke med jevnt fordelt last

Formel 2:

$$V = \frac{ql}{2} \text{ [kN]}$$

Disse kreftene vil gi bøyespenninger, σ , og skjærspenninger, τ , i søylen

Formel 3:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M}{I} * y \text{ [MPa]}$$

Formel 4:

$$\tau = \frac{V}{A} \text{ [MPa]}$$

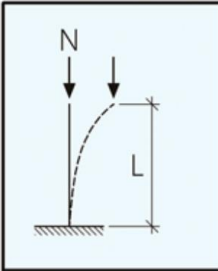
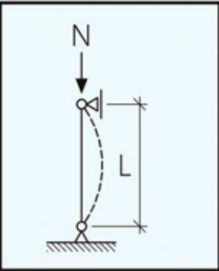
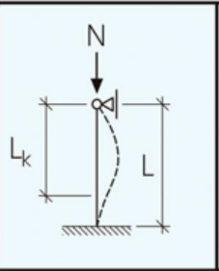
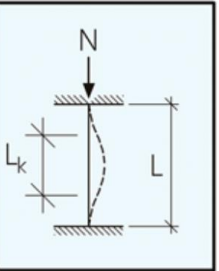
Formel for annet arealmoment for sirkulær ring [7]

Formel 5:

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \text{ [mm}^4\text{]}$$

3.1.10 Knekkning

Knekk lengden til en søyle er avhengig av opplagerbetingelsene. Figur 2 viser fire forskjellige opplagerbetingelser og hvordan knekk lengdene kan beregnes ut i fra søylens lengde, L.

			
$L_k = 2,0 L$	$L_k = 1,0 L$	$L_k \approx 0,7 L$	$L_k = 0,5 L$

Figur 2. Knekk lengder [6]

Ved betongfylling av en stålsøyle vil man få en sterkere søyle, som vil være mer motstandsdyktig mot knekkning enn en enkel stålsøyle. Noe som vil gi et positivt bidrag til søylens styrke mot brudd, og søylen kan derfor beregnes med en redusert slankhet.

Slankheten reduseres også med økende armeringsmengde.

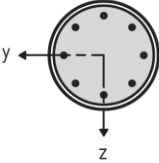
Figur 3 henviser til knekkurve a for søyler med mindre enn 3 % armering og kurve b for søyler med mellom 3 og 6 % armering. Hvor p_s står for armeringsgraden A_s/A_c , hvor A_s står for armeringsareal og A_c for betongareal.

Videre er det også en reduksjon av slankheten ved høye temperaturer, se delkapittel 3.5.2 for detaljer.

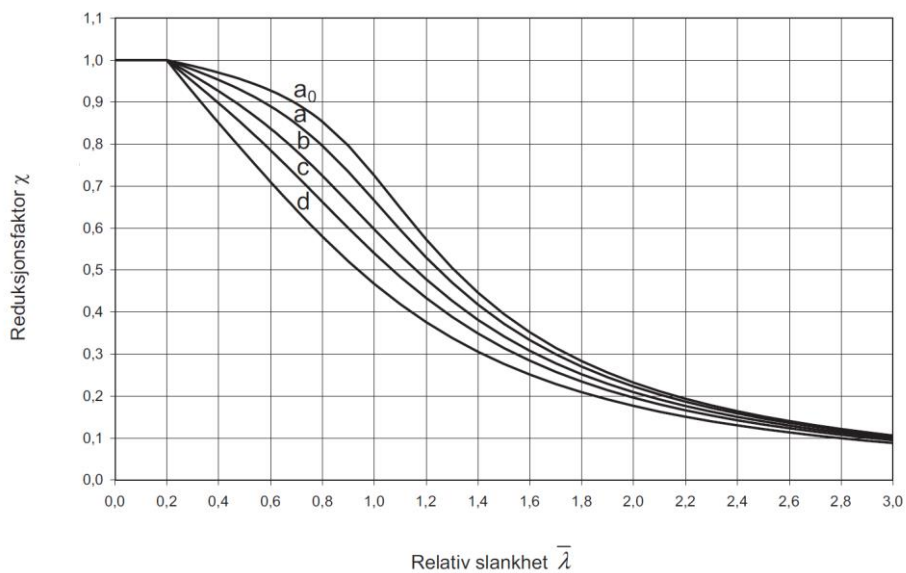
Dimensjonerende aksiallast, N_{Ed} , må tilfredsstille kravet i formel 6. Reduksjonsfaktoren, χ , leses av i figur 4 etter beregning av søylens relative slankhet og valg av knekkurve. Hvor $N_{pl,Rd}$ er den plastiske styrken til søylen [1].

Formel 6:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1,0$$

Tverrsnitt	Grenser	Knekkakse	Knekkurve	Utbøyning
Sirkulære og rektangulære hulprofiler i stål 	$\rho_s \leq 3\%$	alle	a	$L/300$
	$3\% < \rho_s \leq 6\%$	alle	b	$L/200$

Figur 3. Knekkurver og utbøyning for kompositt-søyler [1]



Figur 4. Knekkurver [8]

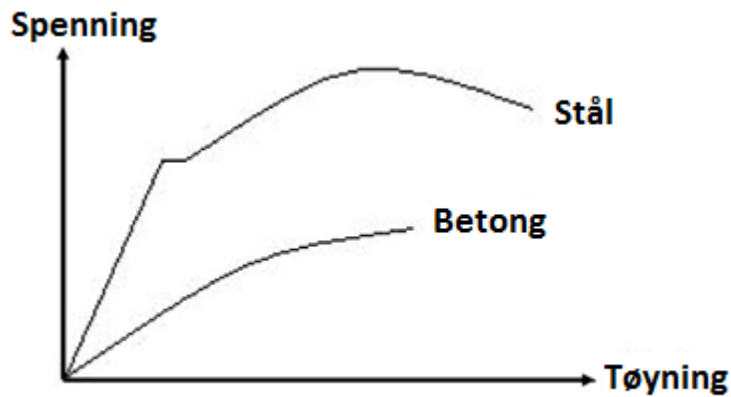
Videre i oppgaven beskrives kun søyler som er leddet i begge ender. Søylerne som skal undersøkes i denne oppgaven er kontinuerlige søyler i fleretasjes bygg, og dette vil bli den beste tilnærmingen.

3.1.11 Kostnader

De tre typer betongkjerner har ulik bæreevne, byggetid, brannmotstand og kostnad. Det er også mulig å fylle søylen med ulike typer mørtel, men det inngår ikke som en del av denne oppgaven [5]. I forhold til en enkel betongsøyle slipper man ved bruk av en betongfylt stålsøyle å bruke forskaling. Dette sparer tid og penger. Forskning viser at betongfylte stålsøyler er konkurransedyktige med tanke på pris i fleretasjes konstruksjoner [5].

3.2 Materialegenskaper

3.2.1 Arbeidsdiagram



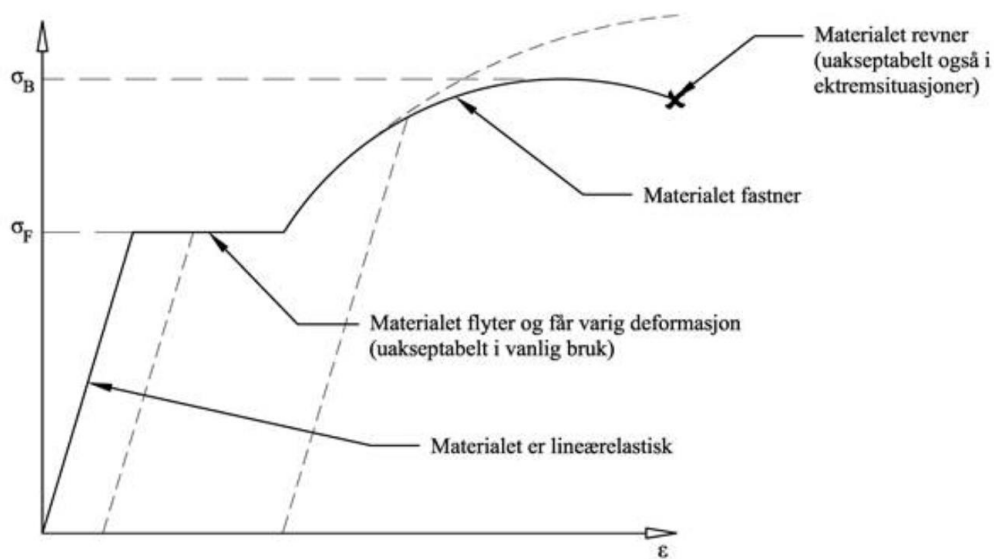
Figur 5. Arbeidsdiagram for stål og betong [9]

Stål og betong har forskjellige materialegenskaper. Stål er et duktilt materiale som kan tøyres i stor grad før det går til brudd. Betong er et sprøtt materiale som går direkte til brudd ved maksimal spenning.

Maksimal spenning i stålet regnes ut i fra den maksimale kraften som kan påføres et tversnittareal før komponenten går til brudd [10].

Arbeidsdiagram gir en oversiktlig fremstilling av hvordan et materiale oppfører seg under spenning og tøyning.

I figur 5 vises spenning-tøyning-diagrammet for stål og betong i samme diagram. Dette for å tydeliggjøre forskjellene mellom egenskapene til stål og betong. Betonggrafene stiger jevnt i både spenning og tøyning før materialet går til brudd i grafens endepunkt. Stålet derimot kan tøyres en god del etter det har oppnådd maksimal spenning. Dette forteller mye om hvordan bruddform materialet har. Betongen vil trolig ikke gi noe forvarsel før den går til brudd. Stålet som har en nedgang i spenning mens tøyningen økes rett før brudd, noe som vil endre materialet så mye at det kan synes på blant annet deformasjoner, vil gi en indikasjon innen brudd.



Figur 6. Arbeidsdiagram for konstruksjonsstål [11]

Figur 6 illustrerer forskjellige stadier i spenning-tøyning-diagrammet til konstruksjonsstål [11]. Materialet går først gjennom en lineærelastisk-fase, denne ender når flytgrensen nås. Her begynner materialet å flyte og får varige deformasjoner. Man er nå inne i plastisk område. Ved videre belastning vil materialet begynne å fastne og går til slutt til brudd med grafens endepunkt.

Elastisiteten til et materiale blir målsatt med elastisitetsmodulen, E . E regnes ut i fra det lineærelastiske området. Slutten av dette området indikerer hvor sprøe og skjøre materialer går til brudd og hvor duktile materialer får belastninger som gir varige deformasjoner, også kalt flyt.

Forholdet mellom spenning, tøyning og elastisitetsmodulen fremstår i Hooke's lov i formel 7.

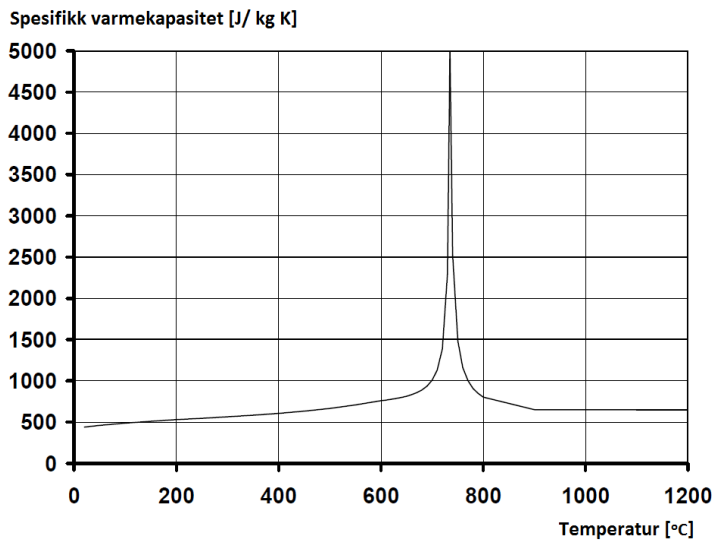
Formel 7:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad [N/mm^2 = MPa]$$

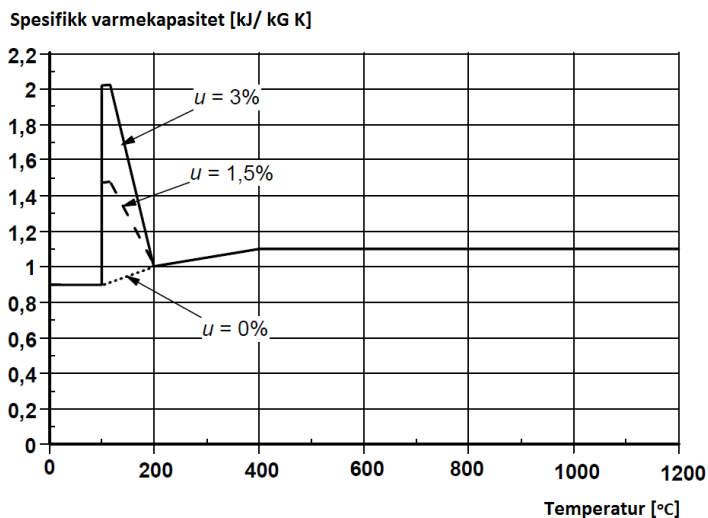
Stål har en elastisitetsmodul på rundt 210.000 MPa [8] og betong har en elastisitetsmodul på mellom 20.000 – 44.000 MPa avhengig av fasthetsklasse [12].

