



UNIVERSITETET I AGDER

Standardisering av brokonstruksjoner for nasjonale hovedveier

ANETTE HEIMDAL, INGRID LANDE LARSEN,
THOMAS NORHEIM

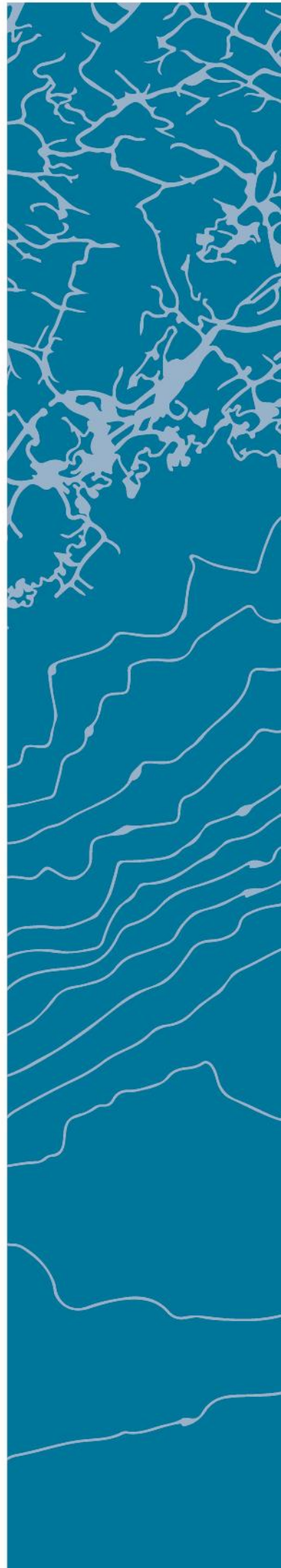
VEILEDER

Rein Terje Thorstensen

Universitetet i Agder, 2017

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap



Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

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

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse. 	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

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

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

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

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

JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?
(Båndleggingsavtale må fylles ut)

JA NEI

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap som en del av masterprogrammet for Byggkonstruksjon ved Universitet i Agder. Masteroppgaven er den avsluttende oppgaven i emnet BYG500 og ble utarbeidet i det fjerde og siste semesteret.

Målet med masteroppgaven er å identifisere de begrensende faktorene og utfordringene knyttet til bruk av standardiserte broløsninger, i tillegg til potensielle bruksområder for økt bruk av standardiserte brosystemer. Masteroppgaven er resultat av universitetets samarbeid med Nye Veier. Vi har deltatt aktivt som medlemmer i faggruppen «Industrialisering/Prefabrikeringsutvalget». Dette har gitt oss bedre forståelse for utfordringer knyttet til industrialisering og prefabrikkering fra bransjens ståsted.

Flere av Industrialisering/Prefabrikeringsutvalgets medlemmer har også bidratt direkte inn i vår oppgave, ved at vi har intervjuet dem som industrispesialister. Dette har vært viktig, fordi oppgaven fokuserer på muligheter og begrensninger – og bransjens erfaringer og holdninger er et nødvendig element i denne kunnskapsoppbyggingen. Vi vil derfor rette en stor takk til de andre medlemmene i denne faggruppen.

Vi vil også benytte anledningen til å takke veilederen vår ved Universitet i Agder, instituttleder Rein- Terje Thorstensen for alt engasjement, oppfølging og faglig innsikt. I tillegg vil vi takke ham og prosjektleder Kjell O. Johannessen for å inkludere oss som medlemmer i faggruppen «Industrialisering/Prefabrikeringsutvalget».

I løpet av oppgaven har vi intervjuet flere personer i bygg- og anleggsbransjen. Vi vil gjerne takke alle respondentene for deres store interesse, engasjement og kunnskap knyttet til vårt problemområde.

Vi vil også rette en stor takk til John-Erik Reiersen og Betongelementforeningen for å ha tatt oss med på studietur til Nederland og Danmark. Dette har gitt oss mulighet til å få betydelig mer kunnskap om prefabrikkering også i Europa. I tillegg fikk vi i løpet av turen viktige innspill fra erfarne og kunnskapsrike personer i bransjen. Nettverket vi har opparbeidet oss gjennom oppgaven, har bidratt til å gjøre oppgaven bedre.

Til slutt vil vi benytte muligheten til å takke våre arbeidsgivere, Universitet i Agder og Rambøll Kristiansand.



Anette Heimdal

Grimstad, 22.mai 2017



Ingrid Lande Larsen



Thomas Norheim

Summary

Standardization is currently not being utilized much in the Norwegian road building industry compared to the rest of the construction industry and road construction abroad. To harvest the potential benefits, it is interesting to determine how to increase the use of standardization in road building. The aim of this master's thesis is to determine how to make use of standardized concrete bridges for the construction of new national highways. To investigate this, the thesis has established knowledge on today's situation and found dominant obstacles towards a more widespread use of standardized bridge solutions. The Norwegian Public Roads Administration's database for bridges, BRUTUS, has been used to map the situation on national highways in Norway. Stakeholders within the construction industry involved in road- and bridge projects were interviewed to gain knowledge of obstacles towards further standardization. The thesis also investigated the magnitude of local effects on a representative, standardized bridge, considering wind loads and seismic loads. Further, restrictions on bridge geometry presented by road geometry and design codes were investigated. The results of the investigation show that many highway bridges are limited to a small number of typical lengths, indicating a potential for standardization. Prefabricated, single-span bridges with short span lengths showed the greatest potential.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	i
Publiseringsavtale.....	ii
Forord.....	iii
Summary	iv
Innholdsfortegnelse	v
Figurliste	ix
Tabelliste	xii
1 Innledning.....	1
2 Samfunnsperspektiv.....	4
3 Teori.....	6
3.1 Standardisering og prefabrikking av broelementer	6
3.1.1 Tidligere standardiserte prefabrikerte broelementer	7
3.1.2 Tidligere standardiserte plastøppte broløsninger	9
3.1.3 Standardisering av broer i Norge	9
3.1.4 Standardisering av broer utenfor Norge	11
3.1.5 Prefabrikerte brosystemer i Nederland.....	12
3.1.6 Prefabrikerte brosystemer i Danmark.....	15
3.1.7 Estetiske krav for broer	15
3.1.8 Generelle konstruksjonskrav	17
3.2 Veidimensjonering.....	17
3.3 Ytre påkjenninger på standardiserte broer	18
3.3.1 Standardverk	19
3.3.2 Grensetilstander og lastkombinering	20
3.3.3 Vindlaster.....	20
3.3.4 Snølaster.....	21
3.3.5 Termiske påvirkninger	21
3.3.6 Seismiske laster	22
3.3.7 Egenlaster.....	23
3.3.8 Trafikklaster	24
3.3.9 Påkjørselslaster.....	24
3.3.10 Overdekning og bestandighet	24
4 Forskerspørsmål	25
4.1 Avgrensninger.....	25

