

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggingteknikk

Bacheloroppgave

Paal-André Bruun, Oda Nisja & Emil Ø. Roligheten

Blendering for avfyring av M100 sektorvirkende ladninger

En studie av dynamiske laster

Bacheloroppgave i Ingeniørfag, bygg

Veileder: Fred Johansen & Peter Brandsæter

Mai 2023



Kunnskap for en bedre verden

Blendering for avfyring av M100 sektorvirkende ladninger

En studie av dynamiske laster

Paal-André Bruun, Oda Nisja & Emil Ø. Roligheten

Gradering: Åpen

Bachelor i ingeniørfag - bygg

Innlevert: mai 2023

Veileder: Fred Johansen og Peter Brandsæter

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for vareproduksjon og byggingsteknikk

| | | | |
|--|------------------|-----------------|---|
| Oppgavens tittel: | Dato: 22.05.2023 | | |
| Blendering for avfyring av M100 sektorvirkende ladning | Antall sider: 70 | | |
| | Masteroppgave: | Bacheloroppgave | x |
| Navn: Paal-André Bruun, Oda Nisja & Emil Ø. Roligheten | | | |
| Veileder: Fred Johansen | | | |
| Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Peter Brandsæter v/ Krigsskolen og Magnus Pjaaka Torp v/ Forsvarsbygg, NKSB | | | |

Under et samarbeidsprosjektet sommeren 2021 mellom Krigsskolen og flere andre avdelinger i Forsvarssektoren, ble det konstruert en blendering i Setermoen skyte- og øvingsfelt (SØF). *Forsvarets sikkerhetsbestemmelser for landmilitær virksomhet (UD 2-1)* stiller en rekke krav for godkjent avfyring av M100 sektorvirkende ladninger. I prosjekteringsfasen ble det tidlig avdekket at produksjonsunderlaget gitt i UD 2-1 var både mangelfull og tvetydig. Oppgaven vil studere følgende problemstilling:

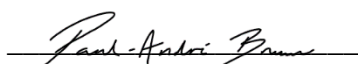
Er produksjonsunderlaget gitt i UD 2-1 tilstrekkelig for å prosjektere blenderinger ment for M100 sektorvirkende ladninger, og hvordan kan man gå frem for å studere påvirkningen av dynamiske laster på slike konstruksjoner?

For å svare på problemstillingen er det benyttet en hypotetisk deduktiv metode. I denne metoden er det lagt til grunn tre evalueringsmetoder for innsamling av data. De tre evalueringsmetodene består av matematiske beregninger, en numerisk datasimulering og ett fullskala forsøk. De matematiske beregningene og den numeriske datasimuleringen predikerte utfallet ved avfyringen av M100 i blenderingen. Videre verifiserte forsøket hvorvidt resultatene fra de to andre evalueringsmetodene stemte med virkeligheten.

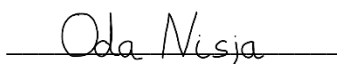
Resultatene fra de tre evalueringsmetodene viste at blenderingen i Setermoen SØF ikke tålte trykkbelastningen fra en M100 sektorvirkende ladning. Resultatene viste også hvordan de tre valgte metodene ga en god indikasjon på utfallet av trykkbelastningen. Oppgavens konklusjon er dermed at produksjonsunderlaget gitt av UD 2-1 ikke er tilstrekkelig for M100 blenderinger, samt at metodene brukt i oppgaven kan indikere resultatet av en trykkbelastning fra M100.

Stikkord:

| |
|-----------------------------|
| Dynamiske laster |
| Blendering |
| M100 sektorvirkende ladning |



Paal-André Bruun



Oda Nisja



Emil Ø. Roligheten

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet som en avsluttende oppgave for byggingeniør-utdanningen ved Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet (NTNU) våren 2023. Oppgaven bygger på det teoretiske grunnlaget som er tilegnet gjennom utdanningen og spesialiseringen fra NTNU og Forsvarets Høgskole. Valg av tema for oppgaven ble introdusert til gruppen under emnet *ledelse av ingeniøroperasjoner*, der det skulle prosjekteres og bygges en blendering for M19 og M100 sektorvirkende ladninger. Denne blenderingen er forløperen til vår bacheloroppgave.

Målgruppen for denne bacheloroppgaven er Forsvarsbygg, Tren Regimentet og ingeniører i Forsvaret som ønsker å ta dette arbeidet videre. Vi anbefaler at leseren innehar ingeniørkompetanse av høyere grad for å både forstå tematikken, samt kunne videreutvikle beskrivelsen gitt i UD 2-1 for hvordan blenderinger skal bygges.

Vi ønsker å rette en takk til våre veiledere i arbeidet med denne oppgaven. Videre ønsker vi å takke Nasjonalt kompetansesenter for sikring av bygg (NKSB) for gjennomføring av en numerisk datasimulering og støtte opp imot gjennomføring av forsøket. Vi ønsker å takke Hærens våpenskole og Krigsskolen for finansiering av forsøket. Til slutt ønsker vi å takke skytebaneadministrasjonen på Setermoen for støtte under gjennomføring av forsøket.

Vi har gjennom bachelorperioden opparbeidet oss unike kunnskaper innenfor dynamiske lastvirkninger, samt dannet oss et godt nettverk fra ulike fagmiljøer i Forsvaret.

Abstract

Introduction:

In the summer of 2021, the Norwegian Military Academy and several units in the Norwegian Defence Sector carried out a collaborative project. During the project, a concrete blindage was built in Setermoen firing and training range. Requirements were set for the construction to be built in accordance with regulations specified in *Safety Rules and Regulation for Land based military activities* (UD 2-1) for approved firing of heavy M100 claymore mines. In the project phase, it was revealed early that the production description given in UD 2-1 was both deficient and ambiguous. The thesis will study the following problem:

Is the production description provided by UD 2-1 for blindages, intended as a firing stand for a heavy M100 claymore mine, sufficient to produce, and how can someone proceed studies of dynamic loads on such structures?

Method:

A hypothetical deductive method has been used to answer the problem. This method is based on three evaluation methods for gathering data. The three evaluation methods consist of mathematical calculations, a numerical computer simulation and a full-scale experiment. The mathematical calculations and the numerical simulation predicted the outcome of firing an M100 in the blindage. Furthermore, the experiment confirmed whether the results from the other evaluation methods were in line with the reality.

Results and conclusion

The results from the three evaluation methods show that the blindage in Setermoen could not withstand the pressure load from M100 claymore mines. The results also showed how the three different gave a good indication on the outcome of the pressure load. The conclusion is thus that the production description provided by UD 2-1 for M100 blindages is not sufficient, and the methods used in this project can indicate the result from the pressure load of M100.

Innholdsfortegnelse

| | |
|---|-----------|
| Forord..... | v |
| Abstract | vi |
| Innholdsfortegnelse | vii |
| Figurliste | ix |
| Tabelliste | xi |
| 1 Innledning | 1 |
| 1.1 Bakgrunn | 1 |
| 1.2 Problemstilling..... | 3 |
| 1.3 Avgrensninger | 4 |
| 1.4 Samfunnmessig perspektiv | 4 |
| 1.5 Rapportens oppbygning | 5 |
| 2 Metode | 7 |
| 2.1 Evalueringsmetoder | 7 |
| 2.2 Kvalitetssikring..... | 9 |
| 2.3 Kildevurdering..... | 10 |
| 3 Konstruksjonsbeskrivelse..... | 11 |
| 3.1 Bakgrunn | 11 |
| 3.2 Konstruksjonen overordnet..... | 12 |
| 3.3 Fundament | 13 |
| 3.4 Vegger | 14 |
| 4 Teori..... | 15 |
| 4.1 Standarder og faglitteratur | 15 |
| 4.2 Eksplosjonslast | 15 |
| 4.3 Dynamisk påkjenning | 18 |
| 4.4 En-frihetsgradsystem | 18 |
| 4.5 Aktuelt system som et ekvivalent en-frihetsgradssystem..... | 19 |
| 4.6 Svingningssystem | 20 |
| 4.7 Deformasjon | 23 |
| 4.8 Lastbetraktning | 24 |
| 5 Matematiske beregninger | 27 |
| 5.1 Geometrisk data | 27 |

| | | |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 5.2 | Lastbetraktning | 29 |
| 5.3 | Deformasjon | 31 |
| 5.4 | Kapasitetsanalyse..... | 33 |
| 5.5 | Usikkerhet..... | 35 |
| 6 | Numerisk datasimulering | 37 |
| 6.1 | Teori..... | 37 |
| 6.2 | Metode | 38 |
| 6.3 | Resultater | 39 |
| 6.4 | Feilkilder..... | 43 |
| 7 | Forsøk..... | 45 |
| 7.1 | Teori..... | 45 |
| 7.2 | Metode | 46 |
| 7.3 | Resultater | 47 |
| 7.4 | Feilkilder..... | 52 |
| 8 | Diskusjon..... | 53 |
| 8.1 | Evalueringsmetoder | 53 |
| 8.2 | Resultater og gyldighet..... | 55 |
| 8.3 | Tekniske løsninger..... | 62 |
| 8.4 | Sikkerhet..... | 65 |
| 9 | Konklusjon..... | 67 |
| 9.1 | Hovedfunn | 67 |
| 9.2 | Relevans i Forsvaret | 69 |
| 9.3 | Videre arbeid | 69 |
| | Litteraturliste..... | 71 |
| | Vedlegg | 74 |

Figurliste

| | |
|--|----|
| Figur 1: Ødeleggelsen av den forsterkede blenderingen i Rødsmoen SØF. Hentet fra Geir Erik Olsen (leder SØF og miljø Forsvaret, personlig kommunikasjon over epost, 14. oktober 2021)..... | 3 |
| Figur 2: 3D-modell av blenderingen. | 12 |
| Figur 3: Tverrprofil av plasseringen til blenderingen ved standplass B3. | 13 |
| Figur 4: Mål på fundamentene sett ovenfra. | 13 |
| Figur 5: Mål på blenderingens vegger sett ovenfra..... | 14 |
| Figur 6: Trykkfordelingen til en eksplosjonslast. Hentet fra Karlos & Solomos (2013, s. 2). 16 | |
| Figur 7: Omgjøring av en tredimensjonal last til to dimensjoner. Hentet fra Kot og Turula (1976, s. 1)..... | 16 |
| Figur 8: Illustrasjon av det ekvivalente fjær-masse-systemet. Hentet fra Biggs (1964, s. 2). . 20 | |
| Figur 9: Illustrerer belastningen fra en stegfunksjonsbelastning. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 17)..... | 24 |
| Figur 10: Illustrerer trykkbelastningen sin varighet. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 20). . 24 | |
| Figur 11: Illustrerer belastningen fra en impulsbelastning. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 17)..... | 25 |
| Figur 12: Perioden til en stegfunksjonsbelastning. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 18)..... | 26 |
| Figur 13: Perioden til en impulsbelastning. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 19)..... | 26 |
| Figur 14: Rotert utsnitt av sideveggene illustrert som en utkrager. | 28 |
| Figur 15: Rotert utsnitt av bakveggen illustrert som dobbelt-innspent bjelke. | 28 |
| Figur 16: Momentdiagram for dobbelt-innspent bjelke. | 28 |
| Figur 17: Rotert utsnitt av bakveggen illustrert som leddet i begge ender. | 29 |
| Figur 18: Momentdiagram for en leddet bjelke. | 29 |
| Figur 19: Snitt av bakveggen markert i rødt. | 29 |
| Figur 20: Snitt av én sidevegg markert i rødt..... | 29 |
| Figur 21: Utsnitt av oppbygningen til blenderingen. Hentet fra NKSB (vedlegg C1)..... | 39 |
| Figur 22: 3D-modell av Blast Impulse Intensity. Snittet er tatt midt på bakvegg. Hentet fra NKSB (vedlegg C1). | 40 |
| Figur 23: Graf over impulsen i punktet midt på bakveggen. Hentet fra NKSB (vedlegg C1). 40 | |
| Figur 24: Tegnet graf av den derivate til impulsen. Hentet fra Magnus Pjaaka Torp (overingeniør Beskyttelse NKSB, personlig kommunikasjon over epost, 26. november 2021). | 41 |
| Figur 25: Graf over utsvingningen til et punkt på bakveggen. Hentet fra NKSB (vedlegg C1). | 42 |
| Figur 26: Skadeplot for et snitt av betongen i blenderingen. Hentet fra NKSB (vedlegg C1). 43 | |
| Figur 27: Avskalling og brudd i topp av bakveggen. | 49 |
| Figur 28: Brudd i fundament på baksiden av bakveggen. | 49 |
| Figur 29: Rissdannelser i østre hjørne. | 50 |
| Figur 30: Skadeomfang på stålplaten på bakveggen etter tredje avfyring. | 51 |
| Figur 31: Rissdannelsen i østre hjørne. | 56 |
| Figur 32: Momentdiagram for en dobbel-innspent bjelke. | 57 |

| | |
|--|----|
| Figur 33: Momentdiagram for en leddet bjelke. | 57 |
| Figur 34: Illustrert armeringsmengde langs sideveggene. | 61 |
| Figur 35: Idéskisse av en halvkuleformet blendering. | 62 |
| Figur 36: Idéskisse av en blendering med støttevegger. | 63 |
| Figur 37: Idéskisse av en blendering med tak. | 66 |

Tabelliste

| | |
|---|----|
| Tabell 1: Fordeler og ulemper ved de ulike evalueringsmetodene (Stølen, 2019, s. 54)..... | 9 |
| Tabell 2: Resultater av konstruksjonens ekvivalente stivhet | 30 |
| Tabell 3: Resultater av konstruksjonens utsvingningstid | 31 |
| Tabell 4: Resultater av konstruksjonens maksimale deformasjon | 32 |
| Tabell 5: Resultater av konstruksjonens ekvivalente kvasi-statiske last..... | 33 |
| Tabell 6: Resultater av konstruksjonens lastvirkninger | 33 |
| Tabell 7: Resultater av konstruksjonens utnyttelsesgrad for moment..... | 34 |
| Tabell 8: Resultater av konstruksjonens armeringsbehov | 34 |
| Tabell 9: Resultater av konstruksjonens utnyttelsesgrad for skjærkraft | 35 |
| Tabell 10: Resultater av bakveggenes utbøying | 48 |
| Tabell 11: Resultater av den målte åpning på blenderingen | 48 |
| Tabell 12: Resultater av stålplatenes deformasjon | 51 |

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Realistisk trening og øving er en grunnleggende nødvendighet for at Forsvaret skal gjennomføre operasjoner på best mulig måte. For Hæren er soldatutdanningen av både vernepliktige og ansatte avhengig av realistiske forhold for å sikre at avdelinger og kapasiteter er operative i reelle situasjoner. Realistiske forhold under trening og øving krever at Forsvaret er i stand til å balansere risiko og sikkerhet (FOH, 2020).

Som en del av Hærens utdanningsprogram skal soldater i Hæren «[...] forstå taktisk bruk av systemet» til M19 og M100 sektorvirkende ladninger (Sjef Hærens våpenskole, 2021, s. 4). Sektorvirkende ladninger benyttes i dag blant annet for å forsterke ildkraft i et ildoverfall eller forsterke et forsvar (FLO systemstyring, 2009, s. 4). Forsvaret benytter i dag både M19 og M100, hvor den grove forskjellen er en større ladning i M100. For å sikre oppnådde læringsmål i utdanningsprogrammet for sektorvirkende ladninger er en viktig del av undervisningen selve demonstrasjonen av en skarp ladning. Ved å erfare effekten som en ladning har, vil soldatene utarbeide en bedre forståelse for bruk i en taktisk ramme.

For å gjennomføre avfiring av sektorvirkende ladninger må *Forsvarets sikkerhetsbestemmelser for landmilitær virksomhet (UD 2-1)* følges. Bestemmelsene baserer seg i all hovedsak på sikkerhetsavstander. For å sikre oppnåelse av Hærens læringsmål er det ønskelig å ha et innsyn på ladningens effekt på målet. Ved å konstruere en blendering ment for avfiring av sektorvirkende ladninger kan sikkerhetsavstanden reduseres (Sjef Hæren, 2020, s. 118). En slik blendering består typisk av armerte betongvegger som skal skjerme personell i bakkant fra trykkbelastningen og beskytte mot splinter fra ladningen. Blenderingen skal skape trygge forutsetninger for å oppnå et godt innsyn på ladningens effekt med gjeldende bestemmelser fra UD 2-1.

Prosjekteringen av slike blenderinger må ta hensyn til både lastvirkningene fra M100 på konstruksjonen og sikkerhetsmessige aspekter slik som splinterfare. For å bygge en slik blendering må dimensjoneringen som ligger til grunn basere seg på den dynamiske lasten fra en M100 ladning. Karakteristikken til en dynamisk last er i stor grad mer komplisert enn for en statisk last. Det er derfor vanskelig å gjennomføre enkle beregninger på systemet. For å

forstå de fysiske fenomenene som oppstår ved avfyring av M100 i en blendering vil denne oppgaven beskrive teorien bak den dynamiske lasten og lastvirkningen på konstruksjonen.

Forsvaret har i dag bygget to blenderinger for avfyring av en M100 ladning, én i Rødsmoen skyte og øvingsfelt (SØF) og én i Setermoen SØF. Begge blenderingene har tatt utgangspunkt i mål og avstander gitt av UD 2-1. Likevel er utførelsen og de valgte løsningene til de to blenderingene i stor grad ulike. Blenderingen i Rødsmoen SØF tålte ikke trykkbelastningen fra en M100 og fikk store skader etter testsprengning. Blenderingen i Setermoen SØF ble prosjektert og bygget av kadetter ved Krigsskolen i 2021 og ble testet med M100 ladninger i forbindelse med denne oppgaven.

UD 2-1 skal beskrive de krav som stilles til sikkerhet for å unngå ulykker ved avfyring av sektorvirkende ladninger. Håndboka beskriver kort sikkerhetsavstander som er gjeldende ved bruk av M100 og inneholder enkle geometriske tegninger. De geometriske illustrasjonene av en blendering er de eneste produksjonsdetaljene UD 2-1 beskriver (Sjef Hæren, 2020, s. 119–121). For å konstruere en blendering vil det være naturlig å ta utgangspunkt i et produksjonsunderlag som beskriver alle nødvendige detaljer om blenderingen. En slik beskrivelse vil typisk inneholde armerings- og konstruksjonstegninger, detaljer om kvaliteten på stål og betong, samt øvrige strukturelle elementer. Det manglende produksjonsunderlaget i UD 2-1 åpner opp for individuelle tolkninger og løsninger. Et eksempel på sistnevnte utfordring oppstod ved blenderingen som ble bygget i Rødsmoen SØF.

Blenderingen i Rødsmoen SØF ble konstruert med prefabrikkerte elementer som sidevegger og plasstøpt bakvegg og fundament. Ved første avfyring av M100 gikk blenderingen til brudd. Blenderingen ble reparert og forsterket ved flere anledninger, uten særlig vellykkede resultater (Geir Erik Olsen, leder SØF og Miljø Forsvaret, personlig kommunikasjon over epost, 14. oktober 2021). Figur 1 viser skadene som oppstod i forbindelsen mellom bakvegg og sidevegger. I 2016 ble det innført en begrensning som kun tillater bruk av M19 i blenderingen (Forsvarsbygg, 2021). Dette eksempelet indikerer at det kan være behov for et tydeligere produksjonsunderlag i UD 2-1.



Figur 1: Ødeleggelsen av den forsterkede blenderingen i Rødsmoen SØF. Hentet fra Geir Erik Olsen (leder SØF og miljø Forsvaret, personlig kommunikasjon over epost, 14. oktober 2021).

I denne oppgaven er det valgt å studere blenderingen som er bygget i Setermoen SØF for å kartlegge om den tåler trykkbelastningen fra en M100 sektorvirkende ladning. En slik kartlegging vil belyse mistanken om hvorvidt produksjonsunderlaget i UD 2-1 er tilstrekkelig. Analysen av konstruksjonens kapasitet skal belyse de ulike evalueringsmetodene som kan benyttes for en slik kartleggelse. En ambisjon med oppgaven er å gi faglig innsikt i dynamiske lastvirkninger gjennom en dimensjoneringsbeskrivelse med utgangspunkt i blenderingen. Oppgaven vil komme med innledende anbefalinger til mulige tekniske løsninger for konstruering av nye blenderinger i Forsvarets skyte- og øvingsfelt.

1.2 Problemstilling

Følgende problemstilling er lagt til grunn for oppgaven:

Er produksjonsunderlaget gitt i UD 2-1 tilstrekkelig for å prosjektere blenderinger ment for M100 sektorvirkende ladninger, og hvordan kan man gå frem for å studere påvirkningen av dynamiske laster på slike konstruksjoner?

Oppgaven vil besvare problemstillingen ved å studere følgende forskningsspørsmål:

- Er blenderingen bygget i Setermoen SØF prosjektert med tilstrekkelig kapasitet for å tåle trykkbelastninger fra M100 sektorvirkende ladninger?
- Kan en forenklet teoretisk analyse av dynamiske laster gi en pålitelig dimensjonering av blenderinger, som kan brukes inn i et produksjonsunderlag til UD 2-1?

1.3 Avgrensninger

Dette delkapittelet beskriver de overordnede avgrensningene som er satt for oppgaven.

Ytterligere detaljer om avgrensninger innenfor de ulike evalueringsmetodene står beskrevet i de respektive kapitlene. Oppgaven inneholder følgende avgrensninger:

- Oppgaven vil kun studere trykkbelastningen fra M100 sektorvirkende ladninger.
- Oppgaven vil ikke utarbeide et komplett produksjonsunderlag for blenderinger, men kommer med en vurdering av mulige tekniske løsninger.
- De matematiske beregningene i oppgaven baserer seg på forenklinger grunnet kompleksiteten til dynamiske analyser.
- Oppgaven gir kun en dimensjoneringsbeskrivelse av de armerte betongveggene og ingen andre strukturelle elementer.
- Resultatene fra den numeriske datasimuleringen gir kun størrelser for bakveggen.
- Forsøket tar kun for seg enkle målinger av lengder, endelig deformasjon og synlige skader før og etter testsprengning.

1.4 Samfunnsmessig perspektiv

Forsvarssektoren er en statlig aktør som er forpliktet til å bygge opp under FNs bærekraftsmål. Det stilles derfor krav til sektoren innenfor blant annet sirkulær økonomi og gjenbruk av ressurser, samt miljøvennlige anskaffelser og avhendinger (Meld. St. 17, (2020-2021), s. 29). For å bidra til en sirkulær økonomi og et bærekraftig samfunn må FNs veiledende prinsipper etterleves og innovative løsninger for bærekraftig produksjon, bruk og avhending må tilstrebes. For denne oppgaven er det spesielt to bærekraftsmål som er relaterbare.

Stoppe klimaendringene, bærekraftsmål nummer 13, er en grunnleggende forutsetning for bærekraftig utvikling i samfunnet (Wilkinson, 2023). For å stoppe klimaendringene er reduserte utslipp nødvendig. For en M100 blendering vil prosessene i livsløpszyklusen (LCA) produsere flere klimagassutslipp (Kvellheim og Bramslev, 2020). For å minimere utslippene er det viktig at Forvaret velger gode leverandører som følger miljøkravene slik at materialene vi benytter har lavest mulig klimafotavtrykk. Det er også viktig med en lang levetid på konstruksjonen for å minimere forbruk og utslipp. Med et godt produksjonsunderlag i UD 2-1 kan konstruksjonens totale klimautslipp senkes ved å forbedre levetiden.

Fred og rettferdighet, bærekraftsmål 16, er en forutsetning for å lykkes med flere av de resterende målene til FN (Wilkinson, 2023). I et land med krig og urettferdighet vil naturligvis bærekraftige løsninger være vanskelig å implementere. For å ivareta suverenitet og opprettholde et fredfullt land er en militærmakt et nødvendig virkemiddel (FSI, 2021). Ved å bygge Forsvaret opp gjennom relevant trening og øving blir evnen til å opprettholde fred styrket. For Forsvaret er det viktig å fokusere på innovative løsninger som skaper gode arenaer for realistisk trening og øving. Som nevnt tidligere er en M100 blendering bygget for å sikre nettopp dette.

