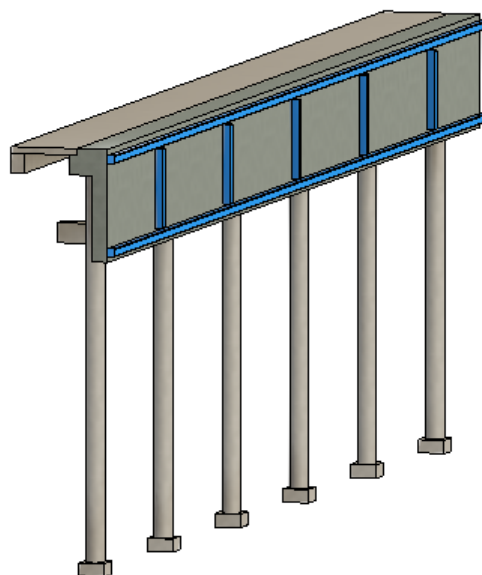


Christoffer A. Stene Berg
Thomas Berglid
Ole Jørgen Haugen

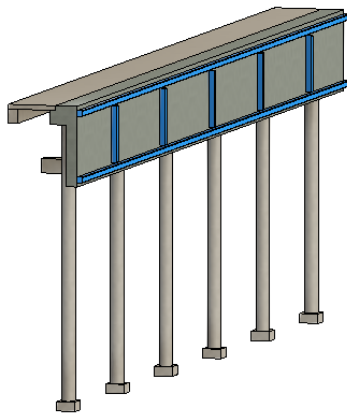
Stad Skipstunell - Fenderløsning og dimensjonering av kaikonstruksjon

Bacheloroppgave i ingeniørfag, bygg
Veileder: Torodd Skjerve Nord
Medveileder: Tore Standal
Mai 2022



Christoffer A. Stene Berg
Thomas Berglid
Ole Jørgen Haugen

Stad Skipstunell - Fenderløsning og dimensjonering av kaikonstruksjon



Bacheloroppgave i ingeniørfag, bygg
Veileder: Torodd Skjerve Nord
Medveileder: Tore Standal
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden

TITTEL:

Stad Skipstunnel – Fenderløsning og dimensjonering av kaikonstruksjon

KANDIDATNUMMER(E):

10001, 10045, 10046

DATO:	EMNEKODE:	EMNE:	DOKUMENT TILGANG:
19.05.2022	BYGA2900	Bacheloroppgave	
STUDIUM:		ANT SIDER/VEDLEGG:	BIBL. NR:
Bachelor i ingeniørfag, bygg		101/23	

VEILEDER(E):

Torodd Skjerve Nord
Tore Standal

SAMMENDRAG:

Temaet for denne oppgaven er dimensjonering av kaikonstruksjon med tilhørende fenderløsning. Kaien skal være i verdens første skipstunnel i Stad kommune, som har forventet byggestart i 2023, hvorav tunnelen skal strekke seg 1,7 kilometer gjennom fjellet fra Kjøddepollen til Moldefjorden. Oppgavens hovedfokus er å finne en alternativ fenderløsning enn den som er foreslått i Teknisk forprosjekt, for deretter å tilpasse og dimensjonere kaikonstruksjonen på en måte som er både teknisk god, og gjennomførbar [1].

Denne oppgaven er en eksamensbesvarelse utført av studenter ved NTNU i Ålesund.


FORORD


Denne oppgaven er skrevet av Christoffer Stene Berg, Thomas Berglid og Ole Jørgen Haugen ved Institutt for havromsoperasjoner og byggtknikk (IHB) ved NTNU avdeling Ålesund. Oppgaven markerer slutten på bachelorutdanningen i ingeniørfag, bygg, og utgjør 20 studiepoeng. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Multiconsult i Ålesund og omhandler dimensjonering av kaikonstruksjoner. Overnevnte studenter hadde ikke erfaring fra dette området tidligere, og synes derfor det hørt ut som en spennende oppgave å ta fatt på videre.


Målet med oppgaven var å utnytte tillærte fagkunnskaper fra studieløpet til å løse relevante problemer innenfor byggingeniørens fagfelt. Konstruksjon og dimensjonering ble valgt som fokus for oppgaven. Dette er spennende temaer som vi har jobbet mye med underveis i studiet. Oppgaven har vært tidskrevende og utfordrende, men også veldig lærerik. Samt gitt oss et stort læringsutbytte gjennom hele prosessen. Vi har store deler av tiden skrevet og arbeidet i fellesskap, heller enn hver for oss, noe som har vært viktig et godt samarbeid i gruppen.

Vi vil rette en spesiell takk til Torodd Skjerve som har vært vår veileder ved NTNU i Ålesund. Vi vil også rette en takk til Tore Standal som har vært vår kontaktperson i Multiconsult Ålesund, samt Aksel Fenerci, Lala Lacramioara Telehoi Nilsen og Bartosz Siedziako ved NTNU i Ålesund for god hjelp gjennom hele prosessen. I tillegg rettes en stor takk til Åsmund Lilleaas som er salgsdirektør i Nordic Fenders for god hjelp med fenderløsning.

Ålesund, 19.05.2022


Christoffer A. Stene Berg


Thomas Berglid


Ole Jørgen Haugen

Innholdsfortegnelse

FORORD	2
1 INNLEDNING.....	17
1.1 BAKGRUNN FOR OPPGAVEN	17
1.2 OPPDRAGSGIVER	18
1.3 PROBLEMSTILLING	18
1.4 AVGRENSNINGER	18
1.5 RAPPORTENS OPPBYGGING	18
1.6 VIKTIG LITTERATUR.....	19
1.6.1 Norsk Standard - Eurokode	19
1.6.2 Statens Vegvesen.....	19
1.6.3 Stad Skipstunnel - Teknisk forprosjekt.....	19
1.6.4 Norsk Betongforening - Publikasjoner	19
1.6.5 Lasthåndbok for kystverkets faste installasjoner	20
2 TEORETISK GRUNNLAG.....	21
2.1 FENDRING.....	21
2.1.1 Grunnlag for valg av fendring.....	21
2.1.2 Torsjonsfenderverk	22
2.1.3 Bunnfundamentert fenderpanel.....	23
2.1.4 Pelers med lavfriksjonsplater	23
2.1.5 Opphengte fenderpanel.....	23
2.1.6 Fenderverk av dumperdekk.....	25
2.2 KONSTRUKSJONSKONSEPT	25
2.2.1 Konsept 1	26
2.2.2 Konsept 2	27
2.2.3 Konsept 3	28
2.2.4 Konsept 4	29

2.3	BESKRIVELSE AV VALGT KONSTRUKSJON.....	30
2.3.1	<i>Referansehøyder</i>	31
2.3.2	<i>Bakkantbjelke</i>	32
2.3.3	<i>Dekke</i>	33
2.3.4	<i>Hovedbjelke</i>	33
2.3.5	<i>Støttebjelke</i>	34
2.3.6	<i>Søyle</i>	35
2.3.7	<i>Frontskjørt</i>	35
2.4	MATERIALER.....	36
2.4.1	<i>Betong</i>	36
2.4.2	<i>Armeringsstål</i>	39
2.4.3	<i>Materialfaktorer</i>	40
2.5	OMRÅDE OG GRUNNFØRHOOLD.....	40
2.5.1	<i>Område</i>	40
2.5.2	<i>Grunnførhold</i>	41
2.6	DIMENSJONERINGSKRITERIER.....	41
2.6.1	<i>Dimensjonerende brukstid</i>	41
2.6.2	<i>Fasthetsklasser</i>	41
2.6.3	<i>Eksponeringsklasser</i>	42
2.6.4	<i>Bestandighetsklasser</i>	42
2.6.5	<i>Pålitelighetsklasse</i>	42
2.6.6	<i>Overdekning</i>	43
2.6.7	<i>Armeringsregler</i>	44
2.6.8	<i>Nedbøyningsberegning</i>	44
2.6.9	<i>Rissviddekontroll</i>	44
2.6.10	<i>Tap av søyle</i>	44
2.7	LASTER.....	44
2.7.1	<i>Lastvirkninger og kapasitet</i>	44

2.7.2	<i>Permanente laster</i>	45
2.7.3	<i>Variable laster</i>	45
2.7.4	<i>Lastkombinasjoner i bruddgrensetilstand (ULS)</i>	45
2.7.5	<i>Lastkombinasjon i bruksgrensetilstand (SLS)</i>	45
2.7.6	<i>Lastkombinasjoner i ulykkestilstand (ALS)</i>	45
2.7.7	<i>Kombinasjonsfaktorer</i>	46
2.8	PREFABRIKKERTE BETONGELEMENT	46
3	VERKTØY OG METODE	48
3.1	DATAVERKTØY	48
3.1.1	<i>Microsoft Office</i>	48
3.1.2	<i>Microsoft Teams</i>	48
3.1.3	<i>Autodesk Robot Structural Analysis Program</i>	48
3.1.4	<i>Revit</i>	48
3.1.5	<i>Mathcad</i>	48
3.1.6	<i>ISY Design</i>	48
3.2	METODE	49
3.2.1	<i>Fender</i>	49
3.2.2	<i>Revit</i>	49
3.2.3	<i>Robot</i>	50
3.2.4	<i>Laster</i>	53
3.2.5	<i>Tap av søyle</i>	58
3.2.6	<i>Dimensjonering</i>	59
3.2.7	<i>Veiledninger</i>	60
3.2.8	<i>Befaringer</i>	60
3.3	KILDEKRITIKK.....	62
4	RESULTATER	63
4.1	FENDERLØSNING	63
4.1.1	<i>Resultat</i>	64

4.1.2	<i>Betongmengde frontskjørt</i>	65
4.1.3	<i>Materialer</i>	66
4.2	DIMENSJONERING AV KONSTRUKSJONSKONSEPT 4	68
4.2.1	<i>Resultat av beregninger for dekke</i>	68
4.2.2	<i>Resultat av beregninger for hovedbjelke</i>	73
4.2.3	<i>Resultat av beregninger for søyler</i>	78
4.2.4	<i>Resultat av beregninger for støttebjelke</i>	82
4.2.5	<i>Resultat for beregninger for frontskjørt</i>	86
5	DISKUSJON	92
5.1	VALG AV FENDERLØSNING.....	92
5.2	VALG AV KONSTRUKSJONSKONSEPT.....	93
5.3	ERFARINGER.....	94
5.4	USIKKERHET.....	94
5.5	FORSLAG TIL VIDERE ARBEID.....	94
6	KONKLUSJON	96
7	REFERANSER	97
8	VEDLEGG	101

Figurliste:

Figur 1: Bildet gir et inntrykk av hvordan tunnelen vil se ut inne. Kilde: [7].	17
Figur 2: Prinsippskisse på torsjonsfender. Kilde: [11].	22
Figur 3: Prinsippskisse på bunnfundamenterte fenderpanel. Kilde: [11].	23
Figur 4: Prinsippskisse på opphengte fenderpanel. Kilde: [11].	24
Figur 5: Opprinnelig valg fenderløsning for kaikonstruksjonen i Stad skipstunnel. Kilde: [15].	24
Figur 6: Eksempel på fenderverk av dumperdekk på kaikonstruksjon. Kilde: [14].	25
Figur 7: Snitt av opprinnelig ledekonstruksjon i Stad skipstunnel. Kilde: [15].	26
Figur 8: Snitt fra forside av kaikonstruksjonen, Konsept 1. Fra Revit.	27
Figur 9: 3D visualisering av kaikonstruksjon som element løsning, Konsept 2. Fra Revit.	28
Figur 10: Snitt av kaikonstruksjon med konsoll løsning, Konsept 3. Fra Revit.	29
Figur 11: Snitt fra forside av kaikonstruksjon med utsparinger, Konsept 4. Fra Revit.	30
Figur 12: 3D visualisering av valgt kaikonstruksjon uten utsparinger, Konsept 4. Fra Revit.	30
Figur 13: Referansemål på tunnelverrsnittet til Stad skipstunnel. Kilde: [15].	32
Figur 14: Snitt av kaikonstruksjon, Konsept 4. Fra Revit.	33
Figur 15: Snitt av hovedbjelke (skravert), konsept 4. Fra Revit.	34
Figur 16: Dimensjoner på støttebjelke, konsept 4. Fra Revit.	34
Figur 17: Snitt av frontskjørt (skravert), konsept 4. Fra Revit.	35
Figur 18: Snitt fra framside av konstruksjon uten utsparinger, konsept 4. Fra Revit.	36
Figur 19: Klimagassutslipp for en typisk konstruksjonsbetong. Kilde: [18].	39
Figur 20: Kartutsnitt med markering for plassering av lokasjon for prosjektet Stad skipstunnel. Fra Google Maps.	41
Figur 21: 3D visualisering av oppbygging av analytisk modell. Fra Robot.	50
Figur 22: Snitt av konstruksjon som viser knutepunktene sammenkobling i Robot. Skisse fra Revit.	52
Figur 23: 3D visualisering av horisontallast på rekkverk påført som moment. Fra Robot.	53
Figur 24: 3D visualisering av vertikallast påført dekket. Fra Robot.	54
Figur 25: 3D visualisering av karakteristisk nyttelast påført dekket. Fra Robot.	55
Figur 26: 3D visualisering av karakteristisk punktlast påført dekket som bevegelig last. Fra Robot.	56

Figur 27: 3D visualisering av støtlast fra «MS Midnatsol» påført frontskjørtet som bevegelig last. Fra Robot.	57
Figur 28: 3D visualisering av støtlast fra lekter påført frontskjørtet som bevegelig last. Fra Robot.	57
Figur 29: 3D visualisering av bølge og strømningslast påført søyler som linjelast. Fra Robot.	58
Figur 30: 3D visualisering av Robot modell ved fjerning av søyle 3. Fra Robot.....	59
Figur 31: Fra befaring på Solavågen fergekai 09.03.2022. Foto: Christoffer A. Stene Berg.....	61
Figur 32: Fra befaring hos Spenncon 19.04.22. Foto: Ole Jørgen Haugen.	62
Figur 33: Illustrasjon av horisontal- og vertikal fenderløsning i Panamakanalen. Kilde: [33].	63
Figur 34: Prinsippskisse fra fenderleverandør på horisontal fenderløsning. Kilde: vedlegg V19.....	64
Figur 35: 3D visualisering av komposittfenderforslag fra Nordic Fender. Kilde: vedlegg V19.....	67
Figur 36: 3D visualisering av benelementfender som planlagt i Teknisk forprosjekt. Kilde: [36].	67
Figur 37: Dimensjonerende moment i bruddgrensetilstand (ULS) - dekke. Fra Robot.	69
Figur 38: Skjærkrefter i bruddgrensetilstand (ULS) - dekke. Fra Robot.....	70
Figur 39: Dimensjonerende moment i bruksgrensetilstand (SLS) - dekke. Fra Robot.	71
Figur 40: Tverrsnitt med armeringsplassering ved feltmoment fra ISY Design – dekke.....	72
Figur 41: Tverrsnitt med armeringsplassering ved støtte fra ISY Design – dekke.	72
Figur 42: Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$ i bruddgrensetilstand (ULS) – hovedbjelke. Fra Robot.	73
Figur 43: Dimensjonerende moment $M_{Ed,z}$ i bruddgrensetilstand (ULS) – hovedbjelke. Fra Robot.....	74
Figur 44: Dimensjonerende moment M_y i ulykkestilstand (ALS) – hovedbjelke. Fra Robot.	74
Figur 45: Dimensjonerende moment M_y i bruksgrensetilstand for hovedbjelke. Fra Robot.....	76
Figur 46: Dimensjonerende moment M_z i bruksgrensetilstand for hovedbjelke. Fra Robot.	77
Figur 47: Tverrsnitt med armeringsplassering over felt(t.v.) - og støttepunkt(t.h.) - hovedbjelke. Fra ISY Design.	78
Figur 48: Tverrsnitt av søyle med armeringsplassering. Fra ISY Design.	81
Figur 49: Bjelketverrsnitt fra ISY Design(t.v.) og aksesystem (t.h.) – støttebjelke.	86
Figur 50: Dimensjonerende moment $M_{Ed,x}$ i bruddgrensetilstand -frontskjørt. Fra Robot.....	87
Figur 51: Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$ i bruddgrensetilstand – frontskjørt. Fra Robot.	87
Figur 52: Dimensjonerende skjærkrefter – frontskjørt. Fra Robot.....	89
Figur 53: Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$ i bruksgrensetilstand – frontskjørt. Fra Robot.....	90

Figur 54: Dimensjonerende moment $M_{Ed,x}$ i bruksgrensetilstand – frontskjørt. Fra Robot.....	90
---	----

Tabelliste:

Tabell 1: Terminologi.....	14
Tabell 2: Vannstands nivåer – Kilde: [1].	31
Tabell 3: Pris for betongklasse B45. Kilde: [17].	36
Tabell 4: Oversikt over de kjemiske tilsetningsmidlene. Kilde: NS-EN 934-2:2009+A1:2012, 3.2.	37
Tabell 5: Tabell 2.1N. Kilde: [3].	40
Tabell 6: Utdrag av Tabell 4.1 for eksponeringsklasser. Kilde: [3].	42
Tabell 7: Pålitelighetsklasse fra Tabell NA.A1(901). Kilde: [23].	43
Tabell 8: Overdekning for konstruksjonsdeler.	43
Tabell 9: Fordeler og ulemper ved prefabrikkerte betongelement. Kilde: [12].	47
Tabell 10: Beskrivelse av ulike konstruksjonsdeler oppbygging i Robot.....	51
Tabell 11: Utregninger av egenvekt og summerte reaksjonskrefter fra Robot. Fra vedlegg V15 og Robot.	52
Tabell 12: Beskrivelse av løsninger fra Teknisk forprosjekt og NordicFender.	63
Tabell 13: Matrise fordeler og ulemper fenderløsning.	65
Tabell 14: Utregninger av total kostnad for betongmengde til frontskjørt fra Teknisk forprosjekt og konstruksjonskonsept 4.	65
Tabell 15: Utregninger av total kostnad for fender og betong for Teknisk forprosjekt og konstruksjonskonsept 4. Fra vedlegg V16.	66
Tabell 16: Totalt utslipp for løsning fra Teknisk forprosjekt og konstruksjonskonsept 4. Fra vedlegg V18.	66
Tabell 17: Dimensjoner – dekke.	68
Tabell 18: Dimensjonerende støtte- og feltmoment – dekke.....	69
Tabell 19: Valgt lengdearmring overkant – dekke.	69
Tabell 20: Valgt lengdearmring underkant – dekke.	69
Tabell 21: Valgt fordelingsarmring overkant – dekke.....	70

Tabell 22: Valgt fordelingsarmering underkant – dekke.....	70
Tabell 23: Dimensjonerende skjærkraftskapasitet og skjærkraft – dekke.....	71
Tabell 24: Dimensjonerende moment – dekke.....	71
Tabell 25: Beregnet nedbøyning hentet fra Robot og beregnet tillat nedbøyning – dekke.....	72
Tabell 26: Resultat fra rissviddekontroll fra Mathcad – dekke.....	72
Tabell 27: Dimensjoner – hovedbjelke.....	73
Tabell 28: Dimensjonerende støtte- og feltmoment – hovedbjelke.....	74
Tabell 29: Valgt lengdearmering og plassering over støtte – hovedbjelke.....	75
Tabell 30: Valgt lengdearmering over felt – hovedbjelke.....	75
Tabell 31: Skjærkrefter og skjærkraftskapasitet – hovedbjelke.....	76
Tabell 32: Valgt bøylearmering – hovedbjelke.....	76
Tabell 33: Dimensjonerende moment i bruksgrensetilstand – hovedbjelke.....	77
Tabell 34: Beregnet nedbøyning hentet fra Robot og beregnet tillat nedbøyning – hovedbjelke.....	77
Tabell 35: Resultat fra rissviddekontroll fra Mathcad på dekket – hovedbjelke.....	78
Tabell 36: Dimensjoner – søyle.....	78
Tabell 37: Resultat fra analyse, krefter i bruddgrensetilstand (ULS) - søyle. Fra Robot.....	79
Tabell 38: Dimensjonerende moment- og aksialkraft – søyle.....	79
Tabell 39: Valgt lengde- og bøylearmering – søyle.....	80
Tabell 40: Krefter på søyle i SLS. Fra Robot.....	80
Tabell 41: Dimensjoner – støttebjelke.....	82
Tabell 42: Dimensjonerende moment til støttebjelke i bruddgrensetilstand. Fra Robot.....	82
Tabell 43: Dimensjonerende moment – støttebjelke.....	82
Tabell 44: Valgt armering og plassering – støttebjelke.....	83
Tabell 45: Skjærkrefter støttebjelke. Fra Robot.....	84
Tabell 46: Dimensjonerende skjærkraft og skjærkraftskapasitet – støttebjelke.....	84
Tabell 47: Krefter fra analyse i bruksgrensetilstand. Fra Robot.....	85
Tabell 48: Beregnet nedbøyning hentet fra Robot og beregnet tillat nedbøyning – støttebjelke.....	85
Tabell 49: Resultat fra rissviddekontroll fra Mathcad – støttebjelke.....	85

Tabell 50: Dimensjoner – frontskjørt.	86
Tabell 51: Dimensjonerende moment ved felt- og støttepunkt – frontskjørt.....	87
Tabell 52: Valgt lengdearmring overkant over støtte – frontskjørt.	88
Tabell 53: Valgt lengdearmring overkant over felt – frontskjørt.....	88
Tabell 54: Dimensjonerende skjærkraftskapasitet og største skjærkraft – frontskjørt.	89
Tabell 55: Dimensjonerende moment over felt- og støttepunkt – frontskjørt.	90
Tabell 56: Beregnet nedbøyning hentet fra Robot og beregnet tillat nedbøyning – frontskjørt.	91
Tabell 57: Resultat fra rissviddekontroll fra Mathcad – frontskjørt.	91

SAMMENDRAG

Temaet for denne oppgaven er dimensjonering av kaikonstruksjon med tilhørende fenderløsning. Kaien skal være i verdens første skipstunnel i Stad kommune, som har forventet byggestart i 2023, hvorav tunnelen skal strekke seg 1,7 kilometer gjennom fjellet fra Kjøddepollen til Moldefjorden. Oppgavens hovedfokus er å finne en alternativ fenderløsning enn den som er foreslått i Teknisk forprosjekt, for deretter å tilpasse og dimensjonere ledekonstruksjonen på en måte som er både teknisk god, og gjennomførbart [1].

Denne bacheloroppgaven har begrenset omfang og tid, og dimensjonering av en slik betongkonstruksjon er tidkrevende arbeid. Ønsket slutttilstand for denne oppgaven er økt forståelse rundt dimensjonering av betongkonstruksjoner etter Eurokode 2 og Statens Vegvesens håndbok N400 [2] [3].

Kaikonstruksjoner er i hovedsak bygget opp av armert betong som blir produsert i fabrikk som enkeltelementer. En essensiell del av det å bygge betongkaier er å hensynta det harde klimaet og den påkjennelse konstruksjonen får fra saltvannet rundt.

Arbeidet startet med å finne riktig fenderløsning til prosjektet. Etter ønske fra oppdragsgiver ble det et mål å finne en horisontal fenderløsning. Fenderleverandører fra hele verden ble kontaktet for å få innspill på løsninger og generell hjelp. Nordic Fender presenterte senere løsningen som ble valgt for dette prosjektet. Dette var en løsning med horisontale fendere bygget opp av støtabsorberende gummi med overflate i PE. Dette er samme type fenderløsning som brukes i Panamakanalen. Fenderlisten skal ligge horisontalt i to høyder med senteravstand på 3,5 meter. Maksimalt hver tiende meter skal det være en vertikal fenderlist.

For å dimensjonere kaikonstruksjonen har vi laget en analytisk datamodell av bæresystemet. Modellen ble laget i beregningsprogrammet Robot Structural Analysis Program [4]. Kaikonstruksjonen er tilpasset valgt fenderløsning. Løsningen som ble valgt er en åpen kaikonstruksjon av betong bestående av fundament, bjelker, søyle, frontskjørt og dekke. Dimensjoneringen av de ulike konstruksjonene ble gjort manuelt i programmet Mathcad [5]. Kaikonstruksjonen som er dimensjonert i denne oppgaven har en dimensjonerende levetid på 100 år og består av armert betong. Denne oppgaven beskriver fremgangsmåte i prosessen steg for steg frem til ferdig dimensjonert konstruksjon.

Resultatet for denne oppgaven tilfredsstiller kravene innenfor Norsk Standard og SV N400 [3] [2].

ABSTRACT

This thesis is a study containing of construction and dimensioning of a dock with marine fenders inside a ship tunnel. The dock is a central part of the coming ferry tunnel at Stad in Vestland county, Norway. The tunnel which will be the first of its kind is measuring 1,7 kilometres in length. Construction is due to start in 2023.

Bachelor thesis has limited time and scope, and some parts of this design have shown to be time consuming. The aim of this thesis is to increase the understanding of concrete structures and its design using Eurocode 2 and Statens Vegvesens Handbook N400 [3] [2].

Construction of docks are mainly built with armed concrete, using precast elements. An essential part of concrete ports and docks are the strict demands regarding corrosion, due to the harsh weather in the area.

The thesis work started with finding a suitable fender system for the construction. Upon the request from the project manager, it became a goal to find a horizontal fender system. Inquiries were made to fender suppliers worldwide, to gather offers from them, based on the information from Kystverkets technical preliminary project report [1]. Nordic Fender presented a model that fitted our terms, which we proceeded with. The solution consists of a shock absorber made of rubber, with a panel made of polyethylene. This is claimed to be the same fender system that is used in part of the Panama Canal. The fenders are horizontally installed in two different heights with 3,5 meters between them. For every tenth meter there shall be a vertical fender.

The design will be based on the fender system, alongside with the preliminary design from Kystverket. Next in the process of designing the dock was to make a finite element model, using the analysis software from Robot Structural Analysis Program [4]. The design that was continued with was an open construction made of concrete, containing beams, columns, foundation, slab, and a quay skirt. The design of each part was dimensioned manually by calculations in Mathcad [5]. A crucial factor in the design is for the construction to withstand a 100-years of wear and tear. The content of this thesis describes the process carefully in a practical manner.

The result in this thesis satisfies the guidelines and rules given by Norsk Standard and N400 [3] [2].

TERMINOLOGI

Forklaring på relevante forkortelser og symboler er listet opp i Tabell 1.

Tabell 1: Terminologi.

NS	Norsk Standard
NS-EN	Norsk Standard Eurocode
N.A	Nasjonalt tillegg
CO ₂ -ekv.	CO ₂ -ekvivalent
EPD	Environmental Product Declaration
HAT	Høyeste astronomiske tidevann
LAT	Laveste astronomiske tidevann
ASA	Allmennaksjeselskap
ULS	Bruddgrensetilstand
SLS	Bruksgrensetilstand
ALS	Ulykkestilstand
L	Lengde
h	Høyde
b	Bredde
d	Diameter
d	Effektiv tykkelse av tverrsnitt
r	Radius
z	Avstand mellom trykk- og strekkresultant
x,y,z	Koordinater
M	Karakteristisk moment
M _{Ed}	Dimensjonerende moment
M _{Rd}	Dimensjonerende momentkapasitet
N	Karakteristisk aksiallast
N _{Ed}	Dimensjonerende aksiallast

N_{Rd}	Dimensjonerende aksiallastkapasitet
V	Karakteristisk skjærkraft
V_{Ed}	Dimensjonerende skjærkraft
V_{Rd}	Dimensjonerende skjærkraftskapasitet
A	Tverrsnittsareal
A_s	Tverrsnittsareal av armering
$A_{s,min}$	Tverrsnittsareal av minimumsarmering
A_{sw}	Tverrsnittsareal av skjærarmering
f_{ck}	Karakteristisk betongfasthet
f_{yd}	Dimensjonerende betongfasthet
f_{yk}	Karakteristisk stålfasthet
f_{yd}	Dimensjonerende stålfasthet
f_{ctm}	Middelverdi av betongens aksialtrekkfasthet
γ_b	Materialfaktor for betong
γ_s	Materialfaktor for stål
E	Elastisitetsmodul
I	2. ordens arealmoment
λ	Slankhet
n	Nødvendig antall stenger per bredde
k	koeffisient, faktor
π	Pi
ϕ	Armeringsdiameter
ψ	Faktorer som definerer representative verdier av variable påvirkninger
ϕ_{LA}	Armeringsdiameter lengdearmering
ϕ_{FA}	Armeringsdiameter fordelingsarmering
σ_s	Spenning i armering
ε	Tøyning

C_{min}	Minimumsoverdekning
C_{nom}	Nominell overdekning
s	Senteravstand for armering
EC0	Eurocode 1990
EC1	Eurocode 1991
EC2	Eurocode 1992
EC8	Eurocode 1998
UHMW-PE	Ultrahøy molekylvekt polyetylen

1 INNLEDNING

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Stadhavet er det farligste kystområdet i Norge med mest og sterkest vind, i tillegg til problematiske bølgeførhold [6]. Gjennom tidene har dette skapt ulykker og nestenulykker for ferdende på sjøen, hvor titalls har forlist og mange har gått bort. Før var båtene mindre og mer utsatt for mye sjø, men selv om næringen har bedre båter og mer teknologi til hjelp har det vist seg at selv de beste båtene kan få problemer under slike forhold.