5	Case	26
6	Metode	27
6.1	Fremgangsmåte	27
6.2	Litteraturstudie	27
6.3	Kartlegging av eksisterende brokonstruksjoner ved hjelp av BRUTUS	27
6.4	Datainnsamling – undersøkelse av bransjens synspunkter	28
6.4.1	Problemstilling	28
6.4.2	Undersøkelsesopplegg	29
6.4.3	Valg av type informasjon, kvalitativ eller kvantitativ	30
6.4.4	Innsamling av informasjon	31
6.4.5	Utvelgelse av enheter	33
6.4.6	Analyse	34
6.5	Datainnsamling – studietur	35
6.6	Fastsettelse av overordnede dimensjoner på standardiserte broer	36
6.7	Fastsettelse av ytre påkjenninger på en standardisert bro	36
6.7.1	Lastkombinasjoner	37
6.7.2	Vindlaster	38
6.7.3	Snølaster	39
6.7.4	Termiske påvirkninger	39
6.7.5	Seismiske laster	39
6.7.6	Egenlaster	42
6.7.7	Trafikklaster	42
6.7.8	Påkjørselslaster	45
6.7.9	Modellering av lastsituasjon	45
6.7.10	Sammenligning av horisontale krefter	46
7	Resultat	48
7.1	Kartlegging av eksisterende broer	48
7.1.1	Samlet registrering	48
7.1.2	Nyere E18	52
7.2	Hovedfunn fra intervjuer	55
7.2.1	Prefabrikasjon	56
7.2.2	Standardisering	59
7.2.3	Erfaringsoverføring	61
7.2.4	Oppsummering	61

7.3	Studietur	62
7.3.1	Prefabrikasjon i Nederland.....	62
7.3.2	Prefabrikasjon i Danmark	65
7.4	Veigeometriens påvirkning på broers overordnede dimensjoner	66
7.5	Potensielle prefabrickerte og standardiserte løsninger	68
7.6	Effekt av stedsavhengige laster på lastsituasjonen.....	70
7.6.1	Valg av representativt brosystem og broform for standardiserte broer	70
7.6.2	Snølast og termisk påvirkning	71
7.6.3	Vindlaster.....	71
7.6.4	Dimensjonerende momenter i lengderetning.....	73
7.6.5	Seismiske laster	76
7.6.6	Bremse- og akselerasjonslast	82
7.6.7	Påkjørselslast	83
7.6.8	Sammenligning av horisontale krefter	83
8	Diskusjon	85
8.1	Kartlegging av eksisterende broer og kulverter på nasjonale hovedveier.....	85
8.1.1	Kulverter	85
8.1.2	Byggemateriale og kompetanse	85
8.1.3	Broer	85
8.1.4	Overgangsbroer	87
8.2	Intervjuer	87
8.2.1	Prefabrickering	87
8.2.2	Standardisering.....	89
8.2.3	Svakheter ved undersøkelsen	90
8.3	Veigeometri	91
8.4	Effekten av stedsavhengige laster på standardiserte broer.....	91
8.5	Potensielle prefabrickerte og standardiserte løsninger.....	92
9	Konklusjon	94
10	Anbefalinger	97
11	Referanser	98
12	Vedlegg.....	101
12.1	Vedlegg vedrørende datainnsamling fra bygg- og anleggsbransjen	102
12.1.1	Intervjuspørsmål.....	103
12.1.2	Informasjonsskriv intervju.....	104

12.1.3	Intervjuguide	105
12.1.4	Tabell med kategoriene fra NVivo.....	106
12.1.5	Program fra studietur til Nederland og Danmark	107
12.2	Vedlegg vedrørende veidimensjonering	109
12.2.1	Breddeutvidelse.....	109
12.3	Vedlegg vedrørende lastpåvirkning.....	111
12.3.1	Laster påført konstruksjonen fra MathCad	112
12.3.2	Lastkombinasjoner	116
12.3.3	Lastkombinasjon og momentberegning for minimum vindlast	117
12.3.4	Lastkombinasjon og momentberegning for sannsynlig vindlast.....	118
12.3.5	Lastkombinasjon og momentberegning for maksimum vindlast.....	119
12.3.6	Stivheter fra MathCad	120
12.3.7	Utskrift av seismisk modellering fra FEM-Design 3D.....	125