3.2.2 Spesifikk varmekapasitet

Spesifikk varmekapasitet måles i hvor mye energi i form av varme, målt i Joule (J), et materiale kan ta opp per kilo (kg) ved en temperaturendring på 1 Kelvin (K). Figur 7 viser spesifikk varmekapasitet til stål. Kapasiteten ligger på rundt 500-700 J/kg*K foruten en ekstrem endring rundt intervallet 700-800°C, hvor den kommer helt opp i 5000 J/ kg*K. Dette kan være en faseovergang i materialet. Varmekapasiteten returnerer så til en verdi på rundt 500-700 J/kg*K . Figur 8 viser spesifikk varmekapasitet til betong. Betongens evne til å ta opp varme avhenger av vanninnholdet i betongen. Dess høyere vanninnholdet er dess mer energi kan betongen ta opp. Dette gjelder henholdsvis for temperaturer mellom 100 og 200°C og vanninnhold mellom 0 og 3 % (se figur 8). Når betongen når en temperatur på 200°C er alt vannet som ikke er kjemisk bundet drevet ut, og vannet som er kjemisk bundet begynner å skille seg ut [2]. Videre flater kurven ut når temperaturen når 400°C og ligger da stabilt rundt 1100 J/kg*K. For sammenligning har betong rundt dobbelt så høy spesifikk varmekapasitet som stål. Det vil si at betongen vil kunne lagre mye energi i form av varme, noe som virker som en kjølende effekt på stålet i en komposittsøyle [2].



Figur 7. Spesifikk varmekapasitet til stål som en funksjon av temperatur [13]

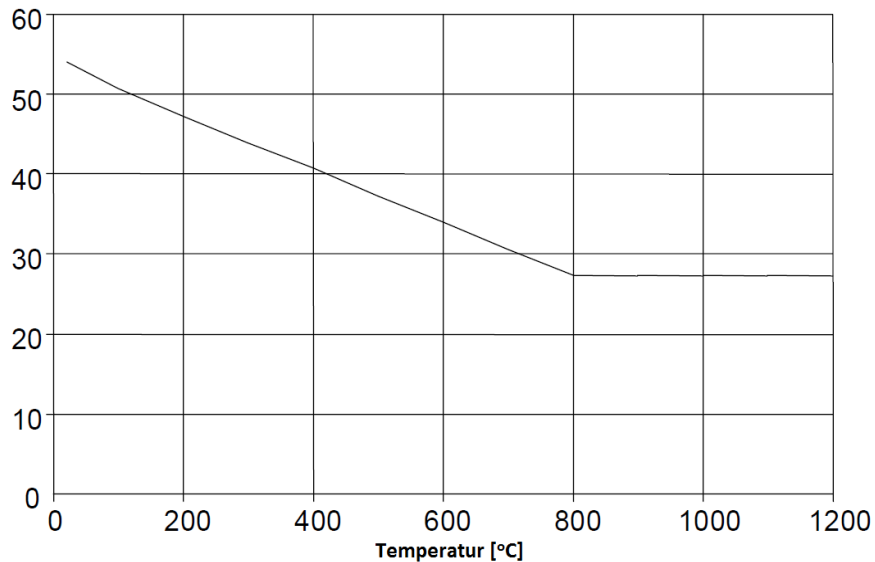


Figur 8. Spesifikk varmekapasitet som en funksjon av temperatur for betong med tre forskjellige vannmengder [14]

3.2.3 Varmeledningsevne

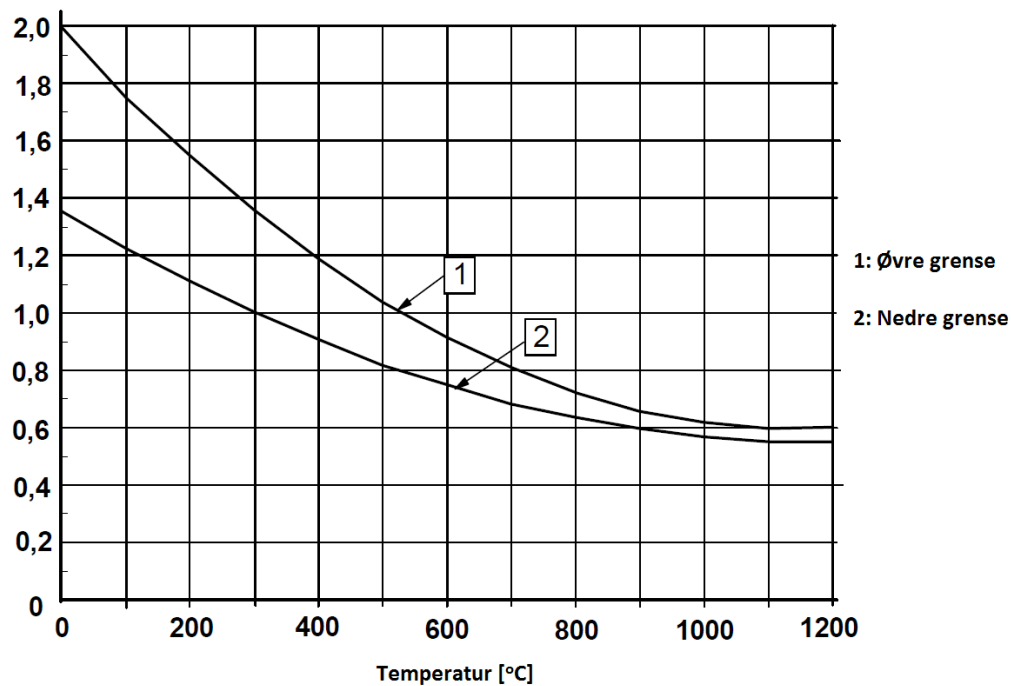
Varmeledningsevnen til et materiale avhenger av temperatur. Både stål og betong leder mer varme ved lavere temperaturer, se verdier for stål i figur 9 og betong i figur 10. Når stålet når en temperatur på 800°C flater kurven ut og stålet leder rundt 27 W/m*K. Betongen har en mer buet kurve. Man kan lese fra figurene at stål leder rundt 30 – 40 ganger mer varme enn betong.

Varmeledning [W/mK]



Figur 9. Varmeledning i karbonstål som en funksjon av temperatur [13]

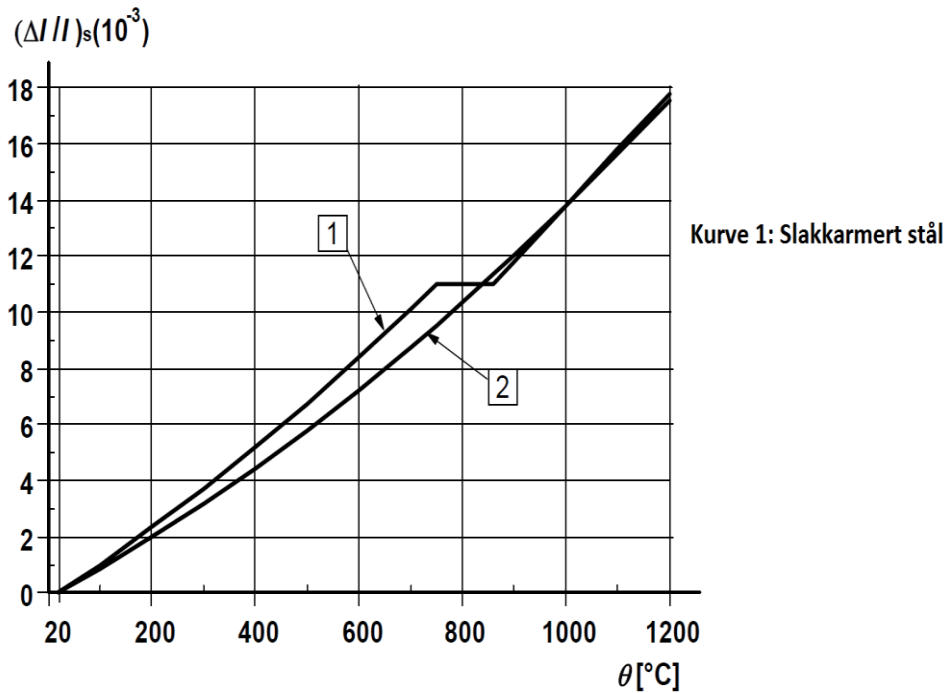
Varmeledning [W/mK]



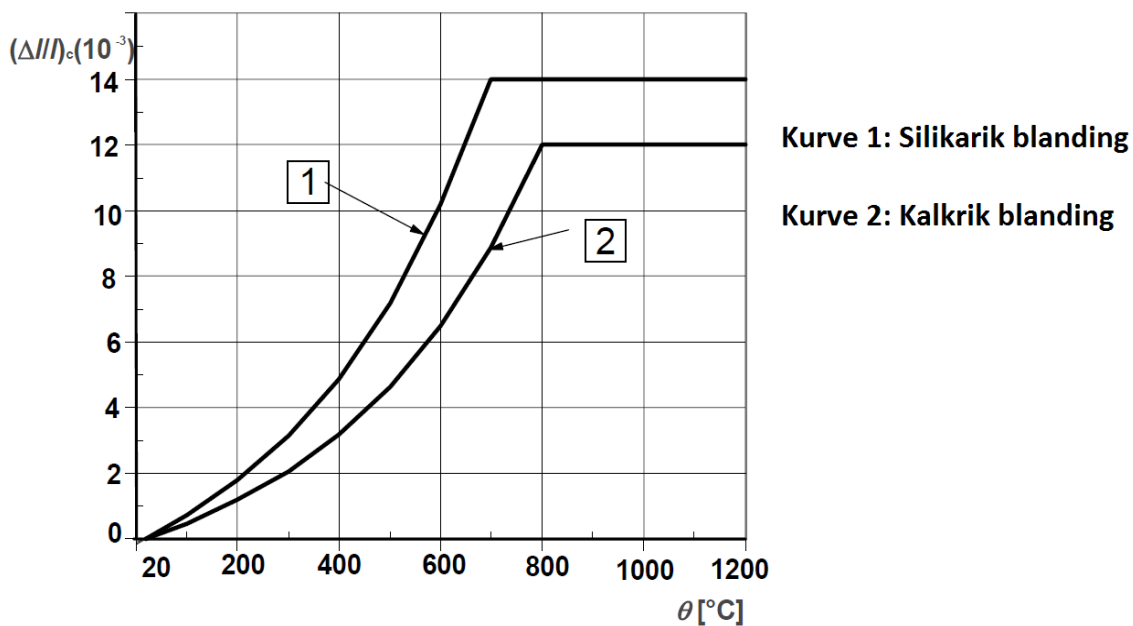
Figur 10. Varmeledning i betong som en funksjon av temperatur [14]

3.2.4 Termisk forlengelse

Hvordan et materiale tøyes avhenger blant annet av temperaturen. Mange materialer har lavere E-modul jo høyere temperatur de er utsatt for. Dette gjelder både for stål som vises i figur 11 og betong som vises i figur 12. Det er verdt å legge merke til at stålets graf ikke flater ut, men stiger kontinuerlig når temperaturen øker. Betongen derimot har nådd sin maksimale tøyningsgrense når materialet når en temperatur på rundt 700-800 °C.



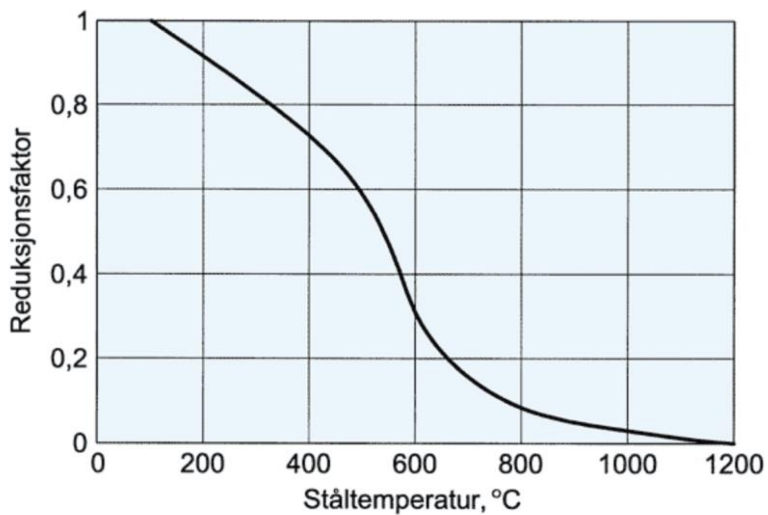
Figur 11. Termisk forlengelse av stål [14]



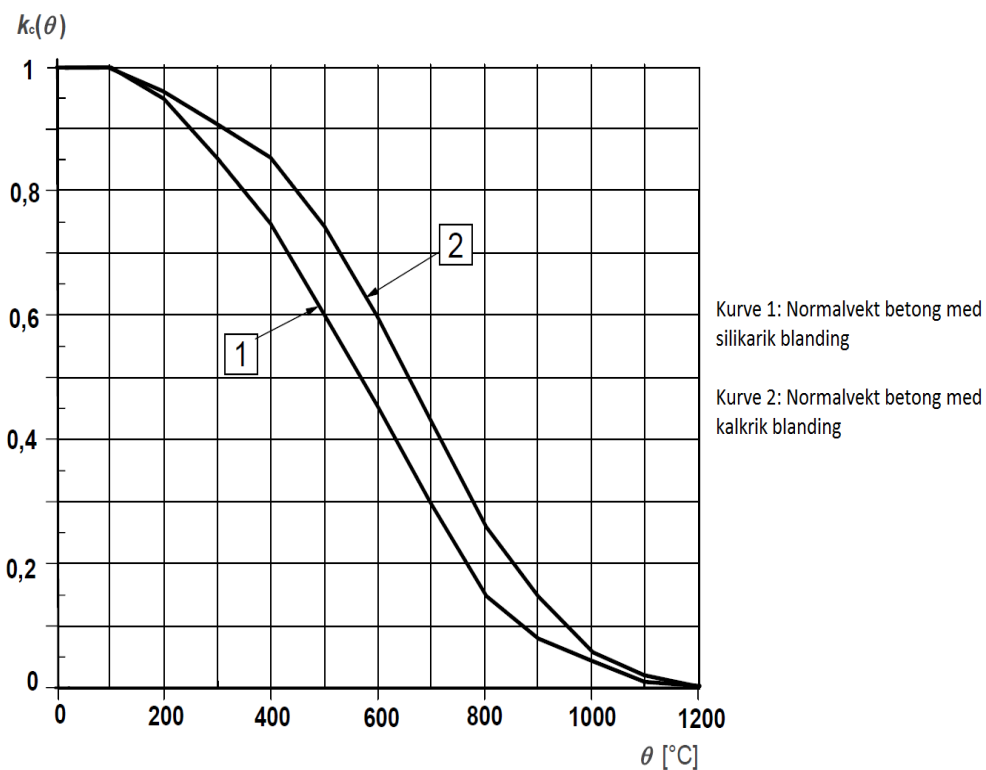
Figur 12. Termisk forlengelse av betong [14]

3.2.5 Reduksjonsfaktor

Ved høye temperaturer mister materialene noe av sin styrke. For å finne ut hvor mye styrke et materiale mister, bruker man en reduksjonsfaktor. Grafen i figur 13 viser sammenhengen mellom reduksjonsfaktoren og ståltemperaturen. Og henholdsvis i figur 14 vises sammenhengen mellom reduksjonsfaktoren og betongtemperatur. Grensen på hva som regnes som kritisk temperatur avhenger av hvor høyt utnyttet et materiale er. Jo høyere utnyttelsesgraden er, jo lavere er den kritiske temperaturen [15].