Figur 1: Bildet gir et inntrykk av hvordan tunnelen vil se ut inne. Kilde: [7].

Tunnelen var i begynnelsen tiltenkt fiskebåter, helt til det i 2003 skjedde en nestenulykke med en av Hurtigruten sine passasjerskip «MS Midnatsol». Tunnelen som da kun var på tegnebrettet var dimensjonert etter ringnottrålere og fryseskip som kombinert måler opp mot 18 meters breidd med 8 meter under vann [6]. Budsjettet for bygging av tunnelen ble estimert til å være rundt 90 millioner i 1985. Ulykken viste seg å bidra til en endring i planene om skipstunnelen, da det ble foreslått at også Hurtigruten måtte være en del av skipene som kunne seile igjennom. Stortinget vedtok i forbindelse med Stortingsmelding 26 å gå for det alternativet med «MS Midnatsol» i tillegg, kalt «stort tunnelalternativ». Nå er Hurtigruten «MS Midnatsol» dimensjonerende for største skip som skal bruke tunnelen. Hovedgrunnene til å bygge skipstunnel er som følger [8]:

1. Økt trygghet på sjøen
2. Mer effektivitet
3. Bedre framkommelighet

1.2 Oppdragsgiver

Denne bacheloroppgaven utføres i samarbeid med Multiconsult i Ålesund, som er en av enhetene til Multiconsult ASA. Multiconsult er et børsnotert ingeniør- og arkitektsselskap som ble etablert i 1908. Selskapet tilbyr tjenester innenfor planlegging, arkitektur, miljøfag, design, innkjøp og prosjektstyring i Norge og utland [9].

1.3 Problemstilling

«Stad Skipstunnel – Fenderløsning og dimensjonering av kaikonstruksjon»

Formålet med bacheloroppgaven er å besvare følgende problemstillinger:

1. Finne alternativ fenderløsning til kaikonstruksjonen i Stad Skipstunnel.
2. Konstruere og dimensjonere kaikonstruksjonen i Stad Skipstunnel, tilpasset den alternative fenderløsningen.

1.4 Avgrensninger

På grunn av begrensninger rundt tid og omfang må oppgaven avgrenses.

I dimensjoneringsdelen er det dimensjonert for bruddgrense- og bruksgrensetilstand for dekke, søyle, frontskjørt, hovedbjelke og støttebjelke (illustrasjoner i *vedlegg V13*). Det vil ikke bli dimensjonert fundament og bakkantbjelke. Oppgaven neglisjerer knutepunkter. Løsninger med forsterkningsplater eller vouter er ikke sjekket der det er spesielt store skjærkrefter, i tillegg til at det heller ikke er beregnet skjærarmering i disse områdene.

Konstruksjonen skal også ha ledere som skal kunne brukes som forankringspunkt ved en evakueringssituasjon hver 54 meter, noe som ikke er med i dimensjoneringen. Rekkverk er heller ikke tatt hensyn til.

I denne oppgaven har vi valgt å legge vekt på ledekonstruksjonen inne i tunnelen fremfor entringskonstruksjonen. Ved entringskonstruksjonen kan støtvinkelen bli større, noe som krever kraftigere fending.

1.5 Rapportens oppbygging

Denne oppgaven følger fast oppsett for bacheloroppgaver. Strukturen i oppgaven er:

1. Innledning
2. Teoretisk grunnlag
3. Verktøy og metode

4. Resultater
5. Diskusjon
6. Konklusjon

Oppgavens innhold er for lesere med en grunnleggende forståelse innenfor dimensjonering og prosjektering av kaikonstruksjoner.

1.6 Viktig litteratur

1.6.1 Norsk Standard - Eurokode

Norsk Standard gir dokumentasjon på metoder, materialer og utførelser som er tilfredsstillende krav i plan- og bygningsloven og den tekniske forskriften. Norsk Standard sikrer at dokumentasjonen er godtatt av de kontrollerende myndigheter [10]. Denne oppgaven inneholder vid bruk av Norsk Standard, og spesielt NS-EN 1992 om betongkonstruksjoner.

1.6.2 Statens Vegvesen

Statens Vegvesens Håndbok N400 er utarbeidet med hjemmel i Samferdselsdepartementets forskrifter etter vegloven § 13. Forskriftene gir rammer for vegens utforming og standard, og gjelder alle offentlige veier. Håndboken gjelder for prosjektering av bruer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner i det offentlige vegnettet og med privat tiltakshaver over eller langs det offentlige vegnettet.

Statens Vegvesen veileder «V431 Ferjekai – Prosjektering», tar for seg løsninger ved prosjektering av ferjekaier [11].

1.6.3 Stad Skipstunnel - Teknisk forprosjekt

Teknisk forprosjekt for Stad Skipstunnel er en samling tekniske utredelser og rapporter for prosjektet produsert for Kystverket. Dokumentene tar for seg utfordringer og mulige løsninger for hvordan tunnelen kan bygges. Prosjektet har vært gjennom flere utredninger og ytterligere kvalitetssikringer siden starten av 2000-tallet. Detaljprosjektering og ytterligere optimalisering vil finne sted når anbudsprosessen er ferdig. Det er dermed ikke gitt at tunnelen skal bygges nøyaktig som beskrevet i Teknisk forprosjekt, men det vil likevel bli brukt som utgangspunkt for denne oppgaven [6].

1.6.4 Norsk Betongforening - Publikasjoner

Norsk Betongforening er en interesseorganisasjon med 1300 medlemmer tilknyttet Tekna-Teknikk-naturvitenskapelig forening. Norsk Betongforening har publisert ulike publikasjoner som har vært til stor nytte i denne oppgaven [12].

1.6.5 Lasthåndbok for kystverkets faste installasjoner

Kystverkets lasthåndbok, heretter omtalt Lasthåndbok KV, tar for seg bestemmelsen av dimensjonerende laster og relevante kombinasjoner. Ved dimensjonering av Kystverkets installasjoner skal lasthåndboken benyttes [13].

2 TEORETISK GRUNNLAG

Dette kapittelet inneholder det teoretiske grunnlaget til oppgaven. Her inngår presentasjon av ulike konsept, valg av løsninger, dimensjonering, informasjon om konstruksjonen og området vil være sentralt i denne oppgaven

Opgaven omhandler prosjektering av kaikonstruksjonen i Stad Skipstunnel. Den vil være på hver sin side av tunnelens lengde, sammenkoblet med entringskonstruksjonene i begge ender. Konstruksjonens hovedformål er å være rømningsvei ved evakuering av skip og entringsvei i forbindelse med vedlikehold- og servicearbeider, samtidig som den vil fungere som ledevei for skip gjennom tunnelen.

2.1 Fendring

Marine fendere skal redusere støtkreftene mellom konstruksjonen og fartøyer. Dette skjer ved at energien absorberes og fordeles over lenger tid enn ved direkte støt. Overflaten av fenderen må ha lav friksjon for å overføre minst mulig av støtenergien til konstruksjonen, og heller la skipet gli videre og lede det tilbake på kurs. Samtidig skal fenderen beskytte båtskroget slik at det ikke bulkes eller får hull [14].

Marine fendere produseres i ulike former og fasonger. Vi deler fendere inn i to hovedkategorier, fastmonterte- og flytende fendere. Disse produseres som regel i elastiske materialer som gummi og plastikk. Fenderløsningen tilpasses kaikonstruksjonen og dens tiltenkte bruk. Fra Håndbok V431 regnes det 5 forskjellige hovedtyper fenderverk, torsjonsfenderverk, bunnfundamentert fenderpanel, peler med lavfriksjonsplater, opphengte fenderpanel og fenderverk av dumperdekk [11]. Valg av riktig fendersystem avhenger av flere ulike faktorer som støtkrefter, fartøy, vannforhold, og kostnader til investering og vedlikehold [14].

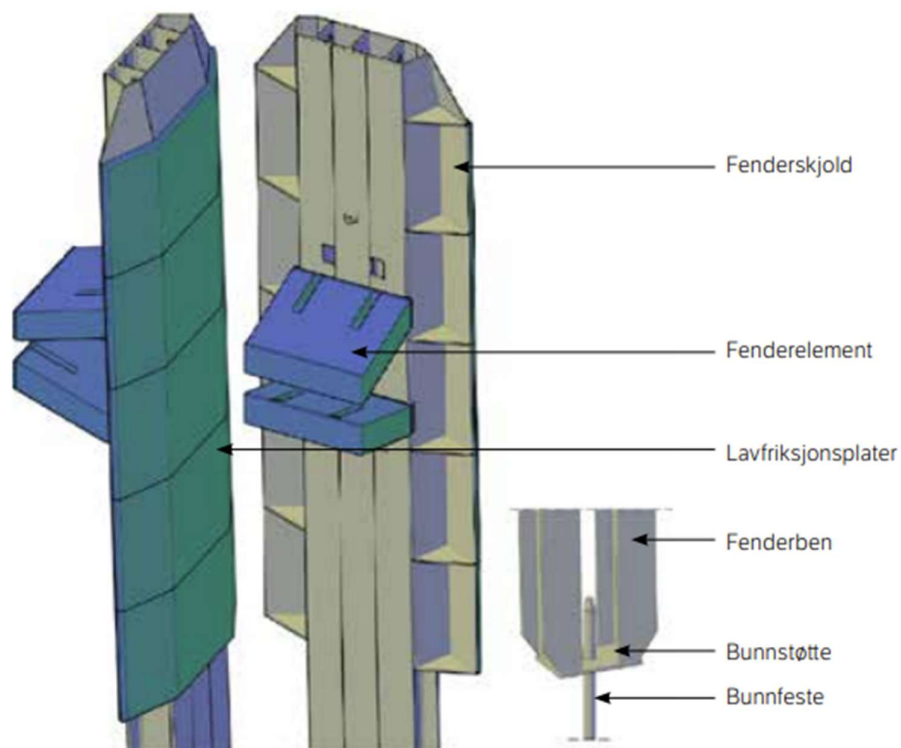
2.1.1 Grunnlag for valg av fendring

Hurtigruta «MS Midnatsol» som seiler gjennom tunnelen med en fart på 5 knop legges til grunn for dimensjonering av fendring langsmed ledekonstruksjonen i det Tekniske forprosjektet [1]. I forhold til senterlinjen kan «MS Midnatsol» støte mot konstruksjonen med en vinkel på 3,5 grader.

Lektere på slep, og kanalbåter vil trafikkere tunnelen. Disse har lavt fribord og nedre elevasjon på fenderplater må dermed disse tilpasses for å hindre at de går under fenderverket ved lavvann. Lektere har ofte skarpe hjørner og det er derfor valgt å vinkle alle sider på fenderplatene for å hindre hekking og skade på fender.

2.1.3 Bunnfundamentert fenderpanel

Bunnfundamenterte fenderpanel festes til bunn med stålbolt. Anbefalt på dybder mellom kote -5 og -15. Denne løsningen gir støtkrefter på kai og ikke moment [11]. Figur 3 viser oppbygging av bunnfundamentert fenderpanel.



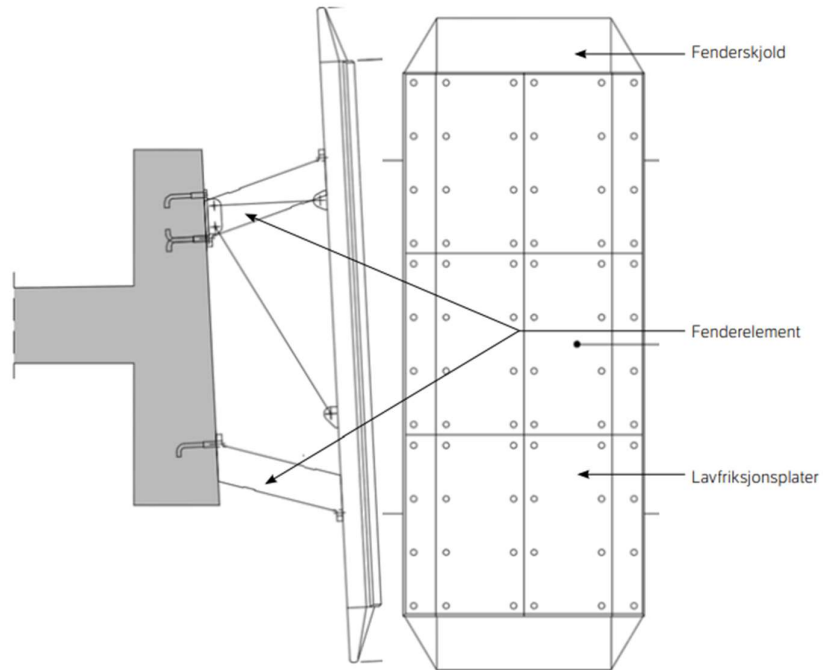
Figur 3: Prinsippskisse på bunnfundamenterte fenderpanel. Kilde: [11].

2.1.4 Peler med lavfriksjonsplater

Peler av stålrør som støpes ut. Fenderelement mellom rør og kai, røret klees med lavfriksjonsplater på støtsiden [11].

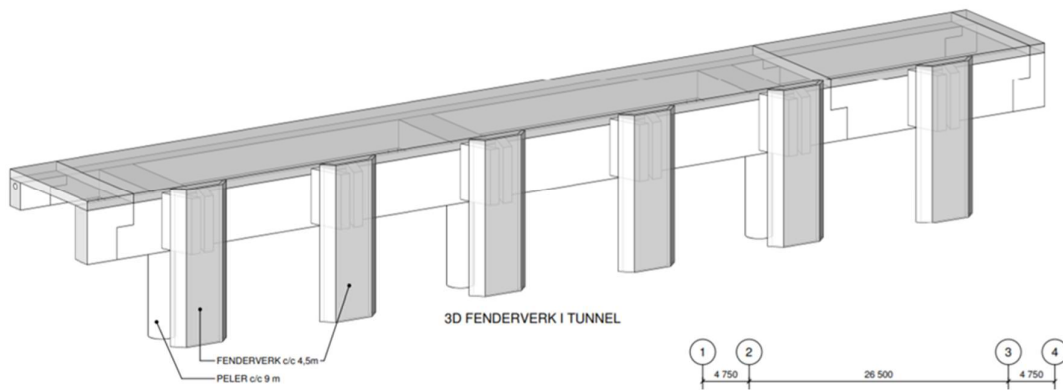
2.1.5 Opphengte fenderpanel

Ved opphengte fenderpanel overføres støtkrefter og moment til konsoll eller brystning på kai. Energiopptak og overførte krefter vil variere med treffpunktet på fenderpanelet [11]. Illustrasjon i Figur 4.



Figur 4: Prinsippskisse på opphengte fenderpanel. Kilde: [11].

Denne fenderløsningen er valgt i Teknisk Forprosjekt [1]. De opphengte fenderpanelene er tilnærmet friksjonsfrie. Disse er boltet fast i fremkant av kaikanten med senteravstand på 4,5 meter illustrert i Figur 5.



Figur 5: Opprinnelig valg fenderløsning for kaikonstruksjonen i Stad skipstunnel. Kilde: [15].

2.1.6 Fenderverk av dumperdekk

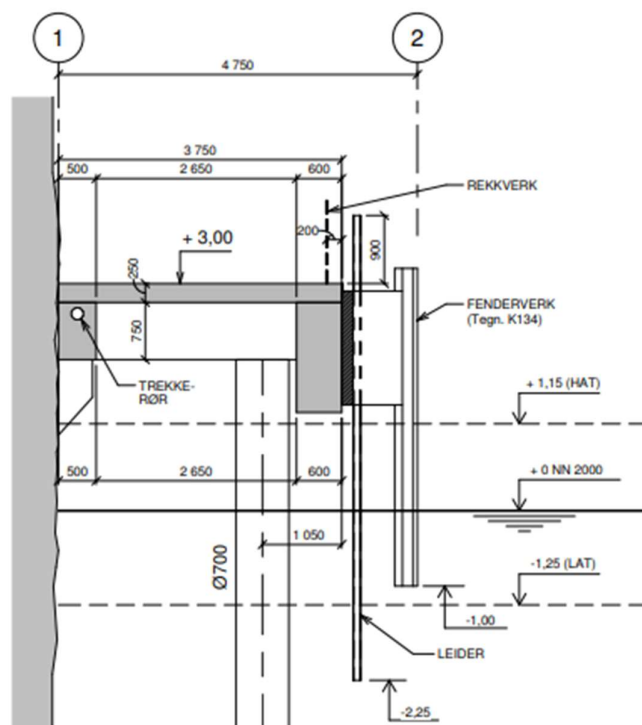
Dumperdekk festes til kaiskjørt eller brystning, hvor det er stor friksjon ved støt. Bruker som regel brukte dekk som gir en billig løsning, men uten dokumentasjon på egenskaper [11].



Figur 6: Eksempel på fenderverk av dumperdekk på kaikonstruksjon. Kilde: [14].

2.2 Konstruksjonskonsept

Konstruksjonskonseptene tilpasses valgt fenderløsning som er utarbeidet i samarbeid med Nordic Fenders AS og er avgjørende for utformingen. Dimensjonene er basert på størrelser på konstruksjonen i Teknisk forprosjekt, og det er lagt til grunn at konstruksjonen skal være en åpen kaikonstruksjon [15]. Konstruksjonen skal være åpen siden det er behov for hele volumet i tunnelen til vann deplasement [1]. Valg og løsninger for dimensjoneringen av kai vil i hovedsak basere seg på kvalitet, økonomi og soliditet. Det er anbefalt å ha minst 2 meter fra frontskjørtet til senterlinjen på søylene. Sikkerhetsavstanden er definert på bakgrunn av muligheten skip med store bulber har til å treffe søyler med stor vinkel [14]. Fra Teknisk forprosjekt bygger fender 1 meter ut fra kaiskjørtet, valgt fenderløsning bygger 0,3 meter og reduserer sikkerhetsavstanden til søylene [1].

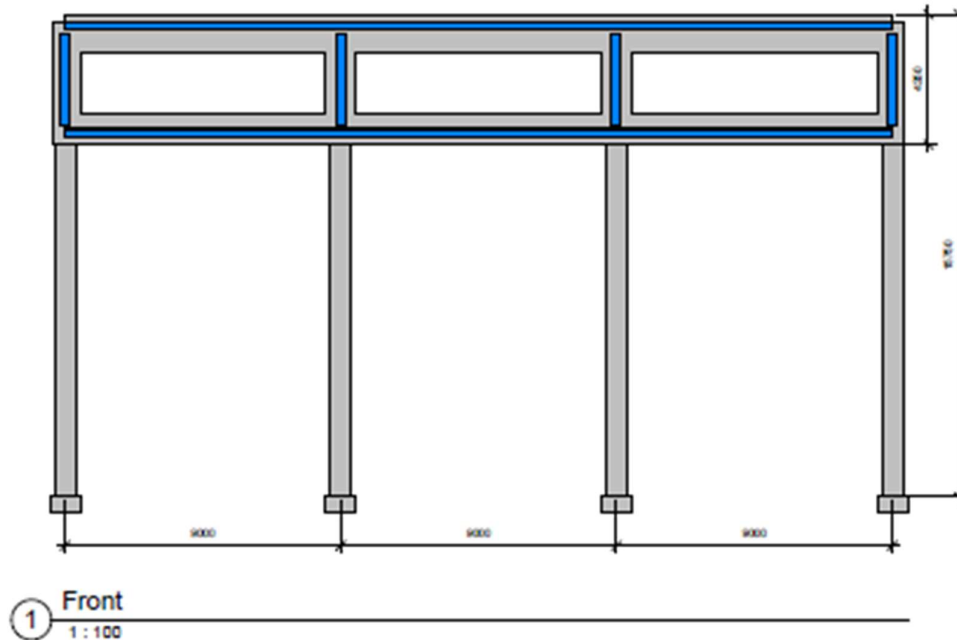


DETALJ 1 - SNITT LEDEKONSTR.
1 : 50

Figur 7: Snitt av opprinnelig ledekonstruksjon i Stad skipstunnel. Kilde: [15].

2.2.1 Konsept 1

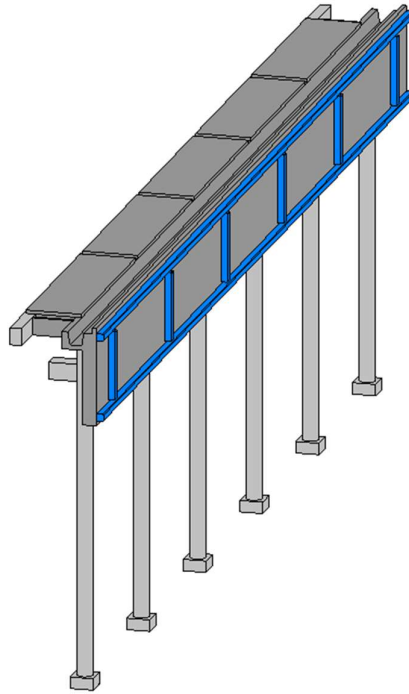
Konsept 1 er basert på størrelser fra Teknisk forprosjekt og planlegges som en plastøpt konstruksjon [1]. Frontskjørtet blir høyere for å kunne montere nedre fenderrad. Søylar med diameter 0,7 meter på plastøpte fundamentar. Øvre tverrbjelke støpes til bakkantbjelke og har opplegg på søyle. Dekket støpes 0,25 meter tykt, til utsiden av frontskjørtet. Dekket vil ha opplegg på øvre tverrbjelker med spennlengde 9 meter. Frontskjørtet festes til øvre tverrbjelker. Det er mulighet for utsparinger i frontskjørtet for å redusere betongmengde. Nedre bjelke plasseres midt mellom søylar for å redusere spenn på nedre del av frontskjørtet, og boltes til fjellveggen. Øvre tverrbjelke tenkes å videreføre støtlaster på øvre fenderrad til bakkantbjelke. Visualisering i Figur 8. Mer detaljerte tegningar i vedlegg V10.



Figur 8: Snitt fra forside av kaikonstruksjonen, Konsept 1. Fra Revit.

2.2.2 Konsept 2

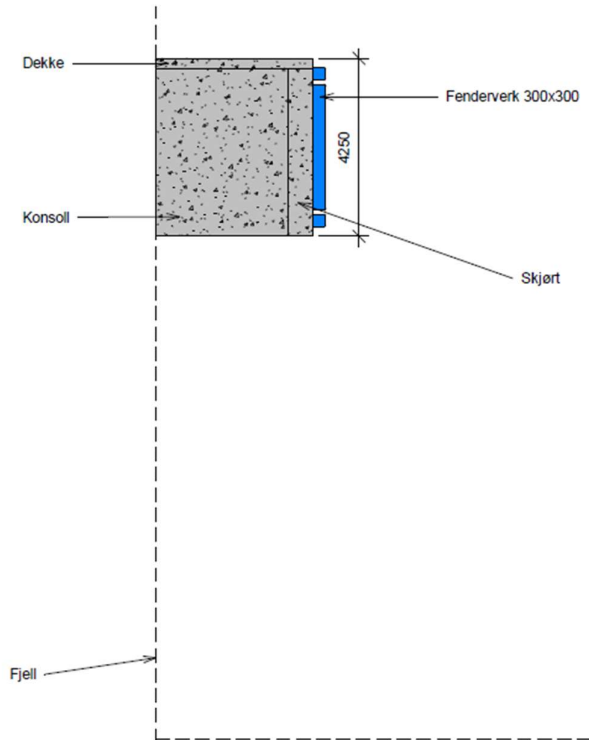
Konsept 2 er en videreutvikling av konsept 1 og planlegges som element som sammenstøpes etter montering. Søyleelement med diameter 0,7 meter monteres på et plaststøpt fundament. Dekkeelementet produseres med tykkelse 0,15 meter, påstøp 0,1 meter, bredde 2,4 meter og lengde 9 meter. Dekkeelement monteres på bakkantbjelke og bjelke over søyler. Frontskjortelement er sammenstøpt med bjelke som er opplagret på søylene. Bjelken produseres med en v-profil som støpes ut samtidig med påstøp av dekket. Frontskjortelementet planlegges utført som henholdsvis to element som vekselvis monteres over søylene, element A med lengde 22 meter og B med lengde 5 meter. Dette er tilsvarende løsning som er beskrevet i Teknisk forprosjekt [1]. Tverrbjelker monteres i øvre og nedre del og er med på å ta opp støtlaster på fronskjørtet. Øvre tverrbjelke er planlagt med v-profil som støpes ut samtidig med påstøp av dekke. Visualisering i Figur 9. Mer detaljerte tegninger i vedlegg VII.



Figur 9: 3D visualisering av kaikonstruksjon som element løsning, Konsept 2. Fra Revit.

2.2.3 Konsept 3

I konsept 3 er det valgt en løsning med konsoller hver 9 meter som festes til fjellet med et fjellanker. Dekket opplagres på konsollene og vil få spennlengde 9 meter og tykkelse 0,25 meter. Frontskjørtet festes til konsollene i fremkant. Det er mulighet for utsparinger i frontskjørtet for å redusere betongmengden. Visualisering i Figur 10. Mer detaljerte tegninger i *vedlegg V12*.

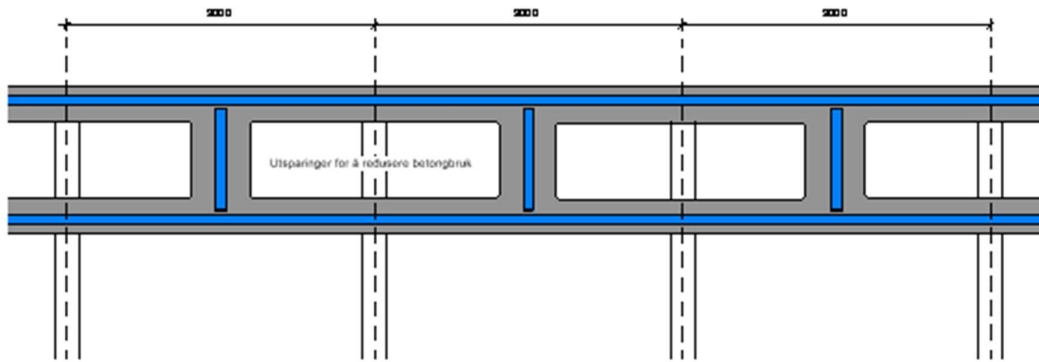


1 Section 1
1 : 100

Figur 10: Snitt av kaikonstruksjon med konsoll løsning, Konsept 3. Fra Revit.

2.2.4 Konsept 4

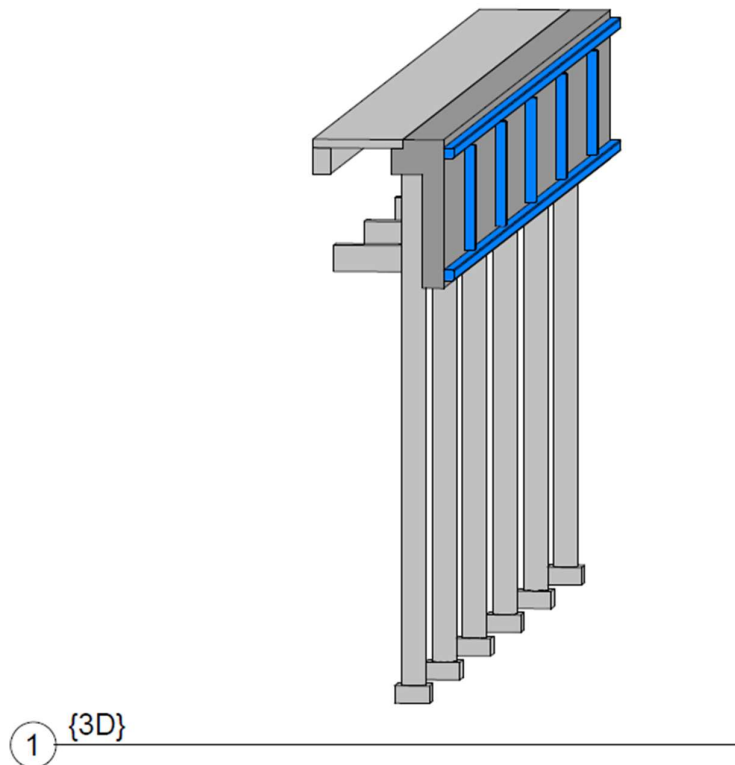
Konsept 4 bygger på konsept 1 og 2. Konstruksjonen planlegges som en plasstøpt konstruksjon, med søyler som element. Dekket støpes som en enveisplate med spenn i korteste retning. Krefter fra skipsstøt vil bli videreført gjennom dekket ved treffpunkt i øvre fenderrad og gjennom støttebjelke i nedre del av frontskjørt. Det er mulighet for utsparinger i frontskjørtet for å redusere betongmengden. I forskjell fra tidligere konsept er vertikale fendere plassert med en offset på 4,5 meter i forhold til søyler. Dette for en mer direkte overføring av krefter til støttebjelke ved støt på vertikale fendringer. Visualisering i Figur 11. Mer detaljerte tegninger i vedlegg V13.



Figur 11: Snitt fra forside av kaikonstruksjon med utsparinger, Konsept 4. Fra Revit.