Figurliste

Figur 1.1: Illustrasjon av oppgavens oppbygging	2
Figur 2.1: Oversikt over mulig veiutbygging frem mot 2050 [3]	4
Figur 3.1: Tverrsnitt for normerte bjelkeelementer [12]–[16]	7
Figur 3.2: Flerspenns MOT-bro [15]	8
Figur 3.3. Graf over de ulike broelementene etter maksimal utnyttelse [15]	8
Figur 3.4: Illustrasjon av MOT- (venstre), PLA-(midt), og Super-I-brokonsepter (høyre) [26]	10
Figur 3.5: Bjelkebrokonseptet «Girder beams» fra Stanton Bonna [38].....	12
Figur 3.6: Bjelkebrokonseptet «Box girder beams» fra Stanton Bonna [38]	12
Figur 3.7: Kompakt komposittkonstruksjon fra Spanbeton [40]	13
Figur 3.8: Spanbetons omvendte T-bjelkekonstruksjoner [42].....	13
Figur 3.9: Kantelementer til bruk med Spanbetons omvendte T-bjelkekonstruksjoner [42]	14
Figur 3.10: Kantelementer for bruk med Spanbetons kassebjelkekonstruksjoner [44]	14
Figur 3.11: Transport av 60 meter langt broelement fra fabrikk til lokasjon [43]	15
Figur 3.12: Ruter-/diamantkryss (venstre), halvt kløverbladkryss (midt) og trompetkryss (høyre) [48]	18
Figur 3.13 Referansevindhastighet $V_{b,0}$ etter NS-EN 1991-1-4 Figur NA.4 (901.1) [58]	21
Figur 3.14: Temperaturfordeling i konstruksjonsdeler. Hentet fra NS-EN 1991-5, Figur 4.1 [60]	22
Figur 3.15: Seismiske soner i det sørlige Norge med spissverdien for berggrunnens akselerasjon i m/s^2 (a_{g40Hz}) etter NS-EN 1998-1 Figur NA.3(901) [61]	23
Figur 6.1: Små-N-studie for å belyse fenomenet prefabrikking og standardisering av brokonstruksjoner. Tilpasset fra [67]	30
Figur 6.2: Grad av åpenhet i den kvalitative tilnærmingen. Legg merke til at kategorisering og strukturering foregår etter datainnsamlingen [67].....	31
Figur 6.3: Grader av strukturering av et intervju. Undersøkelsens grad av strukturering markert med rødt. Etter [67].....	32
Figur 6.4: Kategorier for kvalitative intervjuer	35
Figur 6.5 Prinsippskisse for siktkontroll (Figur 5.3) i V120 Premisser for geometrisk utforming av veg [69]	36
Figur 6.6: Eksponeringsfaktor C_e som funksjon av høyde over havet og terrengkategori. Fra NS-EN 1991-1-4, Figur 4.2 [58].....	38
Figur 6.7: Prinsipiell representasjon av trinn 3 i beregning av jordskjelvkrefter iht responspektrummetoden. Bakgrunn hentet fra NS-EN 1998-1, Figur 3.1	42
Figur 6.8: Inndeling av bro i teoretiske kjørebaneer. Fra NS-EN 1991-2, Figur 4.1 [64]	43
Figur 6.9: Prinsipiell plassering av laster for LM1. Hentet fra NS-EN 1991-2, Figur 4.2A [64]	44
Figur 7.1: Variasjon i total lengde for alle registrerte broer og kulverter	48
Figur 7.2: Fordeling av krysningstyper på de registrerte strekningene.....	49
Figur 7.3: Lengder av kryssinger definert som kulvert i BRUTUS, alle registrerte strekninger	49
Figur 7.4: Fordeling av bæresystem for broer på alle de registrerte strekningene	50
Figur 7.5: Ferdigstillelsesår for krysninger i drift på de registrerte strekningene.....	50
Figur 7.6: Antall broer og kulverter av gitt lengde etter byggeår på de registrerte strekningene	51
Figur 7.7: Normalisert andel broer og kulverter av gitt lengde etter byggeår på de registrerte strekningene.....	51
Figur 7.8 Fordeling av total lengde for krysninger definert som bro på de registrerte strekningene ...	52

Figur 7.9: Oversikt over total lengde for broer i linjen med ulike intervaller. Kun medtatt broer på firefelts motorvei kortere enn 70 meter	52
Figur 7.10: Fordeling av brotyper langs nyere E18.....	53
Figur 7.11: Fordeling av lengde for broer langs og over nyere E18, grovgradert	54
Figur 7.12: Fordeling av bro lengder langs og over nyere E18, fingradert.....	54
Figur 7.13: Oversikt over total lengder for overgangsbroer over nye E18 og E6 med ulike intervall	55
Figur 7.14: Oversikt over overgangsbroenes spenn over antall felt med total lengde langs nye E18 og E6	55
Figur 7.15: Ordsky fra alle intervjuene. Hentet fra NVivo	56
Figur 7.16: Prefabrikkert bro i Nederland med glassfiber kantelementer (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)	63
Figur 7.17: Undersiden av prefabrikkert bro i Nederland (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)	63
Figur 7.18: Kassebjelkebro i Nederland med horisontalradius på 220 meter (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)	64
Figur 7.19: Omvendte T-bjelker fra Spanbeton (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)	64
Figur 7.20: På oversiden av underflensen til omvendte T-bjelker og I-bjelker dannes det porer	65
Figur 7.21: Undersiden av prefabrikkert bro i Danmark med påkjørselsskade (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)	65
Figur 7.22: Undersiden av prefabrikkert bro i Danmark (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)	66
Figur 7.23: Normalprofil for 110 km/t [51]	66
Figur 7.24: Overhøyde for nasjonale hovedveier med 110 km/t fartsgrense.....	67
Figur 7.25: Krav til breddeutvidelse på bro med maksimalt fall for forskjellige versjoner av håndbok N100	67
Figur 7.26: Sammenheng mellom breddeutvidelse, lengdefall og minimum horisontalradius etter håndbok N100	68
Figur 7.27: Oppdatert MOT 900	71
Figur 7.28: Referansevindhastigheten for de aktuelle kommunene, sortert etter fylker.....	72
Figur 7.29: Histogram over referansevindhastighet i de aktuelle kommunene	72
Figur 7.30: Egenlaster modellert i Focus Konstruksjon	73
Figur 7.31: Vindlaster modellert i Focus Konstruksjon.....	73
Figur 7.32: Alternative plasseringer av trafikklast LM 1 modellert i Focus Konstruksjon	74
Figur 7.33: Skjærtdiagram for dekkestripe fra Focus Konstruksjon	74
Figur 7.34: Egenlaster på ytterbjelke som modellert i Focus Konstruksjon	75
Figur 7.35: Vindlast på ytterbjelke som modellert i Focus Konstruksjon.....	75
Figur 7.36: LM 1 på ytterbjelke som modellert i Focus Konstruksjon.....	75
Figur 7.37: LM 2 på ytterbjelke som modellert i Focus Konstruksjon	75
Figur 7.38: Momentdiagram i bruddgrense for ytterbjelke med maksimal vindlast fra Focus Konstruksjon.....	76
Figur 7.39: 3D-modell for seismisk dimensjonering, plan	79
Figur 7.40: 3D-modell for seismisk dimensjonering, lengdesnitt.....	79
Figur 7.41: 3D-modell for seismisk dimensjonering, tverrsnitt.....	79
Figur 7.42: Lasttilfelle "Påført egenvekt" fra FEM-modell	80