Figur 13. Reduksjonsfaktor for flytegrense av stål [15]

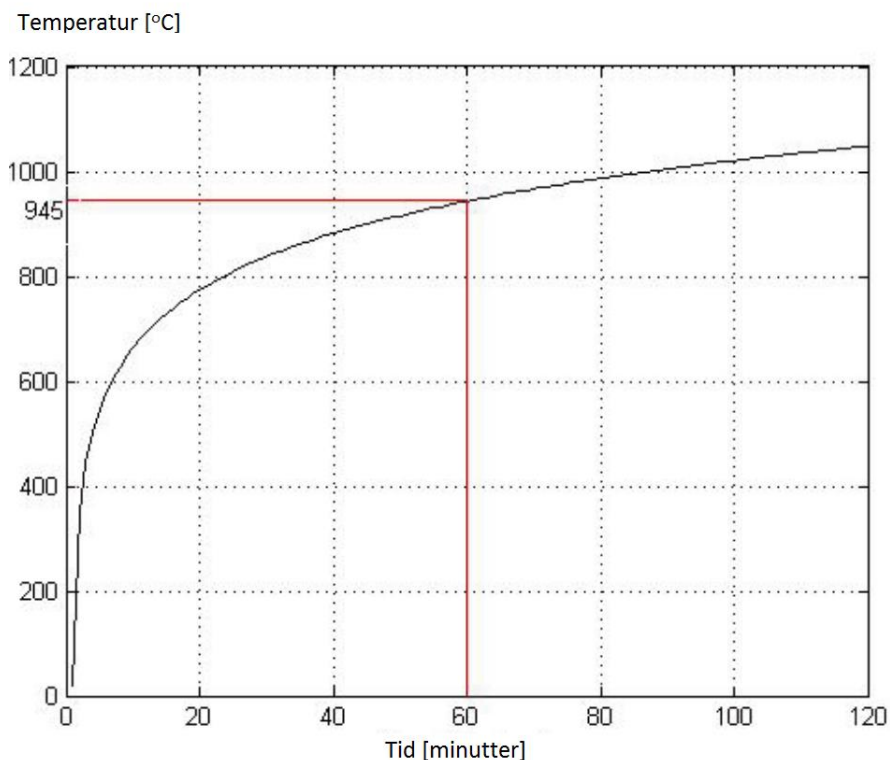


Figur 14. Reduksjonsfaktor for karakteristisk styrke (fck) av betong [14]

3.3 Brann

3.3.1 Brannforløp

For å kunne dokumentere at en konstruksjon har den brannmotstand den er dimensjonert for, må man utføre en test. Selv om ikke alle branner opptrer på nøyaktig samme måte, er det utviklet en standard brannkurve slik at man kan teste og sammenligne forskjellige konstruksjoner. Brannkurven er fremstilt som en tid-temperatur-kurve, og er blant annet presentert i den internasjonale standarden ISO834, se figur 15. Av denne grafen kan man lese av en temperatur på 945°C etter 60 minutters brann.



Figur 15. ISO - Standard brannkurve [16]

ISO- Standard brannkurve følger den samme fasen som oppvarmingsfasen av gasstemperaturen i formel 8 [16]. Ligningen kan benyttes til å finne temperaturen på et ønsket tidspunkt i brannforløpet.

Formel 8:

$$T(t) = 345 \log(480t + 1) + T_0 \quad t > 0$$

Hvor

t = tiden i timer

T(t) = gasstemperatur i °C ved tiden t

T₀ = temperatur i °C ved tiden 0

3.3.2 Varmeledning

Energi i form av varme kan spre seg på tre ulike måter; varmeledning, varmestråling og konveksjon. Varmen forflytter seg alltid fra et sted med en høyere temperatur til et sted med en lavere temperatur. Materialer leder varme på ulike måter, se delkapittel 3.2.3 for mer informasjon om stål og betong. Materialer som har god varmeledningsevne, som stål, kan overføre så høye temperaturer at det kan oppstå brann i en annen del av konstruksjonen.

3.3.3 Brannkrav

Det skiller mellom 4 ulike brannklasser. Det er en kombinasjon av risikoklasse og konsekvensgrad som avgjør hvilken brannklasse en konstruksjon skal plasseres i. Hvor mange etasjer og hvilke bruksområder bygget har, er viktige faktorer i kartleggingen [17].

Ut i fra konstruksjonens brannklasse bestemmes krav til hvordan konstruksjonsdelene/bæresystemet skal opprettholde sin styrke under brannpåvirkning.

Konstruksjonsdeler benevnes ut i fra dens brannmotstand. Med bokstav R for bæreevne, E for integritet, I for isolasjon og/eller M for mekanisk motstandsevne. Etterfulgt av et tall som sier hvor mange minutter motstandsevnen gjelder. Bærende konstruksjonsdeler, som søyler og bjelker, benevnes som regel kun etter konstruksjonsdelens bæreevne [18]. En søyle med brannmotstand R60, til eksempel, vil holde sin bæreevne under brannpåvirkning i 60 minutter.

3.3.4 Lastfordeling

Ved romtemperatur (om lag 20°C) vil stålet og betongen virke sammen som et godt komposittmateriale. Ved brann vil den høye temperaturen endre oppførselen til de to materialene. I brannens tidligfase vil stålet utvide seg raskere enn betongen, og vil dermed også bære mer og mer av lasten. Etter hvert vil stålet miste styrken og lasten føres gradvis over til betongkjernen [5]. Selv om betong har en høy spesifikk varmekapasitet, vil den etter en stund stige i temperatur. Som en del av denne prosessen vil vannet i betongen drives ut og fordampe [2]. Derav viktigheten av riktig plassering, antall og størrelse på ventilasjonshull. Se delkapittel 3.1.5 for utfyllende informasjon. I denne fasen, hvor betongen bærer hoveddelen av lasten, kommer ståldelen likevel med et godt bidrag i form av tildekking av betongkjernen.

Når bæreevnen til de to materialene i komposittsøylen tilsammen ikke er høyere enn den påførte lasten vil det oppstå brudd, og søylen har ikke lenger evnen til å bære lasten.

3.3.5 Brannisolasjon

Det finnes ulike måter å brannbeskytte stålkonstruksjoner på. Man kan blant annet male konstruksjonen med en brannhemmende maling eller bokse den inn med gipsplater. Dette kalles brannisolasjon. Ubeskyttet stål tåler som regel ikke mer enn 10 til 15 minutter med de høye temperaturene som oppstår under brann [15]. Ved bruk av brannisolasjon vil man sinke oppvarmingen av stålet, og konstruksjonen vil bevare styrken i en lengre periode.

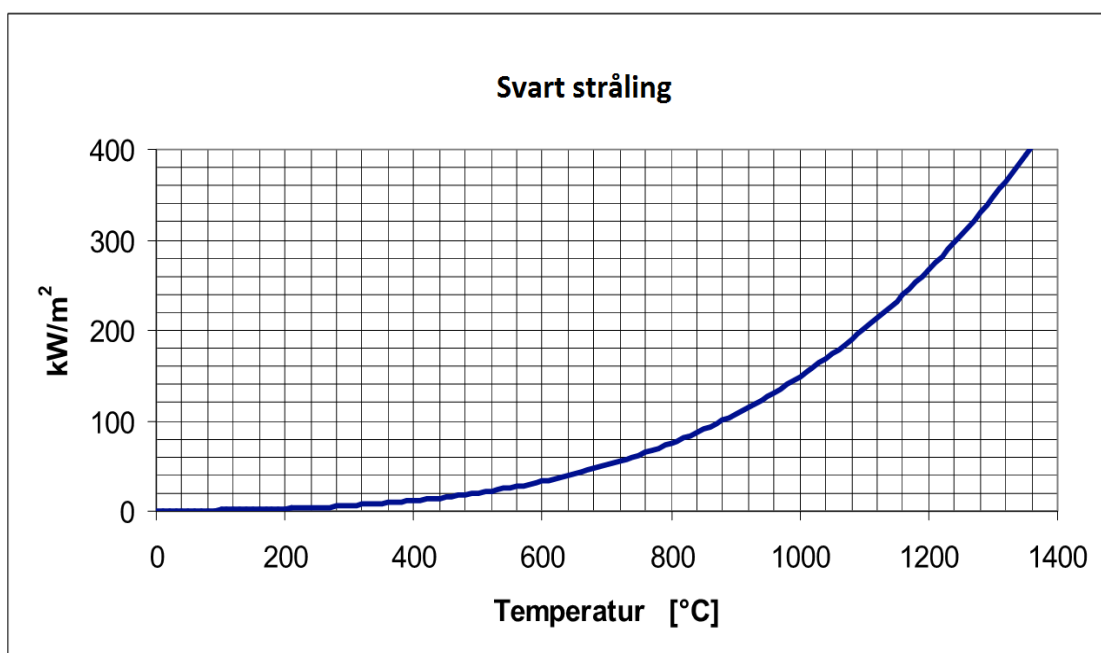
Ved å fylle søylen med betong vil man kunne oppnå en lignende effekt som ved bruk av brannisolasjon. Betongkjernen som har helt andre materialegenskaper enn ståldelen, vil kjøle ned stålet og bidra til en økt brannmotstand [5]. Dette er et resultat av blant annet den høye spesifikke varmekapasiteten til betong i forhold til stål.

3.4 Brannlast

Brann er en stor belastning for en konstruksjon. Brannlast regnes som en varmeovergang og måles i kW/m^2 . Den deles inn i stråling og konveksjon [19]. Grunnet små verdier i gass kan varmeledning neglisjeres i denne sammenhengen [19].

3.4.1 Stråling

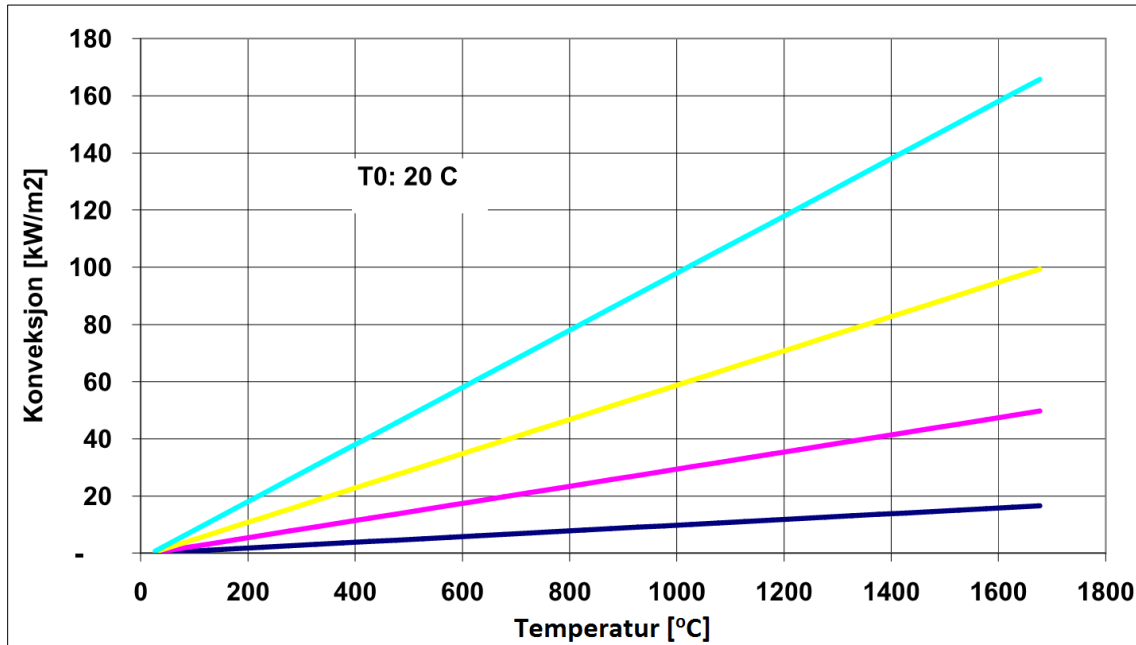
«Flammer har emissivitet i form av sotpartikler og det er rimelig å anta emissivitet tilnærmet lik 1 for flammer tykkere enn 3-4 meter, alt avhengig av brensel » [19]. Man kan derfor sammenligne strålingen fra brann med svart stråling, og finne varmeovergangen fra figur 16.



Figur 16. Varmeovergang for svart stråling ved ulike temperaturer [20]

3.4.2 Konveksjon

Figur 17 viser varmeovergang i form av konveksjon ved ulike temperaturer. Utgangstemperaturen, T_0 , er satt til 20°C. Ved valg av varmerovergangskoeffisient, h , finner man varmeovergangen ved de forskjellige temperaturene.