1.5 Rapportens oppbygning

Kapittel 1 tar for seg oppgavens bakgrunn, problemstilling, avgrensninger og oppbygning for å gi leseren en forståelse av tematikken, grunnlaget for valg av problemstilling, samt oppgavens omfang.

Hoveddelen er delt inn i kapitlene metode, konstruksjonsbeskrivelse, teori, de tre evalueringemetodene, samt diskusjon. Hoveddelen starter med en beskrivelse av valgt metode, som skaper en forståelse for hvordan de valgte evalueringemetodene skal besvare problemstillingen. Deretter følger kapittel 3 med en konstruksjonsbeskrivelse av blenderingen bygget i Setermoen SØF. Kapitlet gir nødvendige input-verdier for de tre evalueringemetodene i oppgaven. Videre tar kapittel 4 for seg en teoridel som beskriver tematikken, der dynamikkens grunnlag og beregningsmetoder gjøres rede for i en trinnvis prosess. Teoridelen gir en forståelse av de formlene som utgjør en forenklet beregning på blenderingens kapasitet. Kapittel 5 beskriver de matematiske beregningene som benyttes i en innledende dimensjoneringsbeskrivelse og tar utgangspunkt i strukturen til teorikapitlet for å skape flyt i formler og resultater. Videre tar kapittel 6 for seg en numerisk datasimulering av blenderingen, og beskriver den effekten trykkbelastningen fra M100 har på blenderingen ved bruk av en mer komplisert analyse enn håndberegningene. Kapittel 7 beskriver forsøket som ble gjennomført. Denne delen gir en forståelse av forsøkets intensjon, gjennomføring og resultater. Kapittel 6 og 7 er strukturert noe annerledes enn kapittel 5 for å skille metodikk og resultater i større grad enn ved matematiske beregninger. Dette grunnet uavhengighet til matematiske formler. Hoveddelen avsluttes med kapittel 8 som diskuterer evalueringemetodene, resultater og gyldighet, samt mulige tekniske løsninger.

Det avsluttende kapittelet inneholder en konklusjon med hovedfunn som deles inn etter forskningsspørsmålene og problemstilling. Kapittel 9 presenterer også tematikkens relevans i Forsvaret og anbefalt videre arbeid.

2 Metode

Dalland (2017, s. 52) beskriver metode som vårt redskap «[...] i møte med noe vi vil undersøke. Metoden hjelper oss å samle inn data, det vil si den informasjonen vi trenger til undersøkelsen vår». Hvilken metode som velges er sentralt for problemet som skal forskes på og veien frem til målet. Gjennom et naturvitenskapelig perspektiv «[...] leter man etter sammenhengen mellom årsak og virkning» (Dalland, 2017, s. 40). Beskrivelsen av det naturvitenskapelige perspektivet viser at fokuset rettes mot å forstå hva naturen er gjennom vitenskapelig rasjonalitet, uavhengig av intensjoner, personlige preferanser eller meninger.

Med utgangspunkt i et naturvitenskapelig perspektiv vil oppgaven benytte hypotetisk-deduktiv metode for å svare på problemstillingen. Denne metoden legger til grunn en hypotese som baserer seg på en observasjon, problemstilling eller en teori (Stølen, 2019, s. 172). Valg og formulering av hypotesen spiller en viktig rolle da det ikke er «[...] praktisk å analysere, sammenligne og klassifisere observasjoner uten en forutgående ide eller hypotese om hva som er viktig» (Stølen, 2019, s. 172). Dette skyldes blant annet de utallige mulige kombinasjoner eller måter å relatere på. Derfor vil valg av fremgangsmåte styre innsamlingen av tilstrekkelig mengde data for å kunne utføre analyser (Stølen, 2019, s. 61). Ved analysing av resultater kan konklusjoner trekkes ved å verifisere eller avkrefte hypotesen, som igjen setter nye momenter til teorien.

2.1 Evalueringemetoder

På bakgrunn av tematikkens kompleksitet og mangelfull dokumentasjon av blenderinger vil den hypotetisk-deduktive metoden legge til grunn tre forskjellige evalueringemetoder for innhenting av data. En slik triangulering av metoder skal forene ulike vinklinger for å danne en synergi-effekt slik at eventuelle svakheter mellom metodene jevnes ut (Stølen, 2019, s. 55). Evalueringemetodene består av matematiske beregninger, en numerisk datasimulering og gjennomføring av ett fullskala forsøk. Målet med disse evalueringemetodene er å studere hvorvidt hver metode kan gi en indikasjon på resultatene fra trykkbelastningen, samt hvorvidt produksjonsunderlaget i UD 2-1 kan benyttes for prosjektering av M100 blenderinger. Evalueringemetodene vil dermed gi økt faglig kunnskap om dynamiske lastvirkninger og belyse hvordan trykkbelastninger fra M100 påvirker blenderingen i Setermoen SØF. For å kunne verifisere om blenderingen kan benyttes for avfyring av M100 er det dedusert følgende krav til konstruksjonen:

- Blendingen skal være sikker å bruke.
- Blendingen skal ikke gå til brudd.
- Det skal ikke oppstå avskalling av betong.
- Blendingen skal vise til holdbarhet over tid.

De tre evalueringsmetodene gir ulike resultater basert på metodenes virkeområde.

Beregningene i oppgaven vil, sett fra et forenklet matematisk perspektiv, vise hvilke fysiske fenomener som oppstår i blendingen ved trykkbelastning. Til tross for at det gjøres forenklinger som vil kunne øke avstanden til virkeligheten, vil beregningene likevel redegjøre for helt grunnleggende dimensjoneringsanalyser av konstruksjoner som påvirkes av dynamiske laster. For å være i stand til å gjennomføre beregninger er det nødvendig å presentere teorien bak dimensjonering med hensyn på dynamiske laster. Teorien som benyttes er ment som et supplement for å understøtte evalueringsmetodene som er benyttet i oppgaven.

Videre vil den numeriske datasimuleringen kunne håndtere mer komplekse beregninger, samt visualisere situasjonsbildet tydelig med modeller. Simuleringen vil i større grad enn de matematiske beregningene kunne relatere seg til de virkelige forholdene blendingen opplever. Oppgaven vil benytte de to nevnte evalueringsmetodene for å oppnå gyldighet i resultatene gjennom den numeriske datasimuleringen og forståelse av de fysiske prinsippene gjennom de matematiske beregningene. I tillegg benyttes de to evalueringsmetodene for å predikere forsøket utfall. Følgende prediksjon er lagt til grunn for de teoretiske analysene:

Blendingen konstruert i Setermoen SØF vil ikke tåle trykkbelastningen fra M100 sektorvirkende ladninger.

Til slutt vil gjennomføringen av ett fullskala forsøk verifisere hvorvidt prediksjonen og resultatene fra de foregående evalueringsmetodene stemmer med virkeligheten. Utover denne verifiseringen vil forsøket også kunne synliggjøre eventuelle utfordringer knyttet til de valgte tekniske løsningene ved prosjekteringen av blendingen i Setermoen SØF. Tabell 1 illustrerer hvordan en kombinasjon av evalueringsmetodene muliggjør en analysing av resultatene fra ulike vinklinger og avdekker eventuelle differanser mellom metodene og resultatene.

Tabell 1: Fordeler og ulemper ved de ulike evalueringsmetodene (Stølen, 2019, s. 54).

| | Presisjon | Generalitet | Realisme |
|----------------------------|-----------|-------------|----------|
| Matematiske beregninger | | | |
| Numeriske datasimuleringer | | | |
| Fullskala forsøk | | | |

Bakgrunnen for valget av evalueringsmetoder kommer av at som ingeniøroffiser vil det kunne være nødvendig å skalere innsats og ressurser ut ifra ståsted i en prosess. Ved å først gjennomføre enkle beregninger i et forprosjekt kan dette bidra til å avdekke om det eksisterer et behov for videre arbeid. Dersom prosjektet er av interesse, kan det være naturlig å sette av mer tid eller ressurser for videre studie. Basert på de ressursene som er tilgjengelig kan det eksempelvis benyttes numeriske datasimuleringer eller reelle forsøk for å bygge på gyldigheten av resultatene. Bruken av disse evalueringsmetodene anses derfor å være relaterbare til hvordan tilsvarende prosjekter kan utføres i Forsvaret.

2.2 Kvalitetssikring

For å sikre troverdig kunnskap i forskningsarbeidet har kvalitetssikring en helt sentral plass. Stølen (2019, s. 121) beskriver kvalitetssikring som krevende med bakgrunn i krav til pålitelighet og etterprøvbarehet i dokumentasjonen. Med bakgrunn i viktigheten av kvalitetssikring benytter denne bacheloroppgaven ulike fagmiljøer fra Forsvarssektoren som har bidratt med faglig ekspertise inn i arbeidet med de ulike evalueringsmetodene. Denne faglige ekspertisen vil også kunne bidra i diskusjonen rundt konklusjonsgyldigheten til resultatene fra evalueringsmetodene. Et eksempel på en slik involvering er numeriske simuleringer gjennomført av Nasjonalt kompetansesenter for sikring av bygg (NKSB). Videre presiserer Dalland (2017, s. 55) viktigheten av en redegjørelse for hvilke valg som er gjort for å kunne si i hvilken grad resultatet er holdbart eller gyldig. For å trekke konklusjoner knyttet til resultatene fra de ulike evalueringsmetodene er det nødvendig å gjøre rede for valgene som har hatt påvirkningskraft på resultatet. Dette innebærer blant annet valg av utførelse, forenklinger og konservative tilnærminger, og beskrives ytterligere i tilhørende kapitler.

2.3 Kildevurdering

I arbeidet med det teoretiske grunnlaget har det hovedsakelig vært benyttet et kompendium utgitt av det svenske forsvarrets forskningsinstitutt, samt vitenskapelig faglitteratur hentet fra de ulike søketjenestene til det norske biblioteket. Ved innhenting av faglitteratur fra åpne kilder har det vært tilstrebet å benytte fagfelleverderte tekster eller master-oppgaver godkjent av universiteter eller høyskoler. Som støttelitteratur har det vært benyttet lærebøker som har vært pensum i ingeniørutdanningen ved Krigsskolen og NTNU. Enkelte av lærebøkene som er benyttet i denne oppgaven er skrevet av ulike fagmiljøer innenfor Forsvarssektoren. Dette har gjort det enklere å ta forbindelse med fagpersonellet som har skrevet tekstene, dersom det har vært behov for ytterligere beskrivelser. Deler av disse tekstene eller dokumentene er også hentet fra Forsvarets eget intranett, og er således ikke tilgjengelig uten tilganger.

Generelt kjennetegnes de innhentede kildene med at de beskriver den overordnede tematikken og teorien til oppgaven godt. Disse tekstene inneholder blant annet ulike fremgangsmåter for beregninger av dynamiske laster, og gode beskrivelser av fenomenet ved trykkbelastninger fra eksplosive laster mot betongkonstruksjoner. Likevel bærer innhentingens preg av lite spesifikk informasjon eller dokumentasjon om blendinger ment for avfyring av M100. Dette er en del av bakgrunnen for valget om å benytte flere evalueringsmetoder.

3 Konstruksjonsbeskrivelse

3.1 Bakgrunn

Som en del av et samarbeidsprosjekt mellom Krigsskolen og ulike avdelinger i Forsvarssektoren, ble det konstruert en blendering i Setermoen SØF sommeren 2021. Prosjekteier stilte krav til at blenderingen skulle bygges i henhold til UD 2-1 for godkjent avfyring av M100 (Melhus, 2021). Prosjekteringen har tatt utgangspunkt i de kravene som er gitt av UD 2-1, men grunnet manglende detaljbeskrivelse er store deler av blenderingen prosjektert basert på prosjektleders egne tolkninger og løsninger.

I tillegg til mangel på detaljer er beskrivelsene i UD 2-1 preget av tvetydigheter.

Sikkerheshåndboka gir mål for sikkerhetsavstanden til farlig sektor ved bruk av M100.

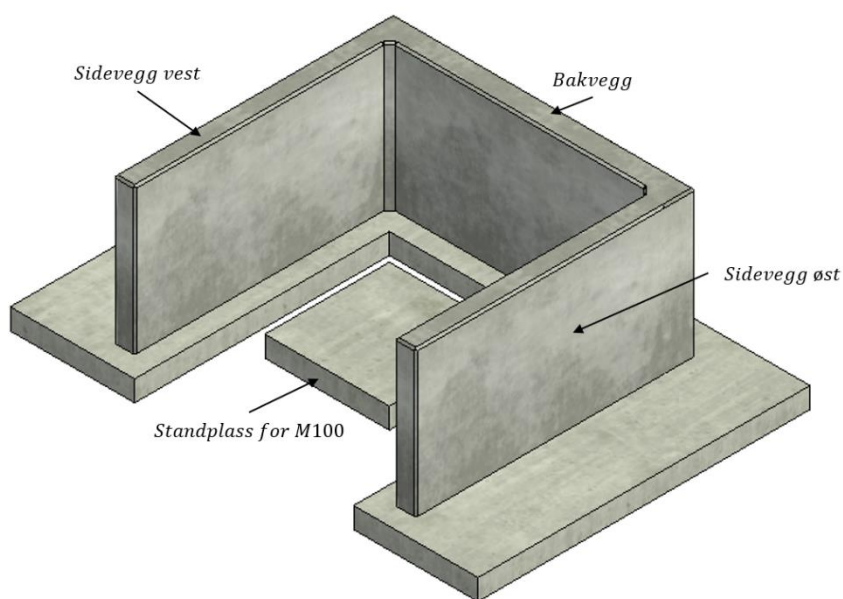
Denne sikkerhetsavstanden er satt til 500 m, dersom det ikke benyttes noen form for dekning (Sjef Hæren, 2020, s. 355). Dersom det benyttes en dekning mellom personell og ladningen er bestemmelsene for avstander i UD 2-1 tvetydige. Sikkerheshåndboka forklarer at personell kan oppholde seg bak en blendering, som illustrert i figurene 3.16 og 3.17 i håndboka (Sjef Hæren, 2020, s. 112–113). Disse illustrasjonene viser en dekning hvor personellet skal oppholde seg under granatkasting, og illustrerer ikke en blendering ment som standplass for sektorvirkende ladninger. Dermed oppstår det uklarheter når sikkerheshåndboka stiller krav til at minimumsavstanden mellom blenderingen og personellet er 50 m (Sjef Hæren, 2020, s. 118). For blenderingen bygget i Setermoen SØF er tolkningen av UD 2-1 at blenderingen skal skjerme personellet slik at de kan stå 50 m fra ladningen utenfor virkningssektor.

Detaljløsningen av blenderingen er som nevnt utført etter situasjonsbestemte forhold med tilhørende egenvurderinger. Dette kapittelet vil beskrive blenderingens geometri og oppbygning for å gi nødvendige input-parametere til de ulike evalueringsmetodene.

Informasjonen om blenderingen er hentet fra *Kvalitetshåndbok M19/M100* (Herland og Bruun, 2021) og førstehåndskilder fra prosjektet. Konstruksjonstegningene av blenderingen er lagt til som vedlegg A1, A2, A3 og A4.

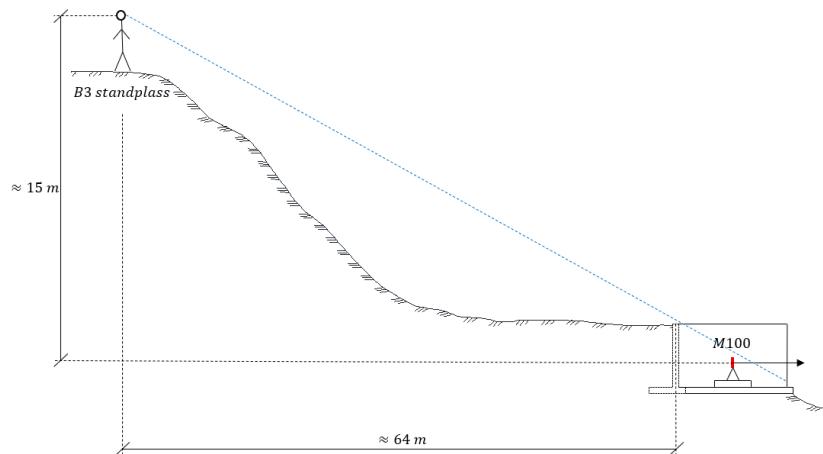
3.2 Konstruksjonen overordnet

Slik som figur 2 illustrerer består blenderingen av et fundament, en bakvegg og to sidevegger, samt et fundament for plassering av én sektorvirkende ladning, heretter omtalt som standplass for M100. Disse konstruksjonsdelene er plasstøpt separat, hvorav fundament og standplass er første støp, og vegger er andre støp.



Figur 2: 3D-modell av blenderingen.

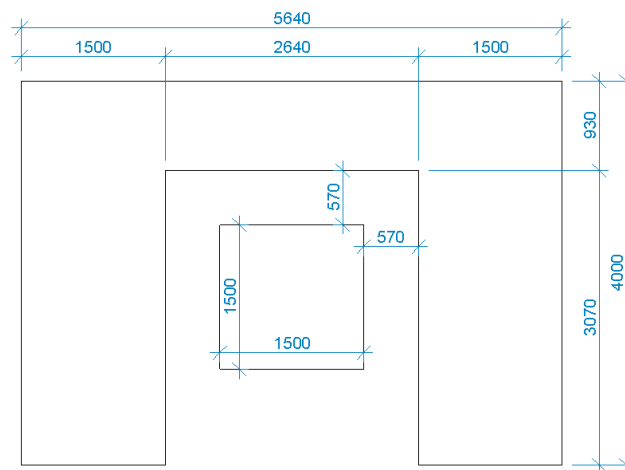
Blenderingen er plassert i fremskråning av standplass B3 og orientert med åpningen mot sør, illustrert i figur 3. Ved å plassere blenderingen i fremskråning muliggjør dette en bedre tildekning av masser rundt alle veggene. Plasseringen tilrettelegger også for innsyn av ladningens effekt siden tilskuere vil stå plassert høyere i terrenget ved standplassen. Denne overhøyden er ikke spesifisert som et krav i UD 2-1. Formålet til massene rundt er å forsterke blenderingen under avfyring. UD 2-1 spesifiserer at massene rundt blenderingen skal bestå av sand/grus/jord og fyllingen skal være 60 cm bred der høyden er én meter. Blenderingen som er bygget har benyttet stedege masser der bredden på fyllingen er én meter der høyden er 1.75 m.



Figur 3: Tverrprofil av plasseringen til blenderingen ved standplass B3.

3.3 Fundament

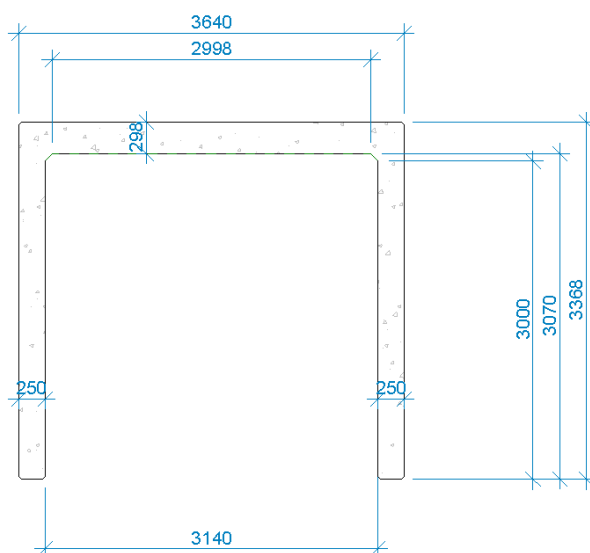
Flaten blenderingen står på er gravd ned til fjell og planert ut med 16-22 mm pukkk. Som en egen vurdering og basert på situasjonsbestemte forhold er det støpt et fundament for veggene, til tross for at UD 2-1 ikke beskriver noe om et tilhørende fundament til blenderingen. Videre er standplassen for M100 støpt 250 mm høyere enn fundamentet til veggene. Denne standplassen er også tildekt med en stålplate for å hindre slitasjeskader som følge av ladningen. Stålplaten er av kvaliteten S355J2+N og har en tykkelse på 20 mm. **Feil! Fant ikke referanseilden.** illustrerer målene til de to separate fundamentene. Fundamentene er støpt med B35 MF45, med en tykkelse lik 250 mm og en prosjektert overdekning lik 40 mm. Videre er fundamentet dobbeltside-armert med armeringsnett av typen K503. Kantbøylene i fundamentet og bøylere fra fundamentet til veggen er B500NA á Ø12. Kantbøylene har senteravstand (cc) 300 mm og bøylene fra fundamentet til veggen har cc 100 mm.



Figur 4: Mål på fundamentene sett ovenfra.

3.4 Vegger

Veggene er støpt med B35 MF45 fiberarmert selvkompimerende betong. Prosjekteringen har tatt utgangspunkt i målene fra UD 2-1 (Sjef Hæren, 2020, s. 118–121), men grunnet avvik i utførelse divergerer dimensjonene på veggene fra tegningene gitt i sikkerhåndboka. Bakveggen er 298 mm tykk fremfor 250 mm. De innvendige hjørnene er forsterket gjennom en avfasing. Denne avfasingen gjør hjørnene tykkere og gir mer rom for armering. Figur 5 viser ytterligere mål på veggene. Overdekningen er prosjektert til 40 mm, og veggene er dobbeltside-armert med armeringsnett av typen K503. I tillegg til armeringsnett er hjørnene forsterket med bøyer for å øke strekkapasiteten. Kantbøyer og bøyer til hjørnene er B500NA á Ø12.



Figur 5: Mål på blenderingens vegger sett ovenfra.

På innsiden av blenderingen er det støpt inn syrefaste (A4) gjengestag av størrelse M16 som muliggjør oppheng av gummiduk og stålplater. For å sikre at gjengestagene sitter fast er det montert firkantskiver og muttere på innsiden av støpen. Gummiduken som er benyttet er av typen Ethylene Propylene Diene Monomer. Denne er 8 mm tykk, og er festet mellom stålplatene og betongveggen. Gummiduken skal redusere effekten fra stålplatene som vibrerer mot betongveggen ved avfyring av M100. På utsiden av gummiduken er det festet stålplater av kvaliteten S355J2+N. Disse har en tykkelse på 10 mm og skal hindre at blenderingen tar skade av splinter og generell slitasje fra trykkbelastningen til M100.

4 Teori

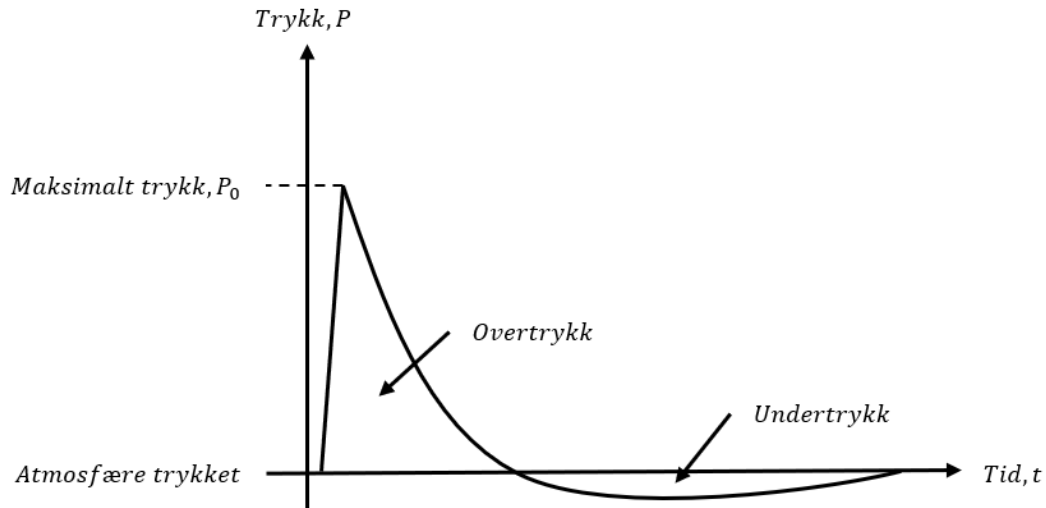
4.1 Standarder og faglitteratur

Standard Norge har til formål å danne standardiserte og detaljerte beskrivelser til EU-direktiver, nasjonale lover og forskrifter. Standardene er ofte frivillige å bruke og fungerer slik mer som retningslinjer enn lovverk. Bøkene er et resultat av nasjonalt, europeisk eller globalt standardiseringsarbeid. Bruken av standarder bidrar til utvikling av formålstjenlige og sikre varer, produksjonsprosesser og tjenester (Standard Norge, 2021). Dimensjoneringen i denne oppgaven tar utgangspunkt i *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner* med gjeldende nasjonale tillegg.