Figur 7.43: Lasttilfelle «LM 1» i FEM-modell.....	81
Figur 7.44: Første svingeform, $f = 12,998\text{Hz}$, 98,4 % medsvingende masse i y-retning.....	81
Figur 7.45: Andre svingeform, $f = 15,610\text{ Hz}$, 99,7 % medsvingende masse i x-retning	82
Figur 7.46: Sammenligning av påkjørsel og seismisk last etter grunntype og berggrunnens akselerasjon, begge laster karakteristiske verdier	83
Figur 7.47: Sammenligning av seismisk last og bremse-/ akselerasjonskrefter etter grunntype og berggrunnens akselerasjon. Karakteristisk seismisk last, bremselast multiplisert med 1,725	84

Tabelliste

Tabell 3.1: Oversikt over tidligere overdekningskrav [12]–[16], [22].....	9
Tabell 3.2: Overordnede prinsipper for broer i linjen etter Nye Veiers DesignVei [9].....	16
Tabell 3.3: Overordnede prinsipper for overgangsbroer etter Nye Veiers DesignVei [9].....	17
Tabell 3.4: Dimensjoneringsklasser for nasjonale hovedveier etter høringsutgave N100, tabell C.1 [52]	18
Tabell 6.1: Oversikt over respondentenes bakgrunn og nåværende funksjon	34
Tabell 6.2: Dimensjonerende verdier for laster i bruddgrensetilstand (STR/GEO) (Sett B). Hentet fra NS-EN 1990, Tabell NA.A2.4(B) [56]	37
Tabell 6.3: Dimensjonerende verdier for laster i kombinasjon med seismiske laster. Hentet fra NS-EN 1990, Tabell NA.A2.5 [56].....	37
Tabell 6.4: ψ -faktorer for aktuelle laster. Hentet fra NS-EN 1990. Tabell NA.A2.1 [56].....	38
Tabell 6.5: Inndeling av brooverbygning i teoretiske kjørebane. Etter NS-EN 1991-2, Tabell 4.1 [64]	43
Tabell 6.6: Karakteristiske verdier for Lastmodell 1. Etter NS-EN 1991-2, Tabell 4.2 [64].....	43
Tabell 6.7: Samtidige grupper av trafikklast. Hentet fra NS-EN 1991-2, Tabell NA.4.4a [64]	45
Tabell 6.8: Lastfaktorer benyttet ved sammenligning av horisontale laster [56]	46
Tabell 6.9: Materialfaktorer brukt for sammenligning av horisontale laster [57]	46
Tabell 7.1: Hovedfunn fra intervjuer oppsummert	62
Tabell 7.2: Prosjekteringstabell standardisert bro på nasjonal hovedvei med 110 km/t fartsgrense ..	68
Tabell 7.3: Oversikt over potensielle standardiserte broløsninger	69
Tabell 7.4: Vurderingsmatrise for standardiserte brokonstruksjoner	69
Tabell 7.5: Forklaring av begrepene i vurderingsmatrisen.....	70
Tabell 7.6: Karakteristiske vindlaster i z-retning for de tre påvirkningskategoriene i oppgaven.....	73
Tabell 7.7: Opplagerkrefter for karakteristiske laster fra Focus Konstruksjon.	74
Tabell 7.8: Dimensjonerende moment for de ulike påvirkningskategoriene for vind	76
Tabell 7.9: Verdier for a_g benyttet i analyse.....	77
Tabell 7.10: Oversikt over produktet $a_g S$ som funksjon av referansespissverdi for berggrunnens akselerasjon og grunntype med seismisk faktor lik 2,0	77
Tabell 7.11: Oversikt over produktet $a_g S$ som funksjon av referansespissverdi for berggrunnens akselerasjon og grunntype med seismisk faktor lik 1,0	78
Tabell 7.12: Modellerte laster for seismisk dimensjonering	80
Tabell 7.13: Ekvivalente krefter på broen i y-retning (tverretning) som funksjon av spissverdien av berggrunnens akselerasjon og grunntype, [kN]	82
Tabell 7.14: Ekvivalente krefter på broen i x-retning (lengderetning) som funksjon av spissverdien av berggrunnens akselerasjon og grunntype, [kN]	82
Tabell 7.15: Horisontalkraft fra akselerasjon- og bremsekrefter på brooverbygningen	83
Tabell 7.16: Påkjørselslast på brooverbygningen.....	83
Tabell 9.1: Konkluderende funn fra intervjuene	94