2.3 Beskrivelse av valgt konstruksjon

Videre beskrivelser tar utgangspunkt i konsept 4 uten utsparinger. Konstruksjonens bredde er satt til 3,75 meter på begge sider fra tunnelvegg. Med fendring vil total bredde være 4,05 meter. Konstruksjonens totale lengde er 1700 meter. Visualisering av valgt konstruksjon i Figur 12 og tegninger i vedlegg V13.



Figur 12: 3D visualisering av valgt kaikonstruksjon uten utsparinger, Konsept 4. Fra Revit.

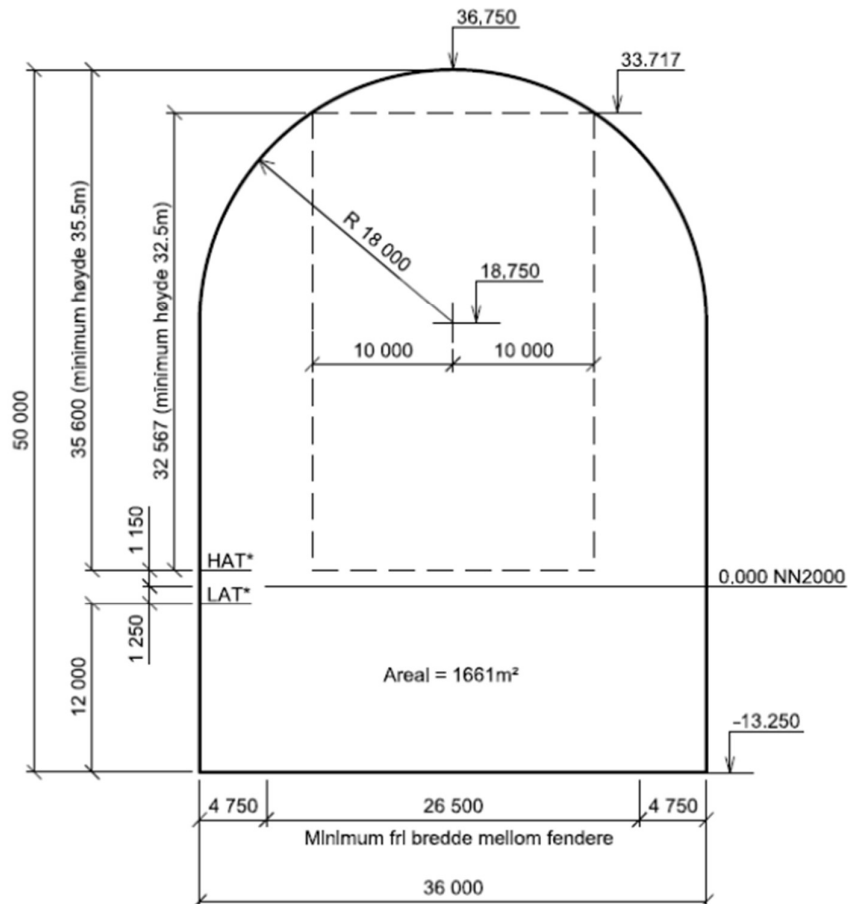
2.3.1 Referansehøyder

Det benyttes høydereferanse Normalnull 2000 (NN2000). Laveste lavvann omtales som laveste astronomiske tidevann (LAT), og høyeste høyvann omtales som høyeste astronomiske tidevann (HAT), presentert i Tabell 2.

Tabell 2: Vannstands nivåer – Kilde: [1].

Vannstands nivå (m)	Måløy	Moldefjorden	Kjøde	Ålesund
HAT	2,26	2,30	2,36	2,41
Normalnull (NN) 2000	1,19	-	-	1,26
LAT/Skjøkartnull	0,00	0,00	0,00	0,00

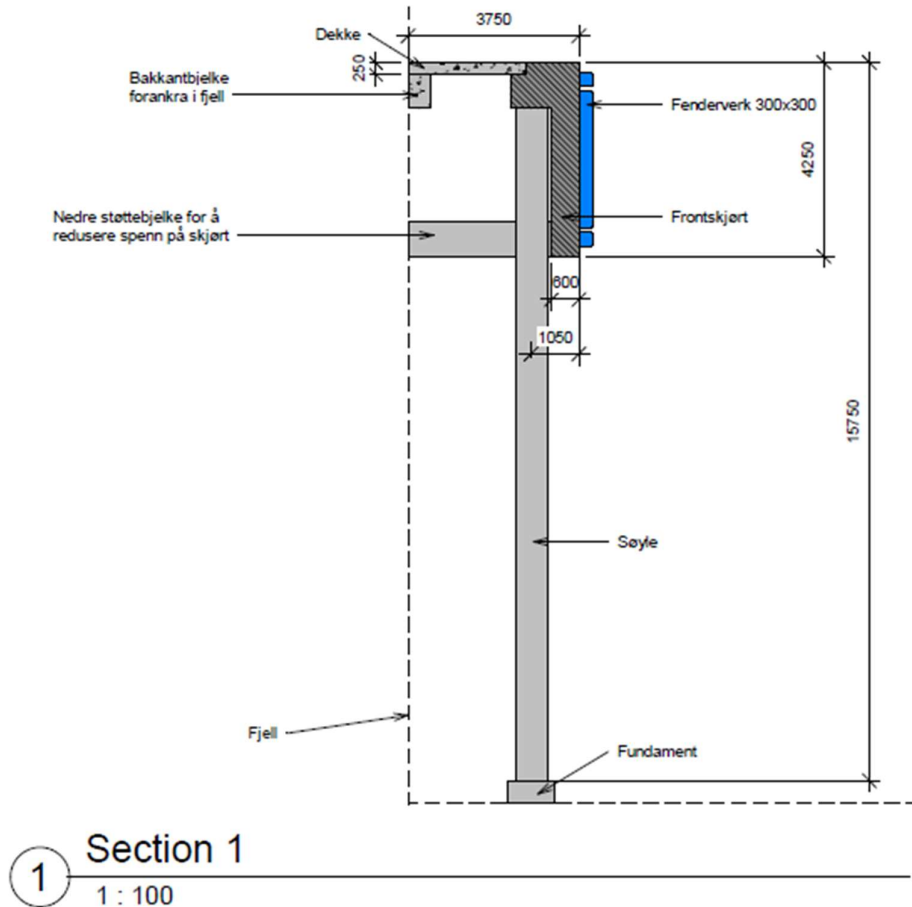
For Stadtunnelen antas det at LAT er 1,25 meter under NN2000, og HAT er 1,15 meter over NN2000. Tunnelen skal ha en høyde på 50 meter og bredde på 36 meter. Krav til dybde ved LAT er på 12,0 meter vannstand. Bunnen av tunnelen blir på kote -13,25 meter i referanse til NN2000. Ledekonstruksjonen vil være delvis neddykket i sjøvann, der søyler er helt neddykket, mens dekke, skjørt og bjelker er i skvalpesonen. Ved LAT ligger vannstanden på 13,25 meter. Da er vannet på høyde med underkant av kaiskjørtet som er på 12 meter. Ved HAT er vannstanden 14,4 meter, mens overkant av konstruksjonen er på 16,25 meter. Dette vil få betydning for valg av overdekning i betongen. Tallgrunnlag er hentet fra Teknisk forprosjekt [1]. Figur 13 viser tunneltversnittet og illustrerer referansehøydene. Den angir også blant annet minimum fri bredde mellom fender på 26,5 meter.



Figur 13: Referansemål på tunnelverrsnittet til Stad skipstunnel. Kilde: [15].

2.3.2 Bakkantbjelke

Bakkantbjelken plasstøpes med forankringer til fjell og skal ta laster fra dekket. Denne er ikke dimensjonert i oppgaven. Illustrert i Figur 14.



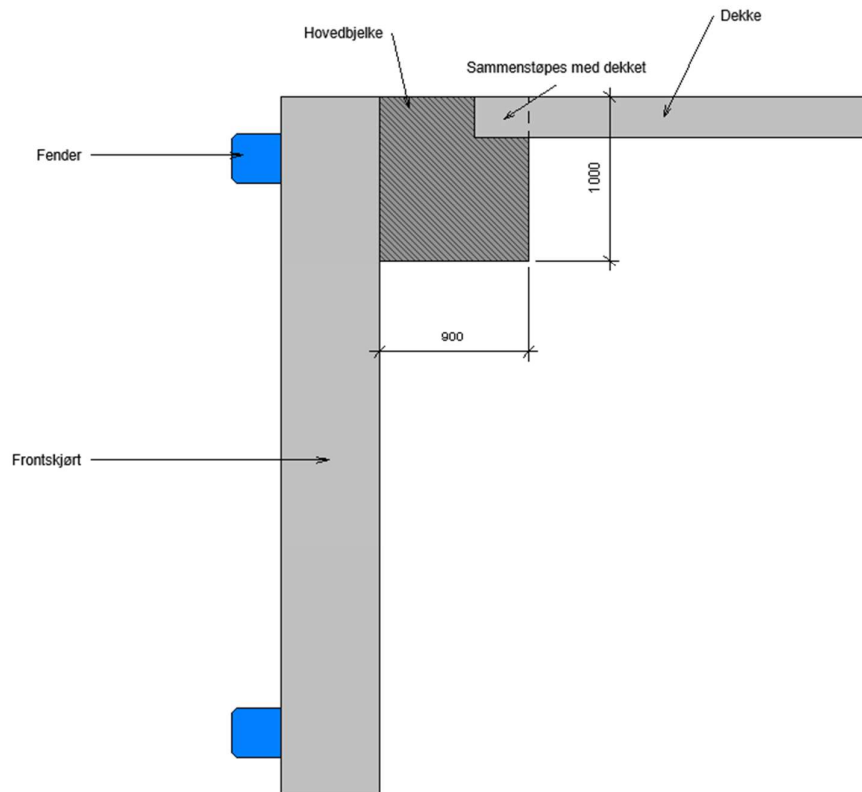
Figur 14: Snitt av kaikonstruksjon, Konsept 4. Fra Revit.

2.3.3 Dekke

Dekket dimensjoneres som en plasstøpt enveisplate som viderefører de vertikale lastene til bjelkene. Dekket skal opplagres på bakkantbjelken og hovedbjelken. De vertikale lastene fra dekke vil bestå av egenvekt, nyttelast og rømningslast. I en ulykke må dekke være dimensjonert for å være rømningsvei og tåle en brannbil. De horisontale kreftene fra skip som støter mot fendere på frontskjørtet videreføres inn i dekket. Tykkelsen er satt til 0,25 meter og spennlengden til 2,4 meter (Illustrert i Figur 14).

2.3.4 Hovedbjelke

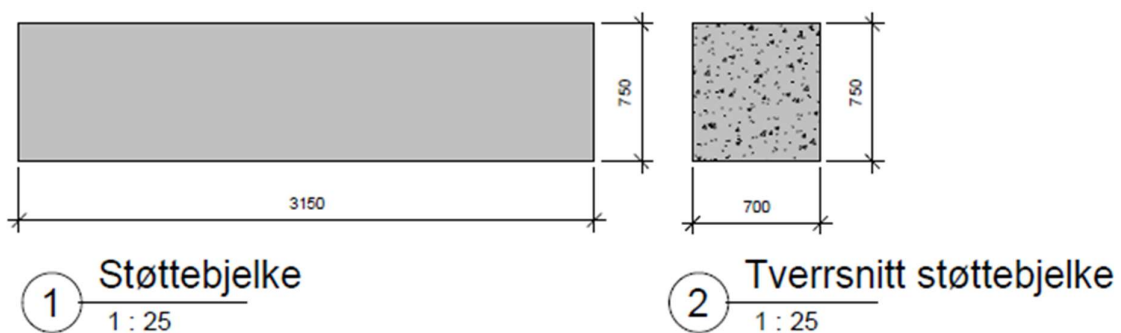
Bjelken skal videreføre egen- og nyttelast fra dekke til søylene, og støtlaster fra kaiskjørtet til dekket. Bjelken er tenkt monolitisk innstøpt med frontskjørtet, men er forenklet beregnet som en egen del. Tverrsnittet av bjelken vil være 1 meter høyt og 0,9 meter bredt. Bjelken dimensjoneres for å tåle bortfall av vilkårlig søyle (Illustrert i Figur 15).



Figur 15: Snitt av hovedbjelke (skravert), konsept 4. Fra Revit.

2.3.5 Støttebjelke

Støttebjelken viderefører de horisontale støtlaste fra skipet til fjellveggen. Bjelken er fast innspent i nedre del av frontskjørtet, sentrisk plassert mellom søyler. I innspenning til fjell er det antatt fastlager. Tverrsnittet er antatt 0,75 meter høyt og 0,7 meter bredt, som vist i Figur 16.



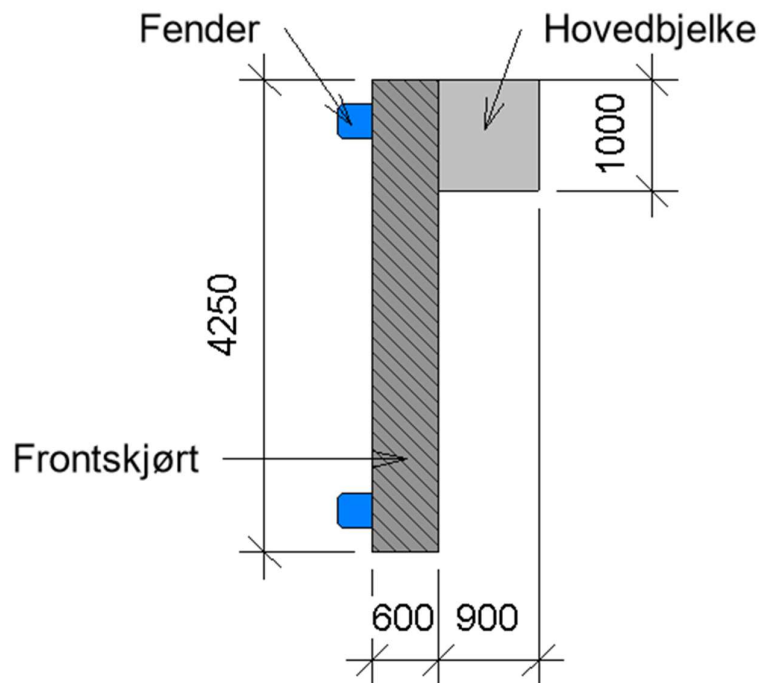
Figur 16: Dimensjoner på støttebjelke, konsept 4. Fra Revit.

2.3.6 Søyler

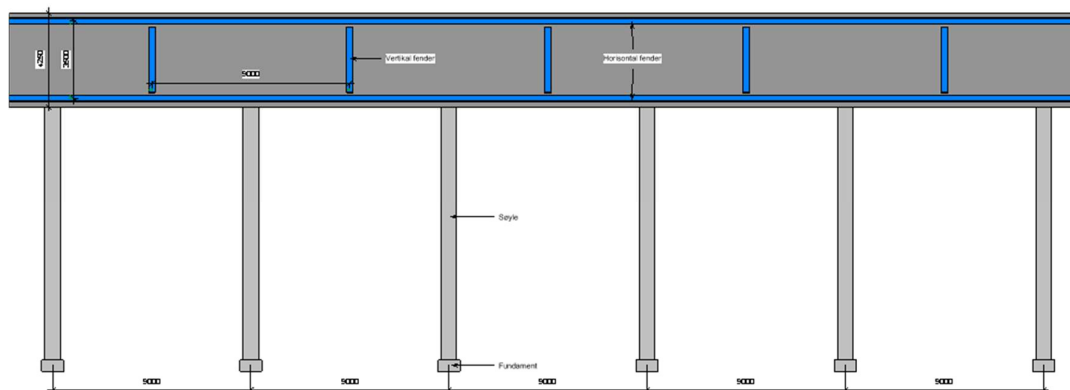
Søylene skal videreføre kreftene fra bjelkene ned til fundamentet. Søylene dimensjoneres også for bølge- og strømlast. Søylene er antatt fast innspent i topp og bunn med en diameter på 0,7 meter og lengde på 15,575 meter. Lengden er konservativt anslått og gir høyde for tilpasning av hovedbjelke. Konstruksjonen skal tåle bortfall av en vilkårlig søyle (Illustrert i Figur 14).

2.3.7 Frontskjørt

Frontskjørtet skal videreføre de horisontale kreftene til dekke og støttebjelke. På utsiden av frontskjørtet skal det monteres marine fendere. Frontskjørtet dimensjoneres som en toveisplate med opplager på støttebjelken og på hovedbjelken (Illustrert i Figur 17 og Figur 18).



Figur 17: Snitt av frontskjørt (skravert), konsept 4. Fra Revit.



Figur 18: Snitt fra framside av konstruksjon uten utsparinger, konsept 4. Fra Revit.

2.4 Materialer

2.4.1 Betong

Betong kan ta opp store krefter og kan støpes i mange former og dimensjoner. Materialet har i tillegg høy bestandighet og brannmostand. Betong krever i tillegg liten grad av vedlikehold og har lang levetid.

Betong er satt sammen av tilslag, vann, sement og kjemiske tilsetningsmaterialer. Tilslaget tilsvarer omtrent 70% av betongen, mens de resterende 30% består av vann, sement og kjemiske tilsetningsmaterial. Blandingsforholdet til delmaterialene avgjør betongens styrke og bestandighet. Betongens densitet avhenger av sammensetningens masseforhold og porevolum. Ut ifra betongens egenskaper deles den inn i ulike klasser. Dette gjør det enklere å velge riktig type betong til prosjektet [16].

2.4.1.1 Pris på betong

Det er hentet inn budsjettpris på B45 fra Dyrøy Betong som er brukt til beregning av pris for konstruksjonen, presentert i Tabell 3.

Tabell 3: Pris for betongklasse B45. Kilde: [17].

Leverandør	Pris for 1 m ³ betong
Dyrøy Betong	1747 kr

2.4.1.2 Tilslag

Tilslaget i betongen består av stein-, grus- og sandmaterialer. Tilslagsmaterialene er framstilt gjennom knusing av naturlige forekomster som for eksempel morener. Tilslaget skal være bestandig og høy. Tilslaget bør ha lavt humus-, slam og leirinnhold. Kornene bør ha kubisk eller rund form og være godt korngradert. God korngradering betyr at tilslaget representerer alle kornstørrelser slik at det lite hulrom som må tettes av sement [10]. Krav til tilslagsmaterialer er gitt i NS-EN 12620.

2.4.1.3 Sement

Blanding mellom vann og sement binder sammen sand- og steinmaterialene og kalles sementpasta. Massen stivner gradvis til sementlimet senere oppnår sin styrke og fasthet. Den første fasen kalles størkning, mens den etter hvert går over til herdning [10]. Krav til sement som skal brukes er gitt i NS-EN 197-1.

2.4.1.4 Kjemiske tilsetningsmidler

For å oppnå ulike egenskaper i betong brukes ulike tilsetningsstoffer. Tilsetningsstoffene er finfordelte materialer som tilsettes betongen under betongproduksjonen. Betongen skal kun inneholde tilsetningsmidler som tilfredsstiller kravene i NS-EN 934-2. Vi deler de kjemiske tilsetningsstoffene i betong i 5 hovedkategorier presentert i Tabell 4 [16].

Tabell 4: Oversikt over de kjemiske tilsetningsmidlene. Kilde: NS-EN 934-2:2009+A1:2012, 3.2.

Klasse	Effekt
Akselererende	Raskere herdeprosess
Plastiserende	Reduserer vannmengden
Retarderende	Tregere herdeprosess
Injiserende	Øker flyteevnen
Luftinnførende	Øker luftinnholdet

2.4.1.5 Skader på betongkonstruksjoner

Betong brytes ned ved for høy påkjenning fra miljøet rundt. Feil valg av betongklasse vil føre til at betongkvaliteten er uegnet miljøet konstruksjonen står i. Dette vil resultere i at betongens egenskaper svekkes. Typiske skader på betongkonstruksjoner er [16]:

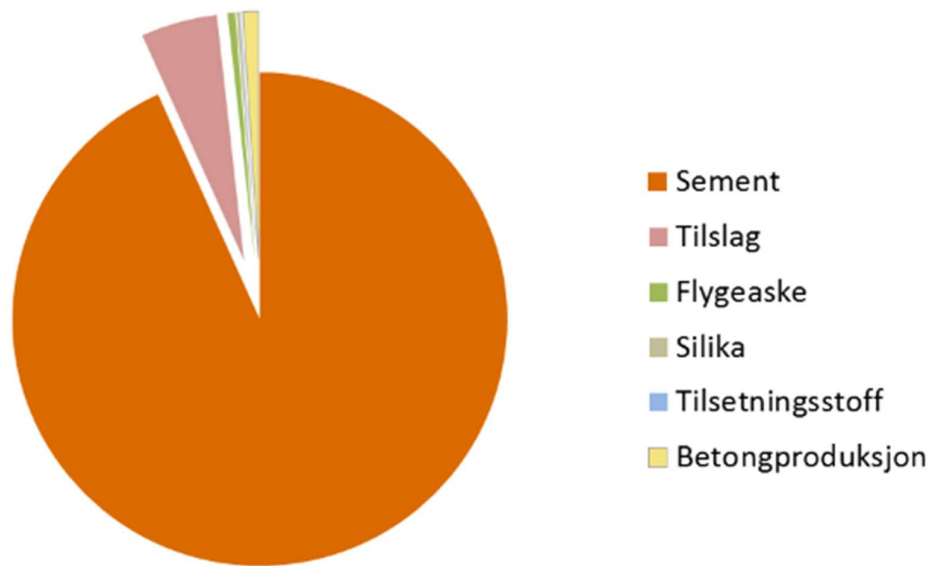
- Karbonisering
- Armeringskorrosjon
- Kloridinitiert armeringskorrosjon
- Frostangrep

For å unngå skader på betongkonstruksjonen må man ta hensyn til flere ulike faktorer. Forebyggende tiltak som må tas hensyn til er [16]:

- God utførelse
- Tilstrekkelig overdekning
- Lavt v/c-tall
- Vedlikeholdsplan

2.4.1.6 Karbonavtrykk

Sement står for den største delen av klimagassutslippet under betongproduksjon. På verdensbasis står sementproduksjon for 5-8% av verdens samlede klimagassutslipp. Reduksjon av energiforbruket og klimagassutslipp ved sementproduksjon har blitt jobbet mye med de siste 10-20 årene. Norskprodusert portlandsement har et totalt klimautslipp på 750 kg CO₂-ekv. per tonn sement. I andre land er det vanlig at tallet overstiger 900 kg CO₂-ekv. per tonn portlandsement [18]. Figur 19 illustrerer klimagassutslippet fra de ulike bestanddelene og produksjonen for en typisk konstruksjonsbetong.



Figur 19: Klimagassutslipp for en typisk konstruksjonsbetong. Kilde: [18].

2.4.1.7 EPD – Environmental Product Declaration

EPD er en kortfattet miljødeklarasjon som oppsummerer miljøprofilen til en komponent, produkt eller tjeneste. En EPD lages ut ifra hele livsløpsanalysen som deles i ulike systemgrenser. Systemgrensene skiller utslippet mellom de ulike prosessene i livsløpsanalysen [19]. Systemgrensene som er tatt med i denne oppgaven er:

- A1: Råmaterialer
- A2: Transport
- A3: Tilvirkning
- A4: Transport

2.4.2 Armeringsstål

Armeringsstål benyttes som innstøpte stenger i betongen for å bedre dens tekniske egenskaper. Betongens lave strekkstyrke kompenseres ved bruk av armeringsstål. Den største delen av armeringsstålet som benyttes i dag er kamstål. Armeringsstål tåler store strekktøyninger og begrenser rissvidde. Armeringen gir også betongkonstruksjonen høyere strekkstyrke og en mer duktil oppførsel. Armeringsstålet er helt omsluttet av betong forankret med direkte heft mellom stål og betong. Vi deler betongtverrsnittet inn i en trykk- og strekksone. Armeringen gjør betongen mer anvendbar, formbar og bestandig. Samspillet mellom armeringsjernet og metallet gjør at produktet blir attraktivt, og er i dag et av verdens mest brukte byggematerialer [16].

Det finnes to ulike kvaliteter av armeringsstål som blir betegnet med B500B og B500C hvor den siste bokstaven angir duktiliteten på stålet [20]. I dette prosjektet er det valgt å benytte stål kvalitet B500C for alle konstruksjoner.

2.4.3 Materialfaktorer

For å gjøre rede for usikkerhet knyttet til materialets kapasitet brukes materialfaktorer som en sikkerhetsfaktor. Materialfaktoren tar også hensyn til avvik fra forutsatte material- og konstruksjonsegenskaper. Materialfaktorene er listet opp i Tabell 5.

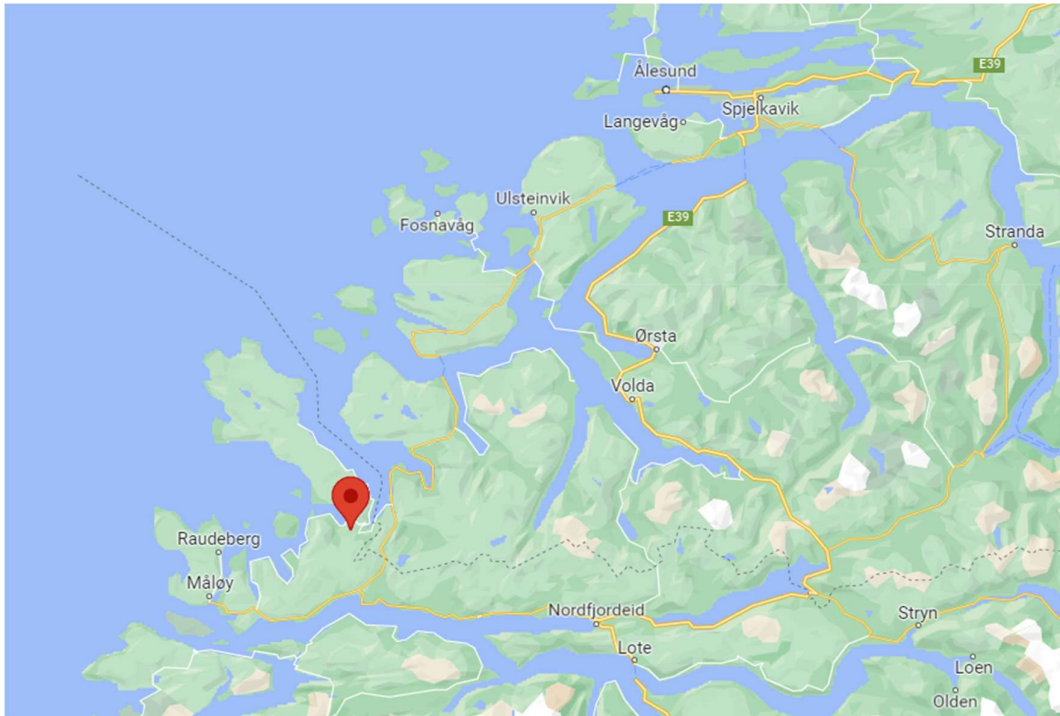
Tabell 5: Tabell 2.1N. Kilde: [3].

Materiale	Materialfaktor		
	Bruddgrensetilstand (ULS)	Bruksgrensetilstand (SLS)	Ulykkestilstand (ALS)
γ_c for betong	1,5	1,0	1,0
γ_s for armeringsstål	1,15	1,0	1,0

2.5 Område og grunnforhold

2.5.1 Område

Skipstunnelen skal bygges i Stad Kommune og vil gå igjennom Stadhalvøya fra Moldefjorden til Kjødøpollen. Stad kommune i Vestland fylke ligger på nordsiden av Nordfjorden [21]. Figur 20 viser hvor Stad Skipstunnel skal bygges.



Figur 20: Kartutsnitt med markering for plassering av lokasjon for prosjektet Stad skipstunnel. Fra Google Maps.

2.5.2 Grunnforhold

Multiconsult har på oppdrag fra Kystverket foretatt kjerneboring fra begge sider av tunnelen, hvor det i alt er boret 791 meter berg. Det ble først boret 150 meter inn fra Kjødipollen før kjerneboret satte seg fast i berget. Boringen ble startet opp på nytt fra den andre siden, i Moldefjorden. Der ble det boret 656,7 meter inn i fjellet. Boreprøvene viste at bergartene i borehullet var ulike typer av gneiser, vekslende mellom øyegneis, glimmergneis og amfibolittisk gneis [22]. Det er derfor rimelig å anta at det i stor grad vil være berg der tunnellopet skal gå.

2.6 Dimensjoneringskriterier

2.6.1 Dimensjonerende brukstid

Brukstidskategori 5 legges til grunn for konstruksjonene, som gir dimensjonerende brukstid 100 år gitt i Tabell 2.1 – Veiledende dimensjonerende brukstid [23].

2.6.2 Fasthetsklasser

Betong deles inn i klasser etter trykkfasthet målt i N/mm^2 eller MPa 28 døgn etter støpning av prøvestykket [16]. Betongens fasthet påvirkes av faktorer som v/c-tall, sementtype, tilslag og

tilsetningsstoff. Fasthetsklasser er definert i Tabell 3.1 [3]. Fasthetsklasse for alle konstruksjoner er satt til B45.