Beregningene av dynamiske laster er i all hovedsak basert på teori fra det svenske forsvaret sitt forskningsinstitutt med kompendiet *Beräkningsmetoder vid stötvågsbelastade konstruktioner*. Teorien tar for seg dynamikkens grunnleggende prinsipper og beregninger på konstruksjoner belastet av trykk fra dynamiske laster. Kompendiet har til formål å skape forståelse rundt konstruksjoners respons ved å studere svingesystemet til strukturen. Teksten gir enkle beregninger og løsninger for ekvivalente systemer, og gir derfor oppskrifter og verktøy for å beregne svingesystemet til kompliserte systemer.

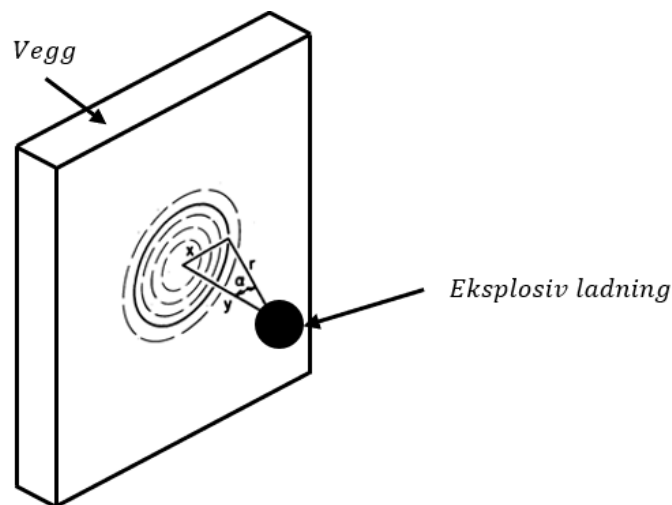
4.2 Eksplosjonslast

Når et høyeksplosivt stoff detonerer i friluft, vil en plutselig frigjøring av energi og forbrenningsgasser oppstå. En eksplosjon kan karakteriseres som en plutselig volumetrisk utvidelse av materie på grunn av en fysisk eller kjemisk tilstandsending (Ekström, 2017, s. 8). For en detonasjon av et eksplosivt stoff, skaper ekspansjonen av gasser et overtrykk som skaper mekanisk arbeid når luften rundt tvinges bort. Den høyt komprimerte luften som omgir detonasjonen skaper en eksplosjonsbølge som forplanter seg fra episenteret til eksplosjonen med supersonisk hastighet (Ekström, 2017, s. 8). Når trykkbølgen treffer en struktur, vil det dannes et overtrykk etterfulgt av et undertrykk, vist i figur 6. Størrelsen på trykket i undertrykksfasen er relativt lavt sammenlignet med trykket fra overtrykksfasen. Derfor er det vanligvis på den sikre siden å anta at undertrykksfasen ikke vil ha en stor innvirkning på strukturen (Karlos og Solomos, 2013, s. 3). Beregningene i denne oppgaven begrenser seg derfor til å kun se på overtrykket, og neglisjerer effekten av det minimale undertrykket som påføres strukturen.



Figur 6: Trykkfordelingen til en eksplosjonslast. Hentet fra Karlos & Solomos (2013, s. 2).

Oppgaven tar for seg virkningene i en betongvegg som er utsatt for eksplosive detonasjoner. Fenomenene forbundet med slike eksplosjoner i nærheten av en struktur er kompliserte og involverer generelt en rekke belastninger. Lufttrykk, grunnsjokk og direkte støt ved kontaktplassering av eksplosivet er eksempler på slike belastninger (Kot og Turulan, 1976, s. 1). Oppgavens matematiske beregninger begrenser seg til å kun se på effekten av lufttrykket fra eksplosjonen. Forsøkets resultater er derfor relevante siden den virkelige effekten, som baserer seg på flere belastninger fra eksplosjonen, blir tatt hensyn til. Som en følge av forenklingen i beregningene omskrives effekten fra et tredimensjonalt problem til to dimensjoner, vist i figur 7. En slik betraktning kan føre til at lasten som studeres blir for lav sammenlignet med virkeligheten. Prosessen for å kunne beskrive belastningen på veggen er selv for en to-dimensjonal betraktning svært komplisert.



Figur 7: Omgjøring av en tredimensjonal last til to dimensjoner. Hentet fra Kot og Turula (1976, s. 1).

Som en følge av kompleksiteten til eksplosjonsbølgens interaksjon med veggen, er en analytisk beskrivelse av belastningen svært komplekst å gjennomføre med håndberegninger (Kot og Turulan, 1976, s. 4). En lastanalyse fra eksplosive detonasjoner er derfor basert på omfattende programmer som systematiserer matematiske formler. Denne oppgaven baserer seg på *Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator*, som benyttes av *UN Safer Guard*. Kalkulatoren beregner eksplosjonsbølgeparameterne til en halvkuleformet frifelt lufttrykks-eksplosjon mot én vegg (UN Safer Guard, u.å). Den baserer seg på empiriske relasjoner og gir data for innfallstrykk, reflektert trykk, innfallsimpuls, reflektert impuls, belastningens varighet, tidspunkt for ankomst av sjokkbølgen og sjokkfronthastighet. Dataen som gis av kalkulatoren er basert på et verst tenkelig tilfelle for en struktur med kun én vegg (Ove Dullum, sjefsforsker ved FFI, personlig kommunikasjon over epost, 18. oktober 2021). Det er derfor ikke gitt at lasten er det verste tilfellet for blenderingen som består av tre vegger.

Ved å benytte *Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator* kan trykkbelastningen fra en M100 sektorvirkende ladning mot en betongvegg bestemmes. Kalkulatoren baserer seg på eksplosivtypen, vekt på eksplosivene og avstanden til veggen fra ladningen. Hovedladningen til en M100 består av ca. 5.4 kg Comp B-3 eksplosiver (FLO systemstyring, 2009, s. 7). Ved avfiring skal ladningen plasseres 1.5 m fra bakveggen og sideveggene til blenderingen. Med nevnte parametere gir kalkulatoren følgende data for videre beregninger:

Reflektert impuls: $2002.85 \text{ kPa} \cdot \text{ms}$

Belastningens varighet: 1.57 ms

I virkeligheten vil trykkbelastningen fra eksplosjonen ha et varierende trykk over veggen. Beregningene som foretas tar utgangspunkt i maksimal trykkbelastning og ser på trykket som jevnt fordelt over hele veggen.

Når M100 avfyres vil veggen utsettes for hovedsakelig to typer skademekanismer. Som en generell respons fra trykkbelastningen er den første skademekanismen en utbøying (Kot og Turulan, 1976, s. 3). Ved stor utbøying vil veggen oppleve store strekk- og trykkrefter, som kan føre til brudd. Beregningene i oppgaven søker å definere størrelsen på veggens opplevde deformasjon for å analysere omfanget av eventuell skade. Den andre skademekanismen handler om betongavskalling. Beregninger på avskalling er komplisert og tas ikke med i oppgaven. For å studere avskalling benyttes forsøket som evalueringsmetode. Skademekanismen er derfor ytterligere beskrevet i delkapittel 7.3.3.

4.3 Dynamisk påkjenning

Trykkbelastningen fra M100 sektorvirkende ladninger er en dynamisk påkjenning. Grunnleggende forskjeller mellom systemer belastet av en statisk og dynamisk last er tilstedeværelse av tregghet i likningen om bevaring av bevegelse, og tilstedeværelse av kinetisk energi i likningen om bevaring av energi (Magnusson, 2007, s. 26). Ved dynamisk last er det derfor behov for å studere bevegelseslikningen, sammenlignet med statisk last der beregningene baserer seg på likevektslikninger. For dynamiske laster er derfor massens deformasjon i et kort tidsforløp viktig, i motsetning til statiske laster som studerer deformasjonen uavhengig av tid. Ved å påføre dynamiske laster på en konstruksjon, skapes akselerasjon og tregghetskrefter. Konstruksjonens respons på belastningen beskrives av de dynamiske egenskapene: egenperiode og dempning (Kvalsund, 2010, s. 75). For å forstå konstruksjonens bevegelse etter belastningen, utføres en dynamisk analyse.

En dynamisk analyse er ofte svært komplisert grunnet flere variabler i konstruksjonens svingesystem. For å undersøke konstruksjonens respons er det derfor ofte nødvendig med flere forenklinger. Strukturelle elementer kan i mange tilfeller bli forenklet til et ekvivalent system som har lik respons som virkeligheten. Ved å studere de viktigste funksjonene til konstruksjonen, kan det modelleres en matematisk modell der teori for dynamisk analyse fastsetter responsen ved belastning (Kvalsund, 2010, s. 75). En slik modell baserer seg på grunnleggende fysiske prinsipper og matematikk. Hensikten til den dynamiske analysen er å beskrive konstruksjonens oppførsel som en funksjon av tiden for et gitt forløp av akselerasjonen (Kleven, 2013, s. 1).

4.4 En-frihetsgradsystem

Blenderingen i Setermoen SØF består av et komplekst system med flere frihetsgrader. En frihetsgrad defineres som «[...] minste antall uavhengige koordinater som trengs for å bestemme posisjonen til alle delene av systemet, til hvilket som helst tidspunkt» (Kvalsund, 2010, s. 76). Siden blenderingen består av flere konstruksjonsdeler i form av stålplate, gummiplate, betongvegg med flere konstruksjonsparametere og jorddekning bak, må disse ses på som ett felles system for å bestemme konstruksjonens virkelige oppførsel. Blenderingen defineres derfor i virkeligheten som et fler-frihetsgradsystem der flere separate parametere bestemmer konfigurasjonen av systemets bevegelse til enhver tid (Biggs, 1964, s. 11). For å regne eksakt på et slikt system må det gjennomføres en numerisk analyse der hver frihetsgrad

uttrykkes i form av bevegelseslikningen og settes i et felles uttrykk på matriseform (Hofgaard og Selmer, 2012, s. 5). Dette er en komplisert metode som håndberegningene i denne oppgaven ikke går nærmere inn på. Ved å benytte numeriske datasimuleringer blir hver enkelt frihetsgrad i større grad tatt hensyn til ved hjelp av et dataverktøy. Karakteristikken til numeriske datasimuleringer som analyse- og beregningsverktøy blir ytterligere beskrevet i kapittel 6.

For å analysere blenderingens oppførsel ved trykkbelastning med enkle formler betraktes blenderingen som et en-frihetsgradsystem (Magnusson, 2007, s. 26). Tanken er å danne et idealisert ekvivalent dynamisk system som deformasjons- og tidsmessig har lik respons som virkeligheten (Balazs, 1998, kap. 2, s. 16). Det ekvivalente systemet samler hele problemet i et punkt der poenget er å forenkle beregningene, men få samme resultat som det virkelige systemet. For å etablere et slikt system beskriver Biggs (1964, s. 2) det som nødvendig å foreta et korrekt utvalg av systemets parametere. Oppgavens håndberegninger tar kun for seg betongkonstruksjonen med armering og ser bort ifra de øvrige strukturelle elementene. Ved å gjøre slike forenklinger kan flere feilkilder oppstå. Det er derfor nødvendig å vurdere forenklingene for å sikre at konsekvensen blir konservativ for den matematiske analysen.

4.5 Aktuelt system som et ekvivalent en-frihetsgradssystem

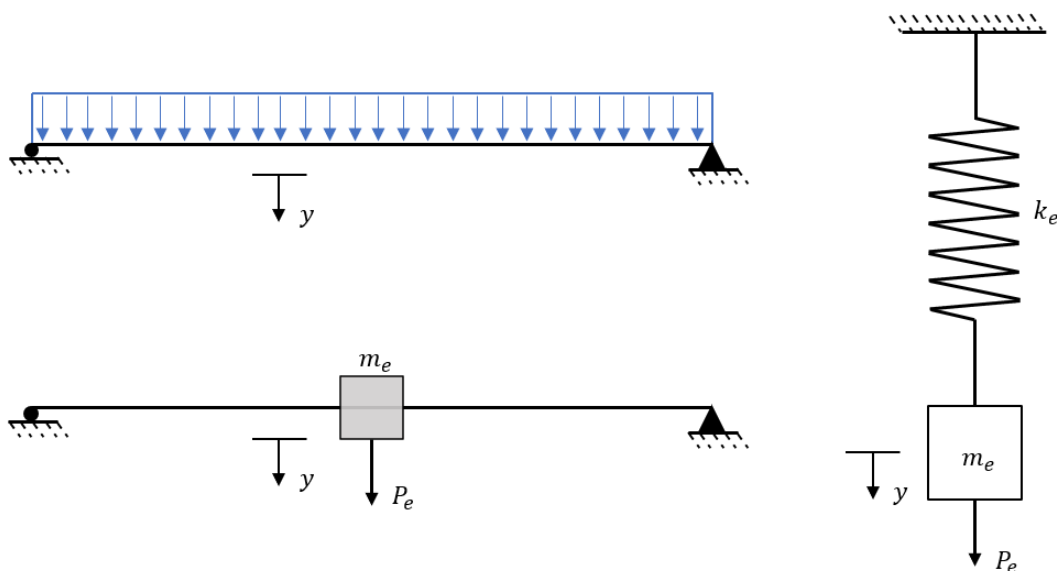
For å beskrive blenderingens system som et en-frihetsgradsystem må massen og indre kraft ha de samme fundamentale egenskapene som systemet med flere frihetsgrader.

Masseegenskapene til konstruksjonen tilskrives et enkelt bestemt punkt der konstruksjonen får den største deformasjonen. Dette systempunktet defineres med en ekvivalent masse (m_e) slik at systempunktets bevegelse har lik kinetisk energi som det virkelige systemet (Balazs, 1998, kap. 2, s. 16). For det samme systempunktet kan det videre bestemmes en ekvivalent belastningskraft (P_e). Denne kraften utfører samme arbeid for å bevege systempunktet, som de faktiske ytre kreftene utfører i sine tilsvarende bevegelser. En lik deformasjonsøkning er vilkåret for at disse transformasjonene av masse og ytre kraft skal være gjeldende (Balazs, 1998, kap. 2, s. 17). Det vil si at samtlige punkters forskyvninger i et vilkårlig øyeblikk skal kunne multipliseres med én og samme konstant for å finne forskyvningen i et annet vilkårlig punkt.

For å finne de ekvivalente størrelsene for systemet benyttes en dimensjonsløs «omvandlingskoeffisient» (κ). Balazs (1998, kap. 2, s. 45) gir en tabell over κ -verdiene for blant annet utkrager-bjelker. Denne tabellen benyttes for beregninger av de ekvivalente størrelsene til sideveggene. Tabellen fra Balazs inkluderer ikke en dobbel-innspent bjelke, derfor benyttes κ -verdier fra *U.S. army corps of engineers*, for bakveggen (Unified facilities criteria, 2008, s. 594). «Omvandlingskoeffisientene» brukes i beregningene på blenderingen for å bestemme de ekvivalente verdiene på massen (m_e), stivheten (k_e) og kraften/impulsen som treffer veggen (P_e/I_e).

4.6 Svingningssystem

For å løse dynamiske problemer er den enkleste fremgangsmåten å betrakte modellen som et fjær-masse-system, vist i figur 8 (Biggs, 1964, s. 1). Figuren viser sammenhengen mellom en fritt opplagt bjelke og det ekvivalente fjær-masse-systemet. Ved å se på bjelken som et fjær-masse-system konsentreres massen om ett punkt og deformasjonen i det bestemte punkt studeres. Da bestemmes massens bevegelse i hvilket som helst tidspunkt av én parameter: y -koordinaten (Balazs, 1998, kap. 1, s. 12). Modellen beskriver hvordan systemet responderer i form av svingninger etter en påført kraft. En svingning defineres som «all bevegelse som repeterer seg selv etter et tidsintervall» (Kvalsund, 2010, s. 75). En svingning kan beskrives som fri, tvungen, udempet og dempet.



Figur 8: Illustrasjon av det ekvivalente fjær-masse-systemet. Hentet fra Biggs (1964, s. 2).

Ved å sette på en ytre kraft på systemet vil det oppstå svingninger. Likevekten til systemet beskrives med den dynamiske likningen (Biggs, 1964, s. 4):

$$m \cdot y'' + c \cdot y' + k \cdot y = P(t) \quad (4.1)$$

Hvor: m er massen til det dynamiske systemet

c er viskøs dempningskoeffisient

k er stivhet

y er den relative forskyvning av systemet

$P(t)$ er en ytre kraft som påvirker systemet gjentakende over tid

På venstre side av formel 4.1 beskrives treghets-, stivhets- og dempnings-kraften, som motvirker den ytre påførte kraften, vist på høyre side.

Treghetskraften (F_i) er definert med Newtons andre lov (Popovic og Sandviknes, 2019, s. 18):

$$F = m \cdot a \quad \rightarrow \quad F_i(t) = m \cdot y'' \quad (4.2)$$

Hvor: F er kraft

y'' er akselerasjonen gitt som den dobbeltderiverte av den relative forskyvningen y

Stivetskraften (F_s) er produktet av forskyvningen y og stivheten k til konstruksjonsdelen gitt ved formel 4.3 (Popovic og Sandviknes, 2019, s. 18).

$$F_s = k \cdot y \quad (4.3)$$

Dempningskraften (F_d) er definert som vist i formel 4.4 (Popovic og Sandviknes, 2019, s. 18).

$$F_d = c \cdot y' \quad (4.4)$$

Hvor: y' er hastigheten gitt som den deriverte av den relative forskyvningen y

Blenderingen betraktes som en modell der svingningssystemet er fritt og udempet. Det vil si at systemet er påvirket av en initial forskyvning, i form av en ytre kraft som påvirker systemet i svært kort tid. Systemet svinger også av seg selv etter forskyvningen, og all energi blir værende i systemet (Kvalsund, 2010, s. 75).

Ved å definere systemet som udempet neglisjeres dempningskraften (F_d) som kommer av friksjonskrefter som virker på blenderingen (Øystad-Larsen, 2010, s. 8). I virkeligheten vil det være en dempet svingning der blant annet de stedege massene påvirker konstruksjonen til å avta bevegelsen. En analyse av svingningene vil gi et svar på hvor stor deformasjon blenderingen opplever. Siden beregningene ønsker å studere den maksimale utsvingningen (y_{max}) som blenderingen opplever, vil en udempet svingning gi et konservativt svar. Bakgrunnen for dette er at en dempet svingning vil ha lavere maksimal bevegelse på grunn av friksjonskreftene som bremser bevegelsen. På den andre siden kan dempningen, forårsaket av øvrige strukturelle elementer, ha en egenfrekvens som fører til økning av svingningene (Popovic og Sandviknes, 2019, s. 18). Dette er en feilkilde beregningene baserer seg på som i virkeligheten kan få store konsekvenser for konstruksjonen.

Forskjellen på en tvungen og fri svingning er gjentagende påvirkning av en ytre kraft. Trykkbelastningen fra M100 avfiringen vil påvirke blenderingen én gang og i svært kort tid. Det vil si at blenderingen ikke påvirkes av en gjentagende kraft. Svingningen til systemet betraktes derfor som fritt og den ytre kraften (P_t) i formel 4.1 settes lik null.

For å konkludere ser denne oppgaven på en modell der svingningssystemet er definert av likevekten mellom de motvirkende kreftene, treghetskraften (F_t) og stivhetskraften (F_s), og den ytre påførte kraften (P_t). Dette gir følgende dynamiske likevektslikning for blenderingen (Balazs, 1998, kap. 1, s. 12):

$$m \cdot y'' + k \cdot y = 0 \quad (4.5)$$

Denne likningen er svært relevant for å gjennomføre beregninger på systemets deformasjon (y). Den allmenne løsningen på formel 4.5 kalles Duhamels integral (Balazs, 1998, kap. 1, s. 16) og er gitt som:

$$y = \frac{1}{m \cdot \omega} \int_0^t P(\tau) \cdot \sin(t - \tau) \cdot d\tau \quad (4.6)$$

Beräkningsmetoder vid stötvågsbelastade konstruktioner gir en løsning på Duhamels integral som gir den maksimale utsvingningen til systemet. Beregningene i vedlegg B1 og B2 tar utgangspunkt i formelen for denne maksimale utsvingningen.

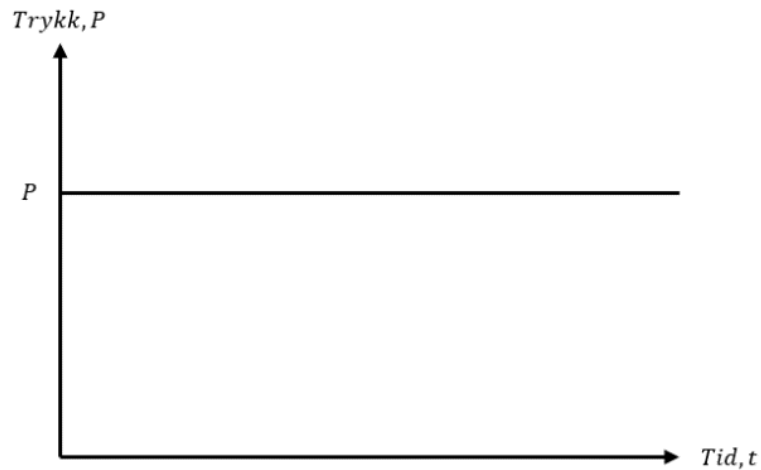
4.7 Deformasjon

Som nevnt er maksimal utbøyning (y_{max}) i betongveggen ved belastning relevant å studere for å kartlegge om blenderingen går til brudd. Oppgaven studerer deformasjonen i strukturen bestående av betong og armering. Ved belastning vil en armert bjelke oppleve et økende bøyemoment gjennom tre stadier frem til det oppstår brudd (Røhne og Vangestad, 2001, s. 39). De tre stadiene defineres som stadium 1, 2 og 3, og har ulik karakteristikk. Overgangen mellom hvert stadium er i flere tilfeller utydelig, dette kommer av materiellmessige ulikheter for når strekksonen er intakt. «I stadium 1 er spenningene så små at både armering og betong befinner seg i det lineært-elastiske området» (Røhne og Vangestad, 2001, s. 40). Spenningene som påføres vil da ikke overskride betongens maksimale strekktøyning og tverrsnittet opplever ikke rissdannelser. Både for stadium 2 og 3 er det armeringen som tar opp hele strekk-kraften (Røhne og Vangestad, 2001, s. 41). Forskjellen på stadium 2 og 3 er plastiske deformasjoner. Ved stadium 2 er spenningene i trykksonen langt fra brudd slik at betongen kan antas å forholde seg som et lineært-elastisk materiale (Balazs, 1998, kap. 2, s. 12). Siden betongen og armeringen er i elastisk fase, vil deformasjoner som oppstår reverseres etter belastningen ved stadium 2. For stadium 3 «[...] er en stor del av betongen i trykksonen i det uelastiske spenningsområdet» (Røhne og Vangestad, 2001, s. 41). Tøyningene som oppstår ved belastningen kalles da bruddtøyninger og skaper deformasjoner som ikke reverseres etter belastningen. Den øvre grensen til stadium 3 er bruddtilstand, der også stålet er i det plastiske området (Røhne og Vangestad, 2001, s. 41).