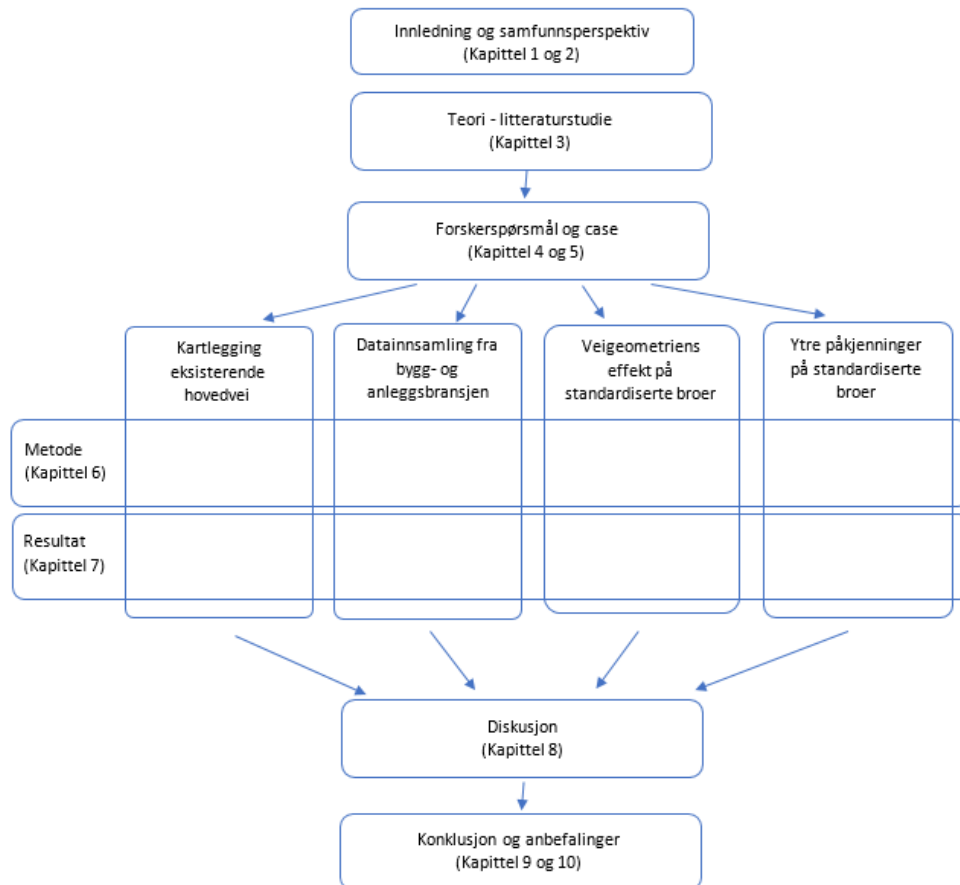
1 Innledning

Standardisering er på fremmarsj i mange deler av samfunnet. Blant annet i byggebransjen er bruken av prefabrikkerte elementer stadig økende, fordi det bidrar til kortere byggetid, forenklet byggeprosess og mulig kostnadsbesparelse. På 1980- og 1990-tallet var prefabrikkerte standardiserte broelementer mye brukt i Norge. De siste 20 årene har imidlertid etterspørselen vært forholdsvis lav. Det kan blant annet skyldes uheldige erfaringer knyttet til bestandighet og estetikk for disse brosystemene.

I dag bygger vi stort sett alle broer med plasstøpt betong, og prosjekterer disse som skreddersøm til hver lokasjon. Standardisering av brokonsepter har imidlertid fått ny oppmerksomhet de seneste årene, og flere prosjekter er satt i gang for å øke bruken av standardiserte løsninger. Betongelementforeningen og Statens vegvesen har samarbeidet om å standardisere prefabrikkerte kulverter og broer. Det nye statlig eide byggherreselskapet Nye Veier ønsker også økt standardisering. Dette er primært for å redusere kostnad og byggetid, slik at de kan nå målet sitt om å bygge mer vei raskere og bedre.

Universitet i Agder har inngått en samarbeidsavtale med Nye Veier med hovedmål om å bidra til å oppfylle Nye Veiers samfunnsoppdrag. Samarbeidet bidrar også mot et annet mål; nemlig å stimulere til økt samskaping mellom næringsliv og forskning. Resultatet av samarbeidet vil forhåpentligvis bli mer og bedre vei for pengene med mindre miljøkonsekvenser og økt innovasjonstakt i hele industrien. Masteroppgaven omhandler standardisering av brokonstruksjoner for nasjonale hovedveier, og er et bidrag til dette samarbeidet. Utfordringen er å finne de begrensende faktorene og utfordringene knyttet til bruk av standardiserte broløsninger, samt potensielle områder for økt bruk av standardiserte brosystemer.

Opgaven er bygd opp i henhold til rapportmalen for programmet Bygg master ved Universitet i Agder. Figur 1.1 viser oppgavens oppbygging.



Figur 1.1: Illustrasjon av oppgavens oppbygging

Opgaven inneholder 12 hovedkapitler:

Kapittel 1: Innledning

Tar for seg bakgrunnen for oppgaven, problemområdet og oppgavens oppbygging.

Kapittel 2: Samfunnsperspektiv

Setter oppgaven i en større sammenheng.

Kapittel 3: Teori

Litteraturstudie som presenterer kunnskapsfronten på prefabrikkerte broløsninger i og utenfor Norge. I tillegg en gjennomgang av hvilke faktorer som påvirker broens utforming og lastsituasjon utfra ulike standardverk.

Kapittel 4: Forskerspørsmål

Presenterer forskerspørsmålet i oppgaven med tilhørende operasjonelle underspørsmål og avgrensninger.

Kapittel 5: Case

Utdyper forskerspørsmålet og beskriver oppgaven.

Kapittel 6: Metode

Beskriver hvilke metoder som er brukt i oppgaven.

Kapittel 7: Resultat

Resultat er delt i seks hovedkategorier: 1) kartlegging av broer på eksisterende nasjonal hovedvei, 2) forskjellige utfordringer og potensiale bransjen identifiserer ved bruk av prefabrikkerte elementer og standardisering, 3) observasjoner fra studietur, 4) veigeometriens påvirkning på broers overordnede dimensjoner, 5) hvordan lokale forhold påvirker lastsituasjonen for en representativ standardisert bro. I tillegg beskrives 6) potensielle standardiserte brosystemer.

Kapittel 8: Diskusjon

Drøfting av resultatene med fokus på utfordringer knyttet til standardisering av brokonstruksjoner og potensielle bruksområder og mulige feilkilder knyttet til intervjuene diskuteres.