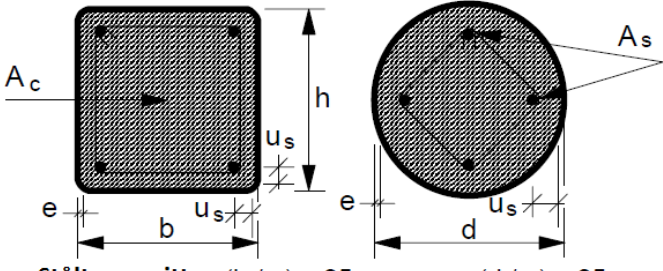
h: — 10 — 30 — 60 — 100 W/m²K

Figur 17. Varmeovergang i form av konveksjon ved ulike temperaturer [21]

3.5 Branndimensjonering

3.5.1 Brannmotstand

Figur 18 viser hvordan man kan beregne brannmotstanden til en betongfylt stålsøyle på en forenklet måte. Man kan ved informasjon om utnyttelsesgrad, prosentandel armering og akseavstand til armering (u_s), finne ut hvor mange minutters brannmotstand søylen har. Man kan også, til eksempel, finne armeringsbehovet til en søyle som skal ha minimum brannmotstand R120 ved å lese figuren på en annen måte. Det som kommer tydelig frem i denne figuren er hvor stor betydning utnyttelsesgraden av søylen har å si med tanke på brannmotstand. En høyt utnyttet søyle har lavere brannmotstand enn en som er mindre utnyttet.

 Ståltverrsnitt: $(b/e) \geq 25$ eller $(d/e) \geq 25$		Brannmotstand				
		R30	R60	R90	R120	R180
1	Minimum tverrsnitt ved utnyttelsesgrad $\leq 0,28$					
1.1	Minimum h og b eller diameter d i [mm]	160	200	220	260	400
1.2	Minimum armeringsmengde $A_s/(A_c + A_s)$ i (%)	0	1,5	3,0	6,0	6,0
1.3	Minimum akseavstand for armering U_s [mm]	-	30	40	50	60
2	Minimum tverrsnitt ved utnyttelsesgrad $\leq 0,47$					
2.1	Minimum h og b eller diameter d i [mm]	260	260	400	450	500
2.2	Minimum armeringsmengde $A_s/(A_c + A_s)$ i (%)	0	3,0	6,0	6,0	6,0
2.3	Minimum akseavstand for armering U_s [mm]	-	30	40	50	60
3	Minimum tverrsnitt ved utnyttelsesgrad $\leq 0,66$					
3.1	Minimum h og b eller diameter d i [mm]	260	450	550	-	-
3.2	Minimum armeringsmengde $A_s/(A_c + A_s)$ i (%)	3,0	6,0	6,0	-	-
3.3	Minimum akseavstand for armering U_s [mm]	25	30	40	-	-

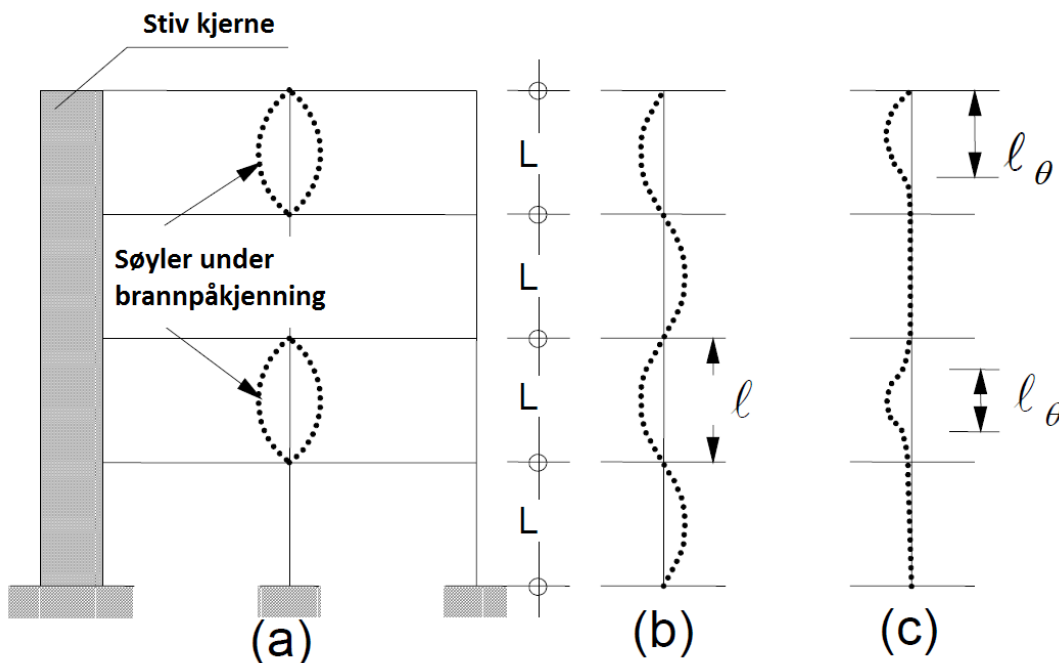
Figur 18. Minimum tverrsnittsdimensjoner, armeringsmengde og akseavstand for armering i betongfylte stålsøyler [22]

3.5.2 Knekk lengde og knekklast

Figur 19 viser hvordan en søyle endrer seg ved belastning i romtemperatur og ved belastning under høye temperaturer.

Man kan regne med en redusert knekk lengde på den betongfylte stålsøylen under brannpåvirkning. Ved bruk av redusert knekk lengde må konstruksjonen være avstivet og ha tilstrekkelig brannmotstand. Det innebærer blant annet at etasjeskillerne må ha minimum samme brannmotstand som søylen, og hver etasje regnes som en branncelle. Del C av figur 19 illustrerer de reduserte knekk lengdene. Verdiene for de brannpåkjennte søylene er $0,7 * L$ for søylen i øverste etasje og $0,5 * L$ for en søyle som regnes som kontinuerlig gjennom flere etasjer [22].

Se delkapittel 3.1.10 for detaljer om reduksjon av knekklast i kompositt-søyler av stål og betong. Ved branndimensjonering skal man bruke knekkurve C for å finne reduksjonsfaktoren χ [22].



- a) Snitt gjennom bygningen
- b) Deformasjoner ved romtemperatur
- c) Deformasjoner ved høye temperaturer

Figur 19. Deformasjon av søyler i avstivet ramme [22]

Det finnes flere ulike forenklete metoder på hvordan man kan regne ut kapasiteten til betongfylte stålsøyler. En av dem er beskrevet ved en design-graf i Eurocode 4 [22]. Denne metoden gjelder sirkulære tverrsnitt, og har en rekke begrensninger.

Design-grafen fremstilles i figur 20. Den gir direkte informasjon om den aksiale knekklasten ved informasjon om knekk lengden, og motsatt. Det vises grafer for 6 søyler med tre forskjellige sirkulære tverrsnitt. Det kommer tydelig frem hvor stor betydning armeringsarealet i en betongfylt stålsøyle har å si for verdien av den aksiale knekklasten.

Figur 20 gjelder for søyler som oppfyller følgende:

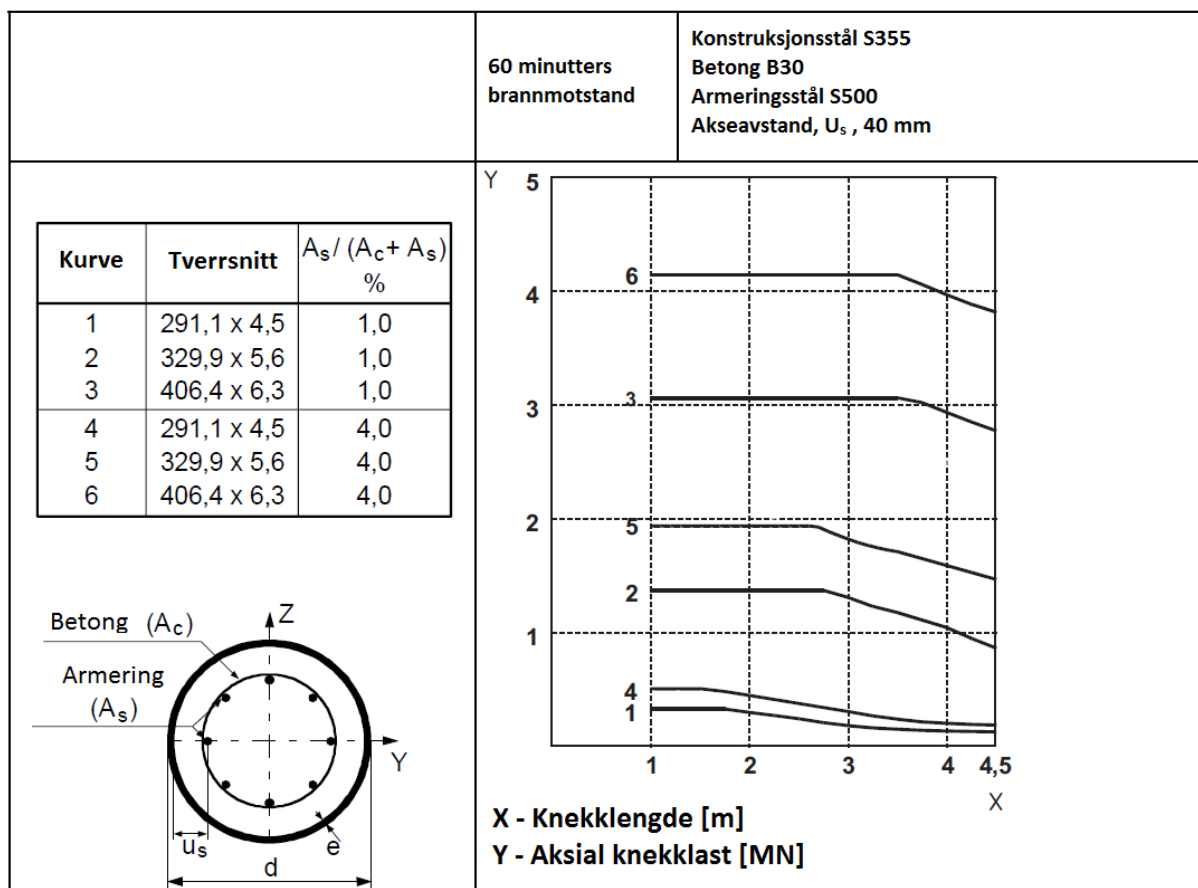
Knekk lengde $\leq 4,5$ m

$140 \text{ mm} \leq \text{Diameter, } d \leq 400 \text{ mm}$

$B20 \leq \text{Fasthetsklasse betong} \leq B45$

$0\% \leq \text{Armeringsmengde i prosent} \leq 5\%$

Brannmotstand ≤ 120 minutter



Figur 20. Design-graf for betongfylte stålsøyler med 60 minutters brannmotstand [22]

3.5.3 Kritisk temperatur

Tabell 1 viser kritisk ståltemperatur uttrykt ved faktor for utnyttelsesgrad. Den kritiske temperaturen i stålet vil være lavere ved høyere utnyttelse i søylen.

Tabell 1. Kritisk ståltemperatur uttrykt ved faktor for utnyttelsesgrad [13]

μ_0 Utnyttelsesgrad	$\theta_{a,cr}$ Kritisk temperatur	μ_0 Utnyttelsesgrad	$\theta_{a,cr}$ Kritisk temperatur	μ_0 Utnyttelsesgrad	$\theta_{a,cr}$ Kritisk temperatur
0,22	711	0,42	612	0,62	549
0,24	698	0,44	605	0,64	543
0,26	685	0,46	598	0,66	537
0,28	674	0,48	591	0,68	531
0,30	664	0,50	585	0,70	526
0,32	654	0,52	578	0,72	520
0,34	645	0,54	572	0,74	514
0,36	636	0,56	566	0,76	508
0,38	628	0,58	560	0,78	502
0,40	620	0,60	554	0,80	496

4. Datasimulering og beregning

I denne oppgaven utføres det temperatursimulering, lastberegning og noen manuelle beregninger for å få et bilde av hvordan en betongfylt stålsøyle vil opptre i en ulykkestilstand som brann. For å kunne gjennomføre en slik kompleks analyse må det settes en rekke begrensninger. Blant annet er et søyletverrsnitt valgt og ulike faktorer som armering, last på en tenkte bjelke og område med brannbeskyttelse begrenset til noen få alternativer. Det vil heller ikke være fokus på selve knutepunktet, men verdier i et referansepunkt på søylen hvor knutepunktet ville funnet sted.

4.1 Modellen

Til simuleringene i denne oppgaven velges en stålsøyle med 329,9 mm diameter og 5,6 mm veggtykkelse. Søylen lengde settes til 4 m. Søylen armeres og fylles med betong. Det simuleres med 1 og 4 % armering av det totale tverrsnittsarealet. Akseavstanden, avstanden fra yttersiden av stålet til armeringen, settes til 40 mm. Betongkvalitet B30, hulprofil med stålkvalitet S355 og armering med kvalitet K_s 500 benyttes. Det skal undersøkes om søylen med en del dekket av en film tilsvarende brannmaling har mulighet til å holde en brannmotstand på 30, 60, 90 eller 120 minutter. Filmlengdene som sjekkes er 100, 200, 300, 400 og 500 mm. Avstanden regnes fra tenkt knutepunktet i toppen av søylen. Bjelken som er med i de manuelle beregningene settes til 3 meters lengde og er fast innspent i begge ender.

4.2 FEM-analyse

Til å simulere effekten av brannbeskyttelse på en betongfylt stålsøyle har FEM-programmet Abaqus blitt benyttet. Abaqus er et avansert program hvor en kan simulere blant annet varmeoverganger. Simuleringen i dette programmet ble utført for å se hvordan temperaturen endrer seg i søylens overflate. En ISO- Standardbrann var ikke mulig å simulere grunnet manglende inngangsverdier. I tillegg ble det benyttet en studentversjon av programmet som hadde sine begrensninger. Blant annet var antall tillatt noder begrenset.

Det ble valgt i denne oppgaven å simulere 1 minutt av brannforløpet. Brannlasten, i form av stråling og konveksjon, leses av fra grafene i delkapittel 3.4.1 og 3.4.2 ved beregnet temperatur fra formel 8. Inngangsverdiene til datasimuleringen er beskrevet i vedlegg 11.1.