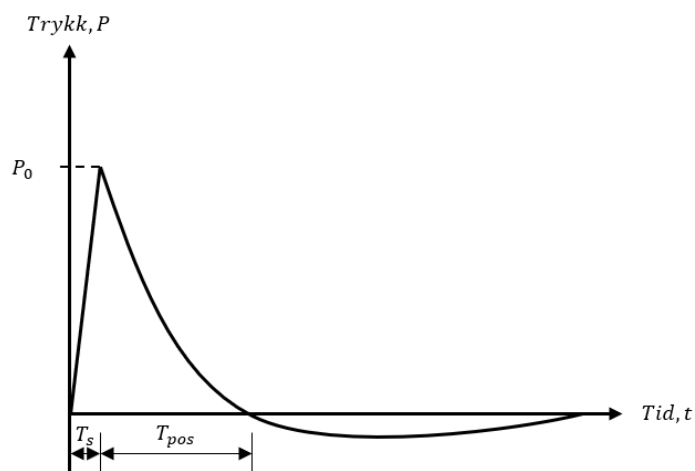
Etter hver avfyring av M100 er et av suksesskriteriene at blenderingen ikke har plastiske skader eller bruddskader. Dersom blenderingen opplever plastisk deformasjon vil dette forekomme som en varig skade. Slike deformasjoner vil bygge seg opp over tid og til slutt føre til brudd. Beregningene som er gjort i oppgaven skal undersøke blenderingens kapasitet ved stadium 2, elastisk fase. Beregningene vil derfor kunne estimere om blenderingen tåler trykkbelastningen uten å oppleve både plastiske skader og bruddskader. For å undersøke eventuelle plastiske deformasjoner i materialet er numeriske datasimuleringer et nyttig verktøy.

4.8 Lastbetraktning

Ved belastning fra dynamiske krefter skilles det hovedsakelig mellom to teoretiske lastbetraktninger (Balazs, 1998, kap. 1, s. 17). Den første belastningen kalles stegfunksjonsbelastning og oppstår når strukturen utsettes for en momentan belastning og beholder denne i ubegrenset tid, vist på figur 9. En slik belastning forekommer dersom systemets utsvingningstid er i tidsintervallet mellom T_s og T_{pos} (Balazs, 1998, kap. 1, s. 20). Der T_s er tiden det tar for å nå maksimal belastning og T_{pos} er belastningens varighet, vist på figur 10. Utsvingningstiden (T_u) defineres som den tiden systemet bruker på å nå første amplitude (Balazs, 1998, kap. 1, s. 20).



Figur 9: Illustrerer belastningen fra en stegfunksjonsbelastning. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 17).



Figur 10: Illustrerer trykkbelastningen sin varighet. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 20).

Den andre belastningen kalles impulsbelastning og oppstår når strukturen utsettes for en belastning med svært kort varighet som både øker og avtar momentant, vist på figur 11. Et slikt lasttilfelle oppstår når konstruksjonen har en mye lengre utsvingningstid enn belastningens varighet. Ved en impulsbelastning vil varigheten til belastningen være over lenge før konstruksjonen rekker å nå sin maksimale utsvingning. For konstruksjoner påvirket av store dynamiske krefter kan slike impulsbelastninger bidra til små utbøyinger selv ved store lastpåkjenninger.

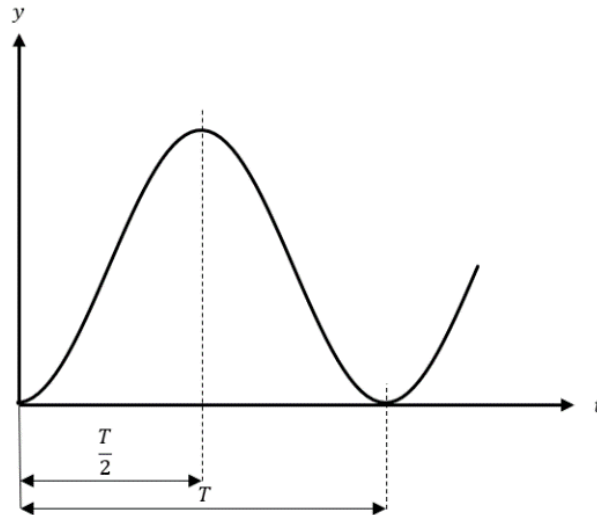


Figur 11: Illustrerer belastningen fra en impulsbelastning. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 17).

Som beskrevet skal beregningene i oppgaven finne den maksimale utbøyingen blenderingen opplever ved bruk av Duhamels integral (formel 4.6). Balazs (1998, kap. 1, s. 16) benytter integralet for å utlede en deformasjonsformel ved impulsbelastning og stegfunksjonsbelastning. For beregningene er det derfor essensielt å først fastslå om belastningen kan betraktes som en stegfunksjonsbelastning eller impulsbelastning. For å definere dette må utsvingningstiden bestemmes. For en stegfunksjonsbelastning vil første amplitude oppstå etter en halv svingning, illustrert i figur 12. Basert på formelen for perioden (T) til svingningen blir utsvingningstiden for en stegfunksjonsbelastning lik (Ling, Loyola og Moebis, 2017, s. 765):

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad \rightarrow \quad T_u = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega} \quad (4.7)$$

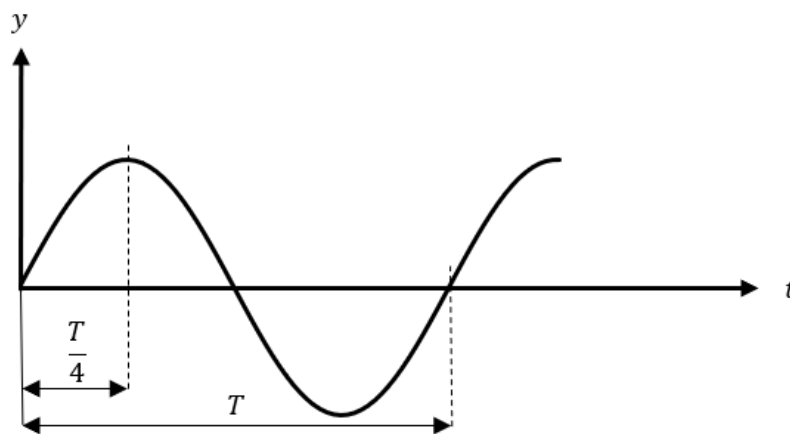
Hvor: ω er svingesystemets vinkelfrekvens



Figur 12: Perioden til en stegfunksjonsbelastning. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 18).

Ved en impulsbelastning vil første amplitude oppstå etter en kvart svingning, illustrert i figur 13. Utsvingningstiden blir da lik:

$$T_u = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2 \cdot \omega} \quad (4.8)$$



Figur 13: Perioden til en impulsbelastning. Hentet fra Balazs (1998, kap. 1, s. 19).

5 Matematiske beregninger

Håndberegningene som er gjort i denne oppgaven viser hvordan forenklete beregninger på dynamiske laster kan gjennomføres. Disse er vist i vedlegg B1 og B2. Vedlegg B1 tar for seg en beregning av sideveggene til blenderingen og vedlegg B2 tar for seg bakveggen.

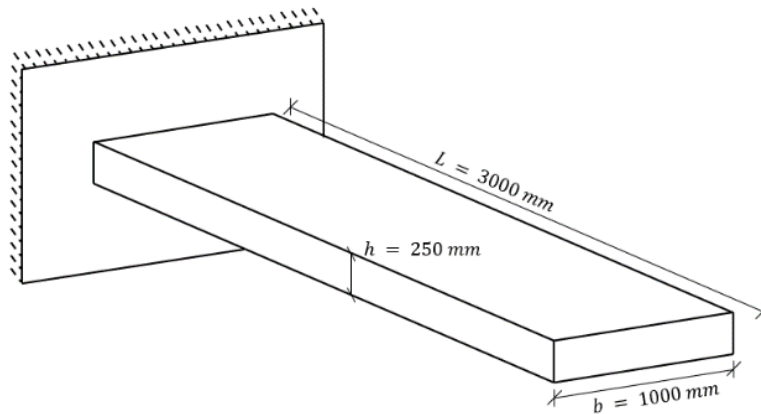
Oppbyggingen av dette kapittelet tar utgangspunkt i vedleggene slik at leser enkelt kan følge gangen i beregningene. Kapittelet skal skape en forståelse av formlenes bruk, samt presentere resultater.

Beregningene skal studere blenderingens kapasitet. For å gjennomføre en kapasitetsanalyse defineres en kvasi-statisk last som er ekvivalent med den dynamiske lasten fra trykkbelastningen. Det vil si at den kvasi-statiske lasten gir de samme lastvirkningene som den dynamiske. For å gjennomføre en slik omskriving benyttes Balazs (1998, kap. 1-2) sine beregningsmetoder for dynamisk belastede konstruksjoner.

5.1 Geometrisk data

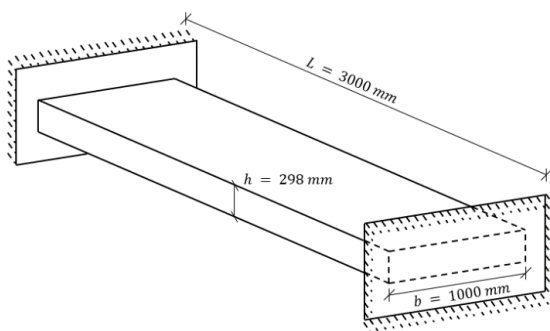
Oppgavens matematiske beregninger tar for seg en bruddgrensekontroll av betongveggen med armering. For å undersøke blenderingens kapasitet er det nødvendig å både se på et snitt av sideveggene og bakveggen. Dette gjøres for å gi en forståelse av responsen til flere ulike snitt i konstruksjonen. Beregningene tar ikke for seg et snitt av hjørnene.

For sideveggene oppstår de største lastvirkningene ved å se på veggen som en utkrager uten støtte fra fundamentet, vist i figur 14. Da vil momentet som oppstår i enden av bjelken, ved hjørnet, være størst og dermed skape de største deformasjonene. Ved å se på veggen som en utkrager-bjelke ser oppgaven kun på den horisontale stivheten i konstruksjonen. I virkeligheten vil den vertikale stivheten, som oppstår fra fundamentet, holde igjen veggen ved belastning. På den andre siden vil den vertikale delen av konstruksjonen bidra til høyere stivhet. Som et resultat av høyere stivhet kan belastningen fra M100 nærme seg en stegfunksjonsbelastning fremfor en impulsbelastning. Dette kan gi store konsekvenser ved at utsvingningen øker. Det er altså ikke gitt at vertikal stivhet er gunstig for konstruksjonen. Konsekvensen av økt stivhet diskuteres videre i delkapittel 5.2 og 8.2.3.

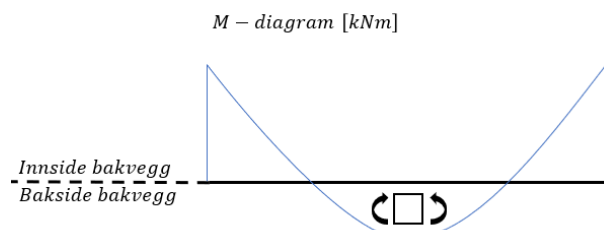


Figur 14: Rotert utsnitt av sideveggene illustrert som en utrager.

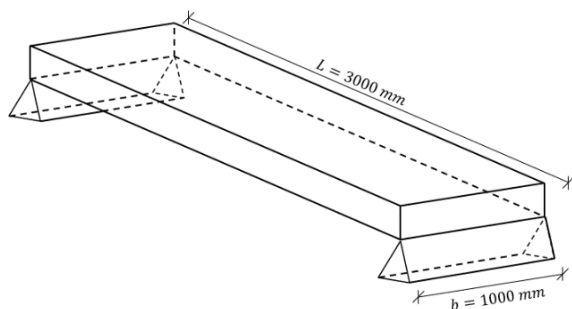
Karakteristikken til bakveggen er komplisert. Fra et perspektiv er bakveggen påvirket av de to sideveggene som skaper momentstive hjørner og slik danner innspenninger i hver ende av bakveggen, vist på figur 15. Fra et annet perspektiv kan veggen oppleve en form for leddet karakteristikk i hjørnene, vist på figur 17. Dette kommer av at armeringen i hjørnene kan gå til plastisk deformasjon og få egenskaper som etterligner ett ledd. Disse betraktningene er basert på materialegenskaper som er vanskelig å definere. Hvilken betraktning som gir det verste tilfellet i beregningene er avhengig av det snittet som studeres. Ved å studere et snitt av bakveggens senter vil det største momentet opptre ved en leddet bjelke. Dette er illustrert ved momentdiagrammene i figur 16 og 18. Diagrammene illustrerer økningen av momentet i senter av bjelken når hjørnene ikke lenger er momentstive. På den andre siden vil en dobbel-innspent bjelke ha en høyere stivhet enn en leddet bjelke. En høy stivhet vil ha en stor effekt på lastbetraktningen, der belastningens egenskaper kan nærme seg en stegfunksjonsbelastning. Med bakgrunn i dette tar beregningene utgangspunkt i en dobbel-innspent bjelke for å undersøke den mest konservative lastbetraktningen.



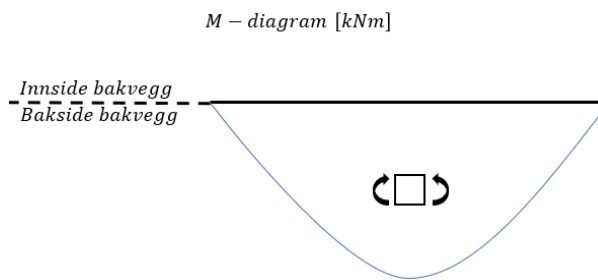
Figur 16: Rotert utsnitt av bakveggen illustrert som dobbelt-innspent bjelke.



Figur 15: Momentdiagram for dobbelt-innspent bjelke.

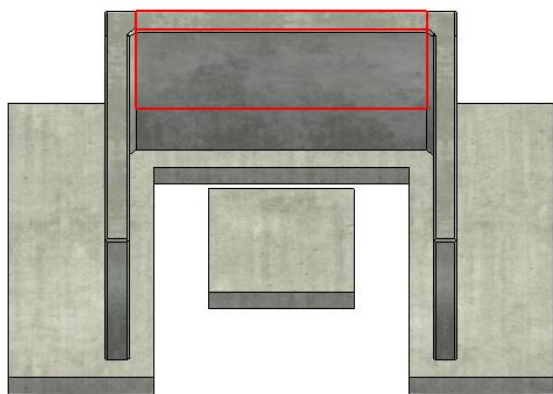


Figur 18: Rotert utsnitt av bakveggen illustrert som leddet i begge ender.

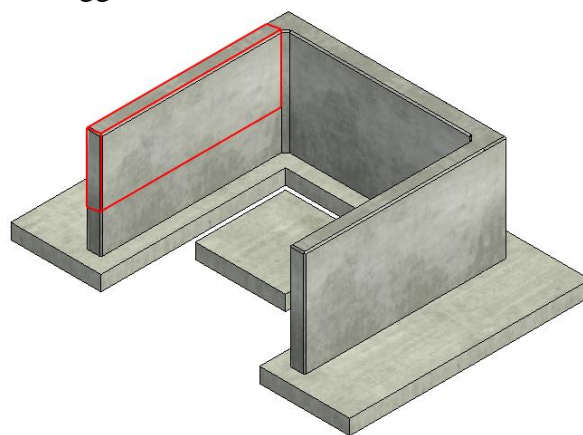


Figur 17: Momentdiagram for en leddet bjelke.

For alle snitt ser oppgaven på én meter høyde av veggen, vist på figur 19 og 20. Valget om én meter er basert på lik armeringsmengde og last overalt. Det vil derfor ikke være forskjell om beregningene studerte en høyere eller lavere del av veggen.



Figur 20: Snitt av bakveggen markert i rødt.



Figur 19: Snitt av én sidevegg markert i rødt.

5.2 Lastbetraktning

Før deformasjonen i konstruksjonen bestemmes må det gjennomføres beregninger som fastsetter om belastningen betraktes som en impulsbelastning eller stegfunksjonsbelastning. Som beskrevet i delkapittel 4.8 er det mest gunstige tilfellet en impulsbelastning. For å fastsette belastningen som en impulsbelastning må utsvingningstiden sammenlignes med belastningens varighet. Utsvingningstiden er definert med forskjellige formler for stegfunksjonsbelastning (formel 4.7) og impulsbelastning (formel 4.8). Dersom $T_u = \frac{\pi}{2 \cdot \omega} \gg T_{pos}$ kan belastningen regnes som en impulsbelastning (Balazs, 1998, kap. 1, s. 20). Hvis dette kravet ikke tilfredsstilles vil belastningens egenskaper nærme seg en stegfunksjonsbelastning.

Beregningene som er gjort finner derfor først utsvingningstiden til systemet ved å bestemme verdien av systemets vinkelfrekvens. Beregningene som gjøres på systemet tar utgangspunkt i et en-frihetsgradsystem der ekvivalente verdier gir den samme deformasjonen som i virkeligheten. For å bestemme blenderingens ekvivalente vinkelfrekvens benyttes følgende formel (Balazs, 1998, kap. 1, s. 22):

$$\omega_e = \sqrt{\frac{k_e}{m_e}} \quad (5.1)$$

Hvor: k_e er den ekvivalente stivheten gitt ved: $k_e = \kappa_k \cdot k$

m_e er den ekvivalente massen gitt ved: $m_e = \kappa_m \cdot m$

Den fordelte stivheten (k) til systemet er definert ut ifra formelverket som beskriver sammenhengen mellom en kvasi-statisk last og nedbøyningen i konstruksjonen (Ling, Loyola og Moebis, 2017, s. 763):

$$P = k \cdot y_{max} \rightarrow k = P \cdot \frac{1}{y_{max}} \rightarrow k = q \cdot L \cdot \frac{1}{y_{max}} \quad (5.2)$$

Nedbøyningen (y_{max}) avhenger av bjelkens form. For sideveggene og bakveggen vil dermed formelen for stivhet være noe ulik. For å finne stivheten benyttes følgende formel for nedbøyning (Larsen, Clausen og Aalberg, 1993, s. 29):

Sidevegg, utkrager-bjelke:

$$y_{max} = \frac{q \cdot L^4}{8 \cdot EI} \rightarrow k = q \cdot L \cdot \frac{1}{\frac{q \cdot L^4}{8 \cdot EI}} \rightarrow k = \frac{8 \cdot EI}{L^3} \quad (5.3)$$

Bakvegg, dobbel-innspent bjelke:

$$y_{max} = \frac{q \cdot L^4}{384 \cdot EI} \rightarrow k = q \cdot L \cdot \frac{1}{\frac{q \cdot L^4}{384 \cdot EI}} \rightarrow k = \frac{384 \cdot EI}{L^3} \quad (5.4)$$

Tabell 2: Resultater av konstruksjonens ekvivalente stivhet

| Konstruksjonsdel | Ekvivalent stivhet |
|------------------|---------------------------------------|
| Sidevegg | $k_e = 109.83 \text{ N/mm}$ |
| Bakvegg | $k_e = 52.72 \cdot 10^3 \text{ N/mm}$ |

Etter å ha funnet stivheten til bjelkene, samt bjelkens masse, kan vinkelfrekvensen bestemmes. Verdien av vinkelfrekvensen benyttes for å finne utsvingningstiden. Beregningene i vedlegg B1 og B2 viser en sammenligning av T_u og T_{pos} . Dersom $T_u \geq 10 \cdot T_{pos}$ regnes lasten som en impulsbelastning (Ove Dullum, sjefsforsker FFI, personlig kommunikasjon over epost, 18. oktober 2021).

Tabell 3: Resultater av konstruksjonens utsvingningstid

| Konstruksjonsdel | Utsvingningstid | Konklusjon |
|------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Sidevegg | $T_u = 66.73 \cdot T_{pos}$ | Impulsbelastning |
| Bakvegg | $T_u = 8.40 \cdot T_{pos}$ | Stegfunksjonsbelastning |

Som nevnt i delkapittel 5.1 vil en økende stivhet i konstruksjonen skape en større vinkelfrekvens som gir lavere utsvingningstid. Dette vil resultere i en belastning som nærmer seg en stegfunksjonsbelastning. For sideveggene er utsvingningstiden over 66 ganger så stor som belastningens varighet. Det vil si at bidraget fra vertikal stivhet trolig ikke vil føre til en stegfunksjonsbelastning for sideveggen siden forholdstallet er såpass stort. For bakveggen er situasjonen mer kritisk, ettersom at forholdet mellom utsvingningstiden og varigheten av belastningen er lik 8.40. Som nevnt over kan bidraget fra den vertikale stivheten senke forholdstallet. En slik effekt vil forverre situasjonen ved at belastningen fungerer som en stegfunksjonsbelastning. Siden en slik lastbetragtning er mest konservativ velger oppgaven å betrakte belastningen på bakveggen som en stegfunksjonsbelastning.

5.3 Deformasjon

Bøyerresponsen til en armert betongkonstruksjon utsatt for en dynamisk belastning er lik bøyerresponsen til en statisk belastet struktur (Ekström, 2017, s. 12). Det vil si at dersom utbøyingen bestemmes for den dynamiske lasten kan denne benyttes for å finne en ekvivalent kvasi-statisk last ($q_{kvasi.stat}$). Den kvasi-statistiske lasten vil videre kunne benyttes for å gjennomføre en kapasitetsanalyse av strukturen.

Den maksimale deformasjonen er gitt ved likningene (Balazs, 1998, kap. 1, s. 23):

For en impulsbelastning:

$$y_{max} = \frac{I_e}{m_e \cdot \omega_e} \quad (5.5)$$

Hvor: I_e er den ekvivalente impulsen, gitt ved: $I_e = P_e \cdot s$

der: P_e er den ekvivalente kraften fra avfyringen, gitt ved: $P_e = \kappa_p \cdot P$

For en stegfunksjonsbelastning:

$$y_{max} = \frac{2 \cdot \frac{I_e}{t}}{m_e \cdot \omega_e^2} \quad (5.6)$$

Hvor: t er belastningens varighet lik T_{pos}

Impulsen (I_e) fra M100 er hentet fra *Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator*, og er gitt med benevnningen $kPa \cdot ms$. For å benytte lasten må den multipliseres med arealet av bjelken der lasten treffer. Da blir benevnningen $kN \cdot ms$. Verdien av impulsen benyttes for å bestemme den maksimale deformasjonen vegg opplever, vist i tabell 4.

Tabell 4: Resultater av konstruksjonens maksimale deformasjon

| Konstruksjonsdel | Maksimal utbøying |
|------------------|-------------------------------|
| Sidevegg | $y_{max} = 328.08 \text{ mm}$ |
| Bakvegg | $y_{max} = 76.95 \text{ mm}$ |

Videre i beregningene benyttes den maksimale deformasjonen (y_{max}) i bjelkens nedbøyningsformel for å finne $q_{kvasi.stat}$, vist i tabell 5. For bakveggen og sideveggene er nedbøyningsformelen hentet fra tabellene i *Stålkonstruksjoner, profiler og former* (Larsen, Clausen og Aalberg, 1993, s. 28–29). For å finne de kvasi-statiske lastene benyttes følgende formler:

Sidevegg, utkrager-bjelke:

$$y_{max} = \frac{q_{kvasi.stat} \cdot L^4}{8 \cdot EI} \quad \rightarrow \quad q_{kvasi.stat} = y_{max} \cdot \frac{8 \cdot EI}{L^4} \quad (5.7)$$

Bakvegg, dobbel-innspent bjelke:

$$y_{max} = \frac{q_{kvasi.stat} \cdot L^4}{384 \cdot EI} \quad \rightarrow \quad q_{kvasi.stat} = y_{max} \cdot \frac{384 \cdot EI}{L^4} \quad (5.8)$$

Tabell 5: Resultater av konstruksjonens ekvivalente kvasi-statiske last

| Konstruksjonsdel | Ekvivalent kvasi-statisk last |
|------------------|---------------------------------------|
| Sidevegg | $q_{kvasi,stat} = 120.11 \text{ kN}$ |
| Bakvegg | $q_{kvasi,stat} = 1352.24 \text{ kN}$ |

Den kvasi-statiske lasten for de to tilfellene benyttes videre i en kapasitetsanalyse for å undersøke om noen av veggene går til brudd.

5.4 Kapasitetsanalyse

Kapasitetsanalysen har som formål å kartlegge strukturens evne til å motstå belastningen den opplever. Analysen skal beskrive utnyttelsesgraden (UR) av blenderingens kapasitet ved trykkbelastningen fra M100. Dersom utnyttelsen er større enn kapasiteten vil blenderingen gå til brudd. Beregningene vil gi et inntrykk av hvorvidt prosjekteringen av veggene er god nok for trykkbelastningen fra M100.