Kapittel 9: Konklusjon

Oppsummerer de viktigste funnene i oppgaven knyttet til forskerspørsmålet.

Kapittel 10: Anbefalinger

Angir områder for videre arbeid og studier, enten gjennom fremtidige bachelor- og masteroppgaver eller FoU-prosjekter.

Kapittel 11: Referanser

Oversikt over referansene som er henvist til i oppgaven.

Kapittel 12: Vedlegg

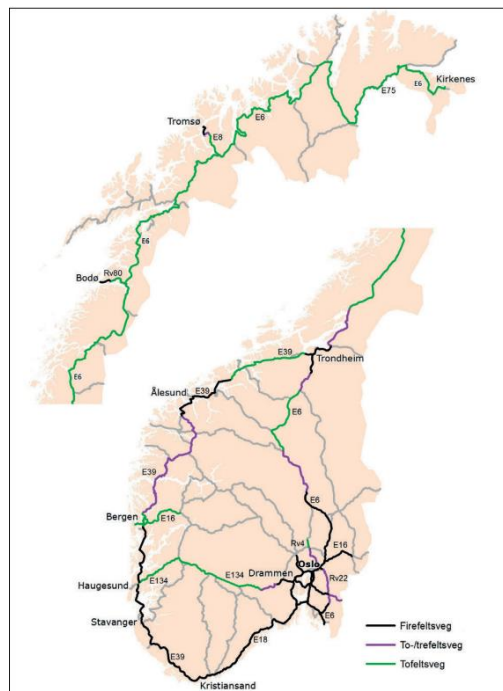
Inneholder vedlegg. Det er ikke gitt grunnlagsdata fra BRUTUS.

2 Samfunnsperspektiv

Nasjonale hovedveier knytter landsdeler og regioner sammen, i tillegg forbinder de Norge med utlandet. Norges første motorveiparsell åpnet i 1964 i Akershus og i dag finnes det om lag 600 km firefelts motorvei i landet. Mye av dette ble bygget ut på 2000-tallet [1].

Investering i samferdselssektoren er stadig økende og i henhold til gjeldende Nasjonal Transportplan (NTP) skal riksveinettet bygges kraftig ut. I planperioden (2018-2029) vil om lag 290 km ny firefeltsvei åpne [2]. Frem mot 2050 vil det sannsynligvis være behov for enda mer firefelts motorvei, der mesteparten sannsynligvis vil være i den sørlige delen av Norge slik som vist i Figur 2.1.

Riksvegsutredningen fra 2015 legger til grunn at det vil være behov for om lag 1200 km ny firefelts vei frem mot 2050 [3].



Figur 2.1: Oversikt over mulig veitbygging frem mot 2050 [3]

Stortingsmeldingen «På rett vei – Reformen i veisektoren», som ble lagt frem i april 2015, dannet grunnlaget for etablering av det nye statlig eide selskapet Nye Veier [4]. I henhold til stortingsmeldingen trenger Norge effektiv og helhetlig bygging av vei, for å knytte regioner sammen og lage nye bo- og arbeidsmarkedsregioner. Stortingsmeldingen omtaler også at selskapet skal kunne se strekninger og prosjekter i sammenheng for å kunne utnytte stordriftsfordeler og velge effektive kontraktsformer blant annet for å utnytte erfaringer og standardiserte løsninger best mulig. Dette skal gi mer kostnadseffektiv veibygging og dermed mer vei for pengene [4].

I følge det innledende samfunnsoppdraget, skal Nye Veier i kommende tyveårsperiode ha ansvaret for i overkant av 500 km uutbygde parseller på E6, E18 og E39. Dette er sterkt trafikkerte strekninger, som i hovedsak vil bli firefelts motorvei [4]. I første omgang har selskapet prioritert fem delstrekninger. Disse er; E18 Tvedestrand – Arendal (forventet åpning 2019), E18 Langangen – Dørdal (forventet åpning 2019), E6 Kolomoen – Moelv (forventet åpning 2021), E39 Kristiansand Vest – Vigeland (oppstart 2018) og E6 i Trøndelag (oppstart 2019) [5]. På strekningene der det allerede

foreligger kommunedelplaner og/eller reguleringsplaner, er det beregnet at det skal bygges 134 nye broer [6],[7]. Det er videre meningen at Nye Veiers oppdragsmengde skal utvides i løpet av perioden.

Et av tiltakene for å kunne bygge veier mer effektivt er som nevnt å øke bruken av standardiserte løsninger, herunder prefabrikkerte broelementer [2]. I Norge har det vært en tradisjon å bygge broer som harmonerer med omgivelsene. Utforming av broer skal ikke bare ta hensyn til teknologi og økonomi, men også kultur, identitet og estetikk [8]. Professor i brobygging, Otto Linton, sa i 1929:

«Det er ikke tilstrekkelig at ei bru er i statisk likevekt, den må også være i sosial, økonomisk og estetisk likevekt for å opphøye seg til brubyggerkunst.» [8]

Statens vegvesen har et ønske om å sette estetiske verdier på lik linje med kravene til økonomi, sikkerhet og bestandighet. Det understrekes i Håndbok V420 *Utforming av bruer* at den økte kvaliteten ved å bygge broer med høye krav til estetikk er verdt å betale mer for [8]. Nye Veier ønsker også å sette høye krav til estetikk og funksjonell verdi. De ønsker å utforme broer med samme formingsprinsipp for å gi en helhetlig og estetisk tiltalende utforming, samt stimulere til gjenbruk av forskalingselementer og generelt bidra til å redusere kostnader og miljøutslipp [9].