2.6.3 Eksponeringsklasser

Betong deles inn i eksponeringsklasser etter miljøpåvirkning fra omgivelsene rundt en betongkonstruksjon. Eksponeringsklassen skal definere miljøet rundt, for eksempel om konstruksjonen er i direkte eller indirekte kontakt med sjøvann. De ulike eksponeringsklassene gir ulike krav til minusoverdekning og materialsammensetning for betongen som skal benyttes [16]. Eksponeringsklassene er definert i Tabell 4.1N [3]. Utdrag i Tabell 6. Alle konstruksjonsdeler settes til eksponeringsklasse XS3.

Tabell 6: Utdrag av Tabell 4.1 for eksponeringsklasser. Kilde: [3].

4. Korrosjon framkalt av klorider fra sjøvann		
XS1	Utsatt for luftbårne klorider, men ikke i direkte kontakt med sjøvann	Konstruksjoner nær eller på kysten
XS2	Permanent neddykket	Deler av marine konstruksjoner
XS3	Tidevannssoner, skvalpesoner og sprutsoner	Deler av marine konstruksjoner

2.6.4 Bestandighetsklasser

Hensikten med konstruksjoner som utføres etter Norsk Standard er å ha en lang levetid før det er behov for vedlikehold. Betong er i utgangspunktet et bestandig materiale, men har begrenset motstandsevne mot syreangrep. Betongens tetthet henger sammen med bestandigheten. Vi deler derfor betong inn i bestandighetsklasser hvor det er krav til største masseforhold og minste bindemiddelmengde. For betong med sterk miljøeksponering er bestandighetsklassen mye viktigere enn fasthetsklassen for levetiden [16]. Bestandighetsklassene er definert i NS-EN 206:2013+A2+NA, Tabell NA.15 [24]. Bestandighetsklasser for alle konstruksjoner er satt til MF40.

2.6.5 Pålitelighetsklasse

For å klassifisere konstruksjonens konsekvenser ved et sammenbrudd av hele eller deler av konstruksjonen deler vi inn i pålitelighetsklasser. I konstruksjonsberegningene skal pålitelighetsklasse være angitt [25]. Tiltaket plasseres i pålitelighetsklasse 2 etter Tabell 7.

Tabell 7: Pålitelighetsklasse fra Tabell NA.A1(901). Kilde: [23].

Pålitelighetsklasse	Bruddkonsekvens	Eksempler på konstruksjoner
1	Liten	Småhus, rekkehus, mindre lagerbygg, landbruksbygg, kaier og fortøyningsanlegg for sport og fritid.
2	Middels	Større boligbygg, skoler, kontor- og forretningsbygg, institusjonsbygg, fiskerihavner, kaier, industrianlegg og tårn.
3	Stor	Byggverk for større menneskemengder: tribuner, kinosaler, sportshaller, kjøpesentre og lignende. Dammer, veg- og jernbanebruer, marine konstruksjoner for petroleumsindustri.
4	Særlig stor	Atomreaktor. Lager for radioaktivt avfall

2.6.6 Overdekning

Overdekning fungerer korrosjonsbeskyttende for armeringsstålet i betongen og det stilles krav til overdekning mellom armering og betongoverflate. Overdekningen bestemmes etter valgt eksponeringsklasse og Tabell NA.4.4N [3]. Overdekning for alle konstruksjonsdeler er listet opp i Tabell 8:

Tabell 8: Overdekning for konstruksjonsdeler.

Element	Armering
Søyle	60 mm ± 10 mm
Hovedbjelke	60 mm ± 10 mm
Underkant dekke	60 mm ± 10 mm
Overkant dekke	60 mm ± 10 mm
Frontskjørt	60 mm ± 10 mm
Støttebjelke	60 mm ± 10 mm

2.6.7 Armeringsregler

Minimum armeringstverrsnitt er gitt i EC2, NA.9.2.1(1) [3].

Maksimumsarmering armeringstverrsnitt er gitt i EC2, NA.9.5.3(3) [3].

Krav til minimums skjærarmering er gitt i EC2, 6.2.1(4) [3].

Fri avstand mellom armeringsstenger er gitt i EC2, NA.8.2(2) [3].

Krav om bøylearmering er gitt i EC2, 9.5.3(1) [3].

Minste armeringsdiameter er gitt i Håndbok N400 – Bruprosjektering [2].

2.6.8 Nedbøyningsberegning

En vanlig og nødvendig kontroll av konstruksjonene i bruksgrensetilstand er beregning av nedbøyning. Er nedbøyning utenfor akseptabel verdi kan reduksjon av nedbøyning gjøres ved å øke betong- og/eller armeringstverrsnittet [26]. Maksimal nedbøyning er gitt i EC2, 7.4.1(4) [3].

2.6.9 Rissviddekontroll

Det er krav til minste rissvidde for at konstruksjonen ikke skal få en uakseptabelt utseende eller svekket bestandighet eller funksjon. Grenseverdi for rissvidde bestemmes ut ifra eksponeringsklassen og gitt i Tabell NA.7.1N [3]. Maksimal tillatt rissvidde w_{\max} settes til 0,35.

2.6.10 Tap av søyle

Konstruksjonen dimensjoneres for bortfall av vilkårlig søyle. Dimensjonerende situasjoner for laster i ulykkestilstand (ALS) er hentet fra Lasthåndbok KV Tabell 3.7.1 [13]. Konstruksjonen sjekkes i bruddgrensetilstand.

2.7 Laster

2.7.1 Lastvirkninger og kapasitet

Ved dimensjonering av konstruksjonen må vi beregne lastens virkning på konstruksjonen. Konstruksjonen som skal dimensjoneres er nødt til å ta opp lastene uten at den kollapser. Ved dimensjonering av konstruksjoner skal det påvises at dimensjoneringsreglene tilfredsstillers kravene i de forskjellige grensetilstandene. Kombinasjoner hentes fra EC0, grensetilstandene er [23]:

- Bruddgrensetilstand (ULS) – I denne grensetilstanden bestemmes konstruksjonens kapasitet mot brudd ved beregning av materialenes dimensjonerende fastheter og tøyningsegenskaper.
- Bruksgrensetilstand (SLS) – I denne grensetilstanden skal det påvises at konstruksjonen tilfredsstillers krav knyttet til dens formål og bruk for hele brukstiden som er satt

- Ulykkestilstand (ALS) – I denne grensetilstanden bestemmes konstruksjonens kapasitet i motstand ved for eksempel eksplosjon eller kollisjon. Konstruksjonen skal dimensjoneres for tap av et søylepunkt.

2.7.2 Permanente laster

De permanente lastene er til stede til enhver tid. Egenlast er konstruksjonens egenvekt og klassifiseres som en permanent last. Kaikonstruksjonen er kun bestående av armert betong. Egenlasten beregnes ved tyngdetetthet for armert betong $\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3$ fra Tabell A.1 [27].

2.7.3 Variable laster

De variable lastene varierer med tiden. Følgende variable laster vurderes i oppgaven:

- Nyttelast ved rømning
- Trafikklast ved ulykke
- Støtlast ved kollisjon
- Bølgelast
- Seismiske laster

2.7.4 Lastkombinasjoner i bruddgrensetilstand (ULS)

Lastkombinasjoner i bruddgrensetilstand beregnes etter EC0. I EC0 fins tallverdier for lastfaktor g og ligningene 6.10a og 6.10b hvor den minst gunstige av ligningene er den dimensjonerende. Lastfaktoren g inkluderer kombinasjonsfaktorene x og y som tar hensyn til redusert sannsynlighet for at de variable lastene treffer samtidig [25]. Ligning 6.10a og 6.10b er gitt i tabell NA.A1.3(B) [23]. Lasthåndboken KV er brukt for å finne relevante lastkombinasjoner [13].

2.7.5 Lastkombinasjon i bruksgrensetilstand (SLS)

Lastkombinasjon i bruksgrensetilstanden må beregnes for å sikre at kaikonstruksjonen opprettholder sin funksjonsdyktighet med hensyn til forskyvninger, svingninger og sprekkvidde (rissvidde). Vi deler bruksgrensetilstanden inn i ulike basissituasjoner etter hvor ofte lastene forekommer. De ulike basissituasjonene er karakteristisk, ofte forekommende og tilnærmet permanent [25]. Lastfaktorer og relevante kombinasjoner for bruksgrensetilstanden er hentet fra Lasthåndbok KV, Tabell 3.7.1 [13].

2.7.6 Lastkombinasjoner i ulykkestilstand (ALS)

Lastkombinasjon i ulykkestilstand må beregnes for å sikre at kaikonstruksjonen opprettholder sin styrke og motstår betalastningen fra kreftene ved situasjoner med hendelser med lav sannsynlighet for å opptre.

For ulykkestilstand skiller vi mellom to ulike situasjoner; ulykkes- og seismisk situasjon. Lastfaktorer i ulykkestilstand er gitt i Lasthåndbok KV, Tabell 3.7.1, og relevante kombinasjoner er gitt i Lasthåndbok Tabell 3.7.2 [13].

2.7.7 Kombinasjonsfaktorer

For å ta hensyn til den reduserte sannsynligheten til at de variable lastene opptrer samtidig med sin maksimale verdi bruker vi kombinasjonsfaktorer (ψ). Verdier for ψ -faktor finnes i Tabell NA.A1.1 [23].

- ψ_0 – kombinasjonsverdi
- ψ_1 – ofte forekommende verdi
- ψ_2 – tilnærmet permanent verdi

Disse produksjonsfaktorene gjelder kun for de variable lastene. For de permanente lastene brukes reduksjonsfaktoren ξ gitt i Tabell NA.A1.2(B) [23].

2.8 Prefabrikkerte betongelement

Konstruksjonsdeler i betong som støpes i fabrikk kalles prefabrikkerte betongelementer, også omtalt som bare prefab eller element. Det som kjenner prefabrikkerte elementer, er konstruksjoner som kan standardiseres og linjeproduseres. Produksjonen kan foregå innendørs under kontrollerte forhold, noe som gjør at sluttresultatet oftest blir likt fra gang til gang. Dette tillater også at produksjonen kan standardiseres, som igjen gjør at produksjonen av elementene går fortere. Prefabrikkerte elementer kan brukes til dekkelementer, søyler, bjelker, trapper og tak- og fasadeelementer. Etter produksjon på fabrikk blir elementene fraktet til byggeplass for montering. Prefabrikkerte elementer brukes som regel der byggeplassen for eksempel har utfordringer med å plassere stillas, for å begrense stopp i fremdriften og for å spare tid på alt forarbeidet som kreves [12].

Betongelementer er dyrere å kjøpe og brukes mest for større prosjekter der det er behov for mange elementer [28]. Bruk av prefabrikkerte element er spesielt effektiv når det gis mulighet til å bygge mange like elementer, såkalt serieproduksjon. Hva som er mest lønnsomt av prefabrikkert- eller plasstøpt element, er det vanskelig å si helt konkret. Det er fordi det finnes prosjektspesifikke krav, som kan gjøre det ene eller andre mer lønnsomt avhengig av prosjekt. Bygninger med kvadratiske etasjer og lite utsparinger og føringsveier er veldig godt egnet for betongelementer. Som regel tillater også prefabrikkerte betongelementer større spenn [29]. Plasstøpt betong er mer tilpasningsdyktig og fungerer til dels bedre der arealet avviker fra normalen. Tid er avgjørende for hvilken løsning som bør velges rent økonomisk. De prosjektene som har god tid, kan i mange tilfeller nøye seg med å plasstøpe betongen. Der hvor tiden er knapp og byggeplassen er liten, velger mange å bruke prefab som løsning. Den økte kostnaden for prefab tas igjen med tidsbesparelsene man får av redusert byggetid [29].

Montering av prefabrikkerte elementer tillater en helt annen fremgang i byggeprosjekter. Kaier er konstruksjoner som dimensjoneres for å tåle store nyttelaster, som igjen krever mye stillas dersom det skal støpes ute på byggeplass. Plasstøpt betong stiller videre krav om diverse anleggstekniske tiltak for å tilstrebe korrekt herding av betongen. På steder hvor slike konstruksjoner settes opp er forholdene ofte vanskelige, da det kan være klima som setter begrensninger for arbeidet. Der er prefabrikkerte elementer til stor hjelp fordi det eliminerer i stor grad behovet for stillas [12]. I tillegg trenger man ikke å tenke på tørketid før arbeidet kan fortsette. Montering av elementene skjer ute på byggeplass.. For at kranene på fabrikk og ute på byggeplass skal klare løftene er det satt en ca. maksvekt på 20 tonn ifølge Spenncon. Derimot kan det ifølge Port Designer's Handbook produseres langt tyngre, men det vil alltid være noen begrensninger rundt værforhold, løftekapasitet på fabrikk og ute på byggeplass, samt tilkomst fra fabrikk til byggeplass [14].

Fordeler og ulemper listes opp i Tabell 9 under.

Tabell 9: Fordeler og ulemper ved prefabrikkerte betongelement. Kilde: [12].

Prefabrikkert betong	
Fordeler	Ulemper
Kort byggetid	Strengere krav til toleranser på plassering av peler og pilarer
Mindre værømfintlig	Spesielle forholdsregler ved vinterstøp
Lettere og mindre stillasutstyr	Større krav til kranutstyr
Mulighet for standardisering mht. prosjektering og produksjon	Miljøavtrykk fra transport
Mulighet for utnyttelse av eventuell ledig kapasitet i betongelementindustrien	
God produksjonskontroll	
Mindre avfall fra produksjon som forskalingstre	

3 VERKTØY OG METODE

3.1 Dataverktøy

3.1.1 Microsoft Office

Microsoft Office er en programvarepakke med flere ulike programmer for kontorbruk. Det tilhørende programmet Microsoft Word er brukt for å sammenstille det som utgjør hoveddelen av tekst i denne oppgaven. PowerPoint er benyttet til presentasjoner. Excel er brukt for enklere beregninger.

3.1.2 Microsoft Teams

Microsoft Teams inngår også i Microsoft Office, og er blitt et naturlig verktøy for mange å bruke. Teams blir brukt for digitale møter med veiledere og eksterne samarbeidspartnere. Det har også tjent funksjonen som dokumenthotell for oppbevaring og strukturering av dokumenter og tegninger.

3.1.3 Autodesk Robot Structural Analysis Program

Robot Structural Analysis Program er en programvare for strukturelle belastningsanalyser, heretter omtalt som Robot. Robot er en del av Autodesk sine dataassisterte konstruksjonsprogram. I denne oppgaven er Robot brukt for å modellere konstruksjonen og påføre aktuelle laster for å finne reaksjonskreftene på konstruksjonen.

3.1.4 Revit

Revit er et tegneprogram fra Autodesk som brukes for å 3D-modellere, og egner seg godt for bygninger og konstruksjoner i stål, tre og betong. Dette tillater visuell illustrering av modeller til eksterne samarbeidspartnere og veiledere, som letter kommunikasjonen ut ad. Revit benyttes av arkitekter og ingeniører.

3.1.5 Mathcad

Mathcad brukes for manuelle utregninger og kontroll av dimensjoneringen av de enkelte elementene i konstruksjonen. Programmet er et levende regneark som kan gjøre tyngre regnearbeid. Her er det også mulighet for å omdefinere variabler slik at regnearkene kan brukes om igjen.

3.1.6 ISY Design

ISY Design er et dataprogram som kan brukes som beregningsverktøy for konstruksjonsteknikk [30]. Programmet er enkelt å bruke og tillater dimensjonering av konstruksjonsdeler etter Eurokode 2. I

programmet visualiseres også bygningsdelene på en oversiktlig måte. I denne oppgaven vil ISY Design bli brukt for å kontrollere manuelle beregninger i Mathcad.

3.2 Metode

Dette kapitlet skal omhandle metodene som er tatt i bruk for innhenting av relevant informasjon til oppgaven.

3.2.1 Fender

Fenderløsninger beskrevet i kapittel 2.1 ble vurdert opp mot kriteriene vedlikehold, pris og tilpasning til bakenforliggende konstruksjon. Skissert fenderløsning i Teknisk forprosjekt fremstår utfordrende med tanke på opptak av moment fra fenderne og over til betongkonstruksjonen [15]. Teknisk forprosjekt beskriver opphengte fenderpaneler med lavfriksjonspaneler. Etter tilbakemelding fra oppdragsgiver i Multiconsult ble det ytret ønske om å se nærmere på horisontalt fenderverk. Bakgrunnen for dette er de ulike båttypene som skal bruke tunnelen. Lekter under slep har lav høyde, og står i fare for å smette inn under kaiskjørt og fenderne. Småbåter kan også få utfordringer med fordelingen av fenderpanelene, som i Teknisk forprosjekt er plassert for hver 9 meter. Tilbakemeldinger fra lokalt fagmiljø kom blant annet med forslag om flytende fendring. Målet ble da å finne en fenderløsning som i hovedsak var horisontal. Delmål for valg av løsning var å finne en billigere og vedlikeholdsvennlig løsning. Aktuelle leverandører for fenderne ble kontaktet i inn og utland. Vi gikk videre med en norsk leverandør som har sin underavdeling med produksjon og ingeniører i Korea. Detaljer om fenderløsningen finnes i vedlagt tilbud fra Nordic Fender i *vedlegg V19*.

3.2.2 Revit

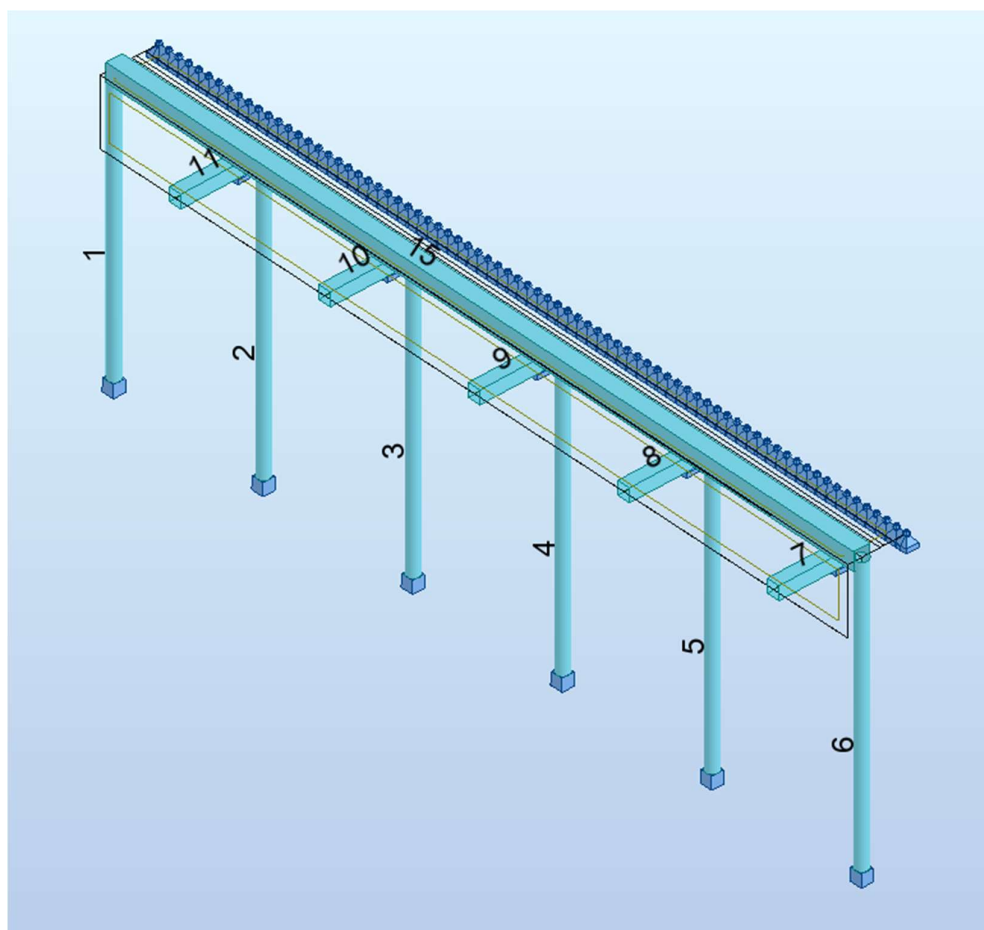
I denne oppgaven er Revit benyttet til modellering av konsepttegninger og visualisering. Det er valgt å bruke Revit for visualisering av ulike konsept både for å forstå konseptene bedre, bedre kommunikasjon med andre, og for å gjøre jobben med modellering i Robot enklere. Underveis har vi kommunisert med flere parter, og hatt flere møter der modeller av konseptene har vært helt sentrale.

Revit tillater modellering etter struktural, eller arkitekturmal, der vi har valgt arkitekturmal fordi tegningene kun er ment for visualisering. De første skissene ble tegnet med Teknisk forprosjekt som grunnlag [15]. Der hentet vi ut vannstand, tiltenkt høyde, bredde og mål ellers. For tegning i Revit brukes rutenett til å tegne etter. Her settes rutenettet opp etter de gitte målene. Dette forenkler tegneprosessen og brukes videre som underlag for opptegning av søyle, bjelker og dekke. Det samme kan gjøres i høyderetning, slik at også høydenivåer defineres. Da blir det enklere å bestemme hvilket nivå bygningsdelen skal legges til og fra. Tegning av konstruksjonen blir gjort ved hjelp av predefinerte konstruksjonsdeler i betong, hvor størrelser og tverrsnitt bestemmes. Dersom noe må endres kan

dimensjoner og egenskaper enkelt endres senere ved redigering. Etter hvert som konseptene ble utviklet, kunne modellen redigeres litt og litt.

3.2.3 Robot

Modellen baseres på konsept 4. Konstruksjonen er modellert som en komplett analytisk modell i FEM programmet Robot, i et snitt på 45 meter. Snittet er antatt representativt for å få et korrekt lastbilde på konstruksjonen. Ledekonstruksjonen er ellers totalt 1,7 kilometer lang. Snittet består av 6 søyler, dette skaper 5 spenn. På søylene hviler bjelken som er opplagret på søylen. Over dette ligger massivplate i betong, og kaiskjørt som stikker ned foran konstruksjonen. Antagelser er gjort i forhold til innspenning av de ulike konstruksjonsdelene og resultater i endepunktene av snittet er neglisjert. Figur 21 viser den analytiske modellen i Robot.



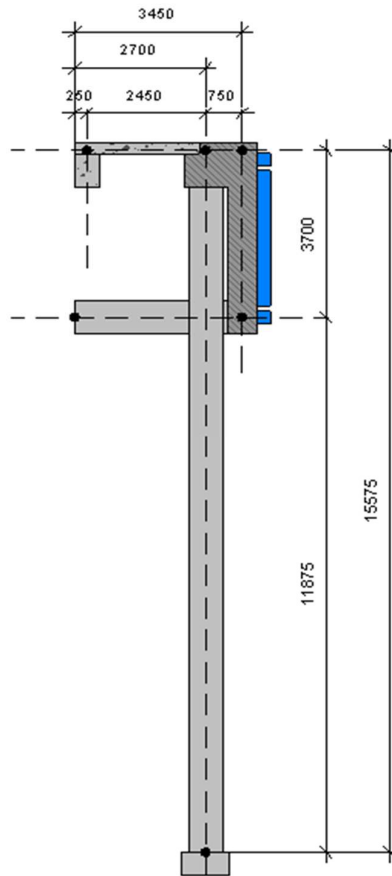
Figur 21: 3D visualisering av oppbygging av analytisk modell. Fra Robot.

Beskrivelse av konstruksjonsdelene slik de er modellert i Robot er i Tabell 10.

Tabell 10: Beskrivelse av ulike konstruksjonsdelers oppbygging i Robot.

Konstruksjonsdel	Beskrivelse
Dekke	0,25 meter tykt med en bredde på 2,45 meter. Dekket er fast innspent i hovedbjelke og fastopplager ved bergvegg. Det er her planlagt en plasstøpt konsoll langsetter tunnelen som dekket ligger på, konsollen er ikke modellert eller beregnet. Dekket er modellert kontinuerlig over snittet.
Søyle	Høyde på 15,75 meter med en senteravstand på 9 meter. Tverrsnittet er sirkulært med en diameter på 0,7 meter. Fast innspenning i bunn og topp.
Hovedbjelke	Rektangulært tverrsnitt med 0,9 meter bredde og 1,0 meter høyde. Den er fast innspent til søylene og festet til dekket og fenderskjørtet. Bjelken er modellert som en kontinuerlig bjelke over snittet på 45 meter.
Støttebjelke	Rektangulære med høyde 0,75 meter og bredde 0,7 meter. Bjelkene har fastopplager i bergvegg og fastinnspenning i frontskjørt.
Frontskjørt	3,7 meter høyt og 0,6 meter tykt. Fast innspent til hovedbjelke i topp. I bunn er dekket festet til støttebjelkene for hver 9 meter, plassert med offset på 4,5 meter i forhold til søyler. Det er i toppen av bjelken modellert et skall for å kunne feste frontskjørtet utenfor senter bjelke. Dette er igjen festet til bjelken.

Figur 22 under viser konstruksjonens senterlinjer og punkt der de er festet sammen eller opplagret, se ellers *vedlegg V13* for nærmere beskrivelse av konsept 4.



Figur 22: Snitt av konstruksjon som viser knutepunktets sammenkobling i Robot. Skisse fra Revit.

3.2.3.1 Validering av Robot-Modell

Det er foretatt en validering av Robot-Modellen ved manuell beregning av egenvekt. Dette er sammenlignet med reaksjonskreftene fra analysen, dette kan sees i Tabell 11. For komplette beregninger henvises det til vedlegg V15.

Tabell 11: Utregninger av egenvekt og summerte reaksjonskrefter fra Robot. Fra vedlegg V15 og Robot.

Totalt:
 $G_{tot} := G_{soyle} + G_{frontskjørt} + G_{hovedbjelke} + G_{dekke} + G_{støttebjelke} = 5441 \text{ kN}$

	FX(kN)	FY(kN)	FZ(kN)	MX(kNm)	MY(kNm)	MZ(kNm)
Case 1	DL1_Egenvekt					
Sum of va	0	0	5431,43	-116,82	0,29	-0,02
Sum of re	0	0	5431,43	15535,57	-122207	0
Sum of fo	0	0	-5431,43	-15535,6	122207,3	0
Check val.	0	0	0	0	0	0
Precision	1,48E-05	4,77E-17				

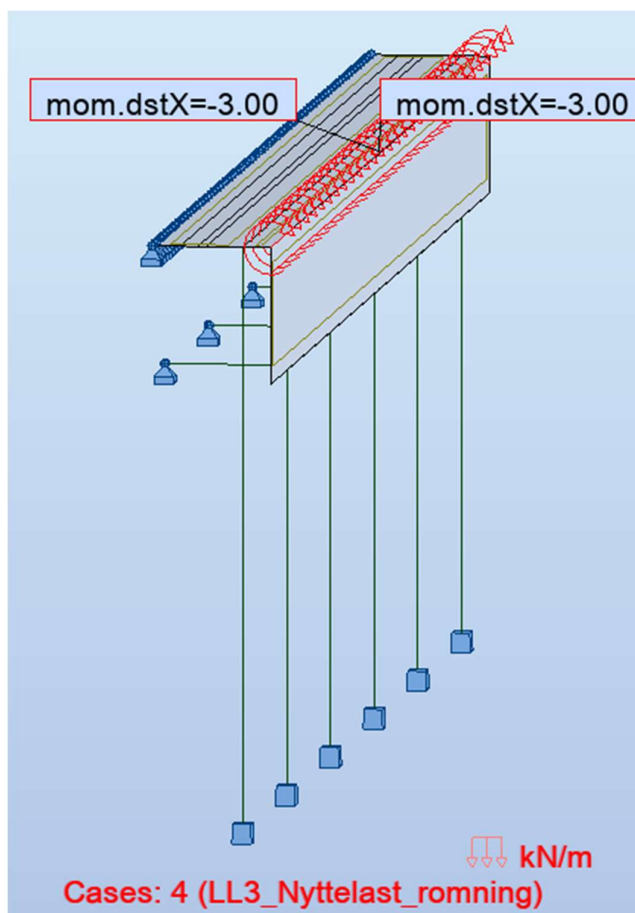
3.2.4 Laster

Konstruksjonen testes mot laster og lastkombinasjoner som legges inn i modellen. Opptredende krefter i modellen vil komme frem av analysen i Robot, og inneholder skjærkrefter, moment og aksialkraft m.m., som vil bli brukt som referanse i videre dimensjonering. Modellen har gitte lasttilfeller som er definert i Teknisk Forprosjekt for bæresystemet [1].