5.4.1 Konstruksjonsanalyse

Lastvirkningene på konstruksjonen bestemmes ved å se på momentet og skjærkraften som opptrer når konstruksjonen opplever den dynamiske lasten. Resultatene, vist i tabell 6, viser det maksimale momentet og maksimal skjærkraft i de valgte snittene for veggene.

Tabell 6: Resultater av konstruksjonens lastvirkninger

| Konstruksjonsdel | Lastvirkninger |
|------------------|--|
| Sidevegg | $M = 540.50 \text{ kNm}$ $V = 360.33 \text{ kN}$ |
| Bakvegg | $M = 507.09 \text{ kNm}$ $V = 2028.36 \text{ kN}$ |

5.4.2 Bruddgrensekontroll

Videre i beregningene foretas en bruddgrensekontroll. Denne delen av beregningene tar for seg en moment- og skjærkraftkontroll. Det gjennomføres ikke en aksialspenningskontroll på bakgrunn av ingen tilstedeværende aksialkraft. Beregningene tar heller ikke for seg en spenningskontroll av armeringen. Bakgrunnen for dette er at beregningene av moment viser bruddmekanisme som implisitt forteller at spenningen i armeringen vil overstige flytegrensen til stålet.

Momentkontroll

For momentkontrollen sammenlignes det opptredende momentet med betongens momentkapasitet ($M_{Rd.c}$). Ved fullt utnyttet betongtrykksone er kapasiteten gitt som (Røhne og Vangestad, 2001, s. 65):

$$M_{Rd.c} = 0.275 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 \quad (5.9)$$

Hvor: f_{cd} er den dimensjonerende fastheten for betong

b er tverrsnittets bredde

d er effektiv tverrsnittshøyde

Tabell 7: Resultater av konstruksjonens utnyttelsesgrad for moment

| Konstruksjonsdel | Utnyttelsesgrad, moment | Konklusjon |
|------------------|-------------------------|------------|
| Sidevegg | $UR_m = 2.43$ | Brudd |
| Bakvegg | $UR_m = 2.28$ | Brudd |

Armeringsbehov

Ved å benytte det opptredende momentet studeres også armeringsbehovet. Nødvendig mengde armering for en struktur er gitt ved formelen (Røhne og Vangestad, 2001, s. 63–65):

$$A_{s,nød} = \frac{M}{\left(1 - 0.17 \cdot \frac{M}{M_{Rd.c}}\right) \cdot d \cdot f_{sd}} \quad (5.10)$$

Hvor: f_{sd} er dimensjonerende fasthet for stål

Formel 5.10 baserer seg på en konstruksjon der betongtrykksonen ikke er fullt utnyttet. For både bakveggen og sideveggene gir ikke formelen et presist svar siden betongen er langt over maksimal utnyttelse. Beregningene benytter likevel formelen for å illustrere hvor stort armeringsbehovet er og belyse hvor underdimensjonert strukturen er.

Tabell 8: Resultater av konstruksjonens armeringsbehov

| Konstruksjonsdel | Nødvendig armering |
|------------------|----------------------------------|
| Sidevegg | $A_{s,nød} = 10482 \text{ mm}^2$ |
| Bakvegg | $A_{s,nød} = 9424 \text{ mm}^2$ |

Skjærkraftkontroll

Skjærkraftkontrollen gjennomføres i lik grad som momentkontrollen ved å sammenligne opptredende skjærkraft med skjærkraftkapasiteten. Skjærkapasitet for betongtverrsnitt er gitt ved formelen (Standard Norge, 2004, s. 83):

$$V_{Rd,c} = \left[c_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (5.11)$$

Hvor: $c_{Rd,c} = \frac{k_2}{\gamma_c}$ og har en anbefalt verdi lik $\frac{0.18}{\gamma_c}$ (Standard Norge, 2004, s. 84)

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$$

ρ_l er armeringsforholdet for lengdearmeringen i strukturen utledet i vedlegg B1 og B2

f_{ck} er karakteristisk fasthet i betongen

σ_{cp} er betongtrykkspenningen ved tyngdepunktsaksen fra aksialbelastningen.

Siden aksialbelastningen er lik null blir leddet $k_1 \cdot \sigma_{cp}$ lik null.

b_w er den minste bredden av tverrsnittet i strekksonen

Tabell 9: Resultater av konstruksjonens utnyttelsesgrad for skjærkraft

| Konstruksjonsdel | Utnyttelsesgrad, skjær | Konklusjon |
|------------------|------------------------|------------|
| Sidevegg | $UR_v = 3.62$ | Brudd |
| Bakvegg | $UR_v = 20.35$ | Brudd |

Resultatene fra analysen viser at begge snitt opplever krefter langt over egen kapasitet. Sammenlignet med forsøket og simuleringens resultater inneholder beregningene flere ukorrekte verdier. Det oppstår derfor usikkerhet til beregningens gyldighet.

5.5 Usikkerhet

Beregningene i oppgaven baserer seg på flere forenklinger som ser bort ifra viktige forhold, som beskrevet i teoridelen. For hver forenkling som gjøres øker sannsynligheten for feilkilder. Dette skaper en usikkerhet opp imot resultatenes gyldighet. Det er derfor viktig å se beregningene i sammenheng med resultatene fra simuleringen og forsøket. Som nevnt tidligere forsøker beregningene å gjøre konservative forenklinger. Siden blenderingen består

av et komplisert system er det ikke alle forenklinger som nødvendigvis kan defineres som konservative i alle tilfeller. Denne problematikken diskuteres i kapittel 8.

6 Numerisk datasimulering

6.1 Teori

Numeriske datasimuleringer kan betraktes «[...] som analytiske beregninger utført av en datamaskin» (Teland og Kiran, 2019, s. 9). Slike beregninger innehar enorme mengder data og er ofte verken fornuftige eller praktisk mulig å gjennomføre for hånd. Numeriske datasimuleringer kan dermed overføre en kompleks problemstilling til et løsbart problem med et endelig antall variabler. Variablene tar utgangspunkt i blant annet fysikkens lover ved bevegelse i tid og rom (Teland og Kiran, 2019, s. 9). Formålet med en numerisk datasimulering er å gjenskape eller forutsi en hendelse så likt virkeligheten som overhodet mulig (Stølen, 2019, s. 96). Slike simuleringer kan gjøre abstrakte og komplekse fenomener mer konkrete og løsbare. Resultatene kan visualiseres i form av bilder eller animasjoner av en dynamisk 3D-modell, eller som grafiske modeller (Teland og Kiran, 2019, s. 9–10).

Én metode innen numeriske datasimuleringer er element-metoden. Denne metoden gjør det mulig å modellere komplekse geometrier, bygge inn materialmodeller og beregne virkningen fra en effektor basert på de fysiske lovene (Teland og Kiran, 2019, s. 63). Dette gjøres ved å dele opp geometrien til objektene i mindre elementer. Graden av oppdelingen til elementene spiller en sentral rolle for simuleringen. Grove oppdelinger av elementer gir mindre nøyaktighet og færre muligheter for å se resultater i et kortere tidsrom, men til gjengjeld tar beregningene vesentlig kortere tid. For finere oppdelinger vil det være motsatt. I slike simuleringer vil beregningene ta «[...] for seg hvert eneste element etter tur og beregner dets tilstand et lite intervall (en syklus) fremover i tid, basert på kreftene som elementet påvirkes av fra de andre elementene» (Forsvarets forskningsinstitutt, 2020, s. 18). Denne beregningssyklusen gjentas mange ganger for å beregne tilstanden til hele systemet over tid. Resultatene vil dermed kunne fastslå blant annet posisjon, fart og akselerasjon til hvert enkelt element etter en bestemt tidsperiode.

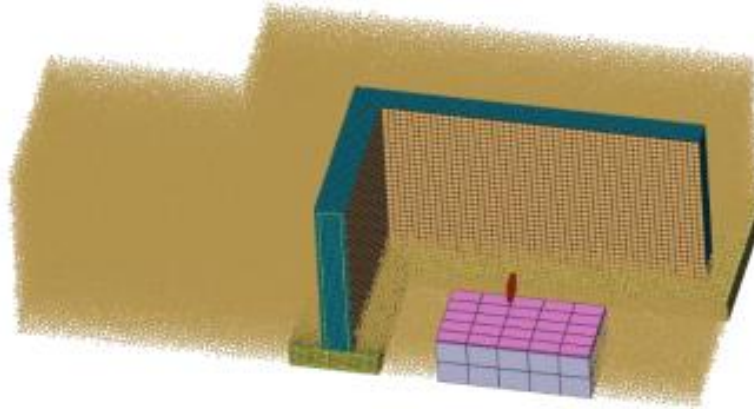
På bakgrunn av grunnleggende utfordringer med numeriske datasimuleringer kan det stilles spørsmål til resultatenes pålitelighet. Ettersom det kan foreligge feil i oppsettet av simuleringene eller at input-parameterne kan inneholde feilkilder, kan selv de flotteste visualiseringer være misvisende og direkte feil (Teland og Kiran, 2019, s. 10). Derfor bør ikke simuleringer stå selvstendig for en konklusjon, men kalibreres opp imot minst ett

eksperiment. Dette vil ikke bare gi flere synsvinkler på samme hypotese eller problemstilling, men også kunne identifisere avvik i input-parameterne (Teland og Kiran, 2019, s. 14).

6.2 Metode

For å gjennomføre numeriske datasimuleringer kreves det mye kompetanse innen programvare og forståelse av element-metoden. For denne oppgaven har NKSB bistått med slik kompetanse og gjennomført en numerisk datasimulering av hendelsesforløpet ved avfyring av M100 i blenderingen i Setermoen SØF. I etterkant av den numeriske datasimuleringen har også NKSB skrevet et notat fra resultatene. Dette notatet beskriver detaljer utover hva dette kapitlet vil gjengi, og er lagt ved som vedlegg C1. Formålet til simuleringen er å predikere hvorvidt blenderingen i Setermoen SØF er prosjektert med tilstrekkelig kapasitet for å tåle trykkbelastninger fra M100. Resultatene fra denne evalueringsmetoden vil sammenlignes med resultatene fra de matematiske beregningene og forsøket som ble gjennomført.

For å gjennomføre simuleringen er element-metoden benyttet. Som tidligere nevnt består denne metoden av en oppdeling av konstruksjonen i mindre elementer. Simuleringen vil dermed kunne beregne blant annet hvilken effekt trykkbelastningen har på hvert enkelt element, og hvor stor den maksimale utbøyningen av bakveggen er. Figur 21 viser et utsnitt av modellen som er benyttet i simuleringene, hvor elementene er visualisert som kuber. Modellen er delt på midten av bakveggen og illustrerer halve blenderingen. NKSB er gitt nødvendige input-parametere for å modulere oppsettet så likt som mulig blenderingen i Setermoen SØF. Dette innebærer blant annet en beskrivelse av geometri, egenskaper ved betong og armering, samt stålplatene og gummidukene. Ytterligere beskrivelser av gitte parametere er gitt i vedlegg C1. Enkelte resultater som kommer frem av notatet fra NKSB er etter ønske for å kunne sammenligne tilsvarende verdier fra de andre evalueringsmetodene. Eksempelvis er det gitt et ønske om å kunne estimere belastningen som ladningen gir på bakveggen.



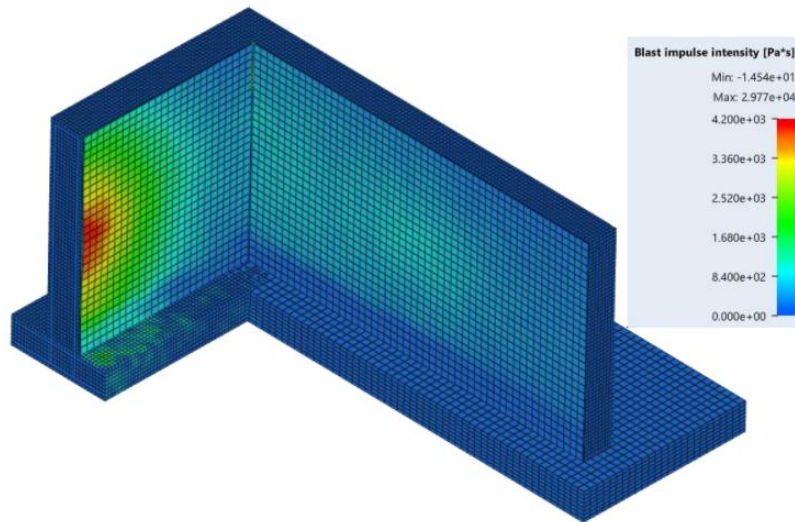
Figur 21: Utsnitt av oppbygningen til blenderingen. Hentet fra NKS (vedlegg C1).

Grunnet tiden NKS har hatt tilgjengelig for oppsettet av simuleringen, samt kompleksiteten av modellen, er det gjort forenklinger. Modelleringen inkluderer alle de ulike strukturelle elementene som er benyttet i den virkelige blenderingen, men det er enkelte avvik fra de faktiske egenskapene eller funksjonene til materialene. En av forenklingene som er gjort er modelleringen av armeringen i hjørnene. Denne er ikke modulert med lik forankring eller med samme antall jern som blenderingen i virkeligheten. En annen forenkling er moduleringen av M100. Ladningen er modulert som ren Comp B eksplosiver med en masse på ca. 5.5 kg, ettersom at metoden baserer seg på små elementer og partikler. Videre baserer simuleringen seg kun på én avfyring av M100, og ikke en serie på flere ladninger. Dette vil medføre at det ikke vil være mulig å se skadeutvikling over tid. Resultatene gitt av simuleringen visualiserer hendelsesforløpet for hele blenderingen, men gir størrelser primært for bakveggen.

6.3 Resultater

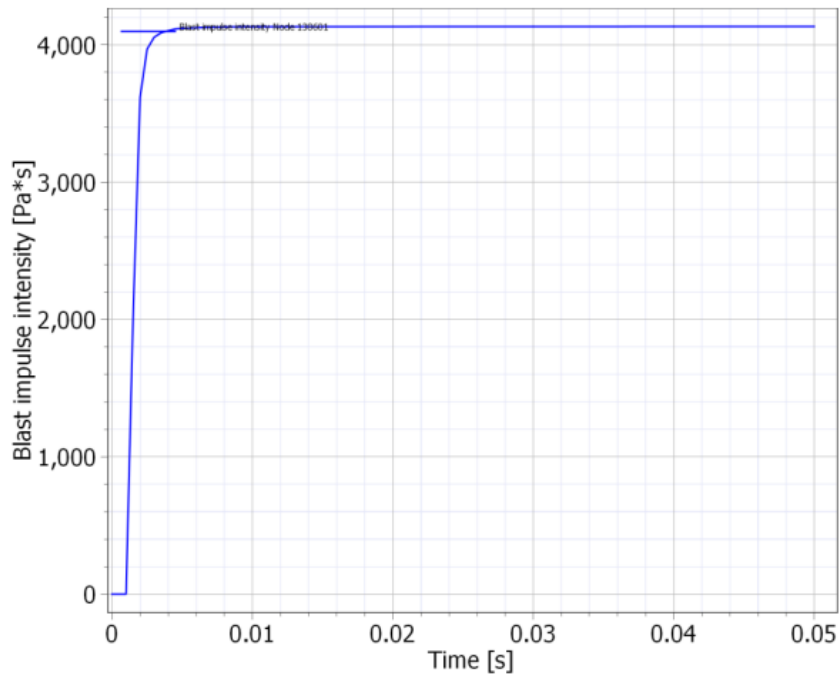
6.3.1 Opplevd impuls

I resultatene fra simuleringen gis figur 22 som visualiserer intensiteten til impulsen ved hjelp av en 3D-modell. For å måle størrelsen på impulsen er det plassert ut noder på stålplatene i blenderingen. Disse er fordelt i et kryss vertikalt og horisontalt fra midtpunktet på bakveggen. Resultatene fra denne modellen baserer seg på treffpunktene til Comp B partiklene på stålplatene i blenderingen. Av modellen vises det tydelig at impulsen er størst rundt midtpunktet av bakveggen, og avtar gradvis i et sirkulært mønster fra midtpunktet. Impulsen oppnår den høyeste intensiteten i senter av bakveggen på bakgrunn av hvordan ladningens form er modulert.



Figur 22: 3D-modell av Blast Impulse Intensity. Snittet er tatt midt på bakvegg. Hentet fra NKS B (vedlegg C1).

Metoden som er benyttet i simuleringene gjør at målingene av impuls inneholder kun én positiv fase. Der impulsen oppnår toppverdi og blir konstant, er trykket i blenderingen lik null, vist i figur 23. Det vil si at trykket kan beskrives som den deriverte av impulsen med hensyn på tid, hvor stigningstallet indikerer topp- og bunnpunkt. Grafen viser at den maksimale størrelsen på impulsen i midtpunktet på bakveggen er lik $4164 \text{ kPa} \cdot \text{ms}$.

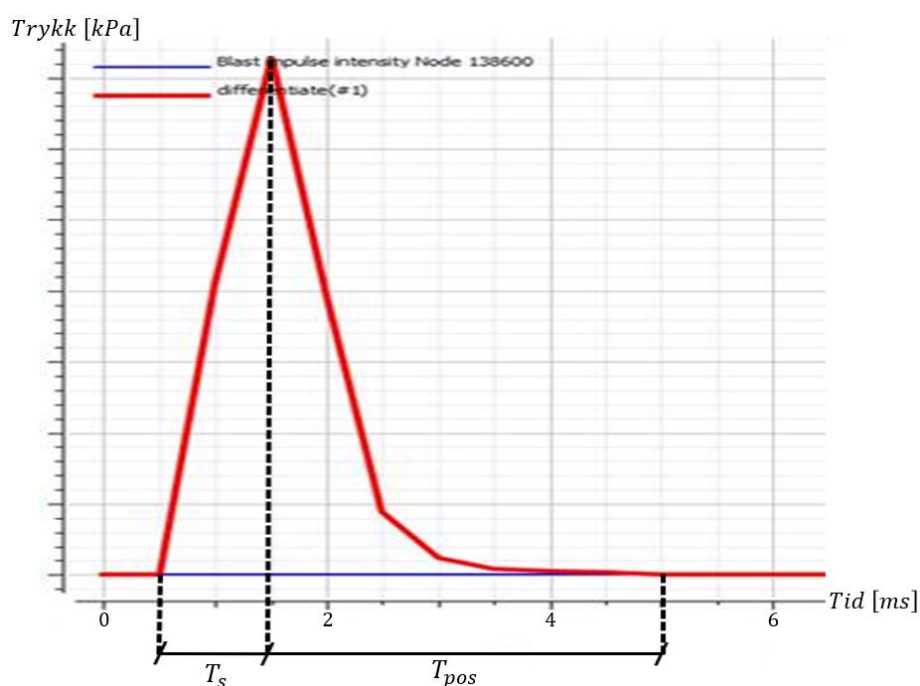


Figur 23: Graf over impulsen i punktet midt på bakveggen. Hentet fra NKS B (vedlegg C1).

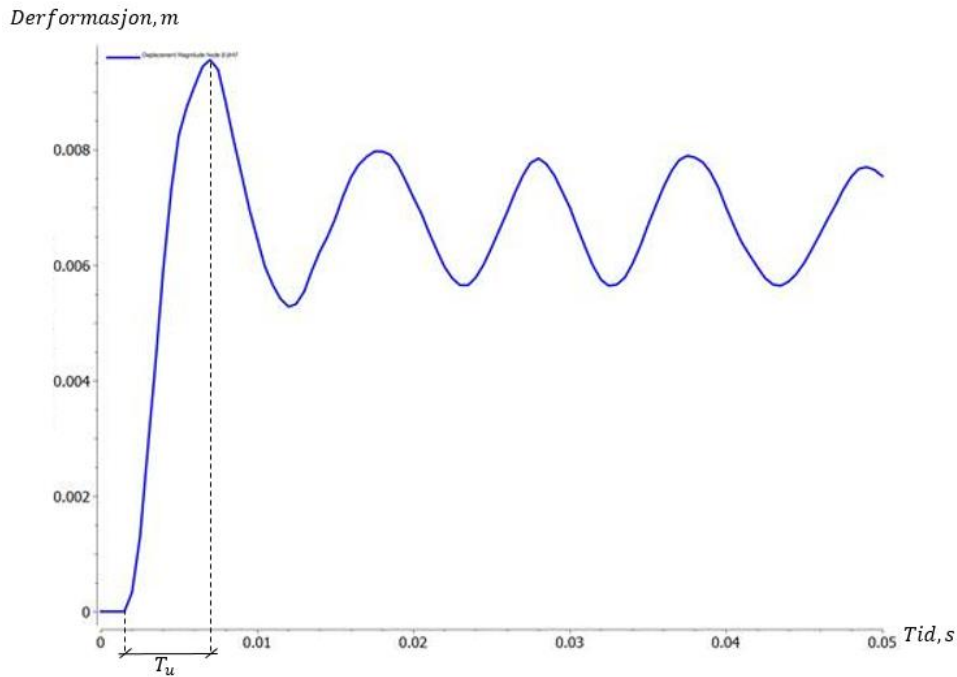
6.3.2 Lastbetraktning

Figur 24 illustrerer varigheten til trykkbelastningen fra simuleringen. Denne grafen har tatt utgangspunkt i grafen for impuls, men er derivert med hensyn på tid. Skissert av grafen tar det ca. 0.5 ms for trykket å treffe bakveggen, og trykket oppnår høyeste verdi etter 1.49 ms .

Dette gir en T_s verdi lik 0.99 ms . I tidsintervallet fra toppunktet til der trykket er null igjen er tiden T_{pos} gitt til 3.5 ms . Figur 25 illustrerer utsvingningstiden (T_u) til blenderingen, som er lik 5.5 ms . Det betyr at bakveggen bruker lengre tid på å oppnå maksimal utbøying sammenlignet med varigheten på trykket. Siden T_u kun er 1.57 ganger større enn T_{pos} kan belastningen i større grad betraktes som en stegfunksjonsbelastning fremfor en impulsbelastning.



Figur 24: Tegnet graf av den deriverte til impulsen. Hentet fra Magnus Pjaaka Torp (overingeniør Beskyttelse NKSB, personlig kommunikasjon over epost, 26. november 2021).



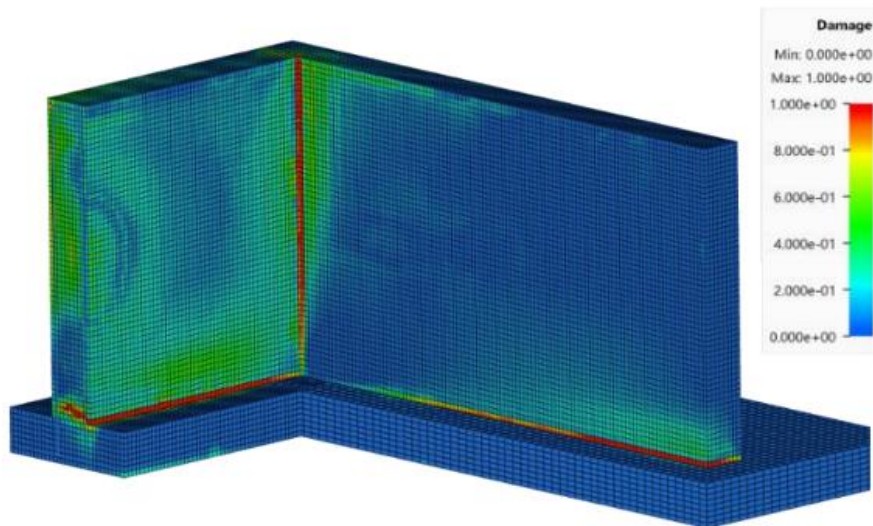
Figur 25: Graf over utsvingningen til et punkt på bakveggen. Hentet fra NKS B (vedlegg C1).

6.3.3 Maksimal utbøying

Figur 25 viser også forskyvningen til et punkt på utsiden av bakveggen. Dette punktet er sentrert helt øverst på veggen. Slik grafen illustrerer kan svingningene til bakveggen minne om et udempet system etter den første utsvingningen. Grafen illustrerer den maksimale utbøyingen (y_{\max}) på bakveggen basert på det punktet som har størst utbøying. Utbøyingen i dette punktet er gitt til 9.5 mm. Resterende svingninger viser en utbøying tett opptil 8.0 mm.