Verdiene fra simuleringen i Abaqus skal ikke brukes direkte i videre kalkulasjoner, men være en referanse til hvordan temperaturen endrer seg ved bruk av en overflatefilm som brannmaling, og hvilke temperaturer man kan forvente seg i stålet. Disse verdiene sammenlignes videre med temperaturer fra ISO- Standardbrannkurve [16] og vurderes mot kritisk ståltemperatur ved utnyttelsesgrad $\leq 0,28$, $\leq 0,46$ og $\leq 0,66$.

Abaqus er et komplekst og tidskrevende simuleringsprogram. For å begrense omfanget av denne oppgaven ytterligere er det valgt å ikke inkludere betongkjernen i temperatursimuleringen. Det er kun ståldelen av søylen, med film tilsvarende brannmaling på deler av overflaten, som blir simulert. Det utføres ikke lastbærende tester i Abaqus, så gevinsten man går glipp av som en følge av dette vil være den kjølede effekten av betongkjernen. Denne avgjørelsen regnes å være på sikker side siden betongen har en kjølede effekt på stålet og utfordringene i denne oppgaven er knyttet til de høye temperaturene som kan forekomme.

Benytter Kelvin, K, som temperaturskala. Verdiene som legges inn inneholder K og resultatene som hentes ut er oppgitt i K. I tillegg settes absolutt null til 0°K , noe som tilsvarer $-273,15^{\circ}\text{C}$.

4.3 Dataprogrammet Potfire

Til beregning av maksimal belastning under brannpåvirkning har programmet Potfire blitt benyttet. Programmet tar for seg alle delene av søylen. Blant annet dimensjoner, armering, materialkvaliteter, knekk lengde og brannmotstand. Det som skal beregnes ved hjelp av dette programmet er maksimal belastning og slankhet. Beregningen utføres for å danne et bilde av hvor mye disse søylene tåler. For å finne den kritiske temperaturen i knutepunktet, må man vite hvor stor utnyttelsesgraden til søylen er. Det vil i denne oppgaven være til nytte å vite hva man kan regne som maksimal belastning for en søyle innen de ulike brannmotstandsklassene.

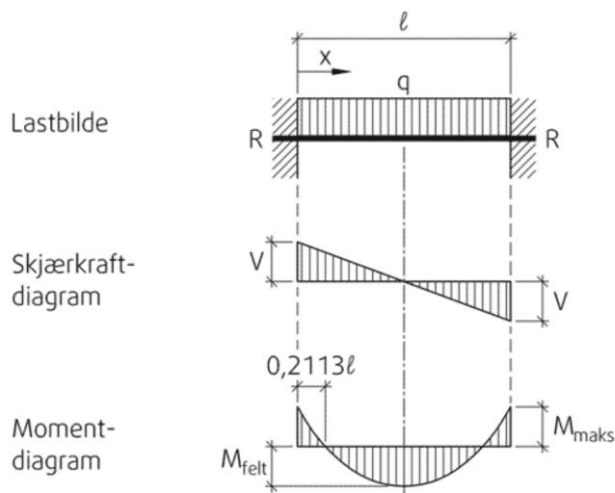
Den samme søylen skal beregnes med forskjellig armeringsmengde under 30, 60, 90 og 120 minutters brannforløp. Dette for å vise hvor stor betydning armeringen har i lasttilfellet.

Beregningene utføres med 1 % og 4 % armering. Prosentandelen regnes ut i fra armeringsarealet i forhold til tverrsnittsarealet.

4.4 Manuelle beregninger

Bjelken som er med i beregningen, er satt til en lengde på 3 meter. Den blir belastet med jevnt fordelt last og regnes som fast innspent i begge ender. Figur 21 viser form og forhold med tanke på lastbildet, skjærkraft- og momentdiagrammet for bjelken. Kraftene som oppstår ved bjelkeopplegget er kreftene som skal føres over og bæres av ståldelen i søylen. Disse kreftene beregnes for å undersøke at spenningene ikke blir for store i og i nærheten av knutepunktet.

For å prøve å oppnå en brannmotstand på 60 minutter brukes det relativt små bjelkelaster i denne oppgaven, noe som gir en lavere utnyttelsesgrad og høyere kritisk ståltemperatur enn ved bruk av høyere laster.



Figur 21. Bjelke innspent i begge ender med jevnt fordelt last [23]

Annet arealmoment for ståldelen av søylen blir videre brukt til å finne spenningene i knutepunktet. Disse kontrolleres mot maksimal tillatt spenning i stål med kvalitet S355.

ISO- Standardbrann-formel (formel 8) brukes til å beregne temperaturen etter ett minutt brannforløp.

4.5 Sammendrag

Resultatene fra simuleringsprogrammet Abaqus skal sammenlignes med den kalkulerte temperaturverdien fra ISO- Standardbrann-formel (formel 8). Disse resultatene kan gi en indikasjon på hvordan temperaturen blir i stålet med og uten brannbeskyttelse. Både ved valgt simuleringstidspunkt og videre temperaturutvikling.

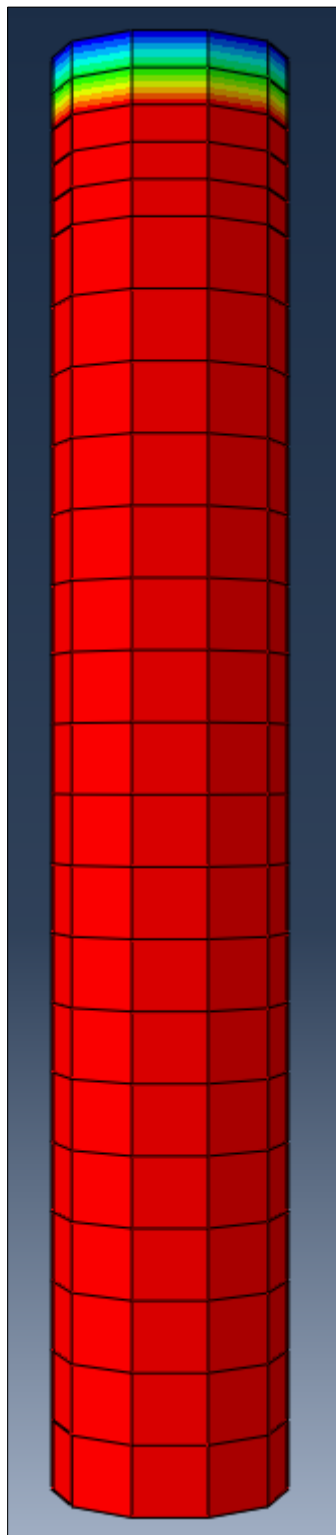
Resultatene fra beregningene i Potfire skal sammenlignes med verdiene i design-figurene beskrevet i litteraturstudiet. Dette kan gi et innblikk i lastkapasiteten til en betongfylt stålsøyle ved ulike brannmotstandskrav og mengde armering.

5. Resultater

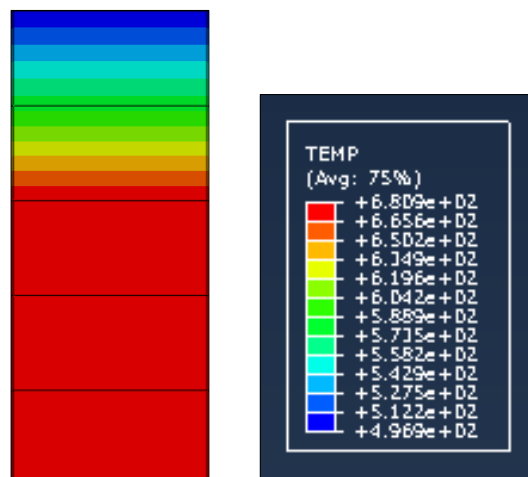
5.1 Datasimulering

Fra simuleringen i Abaqus påløp disse resultatene. Alle temperaturer er oppgitt i grader Kelvin. Tabellene med temperaturer på hver resultatside lister opp node-temperaturene. Den første linjen er verdier fra de 8 øverste nodene i søylen. Linje nummer to viser til de neste 8 nodene som befinner seg fra 100 til 200 mm fra søyletoppen, o.s.v.

5.1.1 Stålsøyle med 10 mm filmlengde



Simulering nummer 1 er beregnet med 10 mm filmlengde. Temperaturene i søylen varierer mellom 496,9°K og 680,9°K i de øverste 20 mm.



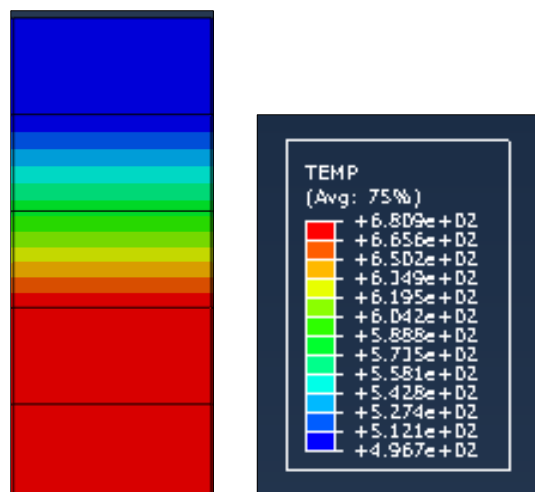
TEMP
583.004, 583.018, 583.004, 583.018, 497.224, 496.853, 497.224, 496.853
680.61, 680.828, 680.61, 680.828, 583.004, 583.018, 583.004, 583.018
680.909, 680.851, 680.909, 680.851, 680.61, 680.828, 680.61, 680.828
680.836, 680.851, 680.836, 680.851, 680.909, 680.851, 680.909, 680.851
680.836, 680.836, 680.851, 680.851, 680.854, 680.854, 680.851, 680.851

Figur 22. Resultat fra simulering med 10 mm filmlengde

5.1.2 Stålsøyle med 20 mm filmlengde



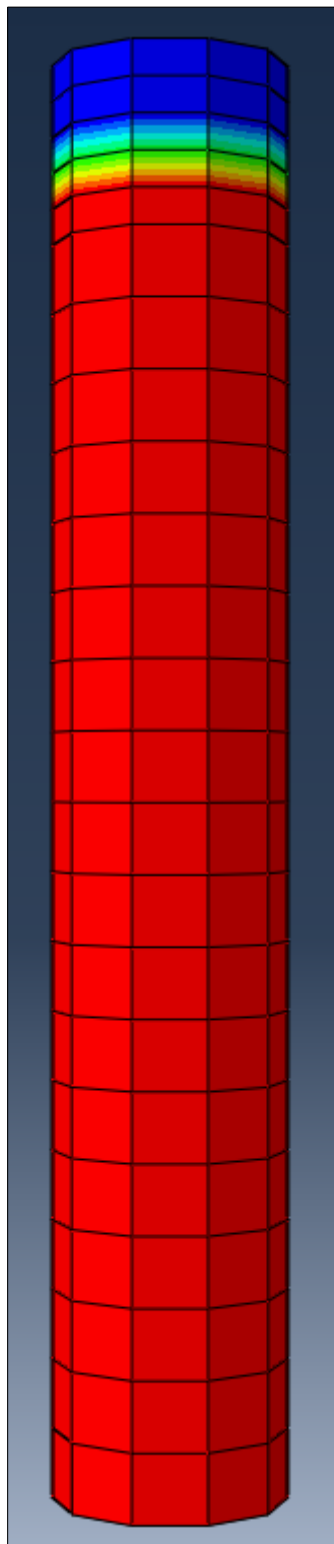
Simulering nummer 2 er beregnet med 20 mm filmlengde. Temperaturene i søylen varierer mellom 496,8°K og 680,9°K i de øverste 30 mm.



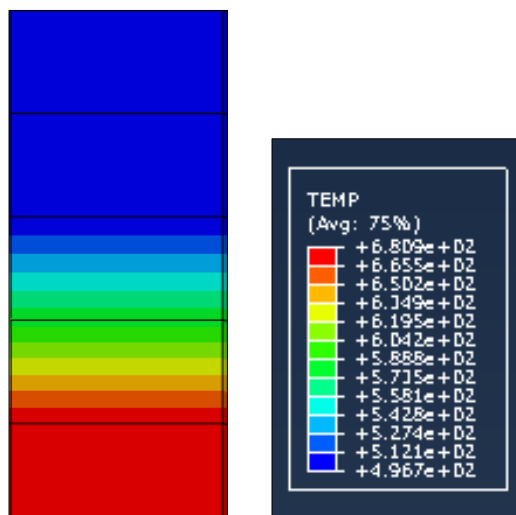
TEMP
497.026, 496.828, 497.026, 496.828, 496.704, 496.802, 496.704, 496.802
583.05, 583.018, 583.05, 583.018, 497.026, 496.828, 497.026, 496.828
680.598, 680.828, 680.598, 680.828, 583.05, 583.018, 583.05, 583.018
680.911, 680.851, 680.911, 680.851, 680.598, 680.828, 680.598, 680.828
680.911, 680.911, 680.851, 680.851, 680.84, 680.84, 680.851, 680.851

Figur 23. Resultat fra simulering med 20 mm filmlengde

5.1.3 Stålsøyle med 30 mm filmlengde



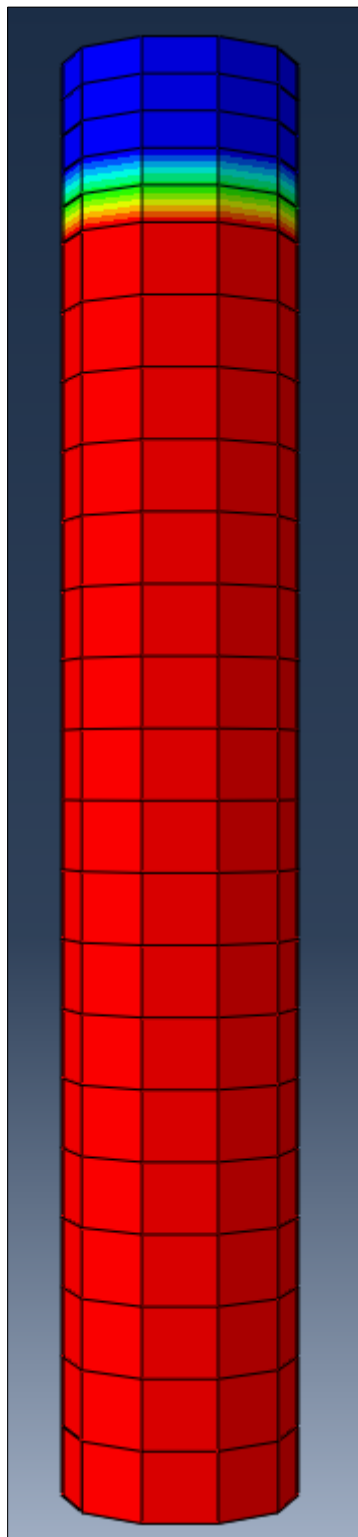
Simulering nummer 3 er beregnet med 30 mm filmlengde. Temperaturene i søylen varierer mellom 496,8°K og 680,9°K i de øverste 40 mm.