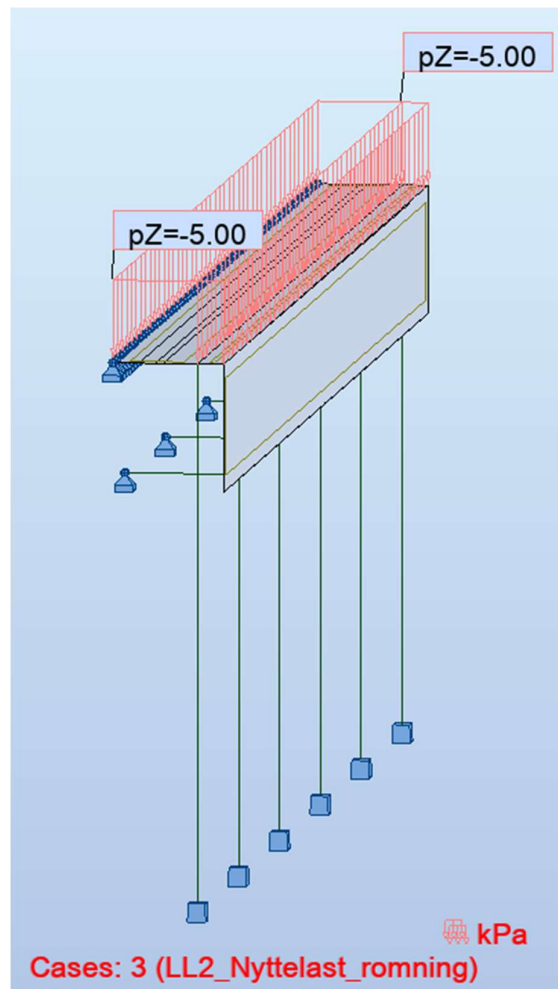
For komplette kombinasjoner og faktorer som er benyttet i Robot henvises det til *vedlegg V14*.

3.2.4.1 Nyttelast ved rømning

I rømningssituasjon vil det påføres en horisontallast på rekkverk på 3,0 kN/m etter Tabell NA.6.2 [27]. Vertikallast påført på dekket er 5,0 kN/m² etter Tabell NA.6.8 vist i Figur 24 [27]. Horisontallasten påføres konstruksjonen som et moment på 3 kNm, dette på grunnlag av horisontallast som påføres et 1 meter høyt rekkverk vist i Figur 23.



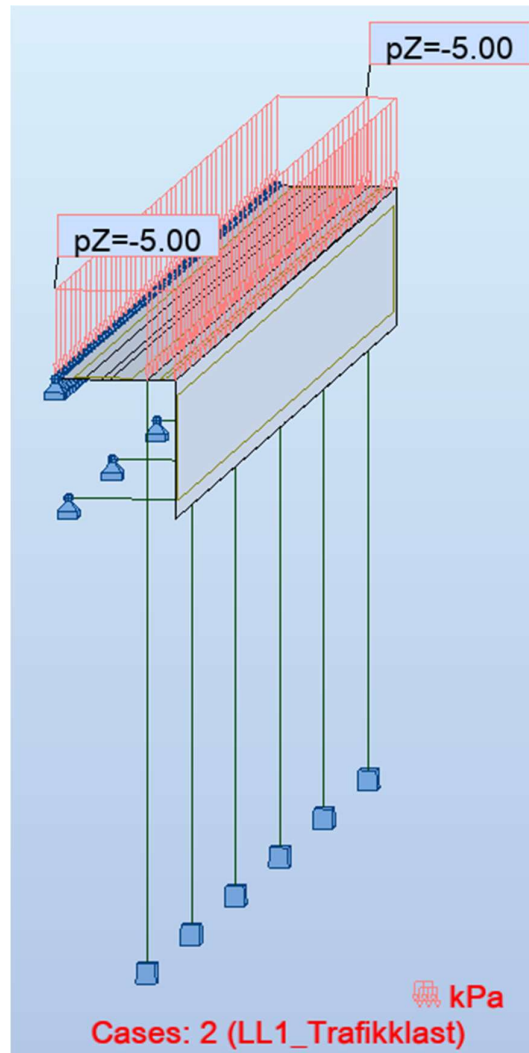
Figur 23: 3D visualisering av horisontallast på rekkverk påført som moment. Fra Robot.



Figur 24: 3D visualisering av vertikallast påført dekket. Fra Robot.

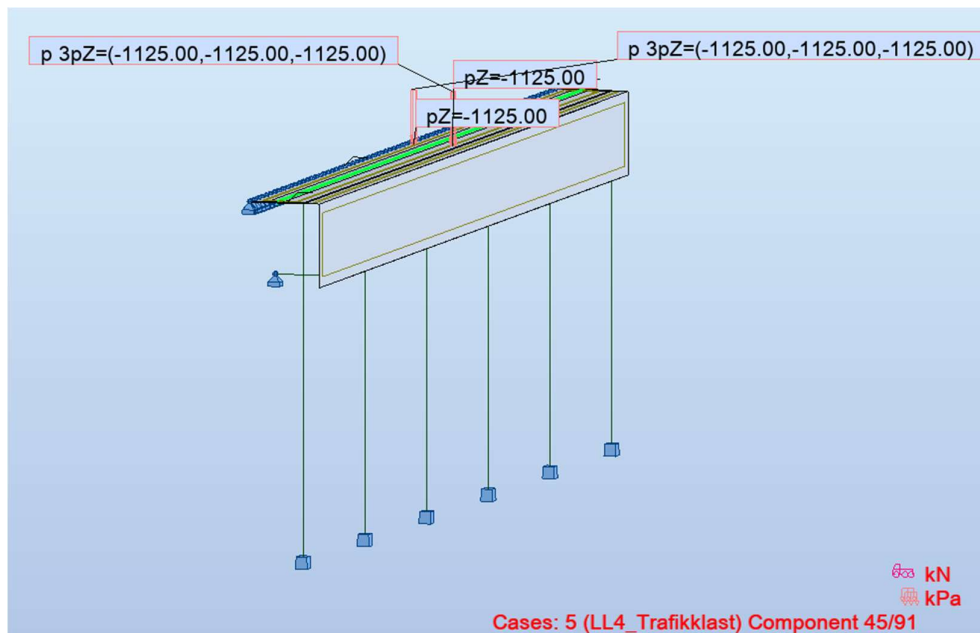
3.2.4.2 Trafikklast

Konstruksjonen dimensjoneres for to uavhengige lastsituasjoner, en med personlast i en rømmingssituasjon, og en med last fra service-kjøretøy. Karakteristisk nyttelast påført dekket er $5,0 \text{ kN/m}^2$ er hentet fra tabell NA.6.4 og vises i Figur 25 [27].



Figur 25: 3D visualisering av karakteristisk nyttelast påført dekket. Fra Robot.

Kaikonstruksjonen må dimensjoneres for en vilkårlig plassert punktlast på 90 kN fordelt på to punkter 0,2 m x 0,2 m med senteravstand 1,8 m (brannbil) hentet fra tabell NA.6.4 [27]. Kjøretøy på ledekonstruksjonen vil i praksis bruke hele bredden, så det forutsettes derfor at det ikke er jevnt fordelt nyttelast samtidig med aksellast fra kjøretøy. Punktlasten defineres som en bevegelig last over hele konstruksjonens lengde. Punktlastene følger 3 forskjellige linjer, høyre-, sentrisk- og venstre plassert. Karakteristisk punktlast på dekke 90 kN er vist i Figur 26.

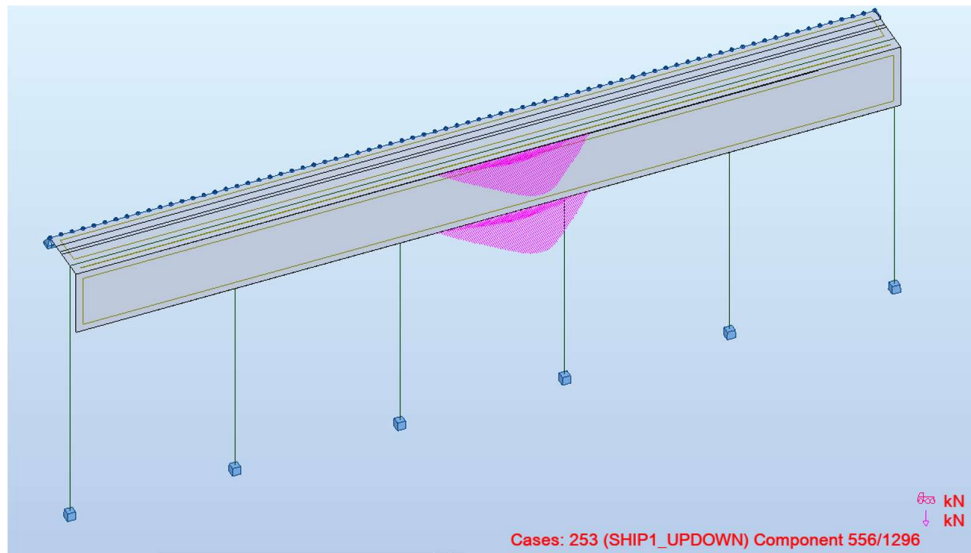


Figur 26: 3D visualisering av karakteristisk punktlast påført dekket som bevegelig last. Fra Robot.

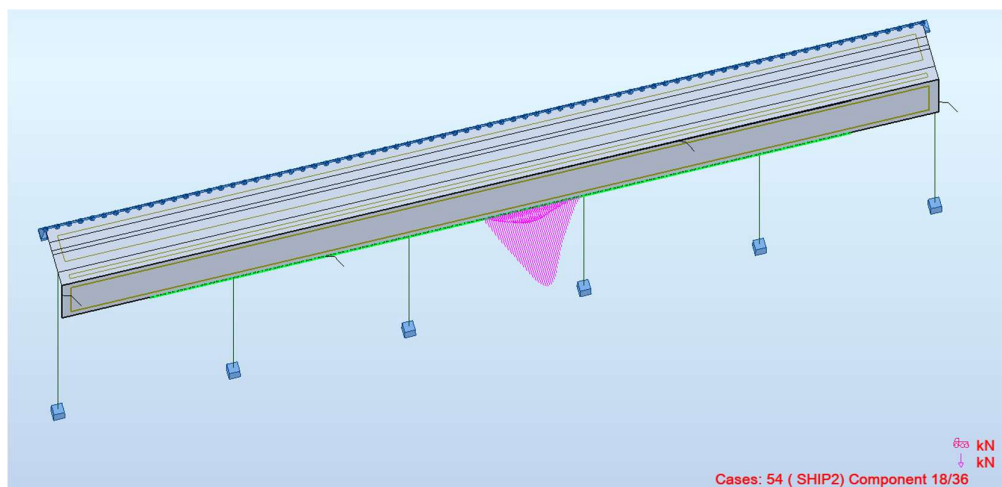
3.2.4.3 Støtlast ved kollisjon

For beregning av største støtlast mot konstruksjonen legges «MS Midnatsol» til grunn. I Teknisk forprosjekt settes farten til maks 5 knop (medstrøms) og støtvinkelen til 3,5 grader. Mindre skip kan være dimensjonerende ved at de kan ha større fart og støtvinkel. Støtlasten er beregnet til 10 tm (lastfaktor 1,0) [1].

I fenderforslaget fra Nordic Fender er to skipstyper lagt til grunn for beregning av reaksjonslaster. Største skip er som i Teknisk forprosjekt, «MS Midnatsol», minste skip er en leker. Dette resulterer i to tilfeller som sjekkes i Robot. Største skip vil treffe øverste og nederste fender rad med kontaktområde 8,7 meter vist i Figur 27. Minste skip vil treffe nederste fender rad med kontaktområde 5,2 meter vist i Figur 28. Fra energiabsorpsjonen og innbøyning av fender er det beregnet tilhørende punktlaster som er påført konstruksjonen. Fenderforslaget og tilhørende reaksjonskrefter kan sees i *vedlegg V19*. Punktlastene som er påført kan sees i *vedlegg V16 beregning av reaksjonskrefter fra fender*. Lastene påføres som et sett med forskjellige punktlaster som defineres som bevegelig last over lengden på frontskjørtet.



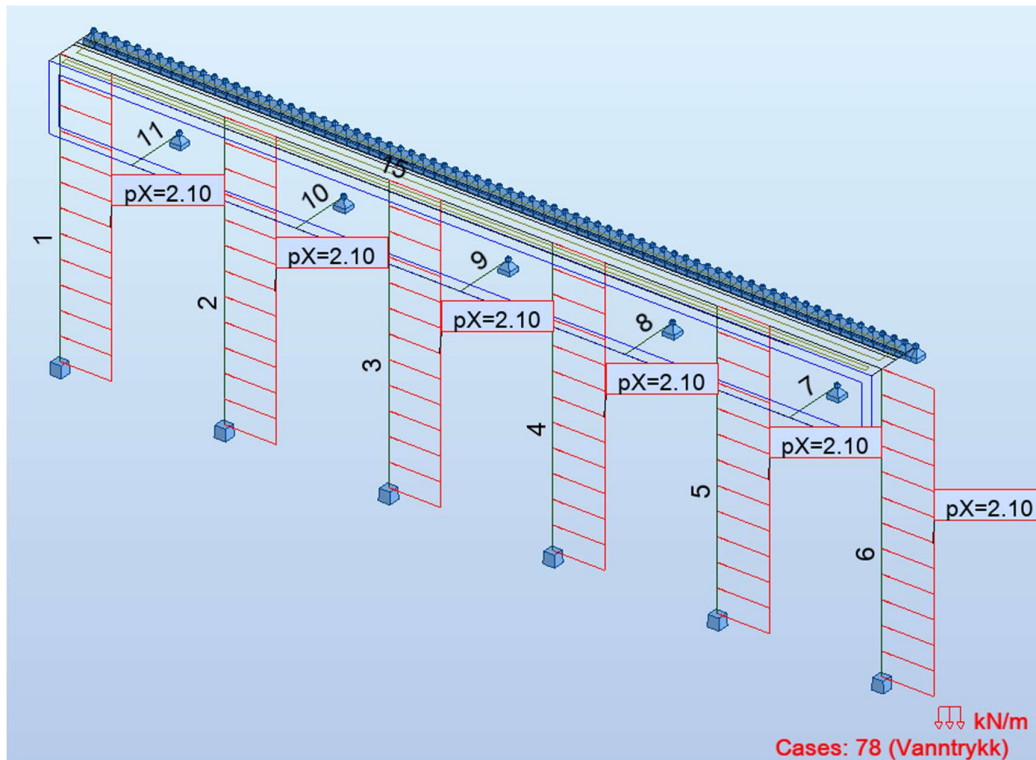
Figur 27: 3D visualisering av støtlast fra «MS Midnatsol» påført frontskjørtet som bevegelig last. Fra Robot.



Figur 28: 3D visualisering av støtlast fra leker påført frontskjørtet som bevegelig last. Fra Robot.

3.2.4.4 Bølgelast/strømlast

I Teknisk forprosjekt er det lagt til grunn en horisontallast, basert på 2 knop strøm og hastighet 5 knop for «MS Midnatsol» [1]. Bølge og strømlast modelleres som en linjelast over hele søylens lengde. Karakteristisk horisontallast på søyle $3,0 \text{ kN/m}^2$, multipliseres med søylens diameter og gir en linjelast på $2,1 \text{ kN/m}$ vist i Figur 29.



Figur 29: 3D visualisering av bølge og strømningslast påført søyler som linjelast. Fra Robot.

3.2.4.5 Seismiske laster

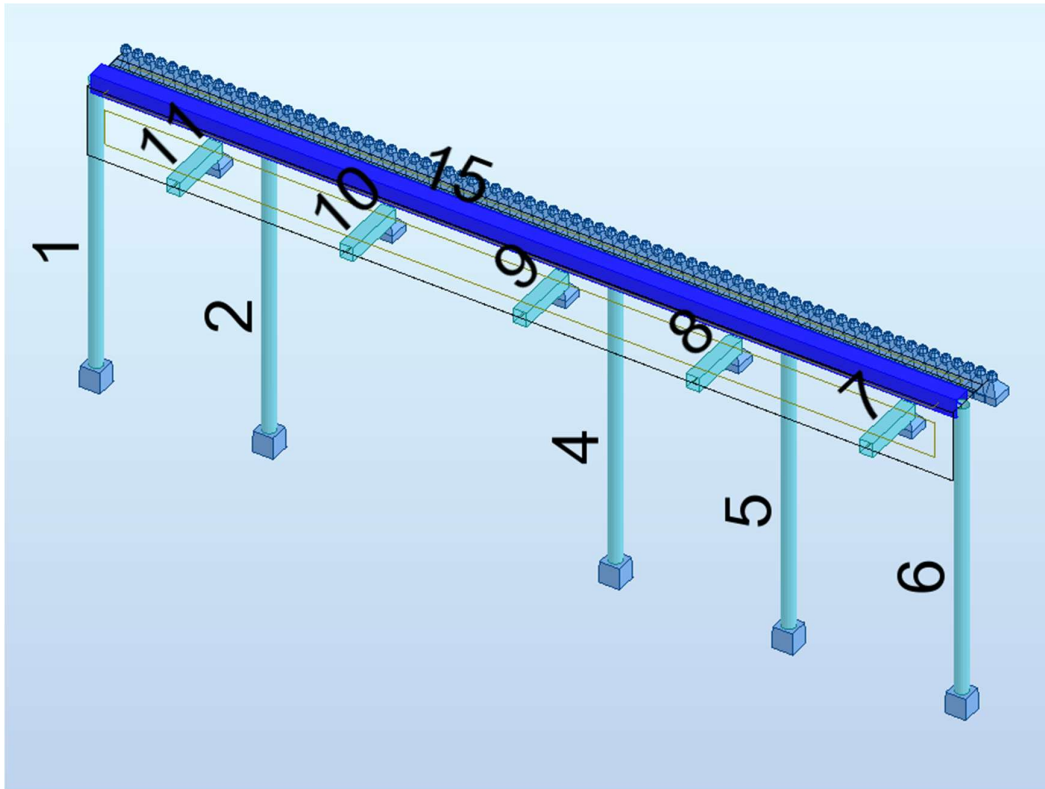
EC8 angir forutsetningene for prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning. Tabell NA.4(902) viser at kaier og havneanlegg kategoriseres under seismisk klasse I [31]. Fra NA.3.2.1(5) kan påvisning av motstand mot seismisk påvirkning utelates for konstruksjoner i seismisk klasse I [31].

3.2.4.6 Egenvekt

Robot modellen påføres egenvekt basert på tverrsnitt og angitt material. I modellen er alle konstruksjonsdeler angitt betong med densitet 24,57 kN/m³.

3.2.5 Tap av søyle

Konstruksjonen skal dimensjoneres for tap av søyle. I modellen fjernes søyle 3 som vist i Figur 30. Analyse av modellen kjøres deretter og sjekkes opp mot lastkombinasjoner og faktorer i ALS etter Lasthåndbok KV.



Figur 30: 3D visualisering av Robot modell ved fjerning av søyle 3. Fra Robot.

3.2.6 Dimensjonering

Det er dimensjonert for dekke, hovedbjelke, frontskjørt, støttebjelke og søyler. Dimensjonering er utført manuelt i Mathcad. Hovedbjelke, søyle og støttebjelke er kontrollert i ISY Design. Kaiskjørtet er ikke kontrollert fordi programmet ikke dekker to-veis plater. Alle konstruksjonene er av armert betong. Vi har kontrollert konstruksjonsdelene i bruddgrensetilstand og bruksgrensetilstand. Krav og retningslinjer til dimensjoneringen som er utført er gitt i Norsk Standard, Eurokode og Statens Vegvesens Håndbøker. Alle krefter som er tatt med i beregningene er hentet fra Robot-modellen. Detaljerte beregninger og kontroller er vedlagt i:

Vedlegg V01 – Dekke: Bruddgrensetilstand (ULS)

Vedlegg V02 – Dekke: Bruksgrensetilstand (SLS)

Vedlegg V03 – Hovedbjelke: Bruddgrensetilstand (ULS)

Vedlegg V04 – Hovedbjelke: Bruksgrensetilstand (SLS)

Vedlegg V05 – Frontskjørt: Bruddgrensetilstand (ULS)

Vedlegg V06 – Frontskjørt: Bruksgrensetilstand (SLS)

Vedlegg V07 – Søyle: Bruddgrensetilstand (ULS)
Vedlegg V08 – Støttebjelke: Bruddgrensetilstand (ULS)
Vedlegg V09 – Støttebjelke: Bruksgrensetilstand (SLS)
Vedlegg V20 – Analyseresultat ISY Design – Hovedbjelke støtte
Vedlegg V21 – Analyseresultat ISY Design – Hovedbjelke felt
Vedlegg V22 – Analyseresultat ISY Design - Søyle
Vedlegg V23 – Analyseresultat ISY Design – Støttebjelke

3.2.7 Veiledninger

Veilederne fra NTNU har blitt brukt flittig, spesielt i forbindelse med utarbeidelse av konsept og modellering av FEM-modell i Robot. Gjennom studiet har studentene gjennomgått flere dataprogrammer med analyse-kapasitet. Robot ble valgt med bakgrunn i at NTNU besitter gode ressurser på nettopp dette programmet. Noe som har gitt god uttelling for denne oppgaven.

3.2.8 Befaringer

Det ble gjennom arbeidet med oppgaven gjennomført to befaringer, en 9.mars og en 19. april.

Onsdag 9.mars gjennomførte vi en befaring på Solavågen fergekai. På denne befaringen dro vi til Solavågen fergekai for å se på fenderløsningen som er benyttet. På Solavågen fergekai er det benyttet både vertikale- og horisontale fendere som er relevant for oppgaven vår. På denne befaringen studerte vi oppbygningen av fendersystem som var montert og tok med oss nyttig informasjon. Bilde av fenderløsningen på Figur 31.



Figur 31: Fra befarings på Solavågen fergekai 09.03.2022. Foto: Christoffer A. Stene Berg.

Tirsdag 19.april gjennomførte vi en befarings på Spenncon i Hjørungavåg. Hovedhensikten med befaringsen var å innhente hjelp fra Spenncon for å se på mulige konstruksjonsdesign for bruk av element. Spenncon er en bedrift som produserer prefabrikkerte betongelementer og spennarmerte hulldekker på bestilling. Spenncon så stor verdi i å få bidra i oppgaven, og kom med mange gode råd når det gjaldt elementproduksjon. Der ble vi gjort oppmerksom på hvilke begrensninger som gjaldt rundt produksjon, herunder maksimal vekt og dimensjoner som beskrevet i kap. 2. Videre fremgangsmåte er å dimensjonere hvert element for seg. Deretter er det mulighet for å ytterligere inndeling av elementene for å gjøre det enklere å produsere og montere elementene.



Figur 32: Fra befaring hos Spenncon 19.04.22. Foto: Ole Jørgen Haugen.

3.3 Kildekritikk

I denne oppgaven har vi vurdert informasjonen og troverdigheten til kildene som er brukt. God kildekritikk er viktig for å unngå usikkerheter i oppgaven. All informasjon som er hentet fra bøker og internett er vurdert etter følgende kriterier [32]:

- Troverdighet: Er kilden til å stole på?
- Objektivitet: Er kilden nøytral?
- Nøyaktighet: Finner du spor av juks eller slurv?
- Egnethet: Finner du svarene du trenger?

4 RESULTATER

I dette kapitlet skal resultater og beregninger presenteres. Resultatene er delt inn i 2 delkapittel:

- Del 1: Fenderløsning
- Del 2: Dimensjonering av konstruksjonskonsept 4

4.1 Fenderløsning

Som dimensjonerende fartøy brukes «MS Midnatsol» og en lekter under slep [1]. Disse to brukes for å skape et mest mulig ugunstig tilfelle av laster på konstruksjonen. Der er «MS Midnatsol» størrelsen på det største skipet som kan bruke tunnelen, mens lekteren under slep er det fartøyet som er størst og som trolig vil treffe nedre fenderlist. Det vil ikke ha noen effekt på levetiden til fenderen at de til tider vil være dekket av vann. Tabell 12 beskriver fenderløsning fra Teknisk forprosjekt og Nordic Fender.

Tabell 12: Beskrivelse av løsninger fra Teknisk forprosjekt og NordicFender.

Fra	Beskrivelse
Teknisk forprosjekt	Vertikale fendere med senteravstand på 4,5 meter. Fenderens festepunkt til kaikonstruksjonen er på frontskjørt og uten bunnforankring.
Nordic Fender	Horisontal fenderlist i to høyder med senteravstand på 3.5 meter. Hver tiende meter skal det være en vertikal fenderlist. Fenderlistene skal monteres på frontskjørtet. Denne løsningen er tatt i bruk i Panamakanalen.

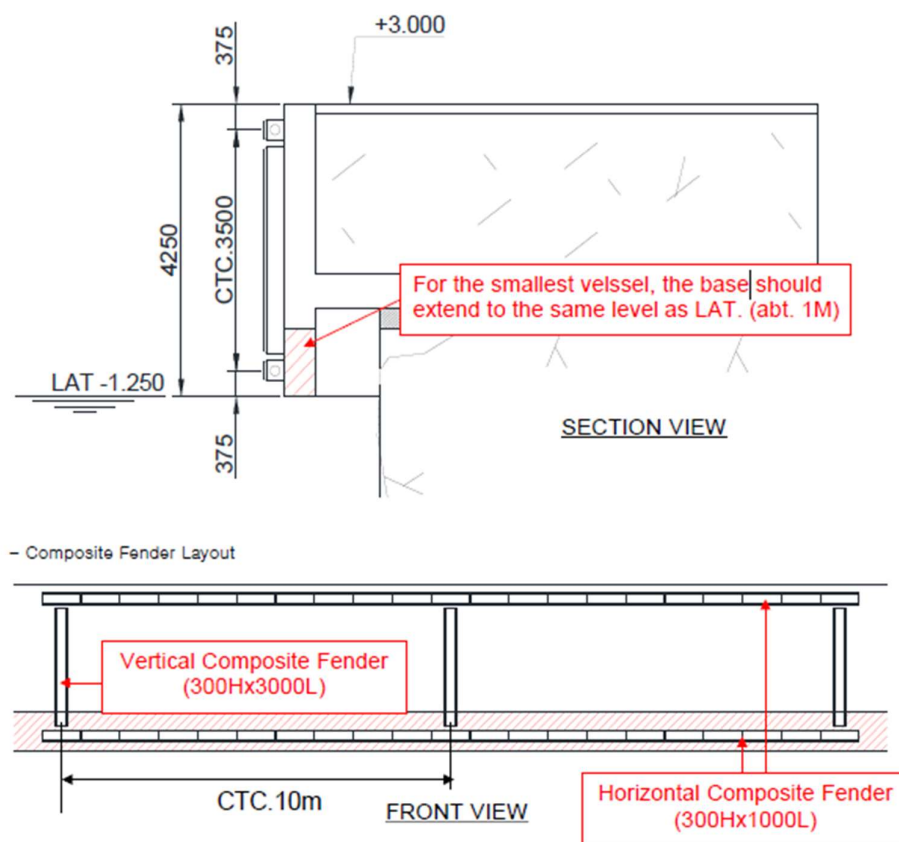
Tilsvarende løsning som forslaget fra Nordic Fender er benyttet i Panamakanalen, sees i Figur 33.



Figur 33: Illustrasjon av horisontal- og vertikal fenderløsning i Panamakanalen. Kilde: [33].

4.1.1 Resultat

Fenderløsningen som er valgt å bruke er løsningen fra Nordic Fender. Løsningen går ut på at fenderlisten skal ligge horisontalt i to høyder med senteravstand på 3,5 meter. For maksimalt hver tiende meter skal det være en vertikal fenderlist. Fenderlistene skal i horisontal- og vertikal retning ta høyde for tidevannsforskjell og de ulike størrelsene på båtene som passerer. Ettersom skip ikke regelmessig skal støte inntil kaikonstruksjonen vil denne løsningen være gunstig. Dette er et kostnadsbesparende alternativ sammenlignet med løsningen fra Teknisk forprosjekt.



Figur 34: Prinsippskisse fra fenderleverandør på horisontal fenderløsning. Kilde: vedlegg V19.

4.1.1.1 Fordeler og ulemper

Fordeler og ulemper ved fenderløsning fra teknisk forprosjekt og fenderløsning fra Nordic Fender er listet opp i Tabell 13.

Tabell 13: Matrise fordeler og ulemper fenderløsning.

Fender fra Teknisk forprosjekt		Fender fra Nordic Fender	
Fordeler	Ulemper	Fordeler	Ulemper
Utprøvd system	Økte kostnader	Lavere kostnader	Større kaiskjørt og dermed økt behov for betong
Gode støtabsorberende egenskaper	Mer utsatt for korrosjon vedlikehold	Mindre bevegelige deler og enklere å håndtere	
	Mye moment i festepunktet	Frigir plass i bredden	

4.1.2 Betongmengde frontskjørt

Konstruksjonskonseptet vårt krever et større frontskjørt for tilpasning til fenderløsningen. Det er derfor valgt å se på de økonomiske- og miljømessige konsekvenser av denne økningen av betong.

Tabell 14: Utrekninger av total kostnad for betongmengde til frontskjørt fra Teknisk forprosjekt og konstruksjonskonsept 4.

Frontskjørt	Lengde (begge sider)	Bredde	Høyde	m ³ betong	Total kostnad
Teknisk forprosjekt	3400 m	0,60 m	1,70 m	3468 m ³	6,06 mill. kr
Konstruksjonskonsept 4	3400 m	0,60 m	4,25 m	8670 m ³	15,15 mill. kr

Tabell 14 viser en økning i betongmengde for konstruksjonskonsept 4 med 5 202 m³ sammenlignet med løsning fra Teknisk forprosjekt. Med pris fra Dyrøy Betong fra kapittel 2.4.1.1 vil det tilsvare en prisstigning på 9,1 millioner kroner. Det er ikke tatt hensyn til utsparinger i disse beregningene Dette legges inn som et forslag til videre arbeid for optimalisering av konstruksjonen.