6.3.4 Brudd i konstruksjonen

Figur 26 viser et skadeplot for betongen i konstruksjonen etter et tidsintervall på 50 ms. Skaleringen av skadeomfanget er basert på plastisk tøyning og er skalert fra mørkeblått til rødt. De røde områdene indikerer brudd som en følge av for høy spenning i betongen. Figuren er et utklipp av en simuleringsvideo og viser halve blenderingen med et snitt midt på bakveggen. Fra denne figuren kommer det tydelig frem at alle hjørnene vil få problemer med trykkbelastningen fra M100.



Figur 26: Skadeplot for et snitt av betongen i blenderingen. Hentet fra NKS B (vedlegg C1).

Tilnærmet hele innsiden av hjørnet mellom sidevegg og bakvegg er rødt. Resultatet tyder på at hjørnet vil oppleve strekkbrudd. Slik figur 26 visualiserer, avtar skadeomfanget raskt på hver side av hjørnet, samt nærmere yttersiden av hjørnet. Fra simuleringvideoen ser det ut til at hjørnet får de største skadene først. Etter hvert som hjørnene sine skader forverres, oppstår det skademekanismer i senter av bakveggen.

Hjørnene mellom veggene og fundamentet opplever også utfordringer ved trykkbelastningen fra M100. Både hjørnene mellom sidevegger og fundament, samt bakvegg og fundament viser tegn til strekkbrudd. Det er aller verst for hjørnet mellom bakvegg og fundament. I snittet av bakveggen er det tydelige indikasjoner på at det vil oppstå et brudd som går gjennom veggens tverrsnitt. Dette bruddet strekker seg også langs hele innsiden av bakveggen. For den innerste delen av sideveggene oppstår det tilsynelatende ingen utfordringer, men sjansen for brudd øker jo lengre mot enden av veggen man ser. I enden av sideveggene er det også tydelige indikasjoner på at det oppstår et brudd.

6.4 Feilkilder

Forenklingene som er gjort i oppsettet av den numeriske simuleringen åpner opp for avvik i resultatene sammenlignet med hvordan det vil være i virkeligheten. Enkelte av forenklingene er gjort med en konservativ tilnærming som vil kunne forsvare valgene i oppsettet av simuleringen. Et eksempel på en konservativ tilnærming ved forenklingene er hvordan fundamentet til blenderingen er modellert. Fundamentet er modulert slik at det er fastholdt i bakken, som vil resultere i at det ikke har mulighet for bevegelse i noen retninger. Dette kan

medvirke til en stivere respons enn det som vil opptre i virkeligheten. Effekten av dette er større lastvirkninger fra trykkbelastningen, som forklart i kapittel 5. Det er også gjort forenklinger som ikke nødvendigvis viser til en konservativ tilnærming. Simuleringen tar ikke høyde for at det kan oppstå skader på standplassen og stålplatene på veggene. Dette skyldes blant annet hvordan stålplatene er festet til veggene og standplassen, samt modelleringen av ladningen. Resultatene på disse områdene er på slik måte ikke sammenlignbare med resultatene fra forsøket.

7 Forsøk

7.1 Teori

Et forsøk baserer seg på å studere et objekt der det anvendes eller integreres «[...] i sin naturlige eller tiltenkte omgivelse, og forskerens rolle er begrenset til observasjon» (Stølen, 2019, s. 95). Ved gjennomføring av slike studier rettes fokuset mot å finne svaret på det aktuelle problemet uten å nødvendigvis ta hensyn til de fysiske lovene. Dette gir muligheter for å avdekke sammenhenger som ellers ville vært vanskelige å beregne (Forsvarets forskningsinstitutt, 2020, s. 16–17). Forsøk vil dermed representere et mer realistisk syn av en situasjon sammenlignet med de andre valgte evalueringsmetodene (Stølen, 2019, s. 53–54).

Gjennomføring av forsøk kan i enkelte tilfeller være svært egnet for å gi konkrete svar på avgrensede problemstillinger. Dette kan resultere i at forsøkene vil bli relativt enkle, lite kostbare og tidseffektive. I andre tilfeller vil metoden ikke nødvendigvis oppfylle de krav som er satt dersom problemstillingen ikke er avgrenset nok. Dette grunnlaget kan gjøre forsøkene både kostbare og tidkrevende, samt kreve spesiell kompetanse fra eksterne parter (Forsvarets forskningsinstitutt, 2020, s. 16). Dermed kan det være hensiktsmessig med en tilpasning av forsøket ut ifra formålet. Et forsøk kan utføres med ulike skaleringer basert på kompleksiteten til forskningsobjektets art eller ressurser som er tilgjengelig. Ofte benyttes en prototype til testing ettersom at dette kan være et mer kosteffektivt alternativ (Stølen, 2019, s. 94). Likevel vil dette kunne åpne opp for mulige feilkilder, ettersom at forskeren gjør endringer på forskningsobjektet.

På lik linje med all annen forskning står etterprøvnbarhet sentralt. For å kunne gi pålitelige resultater stilles det store krav til nøyaktighet i dokumentasjon av både fremgangsmåte og resultater (Stølen, 2019, s. 57). Ved gjennomføring av forsøk kan utfordringer knyttet til etterprøvnbarhet oppstå på bakgrunn av plutselige endringer i initialbetingelser. Disse endringene behøver ikke være store, men vil kunne medføre en usikkerhet knyttet til resultatene fra hver gjennomføring av forsøket (Forsvarets forskningsinstitutt, 2020, s. 16). Likevel vil forsøk kunne representere pålitelige og fornuftige resultater ettersom at det forskes på virkelige og størrelsesmessige korrekte forhold (Stølen, 2019, s. 94).

7.2 Metode

I perioden 10. – 12. november 2021 ble oppgavens forsøk gjennomført i Setermoen SØF med støtte fra tilhørende skytebaneadministrasjon og personell fra Forsvarsbygg. Målet med forsøket var å verifisere resultatene fra beregningene og simuleringen, samt kontrollere hvorvidt blenderingen kunne brukes til avfiring av M100 sektorvirkende ladninger. Forsøket bestod av fullskala testsprengninger av M100 i blenderingen for å kunne hente ut mest mulig reelle resultater. For å kunne gjennomføre forsøket ble det lagt til grunn en veiledning som beskriver nødvendig utstyr, fremgangsmåte og dokumentasjon av resultater. Denne veiledningen er lagt til som vedlegg D1. På bakgrunn av ressurser og tid tilgjengelig ble det kun gjennomført enkle målinger av lengder, utbøyning og synlige skader. Forsøket gir derfor ikke svar på tilstanden til innsiden av betongen eller størrelsen av den opplevde trykkbelastningen fra M100. For selve gjennomføringen av forsøket var det planlagt med totalt fem avfiringer av M100. Det ble antatt at resultatene ville kunne vise til holdbarhet etter en viss størrelsesorden på serien av tester, og eventuelle skader ville oppstå i løpet av de fem gjennomføringene.

I løpet av forsøket ble det avfyrt totalt tre M100 sektorvirkende ladninger, fremfor fem ladninger som opprinnelig planlagt. Dette skyldtes at blenderingen gikk til brudd etter første ladning, og skadene vokste i tråd med flere gjennomføringer. Skadene utgjorde en fare for å bli truffet av fragmenter fra ladningen og konstruksjonen. Det ble dermed besluttet at det ikke var hensiktsmessig å avfyre alle ladningene, da dette ikke ga merverdi for resultatene.

I forkant av første avfiring av M100 ble blenderingen klargjort for måling, samt dokumentering av tilstanden til blenderingen. Klargjøring for målinger innebar å fastslå ulike punkter som målingene skulle tas fra, og bestemme hvor ladningen skulle stå. Disse punktene ble merket med tusj for å redusere muligheten for feil i målingene gjennom forsøket. Dokumentasjon av tilstanden til blenderingen ga referanseverdier for sammenligning av resultater etter alle testsprengningene.

Selve gjennomføringen av hver avfiring ble delt opp i tre deler, herunder klargjøring av blendering, oppsett og avfiring av M100, og dokumentasjon av resultater. Klargjøringen av blenderingen gikk ut på å skape mest mulig like forhold for hver avfiring. Dette innebar blant annet å jevne ut pukken i blenderingen, samt koste bort eller rydde avfall fra tidligere gjennomføringer. Dokumentasjon av resultater ble utført i henhold til vedlegg D1. Skadene

som oppstod i betongen, ble merket for å kunne se utviklingen utover forsøket. Etter den tredje sprengningen ble de stedegne massene på utsiden av blenderingen gravet opp for å kunne inspisere tilstanden på yttersiden av blenderingen. Denne inspeksjonen skulle avdekke om det hadde oppstått avskalling og eventuelle andre skader etter testsprengningen.

7.3 Resultater

7.3.1 Før testsprengning

I forkant av første testsprengning viser målingene for utbøying at bakveggen inneholdt avvik. Målt fra ytterhjørnene på toppen av bakveggen viser målingene at bakveggen bøyer 8 mm innover i blenderingen. Årsaken til dette resultatet er feil under bygging. I utførelsen er det benyttet for korte formstag i forskalingen ettersom at bakveggen ble tykkere. Dette medførte at formstagene ble for stramme i forkant av støp, og veggen ble dermed slankere mot midten.

Det ble også identifisert utbøying på enkelte stålplater i forkant av første testsprengning. Målingene på bakveggenes stålplate viste en utbøying på 6 mm mot nord. På den vestlige sideveggen bøyd stålplaten 4 – 5 mm mot vest. Disse avvikene kan vise til ujevnheter i stålplatene forårsaket av den valgte festeanordningen, fremfor avvik under støping av veggene. Ytterligere målinger av blenderingen er dokumentert i vedlegg D2.

Utover målingene av deformasjoner ble det gjort en generell vurdering av tilstanden til blenderingen. Det ble ikke observert rissdannelser i betongen under denne tilstandsvurderingen. Alle stålplater så ut til å være i orden, uten skader fra transport eller montering. Mutterne ble gått over for å kjenne til om de var skrudd fast. Da ble det observert at ett av gjengestagene på bakveggen ikke satt fullstendig fast i betongen, dette skyldes feilmontering før støp.

7.3.2 Utbøying av betongveggene

Målingene av utbøyingen til blenderingen tar for seg den permanente deformasjonen etter trykkbelastningen fra M100, og ikke den maksimale deformasjonen (y_{\max}) under belastning. Som tidligere nevnt var bakveggen støpt med en utbøying mot sør. Dette er beskrevet med negativt fortegn i tabell 10. Etter totalt tre avfyringer viser resultatene en tydelig utbøying av bakveggen mot nord. Resultatene viser at økningen i utbøyingen mellom hver avfyring gikk fra 3 mm til 9 mm.

Tabell 10: Resultater av bakveggenes utbøying

| Konstruksjonsdel | Før sprengning | 1. ladning | 2. ladning | 3. ladning |
|----------------------------|----------------|------------|------------|------------|
| Bakvegg – målt fra bakside | -8 mm | -5 mm | 2 mm | 11 mm |

Videre ble det gjennomført målinger av åpningen til blenderingen. Det ble målt både i topp og bunn mellom sideveggene for å avdekke om det oppstod utbøying kun i topp eller for hele åpningen. Slik det vises i tabell 11, tilsier målingene at det ikke har vært en utbøying av sideveggene. Det er sannsynlig at avviket for målingen av toppen etter tredje ladning viser til unøyaktighet i målingene, fremfor en innbøying av veggene.

Tabell 11: Resultater av den målte åpning på blenderingen

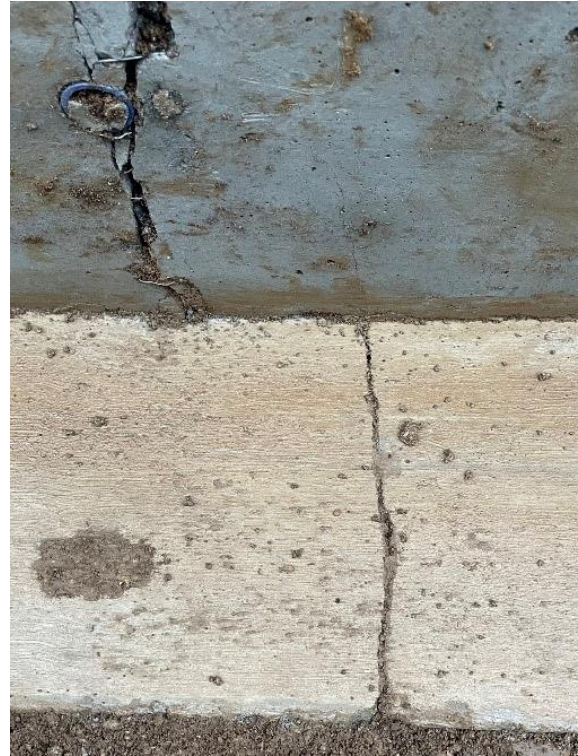
| Konstruksjonsdel | Før sprengning | 1. ladning | 2. ladning | 3. ladning |
|--|----------------|------------|------------|------------|
| Avstand åpning sidevegger – målt fra innsiden, bunn av stålplate | 3113 mm | 3113 mm | 3113 mm | 3113 mm |
| Avstand åpning sidevegger - målt fra innsiden, topp av stålplate | 3132 mm | 3132 mm | 3132 mm | 3130 mm |

7.3.3 Brudd i bakveggen

Allerede etter første avfyring av M100 var det tydelige indikasjoner på et vertikalt brudd midt på bakveggen. Det var vanskelig å si om bruddet strakk seg langs hele veggens høyde, ettersom stålplatene dekket store deler av veggen. Det var synlige sprekker både over og under stålplatene, samt på toppen av bakveggen. Det er derfor sannsynlig at bruddet er i hele veggens høyde. Utover forsøket ble disse sprekkeene større og mer tydelige, i tillegg oppstod det avskalling av én større bit i toppen av bakveggen slik figur 27 viser. Etter avfyring av tre ladninger ble både pukk på innsiden av blenderingen, og de stedegne massene på utsiden gravd opp. Her var det tydelig funn på brudd i fundamentet tilknyttet bakveggen, vist i figur 28. Dette bruddet gikk jevnt med det vertikale bruddet i bakveggen. På yttersiden av bakveggen var det også tegn til avskalling. Ingen biter hadde løsnet fra betongveggen, siden de hang fast i fiberarmeringen. Utviklingen av bruddet er vist i vedlegg D3.



Figur 28: Avskalling og brudd i topp av bakveggen.



Figur 27: Brudd i fundament på baksiden av bakveggen.

7.3.4 Rissdannelser i hjørner

Utover forsøket oppstod det varierende grad av rissdannelser i hjørnene. Det fremstod som at skadene som oppstod i vestre hjørne hang en ladning bak skadene i østre hjørne. Allerede etter første avfyring oppstod riss i østre hjørne, som vokste utover serien av testsprengninger. For vestre hjørnet oppstod ingen synlige riss før andre avfyring av M100. Etter totalt tre testsprengninger viste resultatene lange og markante riss i hjørnene, slik som figur 29 viser. De vertikale rissene strakk seg fra fundamentet til oversiden av veggen. Fundamentet har også tydelige riss som følger de vertikale rissene fra hjørnene. Etter utgraving av de stedege massene i bakkant av blenderingen ble det ikke observert riss på utsiden av hjørnene.



Figur 29: Rissdannelser i østre hjørne.

7.3.5 Skader på stålplater

Etter første avfyring var det markante sår i stålplaten på bakveggen og standplassen. Disse sårene er forårsaket av splinter fra beholder, stativ og tenneren til M100. Figur 30 viser sårannelsene på stålplaten til bakveggen etter tredje avfyring av M100. Sårene på denne stålplaten er opptil 7 – 8 mm dype med en diameter fra ca. 2 mm til 10 mm. Sårannelsene strekker seg fra bunn og nesten til toppen av bakveggen. Det øverste såret er 11 cm under toppen av veggen. Forsøket har ikke tatt høyde for måling utover blenderingens geometri. Det kan derfor ikke bekreftes om alle splintene har blitt stoppet av bakveggen eller om noen splinter har gått over. Dersom det er noen splinter som har gått over er det vanskelig å si hvor langt disse har gått. På stålplaten som er montert på standplassen ble det observert tilsvarende skader som på bakveggen. Disse skadene er av samme størrelsesorden og strekker seg på tvers over stålplaten.



Figur 30: Skadeomfang på stålplaten på bakveggen etter tredje avfyring.

7.3.6 Utbøying av stålplater

I likhet med målingene som er gjort på betongveggenes utbøying, baserer også stålplatenes resultater seg på den permanente utbøyingen. Målene av utbøyingen til stålplatene ble utført med et rettholt og tommestokk. Målene er tatt i det horisontale planet halvveis opp på stålplatene. Tabell 12 viser en deformasjon i to av stålplatene. Stålplaten på bakveggen bøyer inn i bakveggen ved senter. Sammenlignet med deformasjonen til selve bakveggen kan det tyde på at stålplaten følger etter. Resultatene til den vestre stålplaten viser en utbøying mot vest. Denne deformasjonen kan ha oppstått ved at mutterne har løsnet og skapt rom for utbøying av stålplatene, ettersom at åpningen mellom betongveggene ikke øker.

Tabell 12: Resultater av stålplatenes deformasjon

| Konstruksjonsdel | Før sprengning | 1. ladning | 2. ladning | 3. ladning |
|------------------|----------------|------------|------------|------------|
| Sidevegg vest | 4 – 5 mm | 5 mm | 6 mm | 6 – 7 mm |
| Sidevegg øst | 0 mm | 0 mm | 0 mm | 0 mm |
| Bakvegg | 6 mm | 12 mm | 16 mm | 16 mm |

7.4 Feilkilder

Resultatene fra forsøket kan inneholde feilkilder og er påvirket av ulike valg i utførelsen. Ladningen ble plassert over samme punkt og ble siktet inn noe ulikt ved hver gjennomføring. Dette ble gjort med grunnlag i å skape resultater som baserer seg på en realistisk bruk av blenderingen, men uten å gi de største differansene i resultatene. I praksis vil aldri ladningen siktes inn helt likt hver gang, men den kan få en fast plassering som er gjeldende for bruk av blenderingen.

Måleredskapene spiller en stor rolle for nøyaktigheten og avlesingen av resultater. Målinger av lengder er utført med bruk av målebånd og tommestokk. Målingene som benyttet målebåndet, kan inneha et avvik på $\pm 3 \text{ mm}$, ettersom at det måtte strammes tilstrekkelig. Målingene som er gjort med tommestokk kan inneha et avvik på $\pm 1 \text{ mm}$ ut ifra hvorvidt avlesingen har vært vinkelrett på tommestokken.

8 Diskusjon

8.1 Evalueringsmetoder

Som beskrevet i oppgaven er det benyttet tre ulike evalueringsmetoder for å øke forståelsen rundt dynamiske laster og konstruksjonsrespons. Hver evalueringsmetode har svakheter og styrker som alene gjør de utilstrekkelige for å skape god forståelse av tematikken. I boken *Teknologivitenenskap* skriver Stølen (2019, s. 54) om metodetriangulering, der poenget er å danne en synergi-effekt mellom metodene for å dekke over eventuelle hull én metode har alene. Ved å benytte tre evalueringsmetoder vil ikke dette implisitt dekke tematikken. Det er derfor viktig å gjennomføre en nøyaktig analyse av styrkene og svakhetene ved de enkelte evalueringsmetodene.

For håndberegningene er forståelsen av prinsippene ved svingesystem og dynamiske laster sentralt. Herunder er forenklingene som gjør om en kompleks virkelighet til et ekvivalent en-frihetsgradssystem sentrale. Ved bruk av riktige forenklinger skal slike beregninger gi nøyaktig like svar som resultater fra virkeligheten. For blenderingen i Setermoen SØF er det i tillegg gjort flere forenklinger der viktige forhold er sett bort ifra. Det er derfor nødvendig å skille mellom de forenklingene som er gjort for å danne et ekvivalent system og de forenklingene som er gjort fordi blenderingens kompleksitet skaper utfordringer. Ved å se bort ifra viktige parametere som påvirker strukturen mister resultatene sin nøyaktighet og kapasitetsanalysen gir liten nytteverdi for et eventuelt produksjonsunderlag. Et eksempel på en slik feilkilde er beregningene på sideveggene, der analysen viser en underdimensjonering. Likevel viser forsøket at sideveggene, sett bort fra hjørnene, tok ingen synlig skade etter tre avfyringer av M100. Resultatene fra forsøket er på slik måte gode inngangsverdier for å avdekke feil ved beregningene. Forenklingene som er gjort for å danne et ekvivalent system kan derimot antas som pålitelige grunnet høy grad av etterprøvbarehet og litteraturbasert-forskning. Som nevnt benytter beregningene flere kilder for å støtte opp under validiteten til formlene og prosessen. Med bakgrunn i de svakhetene de matematiske beregningene har er det nyttig å sammenligne resultatene med den numeriske datasimuleringen.

Numeriske datasimuleringer er et nyttig verktøy som baserer seg på matematiske beregninger av en mye større kompleksitet enn håndberegningene i denne oppgaven. Dette gir stor nytteverdi ved å kunne sammenligne verdiene fra de to evalueringsmetodene. Også denne evalueringsmetoden har svakheter i form av variabler som viker fra virkeligheten. Et

eksempel på dette er begrensninger i programmet som forenkler armeringen i hjørnene. Resultatet er derfor basert på hjørner uten ekstra armering og viker på den måten fra virkeligheten. På den andre siden tar simuleringen for seg flere strukturelle elementer slik at resultatet baserer seg på strukturen med både masser i bakkant, samt stålplater og gummimatter på innsiden av veggene. Sistnevnte parametere utgjør blant annet den forskjellen i grad av kompleksitet mellom håndberegningene og den numeriske datasimuleringen. Ved en sammenligning er flere verdier relevante å se på. Neste delkapittel tar for seg en diskusjon av resultatene fra de to evalueringsmetodene.

Ved å gjennomføre ett fullskala forsøk oppnår resultatene en troverdighet de to andre evalueringsmetodene ikke kan gi. Denne troverdigheten er spesielt viktig inn mot sikkerhetsaspektet rundt bruk av blenderingen. Ved å teste blenderingen i virkeligheten kan oppgaven gi svar på hvorvidt det er forsvarlig å bygge den etter grunnlaget gitt i UD 2-1. Grunnet håndberegningene og simuleringens nevnte avvik fra virkeligheten, kan disse resultatene ikke stå selvstendig for en konklusjon. På den andre siden inneholder også forsøket feilkilder. Ved å gjennomføre forsøket sent på året kan lokale variasjoner i for eksempel teledybde og materialeegenskaper oppstå. Det må likevel påpekes at slike variasjoner vil oppstå når militære avdelinger bruker blenderingen til ulike årstider. En av styrkene til forsøket er analysen i ettertid som gir gode resultater på hvilke strukturelle elementer som er underdimensjonert. Opp imot et videre arbeid vil disse resultatene kunne bidra til å forenkle prosessen av å etablere et detaljert produksjonsunderlag i UD 2-1.

Som beskrevet er det flere svakheter og styrker ved hver evalueringsmetode som er benyttet. Med bakgrunn i de forholdene som er sett bort ifra i de matematiske beregningene betraktes disse resultatene som de minst troverdige. Det anbefales derfor å benytte resultater fra numeriske datasimuleringer inn i et videre arbeid. Som en supplerende metode kan de matematiske beregningene bidra inn i et innledende arbeid på mindre kompliserte konstruksjoner påvirket av dynamiske laster. Ved en undersøkelse av konstruksjoner der sikkerhet er høyt prioritert anbefales det å benytte ett fullskala forsøk som kan bekrefte effekten ladningen har på materialet. For blenderinger bygget for M100 sektorvirkende ladninger, basert på produksjonsunderlaget i UD 2-1, er det en absolutt nødvendighet å teste blenderingen før eventuelt personell får observere ladningens effekt fra 50 m avstand. Med bakgrunn i de nevnte styrkene og svakheterne kan evalueringsmetodene gi god informasjon om dynamikken og blenderingens respons.