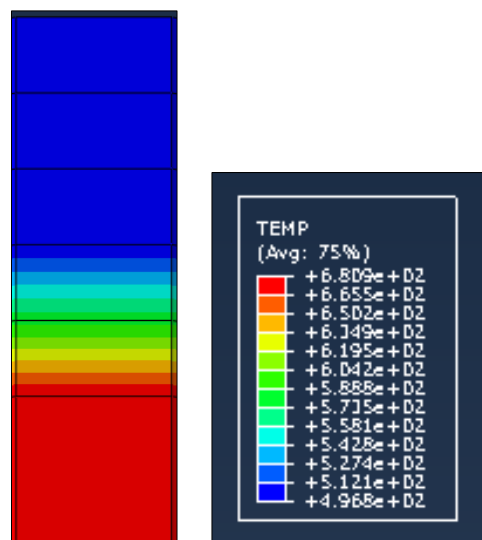
TEMP
496.75, 496.802, 496.75, 496.802, 496.828, 496.802, 496.828, 496.802
497.014, 496.828, 497.014, 496.828, 496.75, 496.802, 496.75, 496.802
583.052, 583.018, 583.052, 583.018, 497.014, 496.828, 497.014, 496.828
680.602, 680.828, 680.602, 680.828, 583.052, 583.018, 583.052, 583.018
680.602, 680.602, 680.828, 680.828, 680.893, 680.893, 680.851, 680.851

Figur 24. Resultat fra simulering med 30 mm filmlengde

5.1.4 Stålsøyle med 40 mm filmlengde



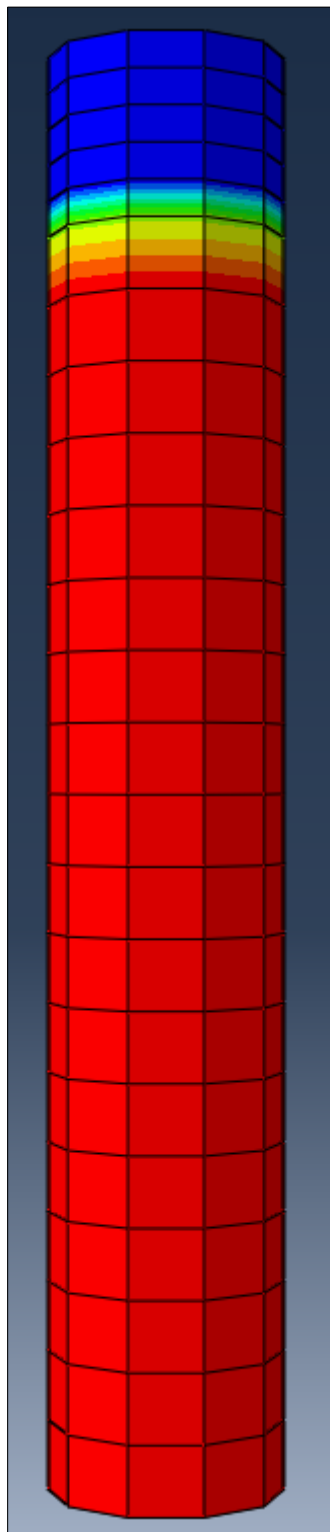
Simulering nummer 4 er beregnet med 40 mm filmlengde. Temperatuene i søylen varierer mellom 496,8°K og 680,8°K i de øverste 50 mm.



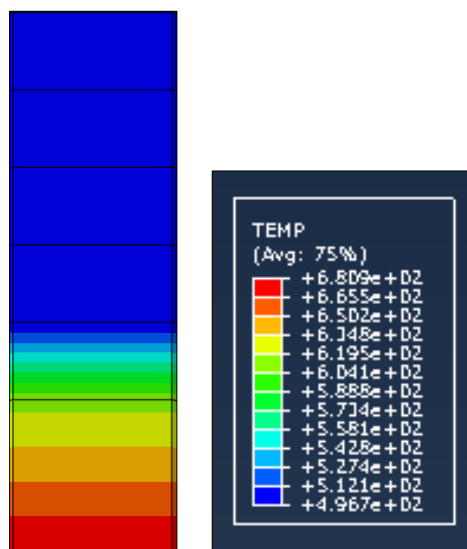
TEMP							
496.817	496.802	496.817	496.802	496.795	496.802	496.795	496.802
496.752	496.802	496.752	496.802	496.817	496.802	496.817	496.802
497.018	496.828	497.018	496.828	496.752	496.802	496.752	496.802
583.034	583.018	583.034	583.018	497.018	496.828	497.018	496.828
583.034	583.034	583.018	583.018	680.678	680.678	680.835	680.835
680.678	680.678	680.835	680.835	680.893	680.893	680.851	680.851

Figur 25. Resultat fra simulering med 40 mm filmlengde

5.1.5 Stålsøyle med 50 mm filmlengde



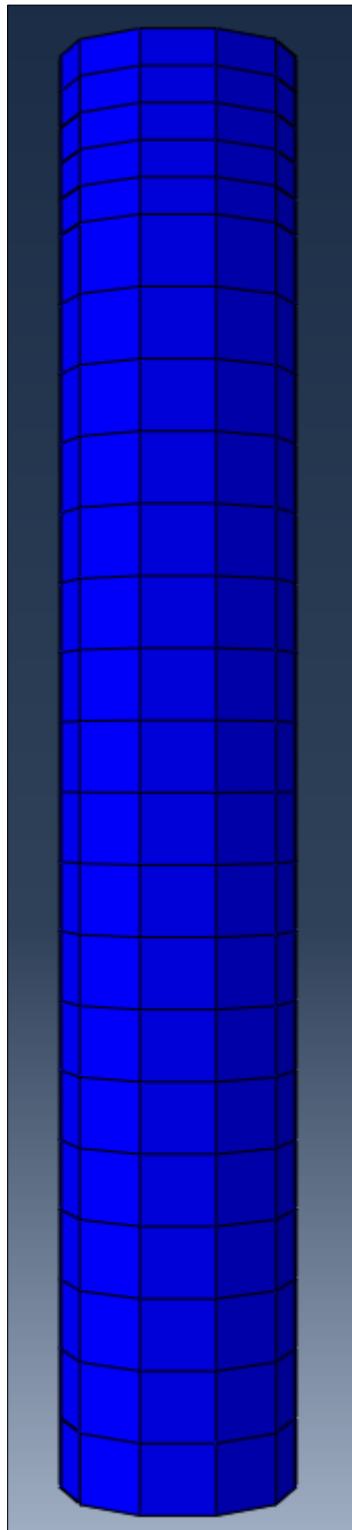
Simulering nummer 5 er beregnet med 50 mm filmlengde. Temperaturene i søylen varierer mellom 496,8°K og 680,9°K i de øverste 70 mm.



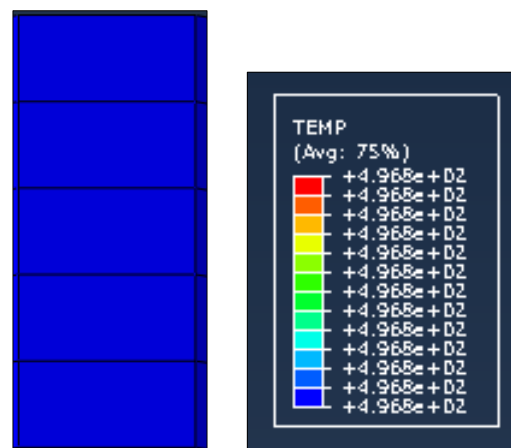
TEMP
496.796, 496.802, 496.796, 496.802, 496.805, 496.802, 496.805, 496.802
496.824, 496.802, 496.824, 496.802, 496.796, 496.802, 496.796, 496.802
496.72, 496.802, 496.72, 496.802, 496.824, 496.802, 496.824, 496.802
497.147, 496.837, 497.147, 496.837, 496.72, 496.802, 496.72, 496.802
497.147, 497.147, 496.837, 496.837, 613.644, 613.644, 613.817, 613.817
613.644, 613.644, 613.817, 613.817, 680.853, 680.853, 680.847, 680.847

Figur 26. Resultat fra simulering med 50 mm filmlengde

5.1.6 Stålsøyle med film på hele legden



Simulering nummer 6 er beregnet med full filmlengde. Denne simuleringen beregnes kun som et sammenligningsgrunnlag og er ikke en del av selve forsøket. Temperaturen i søylen er på $496,8^{\circ}\text{K}$.

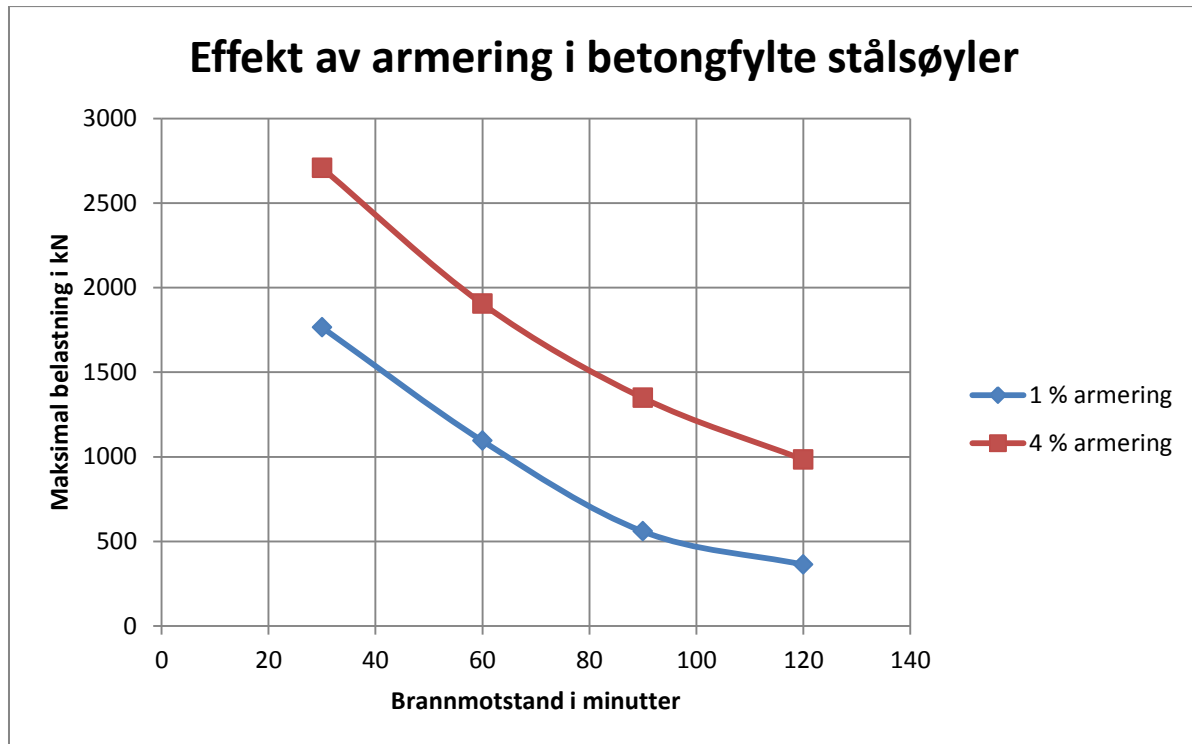


TEMP
496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827
496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827
496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827
496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827
496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827, 496.827

Figur 27. Resultat fra simulering med film på hele lengden

5.2 Dataprogrammet Potfire

Effekten av armering i betongfylte stålsøyler kommer tydelig frem i figur 28 som viser resultatene fra beregningene gjort i Potfire. Søylene som er beregnet med 4 % armering kan bære omtrent dobbelt så mye last som søylene med 1 % armering innen samme brannmotstand-klasse. Alle beregningene ligger i vedlegg 11.4.