4.1.2.1 Økonomiske konsekvenser

Konstruksjonskonsept 4 vil i motsetning til løsning fra Teknisk forprosjekt øke betongkostnaden på 9,1 millioner kroner. Med besparelsen fra ny fenderløsning på 65,5 millioner kroner kan vi konkludere med

at løsningen vår vil ha en økonomisk gevinst på 56,4 millioner kroner. Tallene er inkludert leveringskostnad etter Nordic Fender sine satser og beregnet etter valutakursen den 14. mai 2022. Det er viktig å bemerke seg at tallene er kun estimerte budsjettkostnader fra Nordic Fender. Beregninger for kostnader er vedlagt i vedlegg V16, utdrag i Tabell 15.

Tabell 15: Utrekninger av total kostnad for fender og betong for Teknisk forprosjekt og konstruksjonskonsept 4. Fra vedlegg V16.

	Teknisk forprosjekt	Konstruksjonskonsept 4
Pris for betong	6,1 millioner kroner	15,1 millioner kroner
Pris for fender	139,2 millioner kroner	73,7 millioner kroner
Total kostnad	145,2 millioner kroner	88,8 millioner kroner

4.1.2.2 Miljømessige konsekvenser

I denne oppgaven har vi tatt utgangspunkt i EPD-en «Fabrikkblandet Ferdigbetong – B45 MF40, D22, S4, CI 0,1» [34]. Siden vi skal ha det totale utslipp fra systemgrense A1-A4 summerer vi opp utslippet og bruker det som utgangspunkt til videre beregninger.

Konstruksjonskonseptet vårt krever en økning på 5 202 m³ betong. Det vil resultere i et økt klimagassutslipp på 1646 tonn CO²-ekv. etter tall hentet fra EPD Norge [34]. Det økte utslippet tilsvarer 3 turer med en fullsatt «MS Midnatsol» [35]. Utrekninger kan ses i vedlegg V18.

Tabell 16: Totalt utslipp for løsning fra Teknisk forprosjekt og konstruksjonskonsept 4. Fra vedlegg V18.

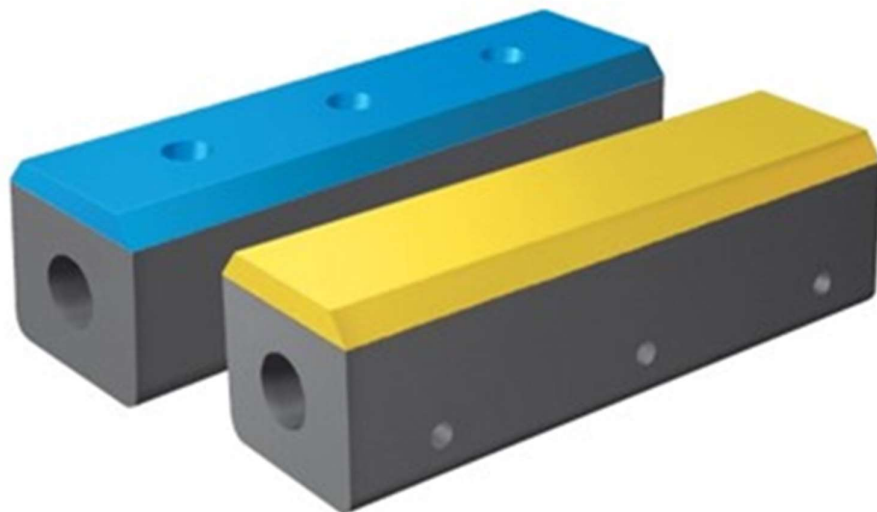
	Teknisk forprosjekt	Konstruksjonskonsept 4
Totalt utslipp (kg CO ₂ -ekv.)	1 097 622	2 744 055
Totalt utslipp (tonn CO ₂ -ekv.)	1098	2744

4.1.3 Materialer

4.1.3.1 Løsning fra NordicFender

Fenderløsningen fra Nordic Fender er laget av komposittmateriale bestående av gummikropp og ultrahøy molekylvekt polyetylen (UHMW-PE). Løsningen gir god energiabsorpsjon med lite friksjon og egner seg godt ved trange vannveier. Fenderløsningen måler 0,3 meter høy og 0,3 meter bred og er

planlagt i to horisontale rader med senteravstand 3,5 meter. For maksimalt hver 10 meter skal det være en vertikal rad. Figur 35 viser fenderløsningen, se vedlegg V19 for ytterligere detaljer.



Figur 35: 3D visualisering av komposittfenderforslag fra Nordic Fender. Kilde: vedlegg V19.

4.1.3.2 Løsning fra Teknisk forprosjekt

Løsningen fra Teknisk forprosjekt er laget av ben-element. Ben-element er kompresjonsstøpte modulære knekksøyleskjermer, designet med høy ytelse og geometri. Fenderløsningen har innebygde stålmonteringsplater for å installasjon på konstruksjon. Ben-elementet kombineres med paneler.



Figur 36: 3D visualisering av benelementfender som planlagt i Teknisk forprosjekt. Kilde: [36].

4.2 Dimensjonering av konstruksjonskonsept 4

Manuelle beregningen av hver konstruksjonsdel er utført i Mathcad. I dette kapitlet skal et sammendrag av resultatene fra Mathcad presenteres. For full oversikt og detaljerte beregninger for hver konstruksjonsdel anbefales det å se vedlegg for valgt konstruksjonsdel. Analyseresultat er utført i ISY Design for hovedbjelke, søyle og støttebjelke som kontroll og kan sees i vedlegg. Følgende resultater vil bli presentert for hver konstruksjonsdel:

- Dimensjoner
- Dimensjonerende moment
- Hoved-, fordeling- og skjærarmering
- Kontroll av nedbøyning
- Kontroll av rissvidde

4.2.1 Resultat av beregninger for dekke

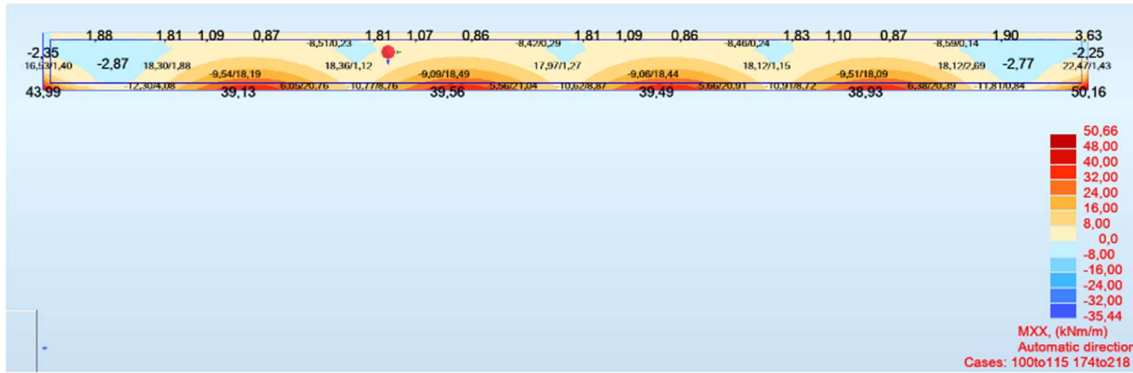
Manuelle beregninger for dekket fra Mathcad kan sees i *vedlegg V01* og *vedlegg V02*. Tabell 17 viser *dimensjoner for dekket*.

Tabell 17: Dimensjoner – dekke.

Dimensjoner for dekke	
Tykkelse	0,25 m
Spennlengde	2,4 m

4.2.1.1 Dimensjonerende moment

Figur 37 viser momentkrefter i dekket fra analysen i Robot i bruddgrensetilstand (ULS). Største opptredende moment er over støttepunkt. Tabell 18 lister opp dimensjonerende moment M_{Ed} .



Figur 37: Dimensjonerende moment i bruddgrensetilstand (ULS) - dekke. Fra Robot.

Tabell 18: Dimensjonerende støtte- og feltmoment – dekke.

Momenter	
Maks støttemoment M_{Ed}	39,56 kNm
Maks feltmoment M_{Ed}	18,36 kNm

4.2.1.2 Armering

Tabell 19, Tabell 20, Tabell 21 og Tabell 22 spesifiserer armeringens plassering, diameter og senteravstand for dekket.

Tabell 19: Valgt lengdearmering overkant – dekke.

Lengdearmering overkant	
Plassering	Overkant
Armeringsjern	$\phi 12$
Senteravstand	200 mm

Tabell 20: Valgt lengdearmering underkant – dekke.

Lengdearmering underkant	
Plassering	Underkant
Armeringsjern	$\phi 12$
Senteravstand	200 mm

Tabell 21: Valgt fordelingsarmering overkant – dekke.

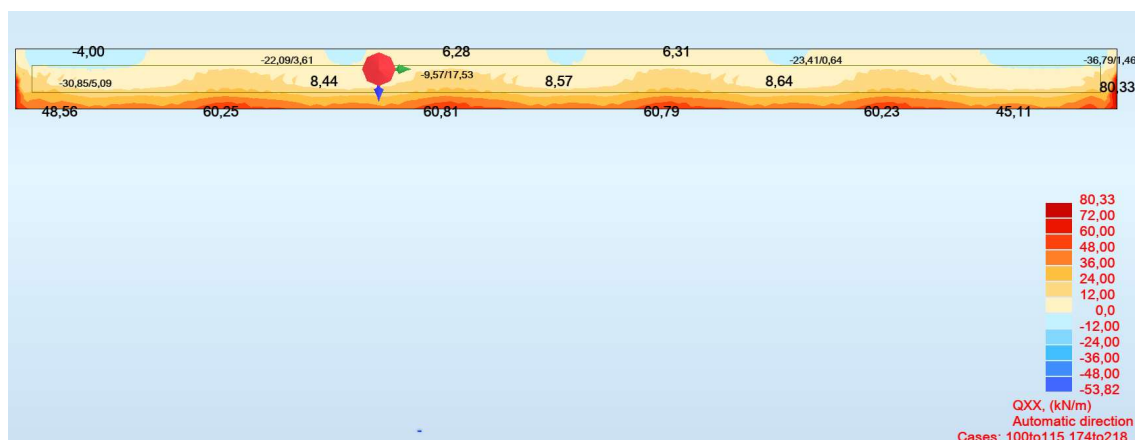
Fordelingsarmering overkant	
Plassering	Overkant
Armeringsjern	φ10
Senteravstand	300 mm

Tabell 22: Valgt fordelingsarmering underkant – dekke.

Fordelingsarmering underkant	
Plassering	Underkant
Armeringsjern	φ10
Senteravstand	300 mm

4.2.1.3 Skjærarmering

Dimensjonerende moment for skjærkrefter i bruddgrensetilstand er hentet fra Robot og vist i Figur 38. Største skjærkrefter er over støttepunkt. Verdiene er presentert i Tabell 23 sammen med dekkets skjærkraftskapasitet.



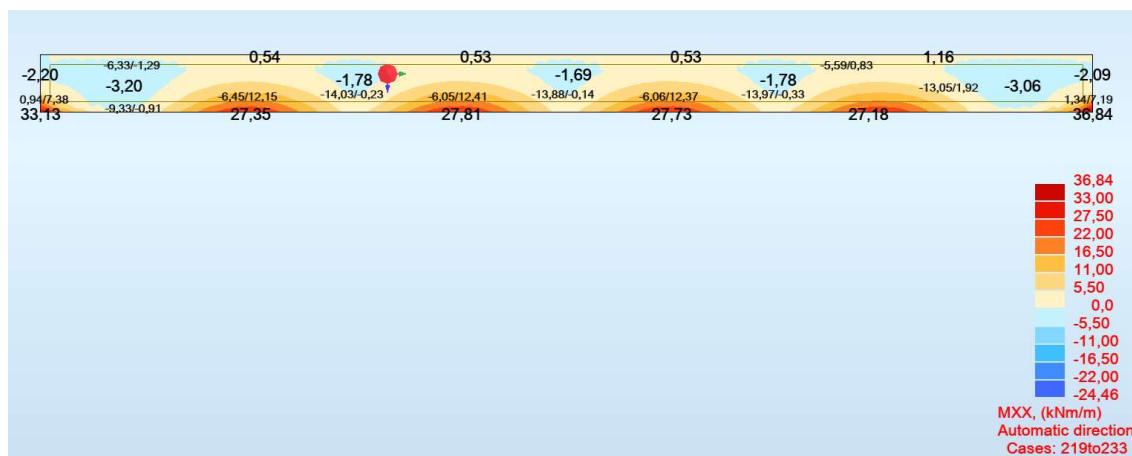
Figur 38: Skjærkrefter i bruddgrensetilstand (ULS) - dekke. Fra Robot.

Tabell 23: Dimensjonerende skjærkraftkapasitet og skjærkraft – dekke.

Skjærkrefter	
Dimensjonerende skjærkraftskapasitet V_{Rd}	80 kN
Dimensjonerende skjærkraft V_{Ed}	61 kN
$V_{Rd} > V_{Ed} \Rightarrow$ Skjærkraftskapasiteten er tilstrekkelig, slik at det ikke beregningsmessig er nødvendig med skjærarmering	

4.2.1.4 Bruksgrensekontroll (SLS)

Figur 39 fra analyse i Robot viser dimensjonerende moment M_x i SLS til dekket over felt- og støttepunkt. Verdiene er presentert i Tabell 24.



Figur 39: Dimensjonerende moment i bruksgrensetilstand (SLS) - dekke. Fra Robot.

Tabell 24: Dimensjonerende moment – dekke.

Dimensjonerende moment i dekket	
Dimensjonerende moment støtte M_{Ed} (SLS)	27,81 kNm
Dimensjonerende moment felt M_{Ed} (SLS)	14,03 kNm

4.2.1.5 Nedbøyning

Beregnet nedbøyning hentet fra Robot og beregnet tillat nedbøyning er presentert i Tabell 25.

Tabell 25: Beregnet nedbøyning hentet fra Robot og beregnet tillatt nedbøyning – dekke.

Nedbøyning	
Beregnet nedbøyning δ_{Robot}	1,58 mm
Maksimal tillatt nedbøyning $\delta_{\text{Max}} = L/250$	9,6 mm
$\delta_{\text{Max}} > \delta_{\text{Robot}} \Rightarrow$ Konstruksjonen er godkjent for nedbøyning	

4.2.1.5.1 Rissviddekontroll

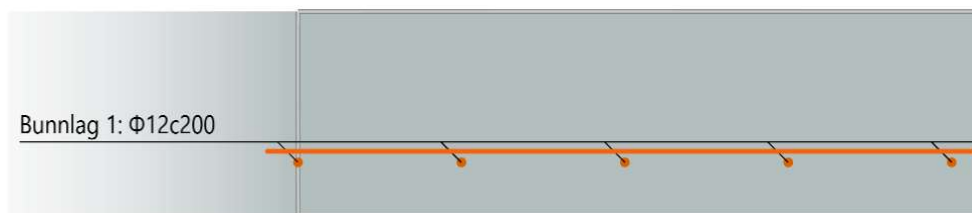
Rissviddekontroll utført for dekket i Mathcad er presentert i Tabell 26.

Tabell 26: Resultat fra rissviddekontroll fra Mathcad – dekke.

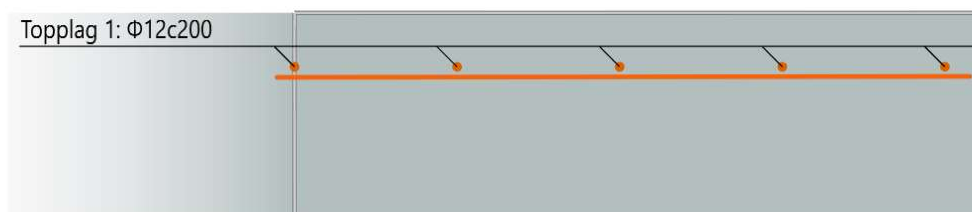
Rissviddekontroll	
Overkant $0,35 \leq 0,35$	Tilfredsstiller krav til godkjent rissvidde i EC2
Underkant $0,32 \leq 0,35$	Tilfredsstiller krav til godkjent rissvidde i EC2

4.2.1.6 Tegninger fra ISY Design

Figur 40 og Figur 41 viser tverrsnitt av dekket med armeringsplassering.



Figur 40: Tverrsnitt med armeringsplassering ved feltmoment fra ISY Design – dekke.



Figur 41: Tverrsnitt med armeringsplassering ved støtte fra ISY Design – dekke.

4.2.2 Resultat av beregninger for hovedbjelke

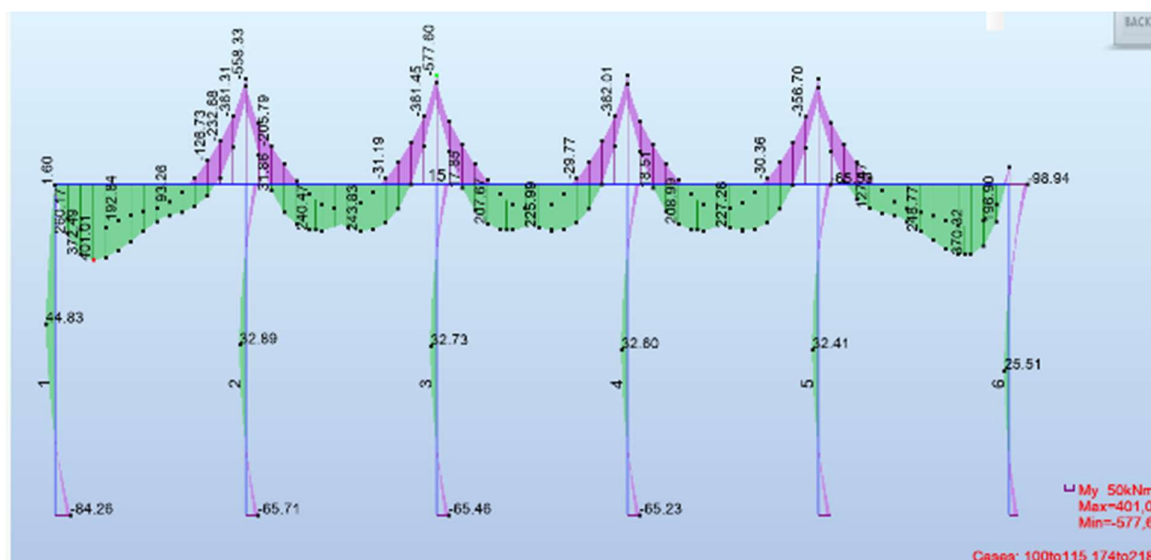
Manuelle beregninger for hovedbjelke fra Mathcad kan sees i *vedlegg V03* og *vedlegg V04*. Rapporter fra kontroll i ISY Design kan sees i *vedlegg V20* og *vedlegg V21*. Hovedbjelkens dimensjoner er presentert i Tabell 27.

Tabell 27: Dimensjoner – hovedbjelke.

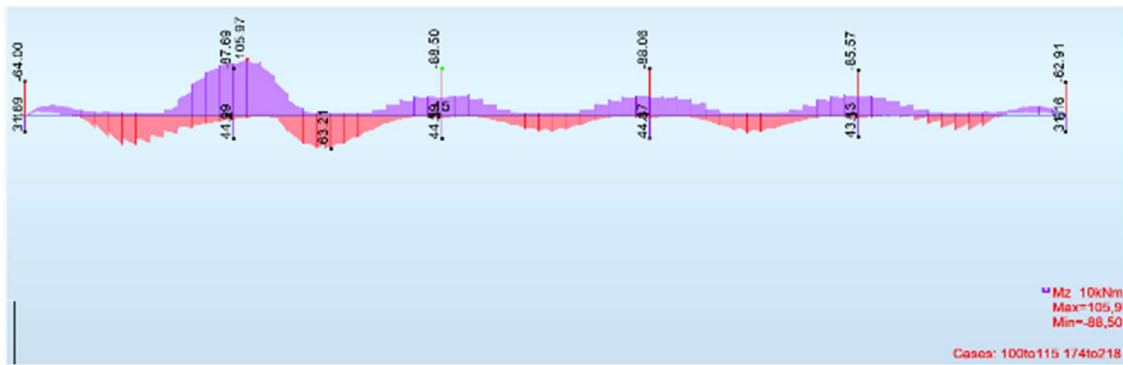
Hovedbjelkens dimensjoner	
Høyde	0,9 m
Bredde	0,9 m
Lengde	9,0 m

4.2.2.1 Dimensjonerende moment

Figur 42 viser moment $M_{Ed,y}$ og Figur 43 viser moment $M_{Ed,z}$ fra analyse i Robot i bruddgrensetilstand (ULS). Verdiene er presentert i Tabell 28.



Figur 42: Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$ i bruddgrensetilstand (ULS) – hovedbjelke. Fra Robot.



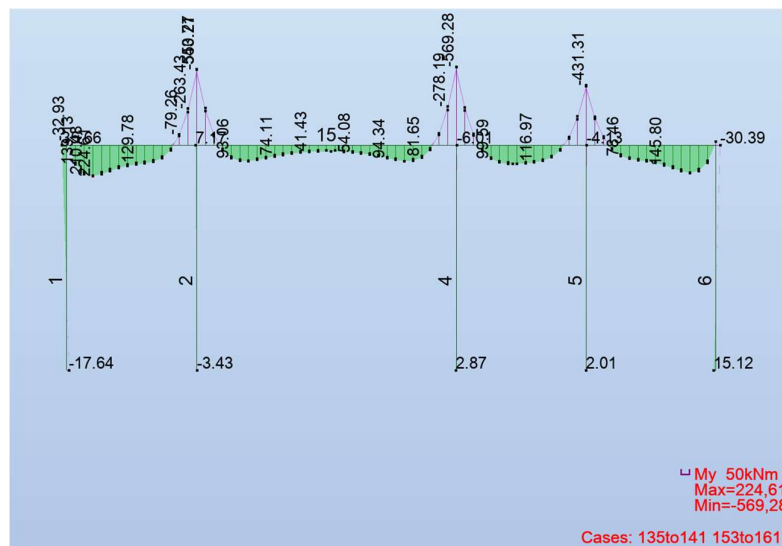
Figur 43: Dimensjonerende moment $M_{Ed,z}$ i bruddgrensetilstand (ULS) – hovedbjelke. Fra Robot.

Tabell 28: Dimensjonerende støtte- og feltmoment – hovedbjelke.

Momenter i hovedbjelke	
Maks støttemoment $M_{Ed,y}$	577,60 kNm
Maks støttemoment $M_{Ed,z}$	88,50 kNm
Maks feltmoment $M_{Ed,y}$	243,83 kNm
Maks feltmoment $M_{Ed,z}$	88,50 kNm

4.2.2.2 Tap av søyle

Fra analyse i Robot ved tap av søyle i ulykkestilstand (ALS) vil det være nødvendig med strekkarmering i underkant bjelke over søylepunkt vist i Figur 44. Dette utføres ved at strekkarmering i bunnlag fra felt mellom søylepunkt videreføres kontinuerlig i hele bjelkens lengde. Konstruksjonen vil ellers ikke påføres høyere dimensjonerende krefter i ALS enn det er dimensjonert for i bruddgrensetilstand.



Figur 44: Dimensjonerende moment M_y i ulykkestilstand (ALS) – hovedbjelke. Fra Robot.

4.2.2.3 Armering

Valgt armering og plassering i hovedbjelke er presentert i Tabell 29 og Tabell 30.

Tabell 29: Valgt lengdearmering og plassering over støtte – hovedbjelke.

Lengdearmering over støtte	
Plassering	Overkant
Armering	φ25
Senteravstand y-retning	142 mm
Plassering	Underkant
Senteravstand y-retning	212 mm
Senteravstand enkeltjern z-retning	212 mm
Trykkarmering	Ikke nødvendig

Tabell 30: Valgt lengdearmering over felt – hovedbjelke.

Lengdearmering over felt	
Plassering	Overkant
Armering y-retning	φ25
Senteravstand y-retning	212 mm
Plassering	Underkant
Senteravstand y-retning	212 mm
Senteravstand enkeltjern z-retning	212 mm
Trykkarmering	Ikke nødvendig

4.2.2.4 Skjærarmering

Skjærkrefter og skjærkraftskapasitet for hovedbjelke er presentert i Tabell 31. Valgt bøylearmering er presentert i Tabell 32.

Tabell 31: Skjærkrefter og skjærkraftskapasitet – hovedbjelke.

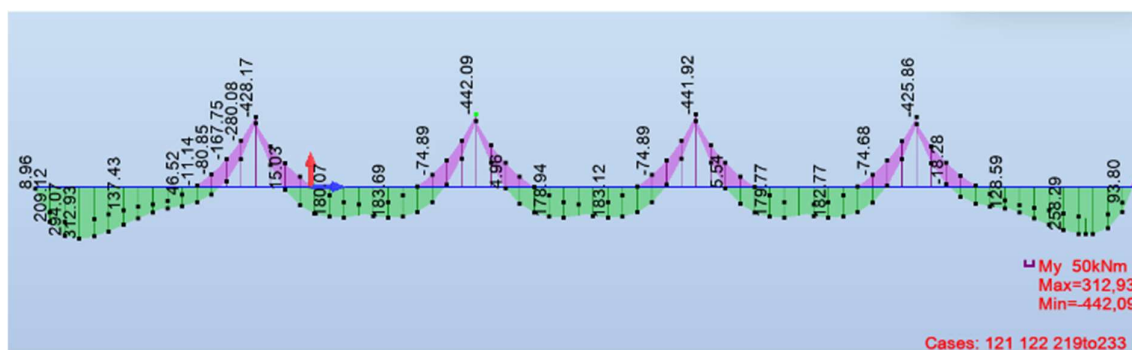
Skjærkrefter	
Dimensjonerende skjærkraft $V_{Ed,z}$	535,27 kN
Skjærkraftskapasitet $V_{Rd,z}$	300 kN
$V_{Rd} < V_{Ed} \Rightarrow$ Skjærkraftskapasiteten er ikke tilstrekkelig, slik at det beregningsmessig er nødvendig med skjærarmering	
Dimensjonerende skjærkraft $V_{Ed,y}$	23,35 kN
Skjærkraftskapasitet $V_{Rd,y}$	300 kN
$V_{Rd} > V_{Ed} \Rightarrow$ Skjærkraftskapasiteten er tilstrekkelig, slik at det ikke beregningsmessig er nødvendig med skjærarmering	

Tabell 32: Valgt bøylearmering – hovedbjelke.

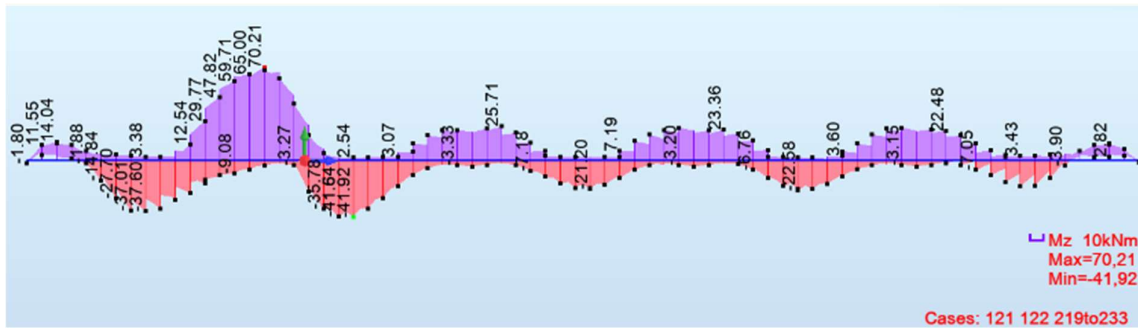
Bøylearmering	
Armeringsareal	$\phi 12$
Senteravstand	133 mm

4.2.2.5 Bruksgrensekontroll (SLS)

Dimensjonerende momenter M_{Ed} i bruksgrensetilstand (SLS) for hovedbjelke over felt- og støttepunkt er hentet fra Figur 45 og Figur 46. Verdiene er presentert i Tabell 33.



Figur 45: Dimensjonerende moment M_y i bruksgrensetilstand for hovedbjelke. Fra Robot.



Figur 46: Dimensjonerende moment M_z i bruksgrensetilstand for hovedbjelke. Fra Robot.

Tabell 33: Dimensjonerende moment i bruksgrensetilstand – hovedbjelke.

Dimensjonerende momenter	
Dimensjonerende moment støtte $M_{Ed,z}$ (SLS)	25,71 kNm
Dimensjonerende moment støtte $M_{Ed,y}$ (SLS)	442,09 kNm
Dimensjonerende moment felt $M_{Ed,z}$ (SLS)	25,71 kNm
Dimensjonerende moment felt $M_{Ed,y}$ (SLS)	183,69 kNm

4.2.2.6 Nedbøyning

Resultat fra nedbøyning fra Robot og tillatt nedbøyning for hovedbjelke er presentert i Tabell 34.

Tabell 34: Beregnet nedbøyning hentet fra Robot og beregnet tillatt nedbøyning – hovedbjelke.