Et gjennomgripende aktuelt tema rundt utbygging av transportinfrastruktur er miljø- og klimagassutslipp. På landsbasis er transportsektoren ansvarlig for 60 % av ikke-kvotepliktige utslipp. I NTP legges det stor vekt på å redusere disse miljø- og klimagassutslippene. En del av dette kan tas ved bygging, drift og vedlikehold av infrastruktur. Innen 2030 er Norge forpliktet til å redusere klimagassutslippene med 40 % sammenliknet med tall fra 1990. Det teknologiske skiftet relatert til blant annet økt andel av lav- og nullutslippsbiler, vil føre til store utslippskutt i planperioden. Utslippene fra bygging av infrastruktur skal også reduseres med 40 % innen 2030, og utslipp fra drift og vedlikehold skal reduseres med 50 % innenfor samme periode. For å nå målene er det grunnleggende å øke bruken av nullutslippsteknologi, alternative drivstoff og øke bevisstheten rundt materialvalg og materialmengder [2].

3 Teori

I denne oppgaven vil vi fokusere på standardisering i stor skala, nemlig standardisering av hele brooverbygninger. Dette gjør vi med bakgrunn i en hypotese om at dersom brooverbygningen blir hyllevarer kan det bidra til å industrialisere veibygging. Dette betyr at når det snakkes om standardisering av broer i oppgaven vil dette innebære utviklingen av broer som kan benyttes «hvor som helst», med små stedlige tilpasninger. I tillegg vil oppgaven utforske mulighetene for å bygge brooverbygninger med prefabrikkerte, forspente bjelkeelementer. Disse bjelkeelementene inngår ikke nødvendigvis i en standardisert brooverbygning.

For å danne et grunnlag for å standardisere brokonstruksjoner eller prefabrikerte elementer i brobygging er det hensiktsmessig å se på hva som er gjort av tilsvarende arbeid tidligere og hvordan situasjonen er i andre land. Kapittel 3.1 *Standardisering og prefabrikking av broelementer* er viet til dette studiet. I dette kapittelet er det valgt å se spesifikt på Nederland og Danmark. Én grunn til valget av Nederland og Danmark er at vi har vært på studietur i disse landene for å se på prefabrikkerte brosystemer. En veibro må forholde seg til veien og dens utforming. Derfor vil det i 3.2 *Veidimensjonering* bli gjennomgått viktige parametere som styrer veiens utforming. En bro må ha tilstrekkelig kapasitet mot ytre påvirkninger (laster), noen av disse påvirkningene er stedsavhengige og vil derfor variere fra bro til bro. Påvirkningene og kapasitetene er regulert i ulike standarder og i håndbøkene til Statens vegvesen. Disse gjennomgås i 3.3 *Ytre påkjenninger på standardiserte broer*.

3.1 Standardisering og prefabrikking av broelementer

Standardisering og industrialisering er begreper som har fått økt interesse i byggebransjen [10]. Årsaken er en hypotese om at ved å nærme seg industriens tilnærming til produksjon kan man spare tid og penger i tillegg til at man kan oppnå en høyere kvalitet.

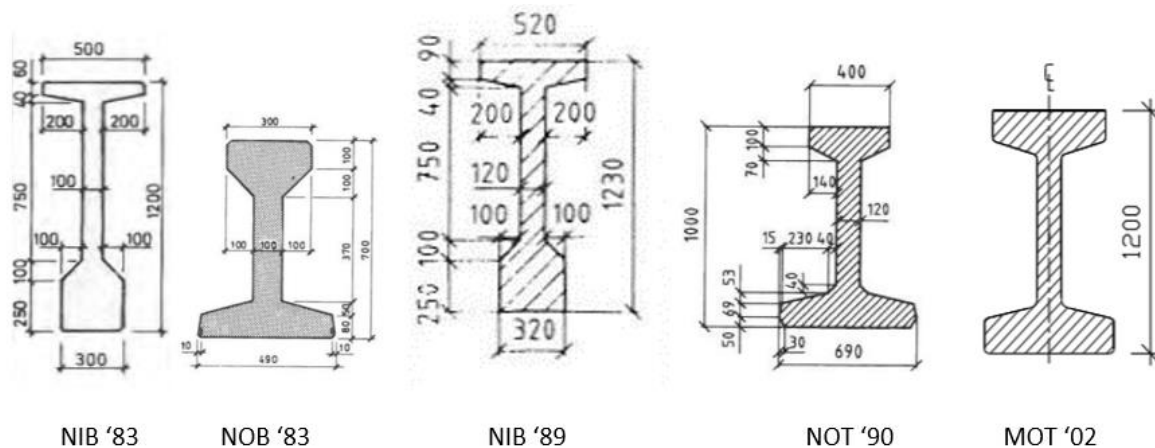
Industrialisering er overgangen fra manuelt, tradisjonelt arbeid til fabrikkmessig drift. I byggebransjen snakker man om at industrialisert byggeproduksjon er produksjon der verdiskapningen skjer i fabrikker, hvor moduler og/eller prefabrikkerte elementer produseres i store serier [10].

Standardisering i tradisjonell forstand kan sies å være en del av industrialisering, ved at man benytter standardiserte komponenter som settes sammen på ulike måter. Denne standardiseringen kan innebære store eller små komponenter eller konsepter. For eksempel opererer gjerne en bilfabrikk med et standard sett med betjeningsknapper til sine bilmodeller. Disse er da en standard som benyttes i alle modellene så lenge de er gyldige. I byggebransjen har man gjennom flere år hatt konseptet med 600 mm avstand mellom stendere i en stendervegg. Dette er en standard alle fra leverandører til håndverkere vet om, og bidrar til en mer effektiv produksjon.

Senere i oppgaven vil det fremgå at langt de fleste broer i tilknytning til nasjonale hovedveier i Norge er utført i betong. Når man bygger i betong kan man skille mellom plasstøpt og prefabrikkert betong. Plasstøpt betong er fersk betong som transporteres til byggeplassen og støpes ut i forskaling på stedet den skal stå. Prefabrikkert betong er i denne sammenheng definert som betong som er ferdig herdet når den plasseres i sin endelige posisjon. Selve utstøpingen kan foregå på fabrikk (off-site) eller i nærheten av anleggsområdet (on-site).