Figur 28. Effekt av armering i betongfylte stålsøyler

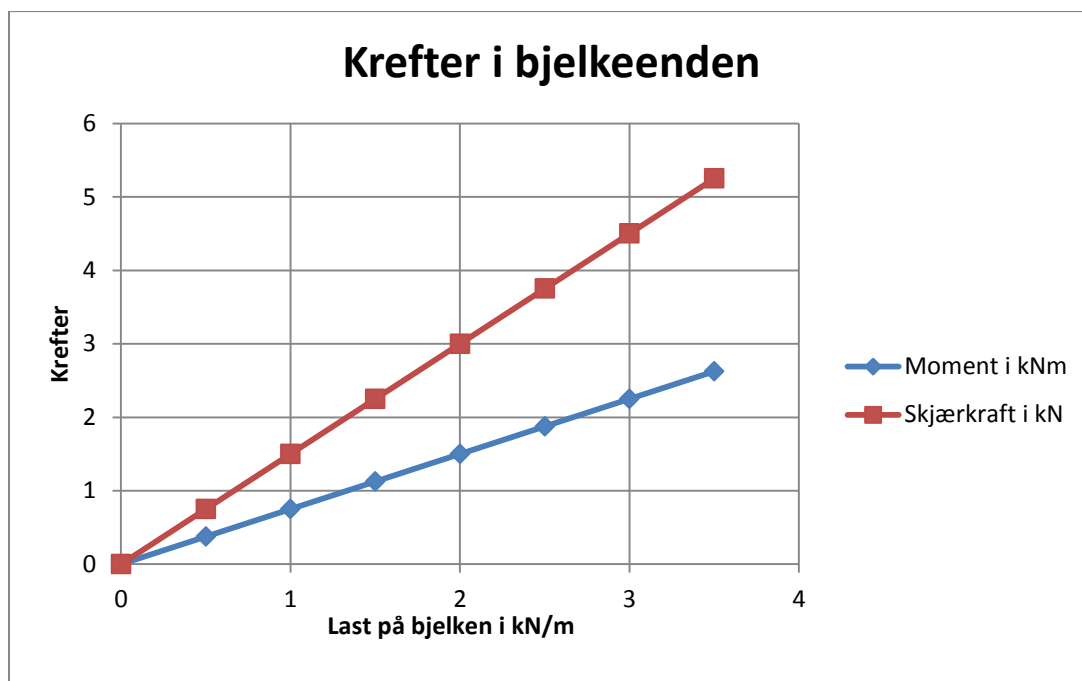
5.3 Manuelle beregninger

ISO- Standardbrann-formel (formel 8) er benyttet for å beregne temperaturen etter ett minutt av brannforløpet og sammenlignes senere med resultater fra Abaqus.

$$T(t) = 345 \log(480t + 1) + T_o \quad t > 0$$

$$T(1/60) = 345 \log(480(1/60) + 1) + 20 = 349,2^\circ C = 622,4 \text{ } ^\circ K$$

Ved ulike jevnt fordelte laster på bjelken er både skjærkraft og moment beregnet i enden på den fast innspennte bjelken. Figur 29 viser de lineære økninger i krefter når lasten stiger.



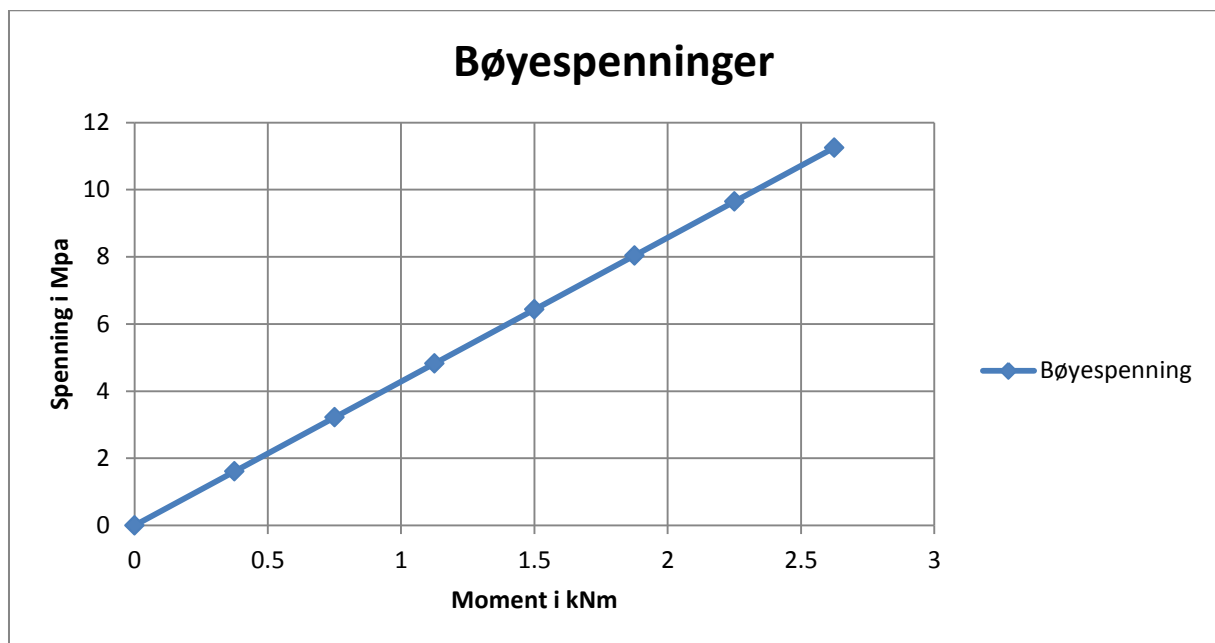
Figur 29. Krefter i bjelkeenden

Annet arealmoment for ståldelen av søylen er beregnet til $38,48 \times 10^6 \text{ mm}^4$ ved bruk av formel 5.

Maksimal tillatt spenning i ulykkestilstand settes til

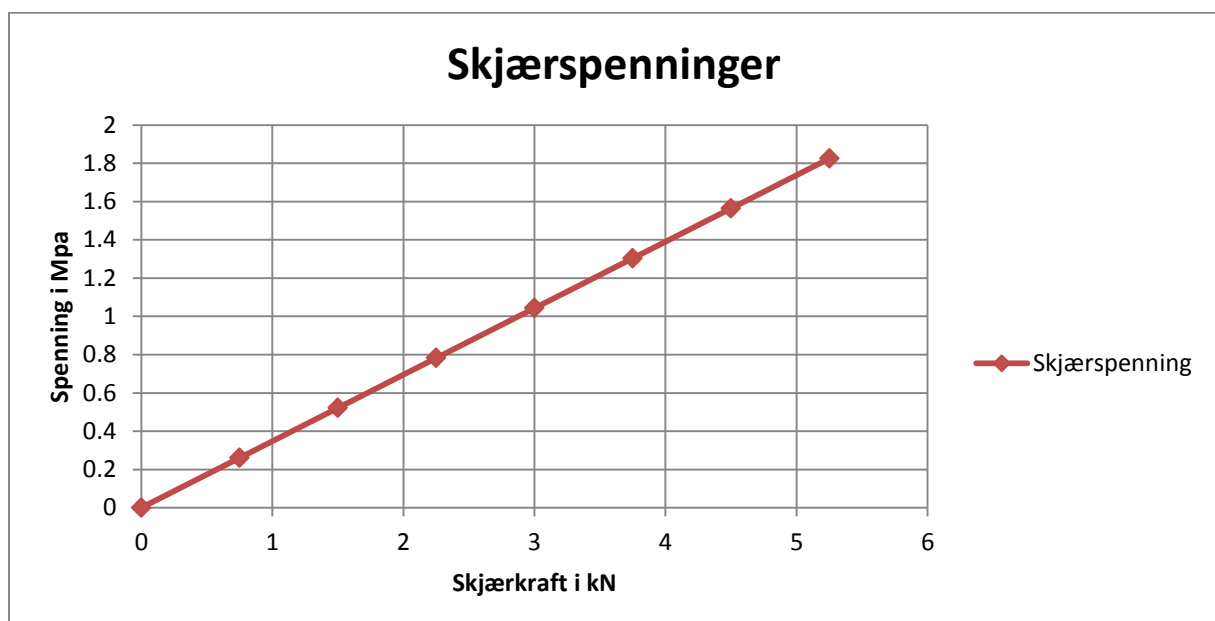
$$\sigma \leq \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{355}{1,0} = 355 \text{ N/mm}^2 = 355 \text{ MPa}$$

Ut i fra momentene ved de ulike lastene er det satt opp et bøyespennings-diagram (se figur 30). Det kommer tydelig frem at spenningene øker lineært med økende moment. Spenningene er relativt lave i forhold til tillatt stålspenning. Verdier brukt i beregningen ligger i vedlegg 11.2.



Figur 30. Resultat bøyespenninger

Og videre er skjærspenningene ledet frem på samme måte ved bruk av skjærkreftene (se figur 31). Også her ser man relativt lave spenninger i forhold til hva som er tillatt stålspenning i søylen. Verdier brukt i beregningen ligger i vedlegg 11.3.



Figur 31. Resultat skjærspenninger

5.4 Sammendrag

Temperaturen etter 1 minutts simulering i Abaqus er høyere enn temperaturen som er beregnet etter 1 minutts brannforløp ved hjelp av ISO- Standardbrann-formel (formel 8). Verdiene er henholdsvis på 680°K og 622°K. Forskjellen kan skyldes mangel på detaljer og nøyaktighet i grafene hvor varmeovergangen, som ligger til grunn for brannlasten, ble lest av. Verdiene er likevel like nok til å kunne sammenlignes og trekke linjer videre i hvordan temperaturene vil endre seg med tiden i brannforløpet. Siden temperaturen fra Abaqus er høyere enn temperaturen i standardbrannen, regnes antagelsen for å være på sikker side.

Spenningene fra bjelkelasten alene er langt innenfor grensen for denne stålqualiteten. Utfordringen er temperaturen som vil oppstå i stålet. Den vil trolig bli så høy at stålsøylen ikke vil klare å bære en relativt liten bjelkelast.

Ut i fra figur 18 i delkapittel 3.5.1 bør man ikke ha en utnyttelsesgrad høyere enn 0,66 ved bruk av tverrsnittet og armeringsmengden som er valgt i denne oppgaven.

De tre utnyttelsesgradene som undersøkes i denne oppgaven gir, i følge tabell 1 i delkapittel 3.5.3, følgende kritiske ståltemperaturer:

Utnyttelsesgrad $\leq 0,28$ gir kritisk ståltemperatur på 674°C = 947°K

Utnyttelsesgrad $\leq 0,46$ gir kritisk ståltemperatur på 598°C = 871°K

Utnyttelsesgrad $\leq 0,66$ gir kritisk ståltemperatur på 537°C = 810°K

6. Diskusjon

Hovedinteressen med oppgaven var å undersøke hva betydningen av bjelkeinnfestningen i en betongfylt stålsøyle under brannpåvirkning har å si for evnen til å bære en bjelkelast gjennom hele brannforløpet. Jeg fant ikke dekkende litteratur på dette tema, og ønsket å undersøke dette nærmere.

Som forventet fant jeg ut gjennom litteraturstudiet at betongen vil ha en kjølede effekt på ståldelen av søylen. Videre gav også simuleringen av brannbeskyttelse av knutepunktet en antatt temperaturreduksjon.

Prosessen med å simulere et fullstendig brannforløp med alle elementer inkludert, er tidsmessig et for stort omfang for en masteroppgave. På bakgrunn av dette har det blitt gjort visse begrensninger, og arbeidet i denne oppgaven legges frem som grunnlag til videre forskning innen dette tema.

En enkel stålsøyle uten brannbeskyttelse vil gå til brudd etter kun 10-15 minutter under brannpåvirkning. I tidlig brannforløp er det ståldelen av en betongfylt stålsøyle som bærer mesteparten av aksiallasten, og ved et senere tidspunkt er det betongen som tar over. Etersom bjelkelasten i denne oppgaven kun skal bæres av stålet gjennom hele brannforløpet, kreves dette grundig ettertanke.

Ut i fra det denne oppgaven dekker, og den kunnskapen jeg har tilegnet meg gjennom litteraturstudiet, simulerings- og beregningsprogrammene, ses det på som en risiko å feste en bjelke kun i ståldelen av søylen. Det ses på som utilstrekkelig kun å brannbeskytte deler av søylen når man ikke har noe feste inn til betongkjernen.

Den betongfylte stålsøylen med 4 % armering, beregnet i Potfire, kan bære laster på 1348 kN og 984 kN med en brannmotstand på henholdsvis 90 og 120 minutter. Dette stemmer overens med bruk av designfigurene beskrevet i denne oppgave. Etter 1 minutt simulering i Abaqus er ståltemperaturen i det ubeskyttede området på 407°C, og rundt 223°C i det beskyttede området. Etter 30 og 60 minutter ut i brannforløpet forventes, ut i fra ISO- Standardbrann, en temperatur på henholdsvis 842°C og 945°C i delen av søylen som ikke er brannbeskyttet. Så selv om man kan redusere disse temperaturene, grunnet den kjølede effekten til betongkjernen, vil de trolig fortsatt være over kritisk ståltemperatur. Selv med stålutnyttelsesgrad $\leq 0,28$, som gir kritisk ståltemperatur på 674°C, vil ikke ståldelen av søylen alene kunne bære bjelkelasten ved disse høye temperaturene, og hverken klare 30 eller 60 minutters brannmotstand.

Det skal tydeliggjøres at modellen som er brukt til den termiske analysen ikke er fullstendig. I tillegg er simuleringstiden kun på 1 minutt. Ved videre forskning oppfordres det å inkludere en armert betongkjerne i den termiske analysen, og utføre en 60 minutters simulering av brannforløpet i ISO- Standardbrann.

Som beskrevet i litteraturstudiet er det mange gevinster ved bruk av betongfylte stålsøylar. Både med tanke på kapasitet, muligheten for eksponering av stål, redusert tverrsnittsstørrelse, konkurransedyktig pris og redusert byggetid.

Oppmuntringene ved å kartlegge problemet i denne oppgaven, og ved videre forskning, er mange. Man kan spare tid og frustrasjon i dimensjoneringsfasene og sikre flere bygg med trygge løsninger

med tanke på brann.

7. Konklusjon

Ut i fra litteraturstudiet, simuleringer og beregninger som er presentert i denne oppgaven, med de begrensningene og betraktningene som er gjort, konkluderer jeg med følgende:

Betongen har en kjølede effekt på stålet, og dermed har en betongfylt stålsøyle bedre brannmotstand enn en stålsøyle alene. Ved å brannbeskytte en del av søylen, vil temperaturen i stålet i dette området reduseres betraktelig. Delen som ikke er beskyttet vil oppnå temperaturer høyere enn kritisk ståltemperatur. Søylen vil derfor ikke oppnå en brannmotstand på 60 minutter ved bruk av valgt bjelke-forbindelse.

500 mm brannbeskyttelse rundt knutepunktet er ikke tilstrekkelig for en betongfylt stålsøyle med bjelkelast festet kun i ståldelen av tverrsnittet.