Nedbøyning	
Beregnet nedbøyning δ_{Robot}	1,37 mm
Maksimal tillatt nedbøyning δ_{Max}	$L/250 = 9,6$ mm
$\delta_{Max} > \delta_{Robot} \Rightarrow$ Konstruksjonen er godkjent for nedbøyning	

4.2.2.7 Rissviddekontroll

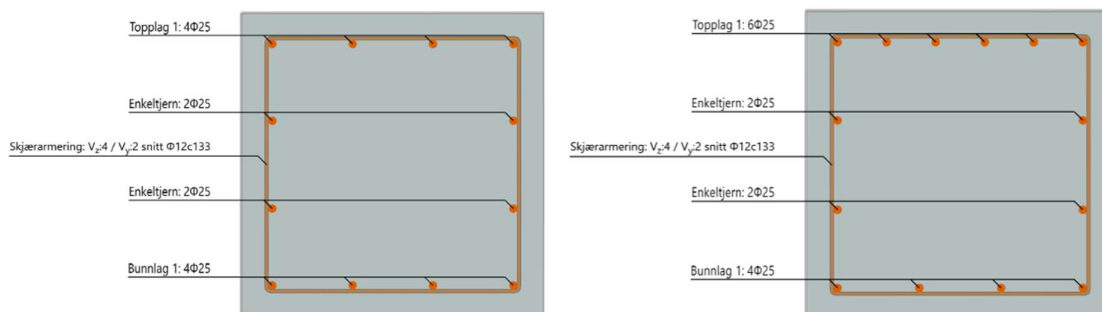
Resultat fra rissviddekontroll på hovedbjelke utført i Mathcad er presentert i Tabell 35.

Tabell 35: Resultat fra rissviddekontroll fra Mathcad på dekket – hovedbjelke.

Rissviddekontroll	
$0,26 \leq 0,35$ støtte y-retning	Tilfredsstillter krav til godkjent rissvidde i EC2
$\sigma_s > \sigma_{tillatt}$ støtte z-retning	Tilfredsstillter krav til godkjent rissvidde i EC2
$\sigma_s > \sigma_{tillatt}$ felt y-retning	Tilfredsstillter krav til godkjent rissvidde i EC2
$\sigma_s > \sigma_{tillatt}$ felt z-retning	Tilfredsstillter krav til godkjent rissvidde i EC2

4.2.2.8 Tegninger fra ISY Design

Hovedbjelkens tverrsnitt med armering over felt og støtte er illustrert i Figur 47.



Figur 47: Tverrsnitt med armeringsplassering over felt(t.v.) - og støttepunkt(t.h.) - hovedbjelke. Fra ISY Design.

4.2.3 Resultat av beregninger for søyler

Dimensjoner for søyle er presentert i Tabell 36.

Tabell 36: Dimensjoner – søyle.

Søylens dimensjoner	
Høyde	15,575 m
Radius	0,25 m

4.2.3.1 Dimensjonerende moment

Dimensjonerende moment M_{Ed} og aksialkraft N_{Ed} for 3 lasttilfeller i bruddgrensetilstand (ULS) for søyle er hentet fra Tabell 37. Dimensjonerende verdiene er presentert i Tabell 38.

Tabell 37: Resultat fra analyse, krefter i bruddgrensetilstand (ULS) - søyle. Fra Robot.

Member/Node/Case	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)	Definition
2/ 3/ ULS B1	1349,02>>	5,90	17,47	0,29	-46,09	30,92	1*1.35 + 9/10*1.05 + 8/1*1.05 + 78*1.05
2/ 3/ 2	86,63<<	0,00	0,01	0,00	-0,06	0,01	
2/ 3/ ULS B2	790,19	8,52>>	17,36	0,29	-45,51	44,99	1*1.20 + 9/1*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05
2/ 3/ 2	86,63	0,00<<	0,01	0,00	-0,06	0,01	
2/ 3/ ULS B2	988,09	5,75	24,93>>	0,11	-65,71	29,92	1*1.20 + 5/4*1*1.05 + 78*1.50
2/ 4/ ULS B2	800,98	6,32	-24,53<<	0,07	-63,63	-65,15	1*1.20 + 9/4*1.05 + 8/1*1.05 + 78*1.50
2/ 3/ ULS B2	1263,57	5,72	17,50	0,41>>	-46,21	30,16	1*1.20 + 9/10*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05
2/ 3/ ULS B2	920,44	7,02	17,10	-0,63<<	-44,19	36,80	1*1.20 + 9/4*1.50 + 8/4*1.50 + 78*1.05
2/ 4/ ALS/69	777,53	3,66	0,14	0,00	1,42>>	-38,07	1*1.00 + 6/69*0.50
2/ 3/ ULS B2	988,09	5,75	24,93	0,11	-65,71<<	29,92	1*1.20 + 5/4*1*1.05 + 78*1.50
2/ 3/ ULS B2	790,19	8,52	17,36	0,29	-45,51	44,99>>	1*1.20 + 9/1*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05
2/ 4/ ULS B2	613,75	8,52	-16,99	0,29	-42,61	-87,69<<	1*1.20 + 9/1*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05
3/ 5/ ULS B1	1382,53>>	6,12	17,16	-0,10	-44,54	31,72	1*1.35 + 9/1*1.05 + 8/9*1.05 + 78*1.05
3/ 5/ 2	90,13<<	0,03	0,00	0,00	-0,01	0,14	
3/ 5/ ULS B2	806,03	8,54>>	17,31	0,01	-45,29	44,59	1*1.20 + 9/10*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
3/ 5/ 2	90,13	0,03<<	0,00	0,00	-0,01	0,14	
3/ 5/ ULS B2	1015,56	6,24	24,87>>	0,09	-65,46	32,45	1*1.20 + 9/7*1.05 + 8/1*1.05 + 78*1.50
3/ 6/ ULS B2	823,14	6,45	-24,59<<	-0,12	-64,33	-66,87	1*1.20 + 9/13*1.05 + 8/6*1.05 + 78*1.50
3/ 5/ ULS B2	891,30	7,65	17,55	0,15>>	-46,56	39,85	1*1.20 + 9/8*1.50 + 8/8*1.50 + 78*1.05
3/ 5/ ULS B2	938,31	7,14	17,00	-0,18<<	-43,67	37,16	1*1.20 + 9/13*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05
3/ 6/ ALS/51	807,78	3,91	0,06	-0,00	0,62>>	-40,59	1*1.00 + 6/51*0.50
3/ 5/ ULS B2	1015,56	6,24	24,87	0,09	-65,46<<	32,45	1*1.20 + 9/7*1.05 + 8/1*1.05 + 78*1.50
3/ 5/ ULS B2	806,03	8,54	17,31	0,01	-45,29	44,59>>	1*1.20 + 9/10*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
3/ 6/ ULS B2	629,59	8,54	-17,04	0,01	-43,16	-88,50<<	1*1.20 + 9/10*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
4/ 7/ ULS B1	1380,46>>	6,09	17,12	-0,10	-44,33	31,56	1*1.35 + 9/10*1.05 + 8/9*1.05 + 78*1.05
4/ 7/ 2	90,13<<	0,03	-0,00	0,00	0,01	0,14	
4/ 7/ ULS B2	799,72	8,50>>	17,27	0,02	-45,07	44,37	1*1.20 + 9/19*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
4/ 7/ 2	90,13	0,03<<	-0,00	0,00	0,01	0,14	
4/ 7/ ULS B2	1015,91	6,24	24,83>>	0,10	-65,23	32,45	1*1.20 + 9/16*1.05 + 8/1*1.05 + 78*1.50
4/ 8/ ULS B2	817,67	6,41	-24,64<<	-0,11	-64,78	-66,49	1*1.20 + 9/22*1.05 + 8/9*1.05 + 78*1.50
4/ 7/ ULS B2	885,88	7,61	17,52	0,16>>	-46,37	39,65	1*1.20 + 9/17*1.50 + 8/2*1.50 + 78*1.05
4/ 7/ ULS B2	937,14	7,13	16,95	-0,16<<	-43,41	37,14	1*1.20 + 9/22*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
4/ 7/ ALS/41	954,34	3,91	-0,06	0,00	0,31>>	20,27	1*1.00 + 6/41*0.50
4/ 7/ ULS B2	1015,91	6,24	24,83	0,10	-65,23<<	32,45	1*1.20 + 9/16*1.05 + 8/1*1.05 + 78*1.50
4/ 7/ ULS B2	799,72	8,50	17,27	0,02	-45,07	44,37>>	1*1.20 + 9/19*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
4/ 8/ ULS B2	623,29	8,50	-17,08	0,02	-43,60	-88,06<<	1*1.20 + 9/19*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
5/ 9/ ULS B1	1338,44>>	5,73	17,02	-0,11	-43,87	29,70	1*1.35 + 9/10*1.05 + 8/1*1.05 + 78*1.05
5/ 9/ 2	86,85<<	0,00	-0,01	-0,00	0,05	0,01	
5/ 9/ ULS B2	768,05	8,26>>	17,22	0,01	-44,89	43,13	1*1.20 + 9/28*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05

Tabell 38: Dimensjonerende moment- og aksialkraft – søyle.

1. Lasttilfelle	
Maks aksialkraft N_{Ed}	1383 kN -> Dimensjonerende
Maks feltmoment M_{Ed}	45 kNm
2. Lasttilfelle	
Maks aksialkraft N_{Ed}	1016 kN
Maks feltmoment M_{Ed}	66 kNm
3. Lasttilfelle	
Maks aksialkraft N_{Ed}	630 kN
Maks feltmoment M_{Ed}	89 kNm -> Dimensjonerende

4.2.3.2 Armering

Valgt lengdearmering, bøylearmering og plassering for søyle er presentert i Tabell 39.

Tabell 39: Valgt lengde- og bøylearmering – søyle.

Lengdearmering	
Senteravstand	71 mm
Armering	φ20
Antall	7 stk
Bøylearmering	
Armering	φ12
Senteravstand	400 mm

4.2.3.3 Bruksgrensekontroll (SLS)

Søylen er ikke kontrollert i bruksgrensetilstand ved manuell beregning i Mathcad. Bruksgrensekontroll av søyler er utført i ISY Design, og tilfredsstillende krav. Resultat kan ses i vedlegg V22. Krefter fra analyse i Robot i bruksgrensetilstand på søyle er presentert i Tabell 40.

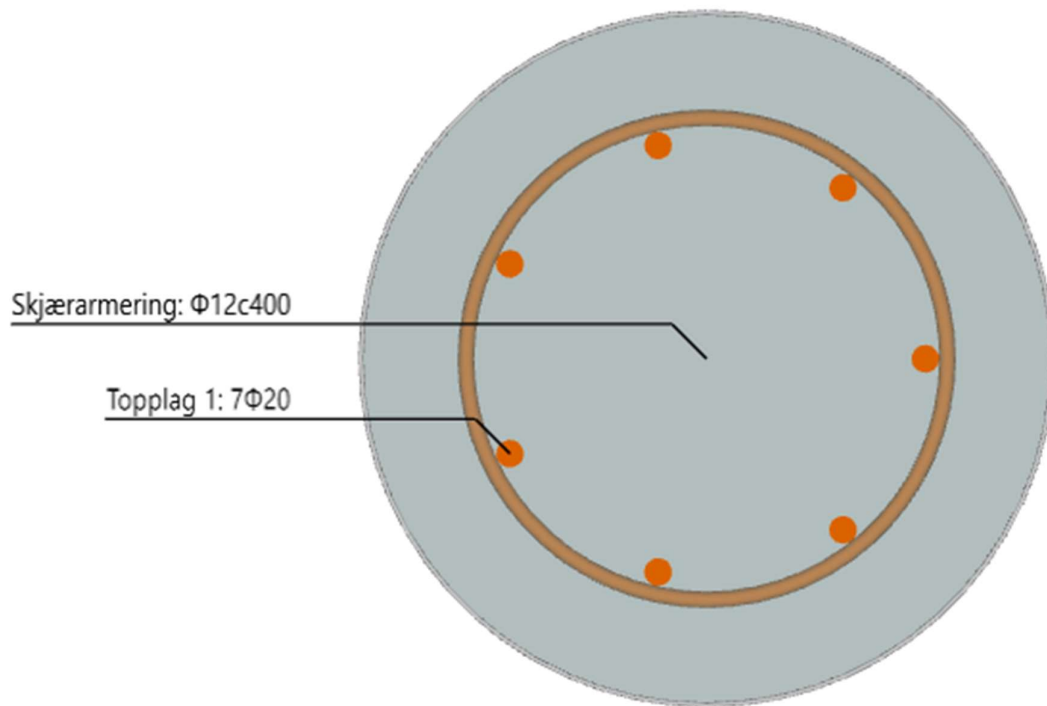
Tabell 40: Krefter på søyle i SLS. Fra Robot.

• Cases: 121 122 220to232By3 221to230By3

Member/Node/Case	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)	Definition
3/ 5/ SLS/289	1048,05>>	4,70	16,34	-0,10	-42,39	24,36	1*1.00 + 9/1*1.00 + 8/9*1.00 + 78*1.00
3/ 6/ SLS/10	574,51<<	6,46	-16,23	-0,00	-41,18	-66,91	1*1.00 + 9/10*1.00 + 8/1*1.00 + 78*1.00
3/ 5/ SLS/298	725,55	6,49>>	16,47	0,00	-43,07	33,83	1*1.00 + 9/10*1.00 + 8/9*1.00 + 78*1.00
3/ 5/ SLS/55	962,39	3,78<<	16,45	-0,00	-42,93	19,63	1*1.00 + 7/55*1.00 + 78*1.00
3/ 5/ SLS/7	832,67	5,38	16,64>>	0,08	-43,96	27,97	1*1.00 + 9/7*1.00 + 8/1*1.00 + 78*1.00
3/ 6/ SLS/193	670,42	5,57	-16,45<<	-0,11	-43,45	-57,81	1*1.00 + 9/13*1.00 + 8/6*1.00 + 78*1.00
3/ 5/ SLS/260	782,39	5,89	16,64	0,10>>	-43,92	30,67	1*1.00 + 9/8*1.00 + 8/8*1.00 + 78*1.00
3/ 5/ SLS/13	813,73	5,55	16,26	-0,12<<	-41,99	28,88	1*1.00 + 9/13*1.00 + 8/1*1.00 + 78*1.00
3/ 6/ SLS/7	685,64	5,38	-16,06	0,08	-39,46>>	-55,78	1*1.00 + 9/7*1.00 + 8/1*1.00 + 78*1.00
3/ 5/ SLS/7	832,67	5,38	16,64	0,08	-43,96<<	27,97	1*1.00 + 9/7*1.00 + 8/1*1.00 + 78*1.00
3/ 5/ SLS/298	725,55	6,49	16,47	0,00	-43,07	33,83>>	1*1.00 + 9/10*1.00 + 8/9*1.00 + 78*1.00
3/ 6/ SLS/298	578,52	6,49	-16,24	0,00	-41,23	-67,21<<	1*1.00 + 9/10*1.00 + 8/9*1.00 + 78*1.00

4.2.3.4 Tegninger fra ISY Design

Figur 48 viser tverrsnitt av søyle med armeringsplassering.



Figur 48: Tverrsnitt av søyle med armeringsplassering. Fra ISY Design.

4.2.4 Resultat av beregninger for støttebjelke

Støttebjelkens dimensjoner er presentert i Tabell 41.

Tabell 41: Dimensjoner – støttebjelke.

Støttebjelkens dimensjoner	
Høyde	0,50 m
Bredde	0,55 m
Lengde	3,15 m

4.2.4.1 Dimensjonerende moment

Dimensjonerende moment M_{Ed} i y- og z-retning og aksialkraft N_{Ed} i for støttebjelke i bruddgrensetilstand (ULS) er hentet fra Tabell 42. Verdiene er presentert i Tabell 43 for to ulike lasttilfeller.

Tabell 42: Dimensjonerende moment til støttebjelke i bruddgrensetilstand. Fra Robot.

Member/Node/Case	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)	Definition
8/ 15/ ULS B2	3301,45>>	22,06	117,11	-0,00	-0,00	0,00	1*1.20 + 9/24*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
8/ 15/ ULS B2	94,97<<	5,82	77,45	-0,00	-0,00	0,00	1*1.20 + 9/11*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05
8/ 15/ ULS B2	2512,74	191,03>>	127,57	-0,00	-0,00	0,00	1*1.20 + 9/27*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05
8/ 15/ ULS B2	2375,84	-205,58<<	135,78	0,00	0,00	-0,00	1*1.20 + 9/20*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
8/ 15/ ULS B2	2375,84	-205,58	135,78>>	0,00	0,00	-0,00	1*1.20 + 9/20*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
8/ 16/ ULS B2	154,14	-1,69	22,18<<	-0,00	168,50	5,84	1*1.20 + 6/86*1.50 + 78*1.05
8/ 15/ ULS B2	2777,12	-195,37	133,01	0,00>>	-0,00	-0,00	1*1.20 + 9/21*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05
8/ 15/ ULS B2	123,76	2,09	77,37	-0,00<<	-0,00	-0,00	1*1.20 + 9/8*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
8/ 16/ ULS B2	2375,84	-205,58	82,47	0,00	376,48>>	709,24	1*1.20 + 9/20*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
8/ 15/ ULS B2	1932,38	-184,51	131,57	-0,00	-0,00<<	-0,00	1*1.20 + 9/19*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05
8/ 16/ ULS B2	2375,84	-205,58	82,47	0,00	376,48	709,24>>	1*1.20 + 9/20*1.50 + 8/9*1.50 + 78*1.05
8/ 16/ ULS B2	2512,74	191,03	74,26	-0,00	348,16	-659,04<<	1*1.20 + 9/27*1.50 + 8/1*1.50 + 78*1.05

Tabell 43: Dimensjonerende moment – støttebjelke.

1. Lasttilfelle	
Maks moment M_y	0 kNm
Maks moment M_z	0 kNm
Maks aksialkraft N_x	3301,45 kN
2. Lasttilfelle	
Maks moment M_y	376,48 kNm
Maks moment M_z	709,24 kNm
Maks aksialkraft N_x	2512,74 kN

4.2.4.2 Armering

Valgt armering og plassering for støttebjelke er presentert i Tabell 44.

Tabell 44: Valgt armering og plassering – støttebjelke.

Lengdearmering i topplag	
Armering	φ40
Antall	2 stk
Bøylearmering i bunnlag	
Armering	φ40
Senteravstand	2 stk
Enkeltjern i midten	
Armering	φ40
Senteravstand	2 stk
Bøylearmering	
Armering	φ12
Senteravstand	277 mm

4.2.4.3 Skjærarmering

Skjærkrefter på støttebjelke er hentet fra Tabell 45. Dimensjonerende skjærkraft og skjærkraftskapasitet for støttebjelke er presentert i Tabell 46.

Tabell 45: Skjærkrefter støttebjelke. Fra Robot.

Member/Node/Case			FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)
8/	15/	ULS B2	3301,45>>	22,06	117,11
8/	15/	ULS B2	94,97<<	5,82	77,45
8/	15/	ULS B2	2512,74	191,03>>	127,57
8/	15/	ULS B2	2375,84	-205,58<<	135,78
8/	15/	ULS B2	2375,84	-205,58	135,78>>
8/	16/	ULS B2	154,14	-1,69	22,18<<
8/	15/	ULS B2	2777,12	-195,37	133,01
8/	15/	ULS B2	123,76	2,09	77,37
8/	16/	ULS B2	2375,84	-205,58	82,47
8/	15/	ULS B2	1932,38	-184,51	131,57
8/	16/	ULS B2	2375,84	-205,58	82,47
8/	16/	ULS B2	2512,74	191,03	74,26

Tabell 46: Dimensjonerende skjærkraft og skjærkraftskapasitet – støttebjelke.

Skjærkrefter	
Dimensjonerende Skjærkraftskapasitet $V_{Rd,y}$	310 kN
Dimensjonerende Skjærkraftskapasitet $V_{Rd,z}$	333 kN
Dimensjonerende Skjærkraft $V_{Ed,y}$	206 kN
Dimensjonerende Skjærkraft $V_{Ed,z}$	136 kN
$V_{Rd,y} > V_{Ed,y} \Rightarrow$ Skjærkraftskapasiteten er tilstrekkelig, slik at det ikke beregningsmessig er nødvendig med skjærarmering	
$V_{Rd,z} > V_{Ed,z} \Rightarrow$ Skjærkraftskapasiteten er tilstrekkelig, slik at det ikke beregningsmessig er nødvendig med skjærarmering	

4.2.4.4 Bruksgrensekontroll (SLS)

Krefter på støttebjelke fra analyse i bruksgrensetilstand er hentet fra Tabell 47.

Tabell 47: Krefter fra analyse i bruksgrensetilstand. Fra Robot.

Member/Node/Case	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
15/ 12/ SLS/29	38,67>>	16,58	-366,04	29,10	-67,21	-1,22
15/ 2/ SLS/307	-1,52<<	-14,11	248,64	-14,12	13,66	-1,40
15/ 12/ SLS/29	38,67	16,58>>	-366,04	29,10	-67,21	-1,22
15/ 2/ SLS/37	14,00	-21,79<<	337,44	-26,23	9,17	-1,52
15/ 2/ SLS/289	12,54	-21,46	340,22>>	-26,47	8,96	-1,80
15/ 12/ SLS/29	38,67	16,58	-366,04<<	29,10	-67,21	-1,22
15/ 12/ SLS/28	38,08	16,43	-365,18	29,13>>	-67,56	-1,14
15/ 2/ SLS/289	12,54	-21,46	340,22	-26,47<<	8,96	-1,80
15/ 2/ SLS/90	-1,15	-14,26	266,90	-15,50	15,51>>	-1,46
15/ 12/ SLS/28	38,08	16,43	-365,18	29,13	-67,56<<	-1,14
15/ 12/ SLS/289	26,45	7,20	-278,39	16,26	-63,85	0,10>>
15/ 2/ SLS/289	12,54	-21,46	340,22	-26,47	8,96	-1,80<<

4.2.4.4.1 Nedbøyning

Resultat fra nedbøyning fra Robot og tillat nedbøyning for hovedbjelke er presentert i Tabell 48.

Tabell 48: Beregnet nedbøyning hentet fra Robot og beregnet tillat nedbøyning – støttebjelke.

Nedbøyning	
Beregnet nedbøyning δ_{Robot}	1,58 mm
Maksimal tillatt nedbøyning δ_{Max}	L/250 = 12,6 mm
$\delta_{\text{Max}} > \delta_{\text{Robot}} \Rightarrow$ Konstruksjonen er godkjent for nedbøyning	

4.2.4.4.2 Rissviddekontroll

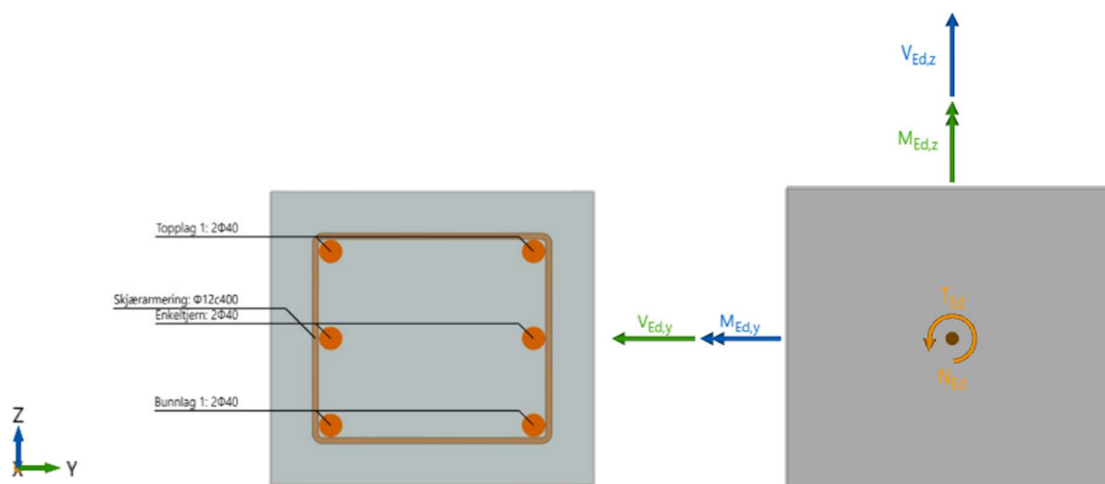
Resultat fra rissviddekontroll utført i Mathcad for støttebjelke er presentert i Tabell 49.

Tabell 49: Resultat fra rissviddekontroll fra Mathcad – støttebjelke.

Rissviddekontroll y-retning	
$0.0123 \leq 0.35$	Tilfredsstillt krav til godkjent rissvidde i EC2
Rissviddekontroll z-retning	
$0.0215 \leq 0.35$	Tilfredsstillt krav til godkjent rissvidde i EC2

4.2.4.5 Tegninger fra ISY Design

Figur 49 viser tverrsnitt av støttebjelke med armeringsplassering.



Figur 49: Bjelketverrsnitt fra ISY Design(t.v.) og aksesystem (t.h.) – støttebjelke.

4.2.5 Resultat for beregninger for frontskjørt

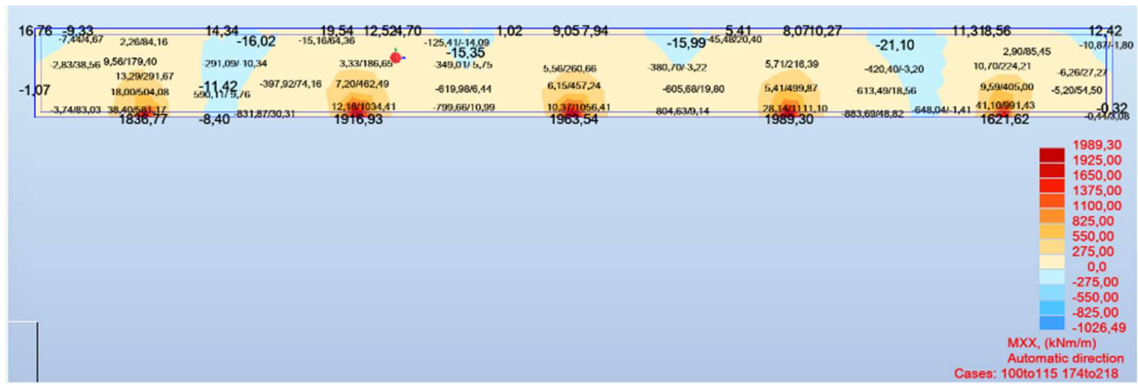
Manuelle beregninger for frontskjørt fra Mathcad kan sees i vedlegg V05 og vedlegg V06. Dimensjoner for frontskjørt er presentert i Tabell 50.

Tabell 50: Dimensjoner – frontskjørt.

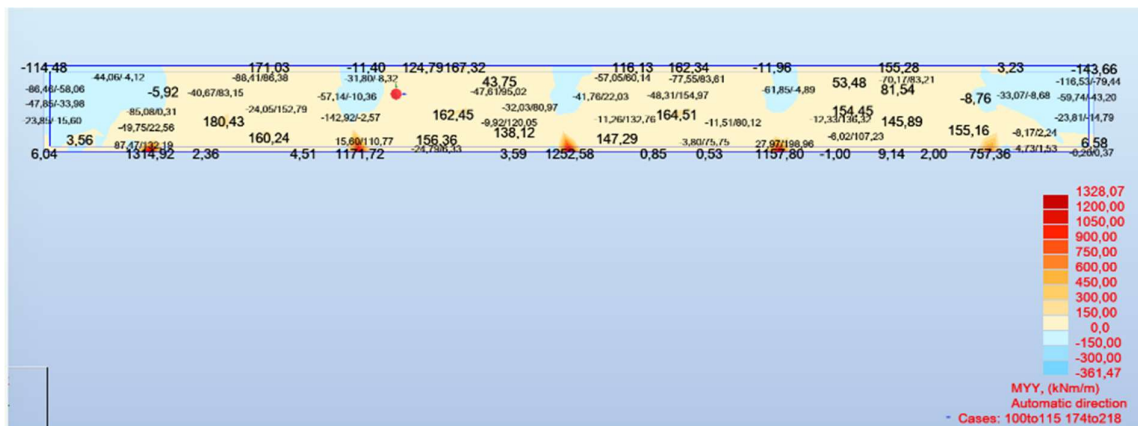
Frontskjørtets dimensjoner	
Tykkelse	0,6 m
Spennvidde y-retning	4,0 m
Spennvidde z-retning	9,0 m

4.2.5.1 Dimensjonerende moment

Dimensjonerende moment fra Robot analysen i bruddgrensetilstand (ULS) på frontskjørteter, er hentet fra Figur 50 og Figur 51. Verdiene er presentert i Tabell 51 sammen med frontskjørtets momentkapasitet.



Figur 50: Dimensjonerende moment $M_{Ed,x}$ i bruddgrensetilstand -frontskjørt. Fra Robot.



Figur 51: Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$ i bruddgrensetilstand – frontskjørt. Fra Robot.

Tabell 51: Dimensjonerende moment ved felt- og støttepunkt – frontskjørt.

Dimensjonerende momenter ved støtte	
Dimensjonerende moment $M_{Ed,x}$	1989,30 kNm
Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$	1252,58 kNm
Dimensjonerende momentkapasitet $M_{Rd,x}$	3219 kNm
Dimensjonerende momentkapasitet $M_{Rd,y}$	2734 kNm
Dimensjonerende momenter ved felt	
Dimensjonerende moment $M_{Ed,x}$	883,69 kNm
Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$	180,43 kNm
Dimensjonerende momentkapasitet $M_{Rd,x}$	3269 kNm
Dimensjonerende momentkapasitet $M_{Rd,y}$	2875 kNm

4.2.5.2 Armering

Valgt armering og plassering for frontskjørtet er presentert i Tabell 52 og Tabell 53.