De tre evalueringsmetodene benyttes i en hypotetisk-deduktiv metode, der problemstillingen er formulert som en hypotese. For å verifisere hypotesen er det tatt utgangspunkt i to forskningsspørsmål som er beskrevet i innledningen. Dersom disse er sanne vil sannsynligheten for at hypotesen er sann stige. Ved å ta utgangspunkt i vitenskapen er det vanskelig å fullstendig verifisere eller falsifisere oppgavens hypotese. Denne svakheten kjennetegner vitenskap der bekreftelse eller avkreftelse regnes som det betydeligste resultatet man kan oppnå (Alnes, 2021). Det vil si at denne oppgaven kun kan gjøre hypotesen mer eller mindre troverdig. For å verifisere oppgavens hypotese er det derfor viktig å bygge under med flere bekreftelser eller avkreftelser. For å bygge opp under problemstillingen kan tilfellet fra Rødsmoen SØF benyttes. Siden denne blenderingen ble bygget etter kravene som stilles i UD 2-1 og ikke tålte trykkbelastningen fra M100. På den andre siden er det vanskelig å bekrefte problemstillingen gjennom tilfellet i Rødsmoen SØF, da dette tilfellet har manglende dokumentasjon. Det kan derfor argumenteres for at oppgaven kun kan bekrefte hypotesen opp imot tilfellet i Setermoen SØF.

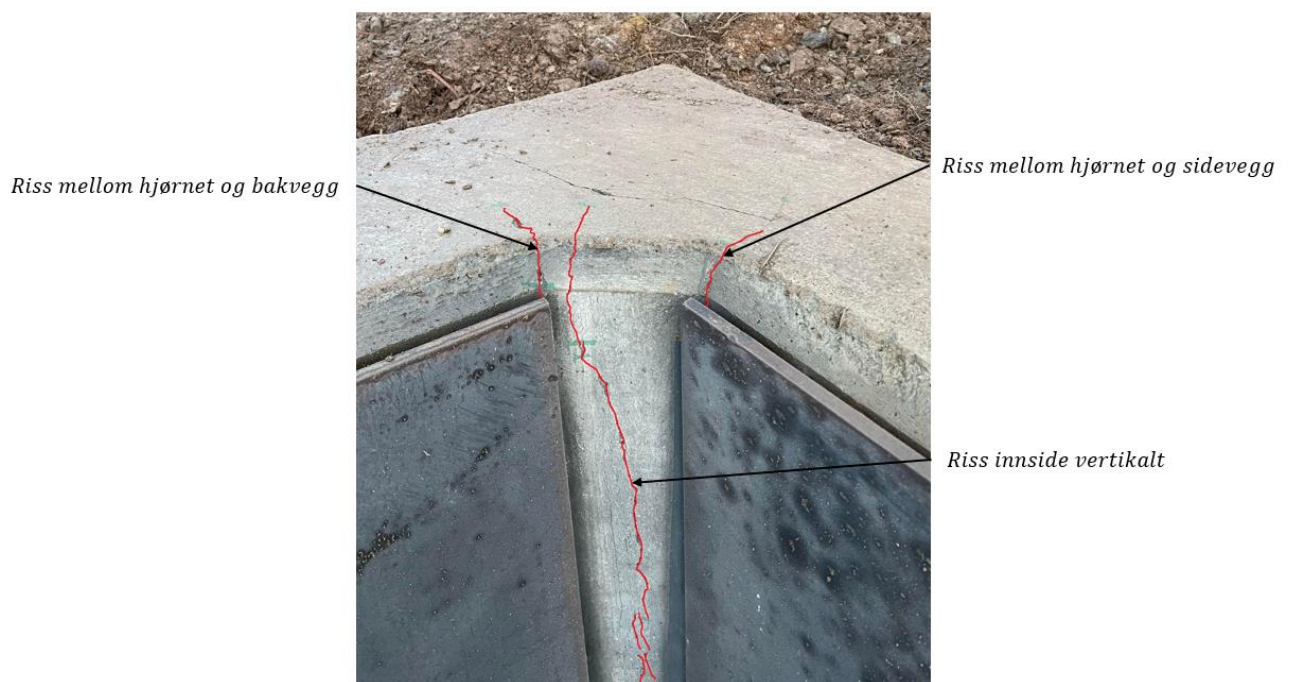
8.2 Resultater og gyldighet

De tre evalueringsmetodene gir tre ulike sett med resultater. Ved å analysere for å finne likheter og ulikheter kan det diskuteres årsaken til resultatene, samt gyldigheten til hvert sett med data. Fra forsøket er det relevant å diskutere årsaken til skadene som oppstod for å se videre på eventuelle løsninger. I motsetning til forsøket gir resultatene fra den numeriske datasimuleringen og de matematiske beregningene verdier på de mekaniske egenskapene til strukturen. Verdiene gir en nærmere beskrivelse av de fysiske egenskapene og årsaken til blenderingens respons.

8.2.1 Forsøk og numerisk datasimulering

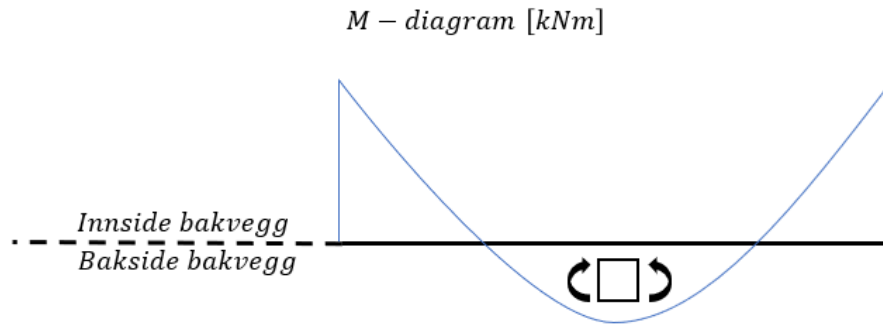
Resultatene etter forsøket viser hovedsakelig tre skademekanismer i form av riss i hjørnene, brudd i senter av bakveggen og brudd i fundamentet i overgangen fra hjørnene og senter av bakveggen. En mulig skademekanisme som kan ha oppstått i hjørnene er forankringsbrudd. Dersom armeringen i hjørnene ikke er forankret godt nok vil armeringen løsne og et rent strekkbrudd kan oppstå. En annen mulig skademekanisme er strekkbrudd i form av at armeringsjernene ryker. Årsaken til slike brudd er store tøyninger som først skaper plastisk deformasjon, for deretter å ende i et rent strekkbrudd i armeringen. Fra resultatene til forsøket er det ikke et opplagt forankringsbrudd, men nærmere et strekkbrudd for armeringen. Ved et

slikt brudd vil den lange tøyningen som oppstår gjøre at betongen risser opp fordi den henger godt fast i jernene. Rissene som har oppstått i avfasingen i østre hjørne, illustrert på figur 31, er gode indikasjoner på slike riss. Dersom hjørnene hadde opplevd et forankringsbrudd hadde trolig blenderingen opplevd en form for «avrivning» grunnet strekkraften i overgangene. En slik skademekanisme vil i større grad være synlig siden veggene blir revet fra hverandre.

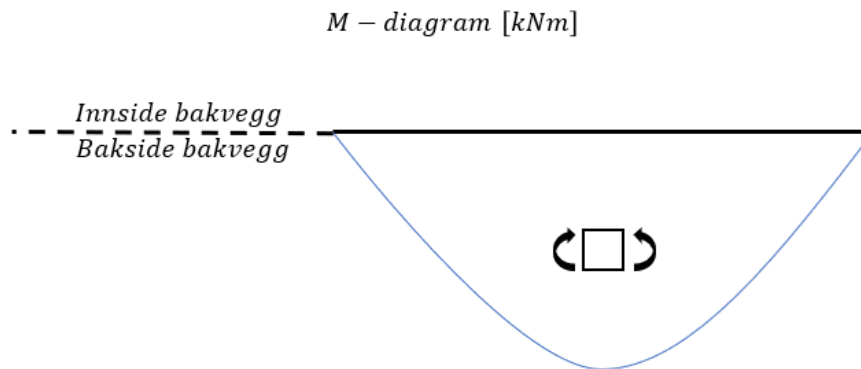


Figur 31: Rissdannelsen i østre hjørne.

Videre har hjørnene opplevd vertikale riss langs innsiden som vist på figur 31. Rissene tyder på en ren strekk-trykk-momentbelastning der det har oppstått strekk i innerkant og trykk i ytterkant av hjørnene. Siden hjørnene er momentstive tar disse opp endemomenter som bedrer momentsituasjonen i senter av bakveggen. Som vist på figur 32, opplever innsiden av hjørnene og utsiden av bakveggen strekk. Det største momentet vil innledningsvis oppstå i hjørnene, før armeringen går til flyt. Momentdiagrammet vil da endre seg siden hjørnene opplever plastisk deformasjon og mister evnen til å ta momentet. Som en følge av dette øker momentet i senter av bakveggen fordi hjørnene har mistet evnen til å ta moment. Det endrede momentdiagrammet er vist på figur 33. Dersom denne skademekanismen oppstår vil bakveggen fortsatt være fastholdt av hjørnene, men det økende momentet i senter kan føre til brudd slik som tilfellet i Setermoen SØF.



Figur 32: Momentdiagram for en dobbel-innspent bjelke.



Figur 33: Momentdiagram for en leddet bjelke.

Fra den numeriske simuleringen viser resultatene de samme bruddmekanismene som forsøket. Et relevant resultat fra simuleringen er figur 26 der skadenes plassering og størrelsesorden blir illustrert i løpet av simuleringens varighet på 50 ms. Resultatet viser at hjørnene opplever de største skadene etterfulgt av senteret til bakveggen. Fra illustrasjonsvideoer viser simuleringen at skadene i senter av bakveggen vokser etter at armeringen i hjørnene får bruddtøyninger. Fra vurderingene av forsøkets resultater blir bakveggens brudd vurdert som en konsekvens av at armeringen i hjørnene ikke tåler endemomentene. Antakelsen fra forsøket blir derfor i større grad bekreftet gjennom simuleringens resultater. Det må i tillegg påpekes at det ikke kun er hjørnenes projeksjon som forårsaker brudd i bakveggen. Det enorme trykket som oppstår i senter av bakveggen kan trolig være nok årsak til at bruddet oppstår. En annen skademekanisme veggene kan oppleve er skråriss grunnet høy skjærkraft. Slike riss vil typisk opptre fra enden og ca. 45 grader ut i feltet. Fra resultatene er det ingen tydelige skråriss. Derimot kan det være en kombinasjon av moment og skjær som gjør det vanskelig å se det entydige 45 graders risset. Det kan derfor ikke bekreftes at blendingen ikke har opplevd skader fra skjærkraften.

Sett i sammenheng med blenderingen i Rødsmoen SØF kan det trekkes noen paralleller mellom blenderingene rundt utfordringer knyttet til kapasitet mot trykkbelastningen fra M100. Som nevnt er forankringsbrudd i hjørnene en mulig skademekanisme ved trykkbelastning. Et slikt brudd er antageligvis årsaken til bruddet mellom sideveggene og hjørnene på blenderingen i Rødsmoen SØF. Ut ifra figur 1 er det mulig å vurdere hvilke bruddmekanismer denne blenderingen har opplevd. Bildet viser en skade på begge hjørnene, der de innstøpte kassetene har løsnet fra bakveggen. En trolig antakelse er for svak forankring av kassetene i den plasstøpte bakveggen. Med bakgrunn i de nevnte observasjonene på blenderingene er et prosjekteringsgrunnlag som tar hensyn til godt armerte hjørner med god forankring helt essensielt for kapasiteten. Figur 1 viser også antydning til brudd i senter av bakveggen til blenderingen. Dette resultatet er direkte sammenlignbart med resultatet fra forsøket til blenderingen i Setermoen SØF. Skadene som har oppstått tyder på et behov for en forsterkning av bakveggen og hjørnene med både større armeringsmengde og muligens en endring i geometri for å redusere oppbygning og refleksjon av trykk. Eventuelle løsninger på denne problematikken blir diskutert i delkapittel 8.3.

8.2.2 Numerisk datasimulering og matematiske beregninger

Som nevnt kan resultatene fra den numeriske datasimuleringen og de matematiske beregningene gi et større innblikk i trykkbelastningen som blenderingen har opplevd. Relevante verdier som både simuleringen og beregningene gir er utsvingningstiden, belastningens varighet og impulsens maksverdi. Resultatene fra simuleringen er som nevnt kun gjeldende for bakveggen. Resultatene fra de to evalueringsmetodene gir grunnlag for å vurdere om belastningen er en stegfunksjonsbelastning eller impulsbelastning. Dersom lasten fungerer som en stegfunksjonsbelastning vil skadeomfanget være større enn ved en impulsbelastning. Et viktig resultat er derfor ladningens lastbetraktning.

Fra den numeriske datasimuleringen er tiden før bakveggen oppnår maksimal deformasjon gitt som 5.5 ms . Sammenlignet med beregningene der bakveggen får en $T_u = 13.19 \text{ ms}$, er forholdet mellom resultatene over dobbelt så stort. Håndberegningene som er gjort benytter formler for en stegfunksjonsbelastning for å definere verdien av T_u . Dersom beregningene tar utgangspunkt i en impulsbelastning, vil svaret bli lik: $T_u = \frac{\pi}{2 \cdot \omega_e} = 6.59 \text{ ms}$. Ved å betrakte belastningen som en impulsbelastning blir differansen mellom resultatene til beregningene og simuleringen mye lavere. Det kan derfor antas at formlene for en impulsbelastning gir et mer nøyaktig svar enn formlene for en stegfunksjonsbelastning. På den andre siden viser både

resultatene fra beregningene på bakveggen og simuleringen at sammenligningen av T_u og T_{pos} gir en stegfunksjonsbelastning.

Fra begge evalueringsmetodene er lastbetraktningen basert på en sammenligning av belastningens varighet og utsvingningstid. Sammenligningene viser at T_{pos} og T_u nærmer seg i verdi. Fra beregningene er forholdet mellom størrelsene lik 8.40 og fra simuleringen er det samme forholdstallet lik 1.57. Lastbetraktningene nærmer seg derfor en stegfunksjonsbelastning. Det kan være flere årsaker til at lastbetraktningen for begge evalueringsmetodene er feil og at en mer korrekt tilnærming er en impulsbelastning. Fra simuleringen kan verdien av T_{pos} inneholde feilmarginer basert på de forenklingene som er gjort når eksplosjonen er simulert. Simuleringen benytter en metode der lasten ikke tar utgangspunkt i fluid-dynamikk. Denne forenklingen kan gi utslag på impulsens størrelse og belastningens varighet. For beregningene benyttes verdien av T_{pos} fra *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components* (UN Safer Guard, u.å). Verdien tar utgangspunkt i sprengstofftype og mengde, men neglisjerer effekten fra eksplosjonens høyde over bakken og det reflekterte trykket i hjørnene. Disse forenklingene kan være mulige påvirkningsfaktorer for en feil lastbetraktning. For beregningene er det nyttig å se videre på nøyaktigheten til kalkulatoren som gir både verdien av T_{pos} og impulsens maksverdi.

8.2.3 De matematiske beregningenes gyldighet

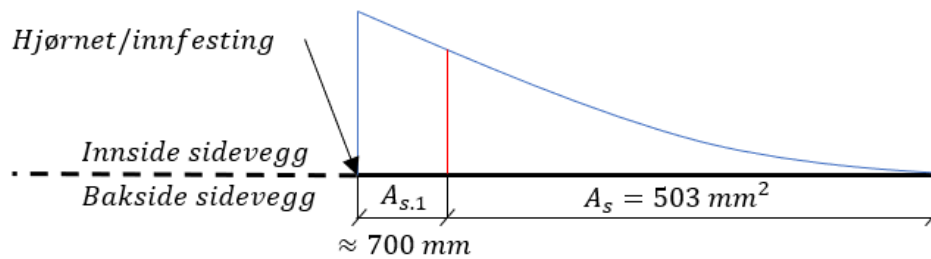
Siden resultatene fra simuleringen og beregningene viser tvetydigheter, og beregningene er den evalueringsmetoden med størst usikkerhet, er det nødvendig å analysere de forenklingene som er gjort. Flere av forenklingene kan vurderes opp imot resultatene fra simuleringen og forsøket. De sentrale forenklingene denne oppgaven vil drøfte er impulslasten gitt av kalkulatoren til UN Safer Guard, bidraget fra vertikal stivhet, momentbetraktningen og effekten av fiberarmering.

En trolig feilkilde er den jevnt fordelte lasten beregningene tar utgangspunkt i. Impulslasten fra kalkulatoren tar utgangspunkt i det reflekterte trykket som treffer veggen dersom ladningen står 1.5 m fra veggene. På den ene siden vil bruk av kalkulatoren være en konservativ tilnærming for sideveggene. Dette kommer av at sideveggene opplever en redusert last ved åpningen av blenderingen, som kalkulatoren ikke tar hensyn til. Den reduserte lasten vil skape en lavere tenkt jevnt fordelt last som gir et mildere svar på beregningene. På den andre siden er lasten fra kalkulatoren kun basert på én vegg som gir et

mildere lastbilde siden programmet ikke tar hensyn til det reflekterte trykket i hjørnene. Effekten denne forenklingen har på bakveggen kan diskuteres ved å studere simuleringens resultat. Lasten fra simuleringen tar hensyn til konstruksjonen sine tre vegger og gir en maksimal impuls lik $4164 \text{ kPa} \cdot \text{ms}$. Denne verdien er over det dobbelte av verdien fra kalkulatoren. Det kan derfor argumenteres for at kalkulatoren sitt lastbilde for én vegg ikke kan benyttes i en analyse av blenderingen. En mulig løsning ved bruk av kalkulatoren på konstruksjoner med flere vegger er å benytte en sikkerhetsfaktor som øker verdien. En slik sikkerhetsfaktor må studeres videre dersom en eksakt verdi skal defineres.

En mulig konservativ forenkling ved håndberegningene er bidraget fra vertikal stivhet. Bidraget fra den vertikale stivheten ble i kapittel 5 påpekt som en negativ konsekvens siden utsvingningstiden blir lavere og belastningens egenskaper minner mer om en stegfunksjonsbelastning. Som en motsetning til denne effekten må den positive effekten av vertikal stivhet belyses. Ved belastning vil stivheten bidra til å holde konstruksjonen igjen fra å bevege seg i y-retning. Dette vil redusere y_{max} og på slik måte redusere momentet strukturen opplever. Å se bort ifra vertikal stivhet kan slik sett gjøre situasjonen verre enn den vil være i virkeligheten. Siden effekten av vertikal stivhet både gir konservative og ikke-konservative konsekvenser er det vanskelig å beslutte i hvor stor grad gyldigheten til beregningene blir påvirket.

En tredje forenkling er momentbetraktningen i det snittet beregningene tar utgangspunkt i. For sideveggene er det vurdert til å se på det snittet som er nærmest hjørnet, siden det største momentet vil opptre i innspenningen til en utkrager. Beregningene tar da utgangspunkt i en armeringsmengde i snittet lik 503 mm^2 . Som beskrevet i 3 er hjørnene forsterket med ekstra armeringsjern utover armeringsnettene. Det vil si at det snittet der armeringen er 503 mm^2 er lengre ut i feltet på sideveggene. Siden momentet til en utkrager avtar mot enden av bjelken, vil snittet med armeringsmengde lik 503 mm^2 ha et lavere moment enn det beregningene tar utgangspunkt i. Dette er illustrert i figur 34 der $A_{s,1}$ symboliserer den forsterkede armeringsmengden nærmest hjørnet som går ca. 700 mm ut i feltet av sideveggen. Et lavere moment for sideveggene vil påvirke resultatene i form av en lavere utnyttelsesgrad og et lavere armeringsbehov i snittet. Dette kan være en mulig forklaring på differansen mellom resultatene til forsøket og beregningene. Der forsøket viser få synlige skader på sideveggene og beregningene viser at veggene vil gå til brudd.



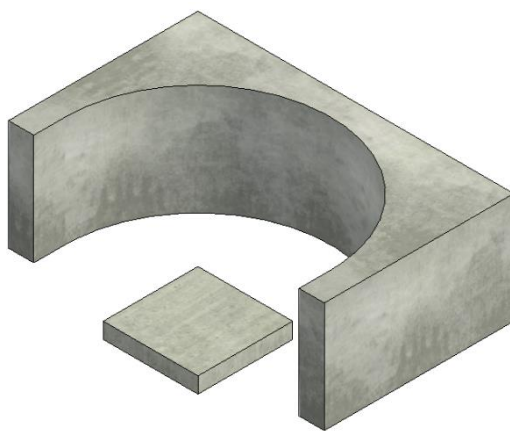
Figur 34: Illustrert armeringsmengde langs sideveggene.

Resultatene fra beregningene viser for både sideveggen og bakveggen at armeringsbehovet er mye høyere enn den mengden blenderingen er prosjektert med. Som nevnt i oppgaven og beregningsvedleggene er disse verdiene noe unøyaktige grunnet feil bruk av formelen for nødvendig armering. I tillegg til dette oppstår det avvik fra virkeligheten ved manglende beregninger på bidraget fra trykk- og fiberarmeringen. Konsekvensen av å ikke regne på trykkarmeringen er et større armeringsbehov i resultatet. Den fiberarmerte betongen vil bidra med økt styrke i tverrsnittet, samt hindre avskalling. Effekten fra fiberarmeringen er en økt strekkfasthet for betongen, hvor den opprinnelige strekkfastheten er en tiendedel av trykkfastheten. Den nøyaktige effekten fra fiberarmeringen er vanskelig å definere grunnet usikkerhet rundt fiberens plassering og mengde. Det er derfor ikke tatt hensyn til dette i beregningene. Også for simuleringen er det ikke tatt hensyn til fiberarmering. Det vil si at forsøket er eneste evalueringsmetode som gir en beskrivelse av bidraget. Dette er dokumentert med bilder og beskrevet i vedlegg D3.

Forenklingene som er beskrevet over skaper usikkerhet til beregningens troverdighet. I forlengelsen av dette må det derfor vurderes hvor stor nytteverdi beregningene har. Ved å sammenligne beregningene opp imot simuleringen og forsøket er det tydelig at flere verdier fra beregningene har stor feilmargin. Det er derfor vanskelig å benytte disse resultatene inn i en utvikling av et produksjonsunderlag til UD 2-1. En mulig løsning er bruk av flere og mer kompliserte numeriske analyser som kan gi inngangsverdier for en videre dimensjonering. For oppgaven er beregningene likevel relevante inn mot forståelsen av dynamikkens grunnlag opp imot virkeligheten og den numeriske datasimuleringen.

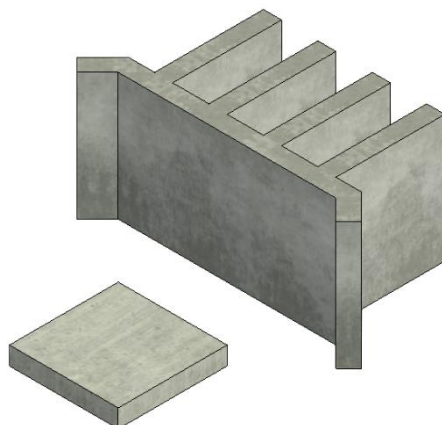
8.3 Tekniske løsninger

Dersom prosjekteringen skal følge tegningene gitt av UD 2-1, er flere geometriske størrelser styrende. Eksempelvis skal blenderingen bestå av en bakvegg og to sidevegger med to hjørner. En stor ulempe ved å bygge blenderingen slik er effekten av det reflekterte trykket i hjørnene. Denne refleksjonen skaper en enorm belastning som spesielt påvirker bakveggen og hjørnene. Under konstrueringen av blenderingen i Setermoen SØF forsøkte prosjektledere å ta hensyn til dette trykket ved å legge ekstra armering i hjørnene. Ut ifra resultatene fra forsøket kan det antas at det er behov for ytterligere armering i hjørnene. For å unngå det nevnte reflekterte trykket er en mulig løsning å se på valg av form på blenderingen. Fra teori rundt trykkbelastninger er det kjent at skarpe hjørner opplever stort trykk på grunn av refleksjon (Forsvarets forskningsinstitutt, 2020, s. 83). Denne effekten kan unngås eller reduseres ved å benytte en form uten skarpe hjørner slik som en halvkule-form, vist i figur 35. På den andre siden vil en halvkuleform få den samme effekten som dagens geometri ved at trykket blir stengt inne. Ved å bygge en blendering som en halvkule vil det store trykket føre til ringstrekk som muligens ikke skaper en bedre situasjon for strukturen.