8. Videre arbeid

- Inkludere betong og armering i den termiske analysen
- Simulere hele brannforløpet i samsvar med ISO- Standardbrann
- Simulere en modell med søyler og bjelker i flere etasjer
- Undersøke ulike søylelengder og tverrsnitt
- Beregne søylen med redusert kneklengde
- Simulere søylen med aksiallast samtidig som bjelkelast
- Kartlegge heft og friksjon mellom materialene som en funksjon av tid i brannforløpet
- Se nærmere på gevinsten, i form av tverrsnittsreduksjon, ved bruk av betongfylte stålsøyler i forhold til tradisjonelle stålsøyler

9. Lister

9.1 Figurliste

Figur 1. Maksimal verdier for (d/t) , (h/t) og (b/t_c) med f_y i N/mm^2 [1].....	9
Figur 2. Knekkengder [6]	13
Figur 3. Knekkurver og utbøyning for kompositt-søyler [1]	14
Figur 4. Knekkurver [8]	14
Figur 5. Arbeidsdiagram for stål og betong [9]	16
Figur 6. Arbeidsdiagram for konstruksjonsstål [11]	17
Figur 7. Spesifikk varmekapasitet til stål som en funksjon av temperatur [13].....	18
Figur 8. Spesifikk varmekapasitet som en funksjon av temperatur for betong med tre forskjellige vannmengder [14]	18
Figur 9. Varmeledning i karbonstål som en funksjon av temperatur [13]	19
Figur 10. Varmeledning i betong som en funksjon av temperatur [14]	19
Figur 11. Termisk forlengelse av stål [14].....	20
Figur 12. Termisk forlengelse av betong [14].....	20
Figur 13. Reduksjonsfaktor for flytegrense av stål [15]	21
Figur 14. Reduksjonsfaktor for karakteristisk styrke (f_{ck}) av betong [14]	21
Figur 15. ISO - Standard brannkurve [16].....	22
Figur 16. Varmeovergang for svart stråling ved ulike temperaturer [20]	25
Figur 17. Varmeovergang i form av konveksjon ved ulike temperaturer [21]	26
Figur 18. Minimum tverrsnittsdimensjoner, armeringsmengde og akseavstand for armering i betongfylte stålsøyler [22]	27
Figur 19. Deformasjon av søyler i avstivet ramme [22]	28
Figur 20. Design-graf for betongfylte stålsøyler med 60 minutters brannmotstand [22]	29
Figur 21. Bjelke innspent i begge ender med jevnt fordelt last [23].....	33
Figur 22. Resultat fra simulering med 10 mm filmlengde	35
Figur 23. Resultat fra simulering med 20 mm filmlengde	36
Figur 24. Resultat fra simulering med 30 mm filmlengde	37
Figur 25. Resultat fra simulering med 40 mm filmlengde	38
Figur 26. Resultat fra simulering med 50 mm filmlengde	39
Figur 27. Resultat fra simulering med film på hele lengden	40
Figur 28. Effekt av armering i betongfylte stålsøyler	41
Figur 29. Krefter i bjelkeenden.....	42
Figur 30. Resultat bøyepenninger.....	43
Figur 31. Resultat skjærspenninger	43

9.2 Tabelliste

Tabell 1. Kritisk ståltemperatur uttrykt ved faktor for utnyttelsesgrad [13]	30
Tabell 2. Inndata datasimulering.....	54
Tabell 3. Verdier til beregning av bøyespenninger	55
Tabell 4. Verdier til beregning av skjærspenninger.....	56

9.3 Formelliste

Formel 1:	12
Formel 2:	12
Formel 3:	12
Formel 4:	13
Formel 5:	13
Formel 6:	14
Formel 7:	17
Formel 8:	22

10. Referanser

1. Norsk Standard. «Eurokode 4: Prosjektering av samvirkekonstruksjoner av stål og betong - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygging.» 2009.
2. Kodur, V. K., og D. H. MacKinnon. *Design of concrete-filled hollow structural steel columns for fire endurance*. Engineering Journal-American Institute of Steel Construction, 37(1), 13-24., 2000.
3. Kodur, V. K. R. *Fire Resistance of Concrete-Filled Steel Columns*. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada., 1997.
4. Morino, S., og K. Tsuda. Design and construction of concrete-filled steel tube column system in Japan. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 4(1), 51-73., 2003.
5. Hicks, S. J. , G. M. Newman, M. Edwards, og A. Orton. *Design guide for SHS concrete filled columns*. Corus Tubes, 2002.
6. SINTEF Byggforsk. «520.235 Søyler av stål. Dimensjoneringstabeller.» Byggdetaljblad, 2011.
7. Høgskolen i Narvik. *Formler for mekanikk*. 2003.
8. Norsk Standard. «Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger.» 2008.
9. *Teach Engineering*. 2014.
http://www.teachengineering.org/view_lesson.php?url=collection/cub_/lessons/cub_brid/cub_brid_lesson04.xml (funnet Mars 2014).
10. Ormestad, Helmut. *Store norske leksikon*. 2009. <http://snl.no/fasthetsl%C3%A6re.%2Ffysikk> (funnet Mars 2014).
11. Meccanica. 2006. <http://meccanica.no/fasthet/materialer.htm> (funnet Mars 2014).
12. Norsk Standard. «Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger.» 2008.
13. Norsk Standard. «Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering .» 2009.
14. Norsk Standard. « Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering .» 2010.
15. SINTEF Byggforsk. «520.315 Brannbeskyttelse av stålkonstruksjoner.» Byggdetaljblad, 2004.
16. International Organization for Standardization. «ISO 834: Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements .» 1999.

17. SINTEF Byggforsk. «321.022 Oversikt over krav og løsninger ved brannteknisk prosjektering av bygninger.» Byggdetaljblad, 2007.
18. Rimstad, N. Ø., R. Løvås, og K. Jensen. Store norske leksikon. 2009.
<http://snl.no/brann%2Fbrannklassifisering> (funnet Mars 2014).
19. Opstad, K. *NBL S04135, Brannteori*. SINTEF NBL as - Norges branntekniske laboratorium, 2004.
20. Wighus, R. *Brann og dens luner*. SINTEF NBL as - Norges branntekniske laboratorium, 2005.
21. Berge, G. *Brannlaster fra olje- og gassbranner*. Petrell AS, 2007.
22. Norsk Standard. «Eurokode 4: Prosjektering av samvirkekonstruksjoner av stål og betong - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering .» 2009.
23. SINTEF Byggforsk. «421.051 Statikkformler for bjelker.» Byggdetaljblad, 2013.
24. Krishnamoorthy, R. R. . *The Analysis Of Partial And Damaged Fire Protection On Structural Steel At Elevated Temperature*. Ph.D , The University of Manchester , 2011.

11. Vedlegg

11.1 Inndata datasimulering

Tabell 2. Inndata datasimulering

Tverrsnittsdiameter, yttermål stål	329,9 mm
Tverrsnittstykkelse, stål	5,6 mm
Søylelengde	4 m
Varmeledning, stål [13]	47 W/mK ved 200 °C 40 W/mK ved 400°C 35 W/mK ved 600°C 27 W/mK ved 800°C 27 W/mK ved 945°C
Simuleringstid	1 minutt
Stefan-Boltzmanns konstant	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
Absolutt nullpunkt	0°K
Film koeffisient [24]	25 W/m ² K
Senkningstemperatur [24]	$\Delta = 200$
Emissivitet [19]	0,85
Varmeovergang, stråling [20]	Ved 349,2 °C (622,4 °K) $\approx 10 \text{ kW/m}^2$
Varmeovergang, konveksjon [21]	Ved 349,2 °C (622,4 °K) $\approx 10 \text{ kW/m}^2$
Utgangstemperatur	20 °C = 293,15°K

11.2 Bøyepenninger

D er ytterradius og d er innerradius.

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (329,9^4 - 324,3^4) = 38\,484\,989,39 \text{ mm}^4$$

Setter y til D/2

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M}{I} * y$$

$$W = \frac{I}{y} = \frac{38\,484\,989,39}{\frac{329,9}{2}} = 233\,313,0608 \text{ mm}^3$$

Tabell 3. Verdier til beregning av bøyepenninger

Last i kN/m	Moment i kNm	Bøyepenninger i MPa
0	0	0
0.5	0.375	1.6072825
1	0.75	3.214565
1.5	1.125	4.8218475
2	1.5	6.42913001
2.5	1.875	8.03641251
3	2.25	9.64369501
3.5	2.625	11.2509775

11.3 Skjærspenninger

Beregning av areal til skjærspenningsberegningen

$$A = \pi r^2$$

$$A = (\pi(329,9/2)^2) - (\pi(324,3/2)^2) = 2877,32188 \text{ mm}^2$$

Tabell 4. Verdier til beregning av skjærspenninger

Last i kN/m	Skjærkraft i kN	Skjærspenninger i MPa
0	0	0
0.5	0.75	0.26065905
1	1.5	0.52131811
1.5	2.25	0.78197716
2	3	1.04263622
2.5	3.75	1.30329527
3	4.5	1.56395433
3.5	5.25	1.82461338

11.4 Potfire kalkulasjoner

Calculation nr 1

Section :

Type of Section : Circular
Diameter : 329.9 mm
Wall thickness : 5.6 mm

Reinforcement bars :

Number of re-bars : 8
Diameter : 11.27 mm
Percentage of re-bars : 1 %
Concrete covering : 40 mm

Buckling length : 4 m

Material characteristics :

Steel section : 355 N/mm²
Reinforcement bars : 500 N/mm²
Concrete : 30 N/mm²

Eccentricity

(perp. to buckling axis) : 0 mm

Calculation of : Ultimate load

Fire duration : 30 min

Result :

NON-DIMENSIONAL SLENDERNESS : .5411
ULTIMATE LOAD : 1765 kN

Calculation nr 3

Section :

Type of Section : Circular
Diameter : 329.9 mm
Wall thickness : 5.6 mm

Reinforcement bars :

Number of re-bars : 8
Diameter : 11.27 mm
Percentage of re-bars : 1 %
Concrete covering : 40 mm

Buckling length : 4 m

Material characteristics :

Steel section : 355 N/mm²
Reinforcement bars : 500 N/mm²
Concrete : 30 N/mm²

Eccentricity

(perp. to buckling axis) : 0 mm

Calculation of : Ultimate load

Fire duration : 90 min

Result :

NON-DIMENSIONAL SLENDERNESS : .5411
ULTIMATE LOAD : 559 kN

Calculation nr 2

Section :

Type of Section : Circular
Diameter : 329.9 mm
Wall thickness : 5.6 mm

Reinforcement bars :

Number of re-bars : 8
Diameter : 11.27 mm
Percentage of re-bars : 1 %
Concrete covering : 40 mm

Buckling length : 4 m

Material characteristics :

Steel section : 355 N/mm²
Reinforcement bars : 500 N/mm²
Concrete : 30 N/mm²

Eccentricity

(perp. to buckling axis) : 0 mm

Calculation of : Ultimate load

Fire duration : 60 min

Result :

NON-DIMENSIONAL SLENDERNESS : .5411
ULTIMATE LOAD : 1094 kN

Calculation nr 4

Section :

Type of Section : Circular
Diameter : 329.9 mm
Wall thickness : 5.6 mm

Reinforcement bars :

Number of re-bars : 8
Diameter : 11.27 mm
Percentage of re-bars : 1 %
Concrete covering : 40 mm

Buckling length : 4 m

Material characteristics :

Steel section : 355 N/mm²
Reinforcement bars : 500 N/mm²
Concrete : 30 N/mm²

Eccentricity

(perp. to buckling axis) : 0 mm

Calculation of : Ultimate load

Fire duration : 120 min

Result :

NON-DIMENSIONAL SLENDERNESS : .5411
ULTIMATE LOAD : 363 kN

Calculation nr 5

Section :

Type of Section : Circular
Diameter : 329.9 mm
wall thickness : 5.6 mm

Reinforcement bars :

Number of re-bars : 8
Diameter : 22.54 mm
Percentage of re-bars : 4 %
Concrete covering : 40 mm

Buckling length : : 4 m

Material characteristics :

Steel section : 355 N/mm²
Reinforcement bars : 500 N/mm²
Concrete : 30 N/mm²

Eccentricity

(perp. to buckling axis) : 0 mm

Calculation of : Ultimate load

Fire duration : 30 min

Result :

NON-DIMENSIONAL SLENDERNESS : .5673
ULTIMATE LOAD : 2707 kN

Calculation nr 6

Section :

Type of Section : Circular
Diameter : 329.9 mm
wall thickness : 5.6 mm

Reinforcement bars :

Number of re-bars : 8
Diameter : 22.54 mm
Percentage of re-bars : 4 %
Concrete covering : 40 mm

Buckling length : : 4 m

Material characteristics :

Steel section : 355 N/mm²
Reinforcement bars : 500 N/mm²
Concrete : 30 N/mm²

Eccentricity

(perp. to buckling axis) : 0 mm

Calculation of : Ultimate load

Fire duration : 60 min

Result :

NON-DIMENSIONAL SLENDERNESS : .5673
ULTIMATE LOAD : 1904 kN

Calculation nr 7

Section :

Type of Section : Circular
Diameter : 329.9 mm
wall thickness : 5.6 mm

Reinforcement bars :

Number of re-bars : 8
Diameter : 22.54 mm
Percentage of re-bars : 4 %
Concrete covering : 40 mm

Buckling length : : 4 m

Material characteristics :

Steel section : 355 N/mm²
Reinforcement bars : 500 N/mm²
Concrete : 30 N/mm²

Eccentricity

(perp. to buckling axis) : 0 mm

Calculation of : Ultimate load

Fire duration : 90 min

Result :

NON-DIMENSIONAL SLENDERNESS : .5673
ULTIMATE LOAD : 1348 kN

Calculation nr 8

Section :

Type of Section : Circular
Diameter : 329.9 mm
wall thickness : 5.6 mm

Reinforcement bars :

Number of re-bars : 8
Diameter : 22.54 mm
Percentage of re-bars : 4 %
Concrete covering : 40 mm

Buckling length : : 4 m

Material characteristics :

Steel section : 355 N/mm²
Reinforcement bars : 500 N/mm²
Concrete : 30 N/mm²

Eccentricity

(perp. to buckling axis) : 0 mm

Calculation of : Ultimate load

Fire duration : 120 min

Result :

NON-DIMENSIONAL SLENDERNESS : .5673
ULTIMATE LOAD : 984 kN



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no