Tabell 52: Valgt lengdearmering overkant over støtte – frontskjørt.

Lengdearmering overkant (støtte)	
Plassering	Overkant
Armering x-retning:	φ40
Armering y-retning:	φ40
Senteravstand x-retning	100 mm
Senteravstand y-retning:	130 mm
Trykkarmering	Ikke nødvendig

Tabell 53: Valgt lengdearmering overkant over felt – frontskjørt.

Lengdearmering underkant (felt)	
Plassering	Underkant
Armering x-retning:	φ32
Armering y-retning:	φ32
Senteravstand x-retning	100 mm
Senteravstand y-retning:	150 mm
Trykkarmering	Ikke nødvendig

4.2.5.3 Skjærkrefter

Skjærkrefter fra Robot analysen på frontskjørtet i ulykkestilstand (ULS) er hentet fra Figur 52. Skjærkraftskapasitet og største skjærkraft er presentert i Tabell 54.



Figur 52: Dimensjonerende skjærkrefter – frontskjørt. Fra Robot.

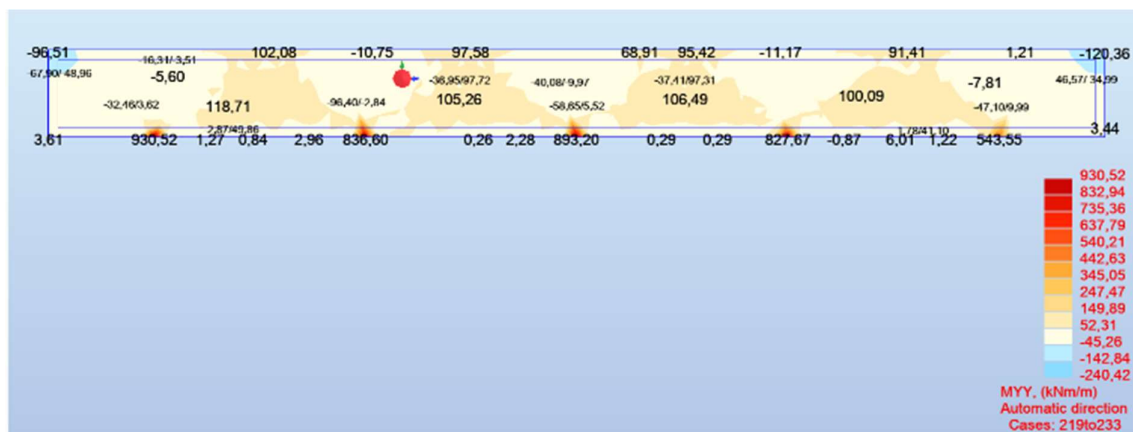
Tabell 54: Dimensjonerende skjærkraftskapasitet og største skjærkraft – frontskjørt.

Skjærkrefter støtte	
Dimensjonerende Skjærkraftskapasitet $V_{Rd,x}$	222 kN
Dimensjonerende Skjærkraftskapasitet $V_{Rd,y}$	184 kN
Skjærkrefter felt	
Dimensjonerende Skjærkraftskapasitet $V_{Rd,x}$	192 kN
Dimensjonerende Skjærkraftskapasitet $V_{Rd,y}$	186 kN
Største skjærkraft V_{Ed}	4084 kN
$V_{Ed} > V_{Rd} \Rightarrow$ Skjærkraftskapasiteten er ikke tilstrekkelig, slik at det beregningsmessig er nødvendig med skjærarmering	

Skjærkraftskapasiteten er ikke tilstrekkelig, slik at det beregningsmessig er nødvendig med skjærarmering. Dette er spesielt i områdene der støttebjelkene er plassert. Løsninger med forsterkningsplater eller vouter må undersøkes. Dette er ikke undersøkt. Det er heller ikke tatt hensyn til reduksjon av skjærkrefter nært opplegg. Bidrag til skjærkraftskapasitet fra hovedbjelke i topp frontskjørt er heller ikke vurdert.

4.2.5.4 Bruksgrensekontroll (SLS)

Figur 53 viser moment M_y og Figur 54 viser M_x fra Robot analysen på frontskjørtet i bruksgrensetilstand (SLS). Dimensjonerende moment er presentert i Tabell 55.



Figur 53: Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$ i bruksgrensetilstand – frontskjørt. Fra Robot.



Figur 54: Dimensjonerende moment $M_{Ed,x}$ i bruksgrensetilstand – frontskjørt. Fra Robot.

Tabell 55: Dimensjonerende moment over felt- og støttepunkt – frontskjørt.

Momenter ved støtte	
Dimensjonerende moment $M_{Ed,x}$	1343,69 kNm
Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$	893,20 kNm
Dimensjonerende ved felt	
Dimensjonerende moment $M_{Ed,x}$	883,69 kNm
Dimensjonerende moment $M_{Ed,y}$	540,20 kNm

4.2.5.4.1 Nedbøyning

Resultat fra nedbøyning fra Robot og tillat nedbøyning for frontskjørt er presentert i Tabell 56.

Tabell 56: Beregnet nedbøyning hentet fra Robot og beregnet tillatt nedbøyning –frontskjørt.

Nedbøyning	
Beregnet største nedbøyning fra Robot δ_{Robot}	7,26 mm
Maksimal tillatt nedbøyning i y-retning $\delta_{\text{Max}} = L/250$	16,0 mm
Maksimal tillatt nedbøyning i x-retning $\delta_{\text{Max}} = L/250$	36,0 mm
$\delta_{\text{Max}} > \delta_{\text{Robot}} \Rightarrow$ Konstruksjonen er godkjent for nedbøyning	

4.2.5.4.2 Rissviddekontroll

Resultat fra rissviddekontroll utført i Mathcad er presentert i Tabell 57.

Tabell 57: Resultat fra rissviddekontroll fra Mathcad – frontskjørt.

Rissviddekontroll	
$0,33 \leq 0,35$ støtte y-retning	Tilfredsstillt krav til godkjent rissvidde i EC2
$0,34 \leq 0,35$ støtte z-retning	Tilfredsstillt krav til godkjent rissvidde i EC2
$0,35 \leq 0,35$ felt y-retning	Tilfredsstillt krav til godkjent rissvidde i EC2
$0,34 \leq 0,35$ felt z-retning	Tilfredsstillt krav til godkjent rissvidde i EC2

5 DISKUSJON

5.1 Valg av fenderløsning

I starten av oppgaven så vi på ulike fenderløsninger. Fenderløsningene er presentert i kap. 2.1. De ulike løsningene vurderes slik: torsjonsfenderverk har flere bevegelige deler og kostbart(1), bunnfundamentert fenderpanel (2) og peler med lavfriksjonsplater (3) er ugunstig pga. den lange avstanden til berggrunnen og korrosjon, opphengte fenderpanel er utfordrende med tanke på kraftopptaket og er kostbart (4), fenderverk av dumperdekk har lite dokumentasjon på egenskaper, lite estetisk og stor friksjon (5).

Fordi det var ønskelig med horisontal fenderløsning ble de fleste fenderkonseptene etter hvert skrinlagt etter faktorene som er nevnt over. En løsning som ble vurdert nærmere var en flytende fender i forkant av konstruksjonen, og flytende konstruksjon. Det ville gitt en adaptiv fender som tilpasset seg vannstanden. Den store utfordringen med en slik løsning, er støtkreftene som skal føres inn i fjellveggen. En annen utfordring med denne løsningen er økt slitasje etter bevegelsen i vannet. Ulike konstruksjoner ble diskutert med blant annet fagverk i stål og betong. Forslaget om flytende kai med påmontert fending vil være en lignende løsning, dette vil gi et uoversiktlig lastbilde. Det er også lagt til grunn at det skal være en åpen kaikonstruksjon som lar vannet flyte fritt. Ved flytende konstruksjon kan det tenkes at den vil føre til at vannet ikke vil flyte like fritt i tunnelen.

Løsningen vi gikk videre er et fendersystem fra Nordic Fender. Fenderløsningen er best egnet til prosjektet med tanke på tekniske egenskaper, utførelse og pris. Løsningen tilfredsstillte kravene som er satt for oppgaven. Våre resultater tyder på at vi har kommet fram til en løsning hvor det er brukt riktige dimensjoner og materialer. Fordelene med valgt fenderløsning i motsetning til tiltenkt løsning fra Teknisk forprosjekt er en lavere kostnad, enklere montering og mindre vedlikehold. Budsjettpriser fra Nordic Fender viser at fenderløsningen vår kan omtrent halvere fenderkostnadene til prosjektet. Det er viktig å bemerke seg at disse tallene er kun estimerte budsjettkostnader.

Valgt fenderløsning krever imidlertid et større frontskjørt og dermed større mengde betong. Beregninger viser at frontskjørtet vil øke betongmengden og klimagassutslippet sammenlignet med løsningen fra Teknisk forprosjekt. Økningen av betong og klimagassutslipp vil kunne reduseres ved utsparinger på frontskjørtet av konstruksjonen. Utsparinger på betongskjørtet ble diskutert under befaringen på Spenncon, og de virket positiv til ideen.

I forbindelse med valg av fenderløsning dukker det også opp problematikk som ikke kan besvares fullstendig i denne oppgaven. Teknisk forprosjekt tar for seg en utfordring for store skip som suges inn

mot en av sidene i fart. Dette løses ved å ha åpen konstruksjon under ledekonstruksjonene slik at bølgene ikke hindres unødig. I vårt konsept vil kaiskjørtet være neddykket i vann, og trolig forsterke effekten hvor båtene suges mot siden. Denne problematikken må drøftes videre i en eventuell optimalisering ved for eksempel utsparinger i frontskjørtet.

Annen problematikk knyttet til valg av fenderløsning er at større båter har bulb foran skroget for vannbryting. En av hovedoppgavene for fendere er å beskytte konstruksjonens søyler mot støt fra bulber. Derfor anbefales det en sikkerhetsavstand på 2 meters klaring til søylens senterlinje i tilfelle båter treffer med stor støtvinkel på kaien. Det er gitt i Teknisk forprosjekt at støtvinkelen vil være på 3,5 grader, på bakgrunn av den lave støtvinkelen antas det at søylene har tilstrekkelig klaring. Trolig bør dette undersøkes ytterligere. Konstruksjonen er dimensjonert for å tåle at én søyle blir borte etter krav fra Teknisk forprosjekt.

5.2 Valg av konstruksjonskonsept

Etter valg av fenderløsning var bestemt, ble ulike konstruksjonskonsept vurdert. Det ble hovedsakelig vurdert fire ulike konstruksjonskonsept: Konsept 1 ble valgt bort på grunn av utfordringer ved bortfall av søylepunkt, dette siden hver tverrbjelke hadde opplegg på søyle og ingen bjelke som spente over flere søylepunkt. Frontskjørtet måtte derfor eventuelt dimensjoneres for å bære konstruksjonen ved bortfall av søylepunkt (1), konsept 2 så nærmere på hvordan eventuelle element kunne tenkes ved en mer elementbasert konstruksjon. Søyleelementene ble ikke vurdert som problematiske. De kan eventuelt produseres som 2 deler dersom kapasitet på kran er lav eller det er høydebegrensninger i produksjonen. Lengden ved frakt er ikke ansett som problem siden en antar at alle element kan fraktes med båt. Dekkeelement er også ansett som en gjennomførbar løsning. Det er imidlertid vurdert som en bedre løsning å produsere elementet i full tykkelse på 0,25 meter og unngå påstøp. Dekket støpes deretter fast til hovedbjelke og bakkantbjelke. Frontskjørtet ble ansett som største utfordring på grunn av høy egenvekt. Uten utsparinger vil vekten av element A overstige 140 tonn (2), konsept 3 ble vurdert som en veldig god løsning med mulighet for store besparelser i betongmengde. Bortfall av søylepunkt ble også eliminert ved valg av denne løsningen. Utfordringene her er kostnader og korrosjonssikkerheten til fjellankerene som må holde konsollene til konstruksjonen. Konsollene ble også vurdert til å hindre fri flyt av vann under konstruksjonen og en måtte eventuelt se på utsparinger her (3).

Konsept 4 er løsningen det ble valgt å gå videre med på grunn av at den ble ansett som mest gjennomførbar. Løsningen tilfredsstillte kravene som er satt for oppgaven og for kaikonstruksjonen i Teknisk forprosjekt. Etter dimensjonering av konstruksjonen kan vi påstå at vi har kommet fram til en løsning hvor det er brukt riktige dimensjoner og materialer. Selv om løsningen baserer seg på en plasstøpt konstruksjon, er det likevel vurdert at enkelte deler av konstruksjonen kan utføres som element. Dette er spesielt søyle, dekke og støttebjelke. Frontskjørtet blir tungt dersom det skal produseres som

element tilsvarende konsept 2, det er derfor vurdert som enklest å plasstøpe. Det er rom for optimalisering av konstruksjonen ved å se på utsparinger i frontskjørt, dette vil da kunne føre til at det er mer aktuelt som element. Ved å inkludere tykkelsen på frontskjørtet som en del av hovedbjelken i beregningene vil dette kunne føre til en reduksjon av tverrsnittet på hovedbjelken.

Ledekonstruksjonen i Stad Skipstunnel er en 1,7 kilometer lang kai som følger begge sidene av tunnelen. En slik konstruksjon faller innenfor kategorien som egner seg godt for elementproduksjon fordi den kan deles opp i mindre like elementer.

5.3 Erfaringer

Før vi startet på denne oppgaven hadde ingen på gruppen erfaring fra dimensjonering av kaikonstruksjon. I starten bydde dette på utfordringer, men med god hjelp av eksterne bedrifter, veiledere og Multiconsult har vi tilegnet oss kunnskap om dimensjonering og prosjektering av kaikonstruksjon. Vi hadde heller ikke erfaring Robot fra tidligere. Vi har tilegnet oss grunnleggende kunnskap om programmet og ikke minst erfart at ting tar tid i ny programvare. Vi har vært i kontakt med mange bedrifter fra næringen, noe som har vært lærerikt og gitt oss en forsmak på hvordan det vil bli å komme ut i jobb. Det har vært helt avgjørende for resultatet i oppgaven.

Arbeidet har for det meste foregått på campus, med enkelte dager med selvstudium. Fremdrift og struktur har blitt prioritert siden oppstart av prosjekt. Vi har deltatt på veiledningstimen på onsdager gjennom hele semesteret og hatt noen møter med Multiconsult, noe som har vært viktig for fremdriften.

På grunn av tidsbegrensningen har vi vært nødt til å gå bort fra temaer som for eksempel bruk av fiberbetong, lavkarbonbetong og detaljerte miljøanalyser. Dette var temaer som ble drøftet i oppstartsmøte med Multiconsult. Oppgaven har vært utfordrende til tider, men samtidig veldig lærerik.

5.4 Usikkerhet

Gjennom hele prosessen har vi tilstrebet å bruke sikre kilder og metoder. I oppgaven har vi basert alle laster og krefter på utregninger utført i Robot. Usikkerheten ved bruk av digitale beregninger kan forekomme ettersom programmet var nytt for oss når vi startet med prosjektet. Tolkning av data fra Robot er også en vesentlig kilde til eventuell usikkerhet. Valgte verdier for dimensjonerende krefter er de mest ugunstige og gir et konservativt lastbilde som kan vurderes redusert.

5.5 Forslag til videre arbeid

I oppgaven har vi valgt å dimensjonere en kaikonstruksjon i betong. Det er mange fordeler ved bruk av prefabrikkerte betongelement (fra kap. 2.8) på en slik konstruksjon. Forslag til videre arbeid vil være å se på mulighetene for å produsere frontskjørt og hovedbjelke ved bruk av prefabrikkerte element.

Optimalisering av konstruksjonen i form av mulige utsparinger og mindre dimensjoner bør også ses nærmere på. Eksempel på egnet sted for utsparinger er i frontskjørtet. Siden starten av prosessen har utsparinger i kaiskjørtet blitt sett på som en mulighet til å redusere betongbruken i konstruksjonen, som videre kan redusere kostnader og klimagassutslipp på betong.

6 KONKLUSJON

Problemstillingen i oppgaven har vært todelt: finne alternativ fenderløsning til kaikonstruksjonen i Stad Skipstunnel (1) og konstruere og dimensjonere kaikonstruksjonen i Stad Skipstunnel, tilpasset den alternative fenderløsningen (2). Resultatet ble en åpen kaikonstruksjon i armert betong med tilhørende fenderløsning fra Nordic Fender bestående av gummi og UHMW-PE. Dekker, søyler og støttebjelker anbefales utført som element. Frontskjørt og hovedbjelke anbefales som plasstøpt konstruksjon. Konstruksjonskonseptet og fenderløsningen har de samme tekniske egenskapene som den gitt i Teknisk forprosjekt [1] og er innenfor krav gitt i Norsk Standard, Eurokode og SVVs publikasjoner. Resultatet gir et fornuftig svar på problemstillingen og tilfredsstiller forutsetningene gitt av Multiconsult.

Samarbeidet med næringen har vært helt avgjørende for resultatet i oppgaven. Besvarelsen av oppgaven er utført i etterkant av kontakt med aktuelle bedrifter. Fenderløsningen fra Nordic Fender satte utgangspunktet for konstruksjonen, og alle beregninger er gjort med utgangspunkt til den. Basert på våre resultater og tilbakemeldinger fra næringen kan vi også konkludere med at dette er en fullverdig gjennomførbar løsning, både for fenderløsning og konstruksjonskonsept 4. Konstruksjonen gir også rom for optimalisering.

Gjennom arbeidet med oppgaven har vi som gruppe tilegnet oss ny kunnskap og økt kompetansen vår innenfor temaet for oppgaven. Vi har underveis i oppgaven måtte begrense hva vi skulle gå videre med for å besvare problemstillingen på best mulig måte ettersom enkelte deler tok lengere tid enn først antatt. Oppgaven har vært svært lærerik, men utfordrende.

7 REFERANSER

- [1] Dr. Techn. Olav Olsen AS; Norconsult AS; Kystverket, «Teknisk forprosjekt - Stad Skipstunnel,» 2017. [Internett]. Available: <https://www.kystverket.no/contentassets/3126a19bba2444f5bc73b68b1204f6ec/rapporter-og-utredninger/teknisk-forprosjekt-2017.pdf/download>.
- [2] Statens Vegvesen, «Bruprosjektering - Håndbok N400,» april 2015. [Internett]. Available: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-n400-bruprosjektering.pdf>.
- [3] «Eurokode 2 - Prosjektering av betongkonstruksjoner: Del 1-1 Allmenne regler og regler for bygninger - NS-EN 1992-1-1:2004+A1+NA,» Standard Norge, 30.06.2021.
- [4] Robot Structural Analysis Program 2022, «Autodesk Inc.».
- [5] PTC Mathcad Prime 3.1 (2015), «Mathcad Prime,» PTC Inc.
- [6] Kystverket, «Bakgrunn, utredninger og bilder,» Kystverket, 23 april. 2021. [Internett]. Available: https://www.kystverket.no/sjovegen/stad-skipstunnel/bakgrunn-utredninger-og-bilder/?fbclid=IwAR1hrP2jNaOIo1hIoFCxq58tjM6-4ag2DrdZG_LHI_CarMc-rmdzW0uAtaY. [Funnet 20 mars. 2022].
- [7] Illustrasjon: Kystverket/Snøhetta/Plomp, «Stad skipstunnel - inne i tunnelen,» 16 Mars 2021. [Internett]. Available: <https://kystverket.fotoware.cloud/fotoweb/archives/5000-Alle-filer/Folder%2023/Stad%20skipstunnel%20-%20inne%20i%20tunnelen.jpg.info>.
- [8] J. Lilleby, «Hurtigruten: – På ingen måte vært en aktiv pådriver for Stad skipstunnel,» E24, 13 februar. 2016. [Internett]. Available: <https://e24.no/norsk-oekonomi/i/Xg9B8E/hurtigruten-paa-ingen-maate-vaert-en-aktiv-paadriver-for-stad-skipstunnel>. [Funnet 29 mars. 2022].
- [9] Multiconsult ASA, «KORT OM MULTICONSULT,» [Internett]. Available: <https://www.multiconsult.no/om-oss/kort-om-multiconsult/>. [Funnet 03 mai 2022].
- [10] B. Normann, M. Sandvik og B. Vik, Materialkunnskap, Bergen: Byggenæringens forlag, 2003.

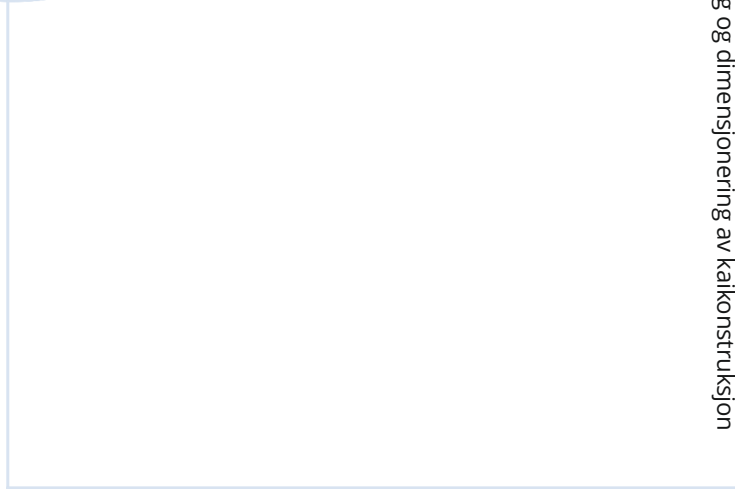
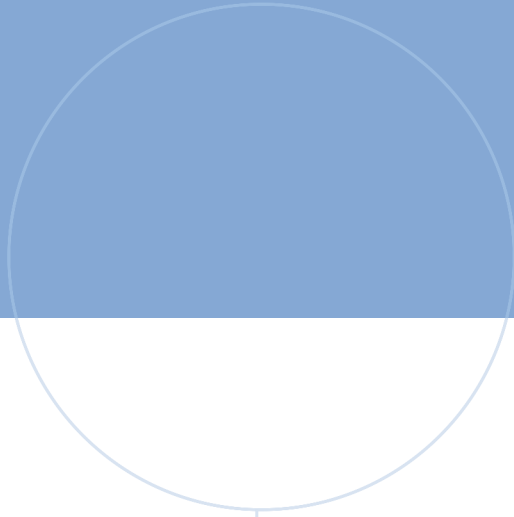
- [11] Vegdirektoratet, «Ferjekai Prosjektering - Håndbok V431,» 2017. [Internett]. Available: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-v431.pdf>.
- [12] Norsk Betongforening, «Publikasjon nr.17 - Retningslinjer for bruk av prefabrikerte betonelementer i kai og havnebygging,» Norsk Betongforening, 1988.
- [13] Kystverket, «Lasthåndbok for Kystverkets faste installasjoner,» 03.03.08. [Internett]. Available: <https://www.merccell.com/da-dk/m/file/getfile.ashx?id=39118594>. [Funnet 10 april 2022].
- [14] C. A. Thoresen, Port Designer's Handbook, London: ICE Publishing, 2014.
- [15] Dr. Techn. Olav Olsen AS; Norconsult AS; Kystverket, «Teknisk forprosjekt. Vedlegg A: Tekniske tegninger,» 2016. [Internett]. Available: https://www.kystverket.no/contentassets/3126a19bba2444f5bc73b68b1204f6ec/rapporter-og-utredninger/11.-vedlegg-a---tegninger_j01.pdf/download.
- [16] Magne og M. Maage, Betong: Regelverk, teknologi og utførelse, Oslo: Byggenæringens forlag AS, 2017.
- [17] Dyrøy Betong AS, *personlig kommunikasjon, Budsjettpris B45 MF40*, 28.01.2022.
- [18] Norsk Betongforening, «Publikasjon nr. 37: Lavkarbonbetong,» Norsk Betongforening, Oslo, 2020.
- [19] EPD-Norge, «Hva er en EPD?,» [Internett]. Available: <https://www.epd-norge.no/hva-er-en-epd/>. [Funnet 19 05 2022].
- [20] J. V. Thue, «SNL,» Store Norske Leksikon, 16. juli 2019. [Internett]. Available: <https://snl.no/armeringsst%C3%A5l>. [Funnet 25 april 2022].
- [21] S. Askheim, «Store Norske Leksikon,» 23. mars 2022. [Internett]. Available: https://snl.no/Stad_skipstunnel. [Funnet 29. mars 2022].
- [22] SINTEF Byggforsk, Kystverket, «Bergsikring – Stad skipstunnel,» 05 Juni 2019. [Internett]. Available: https://www.kystverket.no/contentassets/3126a19bba2444f5bc73b68b1204f6ec/rapporter-og-utredninger/bergsikring-04-01_sladdet-v01_sintef-rapport-bergsikring-stad-skipstunnel.pdf/download. [Funnet 29 mars 2022].

- [23] «Eurokode 0 - Grunnlag for prosjektering - NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016,» Standard Norge, 01.05.2016.
- [24] «Betong - Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar - NS-EN 206:2013+A2:2021+NA:2021,» Standard Norge, 14.04.2021.
- [25] T. Rørvik og V. Årskog, Konstruksjonssikkerhet og belastning: Kompendium i lastberegning, 2010.
- [26] S. I. Sørensen, Betongkonstruksjoner, Bergen: Fagbokforlaget, 2010.
- [27] «Eurokode 1 - Laster på konstruksjoner - NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2019,» Standard Norge, 01.01.2019.
- [28] P. H. Pedersen, «Hva skal vi velge - plasstøpt eller betongelementer?,» *Byggeindustrien - bygg.no*, 04 april. 2014.
- [29] G. V. Hjelseng, «Plasstøpt vs. prefabrikkert betong,» NTNU, 2014.
- [30] ISY Design, «Norconsult Informasjonssystemer,» Norconsult.
- [31] «Eurokode 8 - Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning - NS-EN 1998-1:2004+A1:2013+NA:2021,» Standard Norge, 30.06.2021.
- [32] K. S. Orgeret, «Store Norske Leksikon,» 19. mai 2021. [Internett]. Available: <https://snl.no/kildekritikk>. [Funnet 29. mars 2022].
- [33] Bilde: Panama Canal Authority. Hentet fra: <https://gcaptain.com/tanker-retrofits-delay-use-of-new-panama-canal/>.
- [34] EPD Norge, «Fabrikkblandet Ferdigbetong – B45,MF40, D22, S4, CI 0,1,» Næringslivets Stiftelse for Miljødeklarasjoner, 07 02 2022. [Internett]. Available: https://www.epd-norge.no/getfile.php/1322606-1644245559/EPDer/Byggevarer/Ferdig%20betong/NEPD-3339-1977_Fabrikkblandet-Ferdigbetong-----B45-MF40--D22--S4--CI-0-1.pdf. [Funnet 14 05 2022].
- [35] K.-E. Helle, «Framtiden i våre hender,» 18 02 2020. [Internett]. Available: <https://www.framtiden.no/gronne-tips/spor-oss/hva-far-jeg-for-et-tonn-co2.html>. [Funnet 14 05 2022].

[36] *Nordic Fender AS, personlig kommunikasjon, Budsjettpris fender, 11.05.2022.*

8 VEDLEGG

- Vedlegg V01 – Dekke: Bruddgrensetilstand (ULS)
- Vedlegg V02 – Dekke: Bruksgrensetilstand (SLS)
- Vedlegg V03 – Hovedbjelke: Bruddgrensetilstand (ULS)
- Vedlegg V04 – Hovedbjelke: Bruksgrensetilstand (SLS)
- Vedlegg V05 – Frontskjørt: Bruddgrensetilstand (ULS)
- Vedlegg V06 – Frontskjørt: Bruksgrensetilstand (SLS)
- Vedlegg V07 – Søyle: Bruddgrensetilstand (ULS)
- Vedlegg V08 – Støttebjelke: Bruddgrensetilstand (ULS)
- Vedlegg V09 – Støttebjelke: Bruksgrensetilstand (SLS)
- Vedlegg V10 – Tegninger: Konsept 1
- Vedlegg V11 – Tegninger: Konsept 2
- Vedlegg V12 – Tegninger: Konsept 3
- Vedlegg V13 – Tegninger: Konsept 4
- Vedlegg V14 – Lastkombinasjoner i ROBOT
- Vedlegg V15 – Manuell kontroll av egenvekter i ROBOT
- Vedlegg V16 – Økonomiske konsekvenser av fenderløsning
- Vedlegg V17 – Beregning av reaksjonskrefter fra fender
- Vedlegg V18 – Miljømessige konsekvenser av fenderløsning
- Vedlegg V19 – Tilbud fra Nordic Fender
- Vedlegg V20 – Analyseresultat ISY Design – Hovedbjelke støtte
- Vedlegg V21 – Analyseresultat ISY Design – Hovedbjelke felt
- Vedlegg V22 – Analyseresultat ISY Design - Søyle
- Vedlegg V23 – Analyseresultat ISY Design - Støttebjelke



Fenderløsning og dimensjonering av kalkonstruksjon