Figur 35: Idéskisse av en halvkuleformet blendering.

En annen mulig løsning for å unngå det strekk-trykk-momentbruddet som dagens geometri opplever, er en forsterket bakvegg med støttevegger vist i figur 36. Effekten av støtteveggene bak bakveggen er en større trykkapasitet som forhindrer utbøying og store strekkrefter på baksiden av bakveggen. Dersom sikkerhetsaspektet tillater det, vil det i tillegg være positivt å fjerne sideveggene. Ved å fjerne sideveggene unngår man den oppsamlingen av det reflekterte trykket i hjørnene og lastvirkningen blir lavere. Dette kan gå utover sikkerheten og må derfor studeres videre før en slik konstruksjon benyttes.



Figur 36: Idéskisse av en blendering med støttevegger.

En tredje løsning er å bygge en større blendering slik at avstanden til ladningen øker. En slik løsning vil gjøre at trykket blir lavere og lastvirkningene blir derfor mindre. Dersom en slik løsning skal benyttes må veggene trolig dimensjoneres høyere og lengre grunnet trykkets spredning. For å beslutte om en slik konstruksjon er gunstig må det gjennomføres en nøyere analyse av trykkets spredning og avtakende effekt.

Siden UD 2-1 ikke har en detaljbeskrivelse av materialvalg er flere av de tekniske løsningene på blenderingen utført med grunnlag i prosjektleders egne tolkninger og løsninger. Fra resultatene til forsøket kan flere av løsningene diskuteres. En diskusjon av de valgte løsningene har til hensikt å bidra inn i en endelig produksjonsbeskrivelse der detaljløsningen for blenderingen blir beskrevet. Relevante tekniske løsninger som ble benyttet under bygging av blenderingen i Setermoen SØF er valg av stålplater, festeanordning for stålplatene og støttende masser rundt blenderingen.

Etter totalt tre avfyringer var det store skader på stålplaten til bakveggen og standplassen. Skadene skyldtes splinter fra innpakning, føyter og tenneren til M100. Ettersom at skadeomfanget var relativt stort etter kun tre avfyringer, kan det stilles spørsmål til den valgte kvaliteten og funksjonaliteten til stålplatene. Til tross for tykkelsen og kvaliteten til de valgte stålplatene, er det tydelig at løsningen ikke er tilstrekkelig for å tilfredsstille et krav om holdbarhet. Dersom splintskadene oppstår etter relativt lite bruk, vil dette kunne medføre problematikk rundt drift og vedlikehold. En mulig løsning på problematikken er å benytte stålplater som innehar bedre motstandsdyktighet mot splinter. En annen løsning kan være valg av et annet materiale som er mer egnet enn stål med tanke på vekt og motstandsdyktighet mot splinter. Dersom stålplatene må skiftes krever dette tunge maskiner, som gjør vedlikehold og

oppgradering generelt vanskelig. Derfor kan et lettere materiale være attraktivt så lenge det ikke påvirker evnen til å motstå splinter.

Som tidligere nevnt består festeordningen til stålplatene av innstøpte gjengestag med tilhørende låsemuttere og skiver som skal skru stålplaten fast inntil gummiduken og betongveggen. De innstøpte gjengestagene oppfylte sin hensikt ved å kunne muliggjøre tilstramming av låsemuttere for å holde på plass stålplatene og gummiduken. Enkelte av disse gjengestagene var feilmontert, som medførte at etterstramming ble en utfordring. For gjengestagene som var riktig montert fungerte løsningen slik den skulle, og stagene satt godt i betongen. Derimot oppstod det utfordringer med låsemutterne. Underveis i forsøket var det flere av låsemutterne som løsnet. Dette var spesielt en utfordring for mutterne på bakveggen og standplassen, hvor bortimot samtlige låsemuttere løsnet etter hver avfyring av M100. Det kan diskuteres hvorvidt årsaken skyldes vibrasjonene som oppstod i stålplatene og gjengestagene. Slike vibrasjoner vil kunne skape rotasjon av låsemutterne, slik at de løsner. Dersom låsemutterne løsner, åpnes det opp for problemer tilknyttet drift, vedlikehold og sikkerhet under bruk. Hvis brukeren av blenderingen skal etterstramme mutterne etter hver avfyrte ladning vil dette kunne medføre feilaktig eller mangelfullt ettersyn. Blenderingen bør være enkel å bruke, slik at brukeren ikke er avhengig av å ha med seg korrekt verktøy for å gjennomføre ettersyn underveis eller etter bruk. Dersom mutterne ikke blir strammet over tid vil dette kunne medføre at stålplatene løsner og kan gjøre skade på enten personell eller blenderingen. En mulig løsning er bruk av låsesplint som går tvers gjennom gjengestaget og har en låsende effekt. En annen løsning er å benytte doble sett med muttere for å låse hverandre. Dette vil kunne redusere sjansen for at mutterne skrur seg opp, men ikke fjerne eller redusere effekten fra vibrasjonene. Vibrasjonens effekt kan eventuelt reduseres med en gummiskive mellom stålplate og mutter.

Resultatene fra forsøket og de numeriske simuleringene viser at det ikke oppstod noen form for varig deformasjon av sideveggene. En trolig antakelse er at de stedege massene på utsiden av blenderingen bidro til å motvirke utbøying av betongveggene. I tillegg til å redusere utbøying kan også massene bidra med å redusere avskalling og hindre at biter av betongen blir kastet bakover. Massene bak veggene er derfor å anse som et godt mottiltak. På den andre siden så er kvaliteten på massene, som er benyttet på Setermoen, ikke svært god. Denne typen masser inneholder alt fra finkornede partikler til større steiner, samt torv. Dette kan ha en innvirkning på effekten av utbøying og avskalling siden fraksjonen spriker mye og

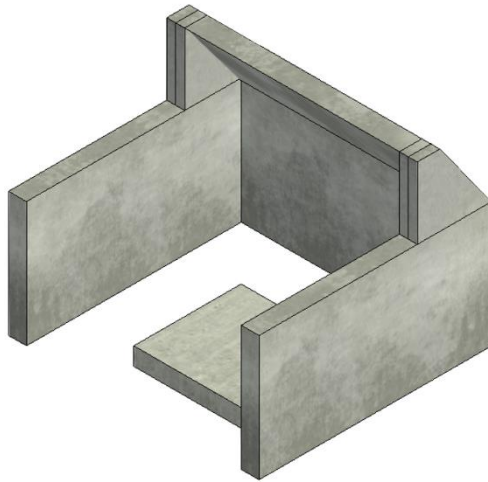
evnen til å ta opp trykk kan være ujevn. Massenes komprimeringsgrad vil også ha en effekt på blenderingen. Ved å øke komprimeringsgraden vil trykket fra massene mot veggen øke. Et økende trykk vil bidra til å motvirke den trykkraften som kommer fra ladningen. Dette kan redusere lastvirkningene i form av mindre deformasjon.

Et annet perspektiv som må ivaretas rundt materialvalg og tekniske løsninger er bærekraft. Som nevnt i innledningen er Forsvaret forpliktet til å søke innovative og bærekraftige løsninger. For at konstrueringen av en blendering skal etterleve en bærekraftig tilnærming er det viktig med holdbare løsninger for å redusere unødvendig materialforbruk. Et eksempel på dette er stålplatene. Dersom stålplatene har god kvalitet og monteres riktig vil forbruket av stålplater etter hvert som blenderingen benyttes minimeres. Det kan også da vurderes å benytte et sterkere materiale enn stål for å skape denne holdbarheten. På den andre siden av dette burde et slikt materialvalg unngå å benytte sjeldne ressurser, derfor kan stål være et godt alternativ. Et annet viktig perspektiv for en bærekraftig tilnærming er leverandører som følger pålagte krav om miljøvennlig produksjon og etisk, sosial og grønn handel (Meld. St. 17, (2020-2021), s. 29). Et eksempel på miljøvennlig produksjon er gjenbruk av betongkonstruksjoner. Samtidig som en bærekraftig materialutvinning og produksjon står sentralt, må også avhendingen av blenderingen tilfredsstillende gjeldende miljøkrav.

8.4 Sikkerhet

Som tidligere nevnt skal UD 2-1 ivareta sikkerhetsaspektet ved utførelse av all landmilitær aktivitet. Det er derfor viktig å gjøre en vurdering på hvorvidt avfiring av M100 i blenderingen tilfredsstillende oppfyller kravene satt til sikkerhet. Denne oppgaven har ikke gjennomført beregninger på sikkerhet for personell, men observasjoner fra forsøket kan gi noen indikasjoner på sikkerhetsbrudd. Et viktig resultat fra forsøket er knyttet til observasjonen av splintenes effekt på bakveggen. Som nevnt har deler av innpakningen til ladningen blitt kastet bakover mot veggen og forårsaket skader på stålplaten bare 11 cm ned fra toppen av bakveggen. Det er ikke bekreftet at splinter har gått over bakveggen. Dersom splintene kastes over blenderingen kan konsekvensen bli stor for eventuelt personell som står innenfor minimumsavstanden beskrevet i UD 2-1. Dette vil derfor være en stor sikkerhetsutfordring ved konstruering av blenderinger tiltenkt M100 etter geometrien gitt av UD 2-1. Det kan gjennomføres ulike tiltak for å unngå denne problematikken. To mulige løsninger er å bygge enten en høyere bakvegg eller en jordvoll bak blenderingen. Dette vil muliggjøre at splintene går inn i veggen eller jordvollen, fremfor over. Jordvollen må i dette tilfellet bygges med

tilstrekkelig vinkel og høyde. For å beslutte hvor høye veggene i blenderingen må være for å sikre at splintene ikke går over må det gjennomføres en videre studie på hvor høyt splintene fra M100 kan kastes bakover. En tredje løsning er å konstruere et tak, vist i figur 37. For at taket skal fungere mest mulig effektivt burde det prosjekteres med en vinkel. Vinkelen skal tilrettelegge for at trykket kan slippes ut uten at det dannes et nytt hjørne mellom taket og bakveggen der trykket kan samle seg.



Figur 37: Idéskisse av en blendering med tak.

9 Konklusjon

9.1 Hovedfunn

For å besvare oppgavens problemstilling tar dette avsnittet først for seg de to forskningsspørsmålene som ble lagt til grunn i innledningen. Det første forskningsspørsmålet er:

Er blenderingen bygget i Setermoen SØF prosjektert med tilstrekkelig kapasitet for å tåle trykkbelastninger fra M100 sektorvirkende ladninger?

Forsøket som ble gjennomført i sammenheng med denne oppgaven gir eksakte resultater som besvarer spørsmålet. Fra resultatene er det tydelig at blenderingen ikke har tålt trykkbelastningen fra en M100 sektorvirkende ladning. For å utdype er det relevant å se på hvilke konstruksjonsdeler som opplevde brudd. Fra simuleringen og forsøket er det tydelig at hjørnene og senter av bakveggen var de konstruksjonsdelene som opplevde de største skademekanismene. Skadene oppstod trolig grunnet et høyt reflektert trykk i de spisse hjørnene, samt et høyt trykk sentrert på bakveggen. Dette skapte trolig store plastiske deformasjoner for armeringen i hjørnene og i bakveggen, samt sprekkdannelser flere steder på betongveggene og fundamentet. Oppgaven kan ikke besvare hvor stor utnyttelsesgrad hvert materiale opplevde under belastningen. Det er derfor vanskelig å besvare hvor stort betong- og armeringsbehovet er for at blenderingen skal oppnå tilstrekkelig kapasitet.

Det andre forskningsspørsmålet er:

Kan teoretiske analyser av dynamiske laster gi en pålitelig dimensjonering av blenderinger, som kan brukes inn i et produksjonsunderlag til UD 2-1?

De matematiske beregningene viste feilmarginer opp imot den mer komplekse numeriske datasimuleringen og det virkelighetsnære forsøket som ble gjennomført. For konstruksjoner bestående av flere strukturelle elementer og en kompleks geometri kan det derfor argumenteres for at forenklete matematiske beregninger, av dynamiske lastpåvirkninger, ikke kan gi selvstendig gyldighet. Fremgangsmåten som benyttes er likevel pålitelig gjennom grunnleggende teori og kan, som nevnt i oppgaven, benyttes ved enkle strukturer bestående av få elementer og ukomplisert geometri. For å oppnå en pålitelig dimensjonering av blenderinger anbefales det å benytte numeriske datasimuleringer for å hente ut verdier som kan brukes inn i en kapasitetsanalyse. En numerisk datasimulering tar i større grad hensyn til

blenderingens mange parametere som bestemmer lastvirkningene ved belastningen. For å benytte dimensjoneringsgrunnlaget inn i et produksjonsunderlag i UD 2-1 anbefales det å gjennomføre flere numeriske simuleringer der resultatene blir sammenlignet med fullskala-forsøk eller laboratorieforsøk.

Konklusjonen fra de to forskningsspørsmålene bidrar inn i besvarelsen av følgende problemstilling:

Er produksjonsunderlaget gitt i UD 2-1 tilstrekkelig for å prosjektere blenderinger ment for M100 sektorvirkende ladninger, og hvordan kan man gå frem for å studere påvirkningen av dynamiske laster på slike konstruksjoner?

Produksjonsunderlaget gitt av UD 2-1 inneholder manglende detaljgrad som åpner opp for feiltolkninger og løsninger som ikke holder ved trykkbelastning fra M100. Hypotesen om det manglende detaljnivået blir verifisert gjennom blenderingene bygget i Setermoen SØF og Rødsmoen SØF. En blendering bygget som standplass for avfyring av M100 vil oppleve store dynamiske laster som kan skape enorme lastvirkninger ved underdimensjonering. Denne oppgaven har vist kompleksiteten til dynamiske laster og vanskelighetsgraden ved beregning på slike laster. Det er nettopp denne kompleksiteten som nødvendiggjør behovet for detaljerte konstruksjons- og armeringstegninger, samt en beskrivelse av materialvalg og øvrige strukturelle elementer. På bakgrunn av resultatene til blenderingen i Setermoen SØF anbefaler denne oppgaven å revidere produksjonsunderlaget for blenderinger, ment som standplass for avfyring av M100 sektorvirkende ladninger.

Konklusjonen er basert på resultatene fra de tre evalueringsmetodene. Hver metode har dannet unike sett med resultater basert på virkeområde og omfang. Ved bruk av matematiske beregninger har oppgaven belyst mulige løsninger for å kunne danne og regne på et ekvivalent en-frihetsgradssystem basert på et komplekst system med flere frihetsgrader. Beregningene har belyst kompleksiteten og behovet for et større faglig grunnlag for å bygge en blendering med riktig kapasitet. Den numeriske datasimuleringen har gitt forståelse for de skademekanismene som oppstår i blenderingen ved trykkbelastningen fra M100. Skadene er såpass omfattende at de geometriske beskrivelsene i UD 2-1 ikke er tilstrekkelige. Ved å gjennomføre ett fullskala forsøk på blenderingen har metoden bekreftet simuleringens resultater og gitt et innblikk i sikkerhetsaspektet ved bruk av blenderingen. Ved å bygge blenderingen etter størrelser gitt i UD 2-1, kan splinter fra M100 innpakningen kastes over veggene og gjøre skade på personell i bakkant. Et videre arbeid på sikkerhetsaspektet er

derfor anbefalt i en revidering av sikkerhetshåndboka. For å konkludere har de tre evalueringemetodene verifisert at produksjonsunderlaget i UD 2-1 ikke er tilstrekkelig for bygging av blenderinger, ment som standplass for avfiring av M100 sektorvirkende ladninger. De tre evalueringemetodene har gjennom oppgaven gitt tilstrekkelig grunnlag for å studere påvirkningen fra dynamiske laster mot en blendering. Ved studier på lignende tematikk anbefales det å benytte en kombinasjon av fremgangsmåtene i oppgaven for å sikre pålitelighet i resultatene.

9.2 Relevans i Forsvaret

Ved å benytte en blendering, kan soldater i Forsvaret oppleve og se effekten fra en M100 ladning fra en avstand på 50 m. Konstruksjonen kan derfor bidra til å skape forståelse av ladningens effekt og bruk i en taktisk ramme. For å bygge en blendering trengs det fagpersonell og under bruk må det være jevnlig ettersyn på grunn av de voldsomme kreftene den utsettes for. Dette kan medføre mer arbeid enn nytteverdien blenderingen gir. Det er derfor viktig å undersøke behovet Forsvaret har i dag før en eventuell revidering av UD 2-1 påbegynnes. En slik analyse burde studere antall ladninger som avfyres hvert år og læringsmålene under demonstrasjonen opp imot tiden det vil ta å revidere produksjonsunderlaget. En vanlig praksis i dag, under en M100 demonstrasjon, er å benytte lende som dekning med en sikkerhetsavstand på 500 m. En slik tilnærming vil ikke gi soldatene muligheten til å observere ladningens effekt under avfiring. Det er derfor viktig å kartlegge om behovet for innsyn er nødvendig.

9.3 Videre arbeid

I forlengelse av oppgavens problemstilling anbefales det å gjennomføre flere studier på tematikken. Blenderingen som er bygget i Setermoen SØF er utført med flere tekniske løsninger som er diskutert i oppgaven. Under diskusjonen blir flere mulige løsninger nevnt som bruk av andre type stålplater eller benytte andre geometriske former på konstruksjonen. For å konkludere hvilke løsninger som er gunstige burde det gjennomføres analyser der både numeriske datasimuleringer og forsøk er gode verktøy.

Som en forlengelse av tematikkens relevans opp imot Forsvaret, anbefales det å gjennomføre beregninger og tester av effekten fra M19 sektorvirkende ladninger. Et slikt arbeid må undersøke hvorvidt blenderinger bygget for kun M19 er dekkende for bruken av sektorvirkende ladninger i Forsvaret. Studien burde også undersøke trykkbelastningen fra ladningen og lastvirkningen på konstruksjonen. En slik studie kan gi et produksjonsunderlag for blenderinger, ment som standplass for avfyring av M19 sektorvirkende ladninger.

Litteraturliste

Alnes, J.H. (2021) *Hypotetisk-deduktiv metode*, Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: https://snl.no/hypotetisk-deduktiv_metode (Hentet: 28. november 2021).

Balazs, P. (1998) *Beräkningsmetoder vid stötvågsbelastade konstruktioner*. 2. utg. Försvarets Forskningsanstalt.

Biggs, J.M. (1964) *Structural Dynamics*. McGraw-Hill Book Company.

Dalland, O. (2017) *Metode og oppgaveskriving*. 6. utg. Oslo: Gyldendal Norsk Forlag AS.

Ekström, J. (2017) *Blast and Impact Loaded Concrete Structures*. Doktoravhandling. Göteborg: Chalmers University of Technology.

FLO systemstyring (2009) 'Ladning, sektorvirkende, M100, komplett'.

FOH (2020) *Hvorfor øver Forsvaret?*, *Forsvaret.no*. Tilgjengelig fra: <https://www.forsvaret.no/om-forsvaret/operasjoner-og-ovelser/ovelser/hvorfor-over-forsvaret> (Hentet: 28. november 2021).

Forsvarets forskningsinstitutt (2020) *Våpenvirkninger*. Oslo: Forsvarsbygg.

Forsvars- og Sikkerhetsindustriens forening, FSI (2021) *Forsvarsindustrien - en forutsetning for bærekraftig utvikling*. Tilgjengelig fra: <https://www.fsi.no/artikler/2021/barekraft/> (Hentet: 22. mars 2023).

Forsvarsbygg (2021) 'Baneinstruks B1'.

Herland, T. og Bruun, P-A. (2021) 'Kvalitetshåndbok M19/M100'. Krigsskolen.

Hofgaard, L.M.G. og Selmer, K. (2012) *Dynamisk analyse av Vulkan bro for horisontal og vertikal ganglast*. Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

Karlos, V. og Solomos, G. (2013) *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Kleven, Ø. (2013) *Dimensjonering av jordskjelv i DCM - Teori og analyser av bygninger i armert betong*. Masteroppgave. Universitetet i Oslo.

Kot, C.A. og Turulan, P. (1976) *Air blast effects on concrete walls*. Masteroppgave. Argonne National Laboratory.

Kvalsund, K.L. (2010) *Analyse av høye elementbygg utsatt for dynamiske laster*. Masteroppgave. Universitetet i Stavanger.

Kvellheim, A.K. og Bramslev, K. (2020) *Betong er en del av klimaløsningen*, SINTEF. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/-betong-er-en-del-av-klimalosningen/> (Hentet: 23. mars 2023).

Larsen, P.K., Clausen, A.H. og Aalberg, A. (1993) *Stålkonstruksjoner - Profiler og former*. 3. utg. Trondheim: Institutt for Konstruksjonsteknikk NTNU.

Ling, S.J., Loyola, J.S. og Moebis, B. (2017) *University Physics*. Texas: Rice University.

Magnusson, J. (2007) *Structural Concrete Elements Subjected to Air Blast Loading*. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan.

Meld. St. 17 (2020-2021) (2021) *Samarbeid for sikkerhet*. Oslo: Forsvarsdepartementet. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-17-20202021/id2838138/?ch=6> (Hentet: 22. mars 2023).

Melhus, Ø. (2021) 'Ordre for samarbeidsprosjekt 2021'. Krigsskolen.

Popovic, D. og Sandviknes, J.S. (2019) *Jordskjelvdimensjonering av Felt 2.2 Damsgårdveien 87*. Bacheloroppgave. Høgskulen på Vestlandet.

Røhne, K. og Vangestad, K. (2001) *Betongkonstruksjoner Prosjektering*. Oslo: Gyldendal Norsk Forlag AS.

Sjef Hæren (2020) *UD 2-1 Forsvarets sikkerhetsbestemmelser for landmilitær virksomhet*. Forsvaret.

Sjef Hærens våpenskole (2021) 'Sektorvirkende ladninger M19 og M100', in *Fagplan for funksjonsrettede kurs i Forsvaret*. Rena: Forsvaret.

Standard Norge (2004) 'Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger', i *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner*. 3. utg. Standard Norge.

Standard Norge (2021) *Standardisering*. Tilgjengelig fra:
<https://www.standard.no/standardisering/> (Hentet: 4. november 2021).

Stølen, K. (2019) *Teknologivitenskap, forskningsmetode for teknologer*. Oslo:
Universitetsforlaget AS.

Teland, J.A. og Kiran, J.H. (2019) *Temahefte 2: Anslags- og splintvirkninger*. Horten:
Forsvarets forskningsinstitutt.

UN Safer Guard (u.å) *Kingery-Bulmash Blast Parameter Calculator, UN Safer Guard*.
Tilgjengelig fra: <https://unsafeguard.org/un-safeguard/kingery-bulmash?fbclid=IwAR20FksYiT9dmLUUXGIWLPuABNFXYoHosN8aDxyPfmIXBnAgqCs6PwVEkHU> (Hentet: 28. oktober 2021).

Unified facilities criteria (2008) *Structures to resist the effects of accidental explosions*. (UFC 3-340-02. U.S). Army Corps of Engineers.

Wilkinson, N. (2023) *FNs bærekraftsmål, FN-Sambandet*. Tilgjengelig fra:
<https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (Hentet: 22. mars 2023).

Øystad-Larsen, N. (2010) *Dimensjonering for jordskjelv - Teorigrunnlag, regelverk og beregninger*. Masteroppgave. Universitetet i Oslo.

Vedlegg

- **Vedlegg A1** – Blending Setermoen SØF, 3D-modell
- **Vedlegg A2** – Blending Setermoen SØF, Fundament ovenfra
- **Vedlegg A3** – Blending Setermoen SØF, Fundament og vegger ovenfra
- **Vedlegg A4** – Blending Setermoen SØF, Fundament og vegger åpning
- **Vedlegg B1** – Dynamisk lastberegning på sideveggene
- **Vedlegg B2** – Dynamisk lastberegning på bakveggen
- **Vedlegg C1** – Simuleringsnotat
- **Vedlegg D1** – Veiledning for gjennomføring av forsøk
- **Vedlegg D2** – Målte resultater fra forsøk
- **Vedlegg D3** – Bilderresultater fra forsøk