3.1.1 Tidligere standardiserte prefabrikkerte broelementer

Standardisering og industrialisering er ikke nye begreper i norsk vei- og brobygging. Allerede på 1960-tallet startet arbeidet med å utarbeide standardiserte broelementer. Komiteen som startet dette arbeidet bestod av representanter fra Norsk Betongforening og Statens vegvesen. Resultatet av prosjektet ble publisert i *Nordisk betong* no. 5 i 1977 [11]. I 1983 utga Statens vegvesen normaler for fritt opplagte bjelkebroer bestående av prefabrikkerte normerte omvendte T-bjelker, NOB-broer [12]. Broelementene kunne spennes fra 5 til 22 meter. Broplaten ble plasstøpt. Senere kom NIB-broene (1989), som var prefabrikkerte I-bjelker med spennlengder fra 14 til 35 meter [13]. Etterfulgt av NIB-broene var NOT-broene (1990) som også var omvendte T-bjelker [14]. NOT-broene erstattet NIB-broene på grunn av endrede krav til armeringsoverdekning og -plassering. NOT-elementene kunne brukes på spennvidder fra 10 til 25 meter. De ovennevnte broelementene ble mye brukt på 1980- og 1990-tallet, men ble senere mindre populære siden de ikke møtte estetiske krav [11]. Alle de normerte bjelkeelementene var forspente og tverrsnittene er vist i Figur 3.1.



Figur 3.1: Tverrsnitt for normerte bjelkeelementer [12]–[16]

Fra 1990-tallet og frem mot starten av 2000-tallet laget Statens vegvesen nye håndbøker for preaksepterte broløsninger, med større krav til estetikk. Håndbøkene var samlet i håndbok 100-serien og bestod av følgende deler:

- Håndbok 100-1 *Konstruksjoner i fylling: Plasstøpte kulverter* (1996) [17]
- Håndbok 100-3 *Støttemurer* (1990) [18]
- Håndbok 100-3 *Elementbruer* (2002) [15]
- Håndbok 100-4 *Plassproduserte platebruer* (2002) [19]
- Håndbok 100-5 *Gangvegbruer* (1993) [20]

Håndbok 100 del 3 – *Elementbruer* er den siste tilgjengelige håndboken for prefabrikkerte elementbroer [15]. Elementbroene som står beskrevet i denne håndboken er MOT-broen og PLA-broen. MOT-broen var en bjelkebro som var ferdig dimensjonert for spennlengder fra 12 til 32 meter. PLA-broen bestod av et forspent plateelement for mindre spenn fra 5 til 14,5 meter. Begge brotypene kunne utføres i flere spenn og dermed strekkes over store avstander, slik som vist i Figur 3.2. Broplaten for begge elementtypene måtte plasstøpes og avhengig av nødvendig kapasitet kunne påstøpen være konstruktiv. Total bredde på broene var oppad begrenset til tre kjørefelt, og var først

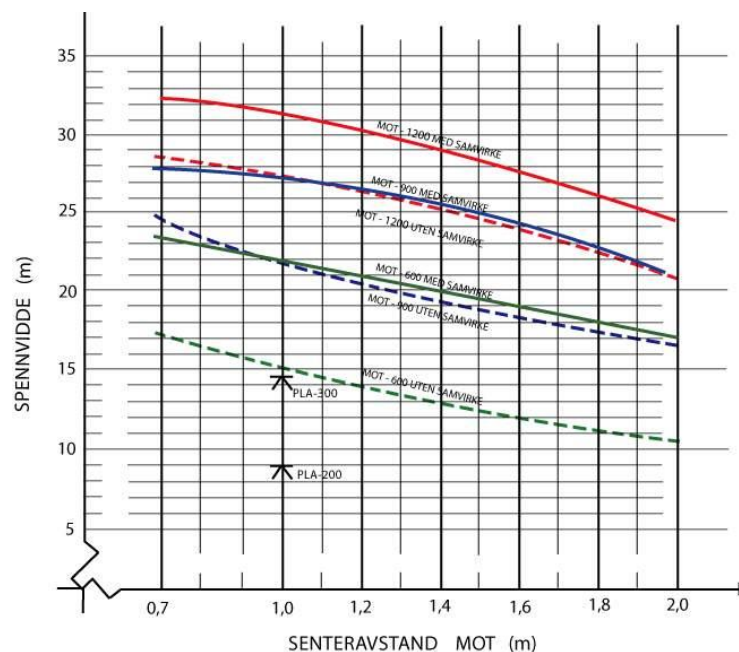
og fremst konstruert for rette broer med lite skjevhet (opptil 10°). De kunne brukes ved større skjevheter hvis kontrollberegninger ble utført [15].



Figur 3.2: Flerspenns MOT-bro [15]

Begge brosystemene baserte seg på samme dimensjoneringsgrunnlag. Betongkvaliteten som ble benyttet var C65 SV-30 for elementene og C55 SV-30 for påstøpen, med spenntau 1700/1900 og areal på 100 mm². Lastene var bestemt etter Statens vegvesens håndbok *Lastforskrifter for bruer og ferjekaier i det offentlige veinett* fra 1995, der broplaten var dimensjonert for slitelag av enten betong eller asfalt med egenvekt på 2,5 kN/m² [15].

Broene kunne tilpasses forskjellige spennlengder, som vist i Figur 3.3. MOT-elementene kunne tilpasses spennlengden ved å endre bjelkehøyden i tre intervaller og variere senteravstanden mellom bjelkene. I tillegg kunne samvirke mellom bjelke og brodekke øke spennlengden ytterligere [15].



Figur 3.3. Graf over de ulike broelementene etter maksimal utnyttelse [15]

Betongelementbroer, og generelt broer bygget på 1980-tallet, hadde svært liten overdekning og har derfor hatt bestandighetsproblemer. For de tidligere standardiserte broløsningene var

overdekningskravet svært lavt sammenlignet med i dag [12]–[14], [16]. Dette har sammenheng med mye lavere krav til overdekning på 1980-tallet etter NS 3473. På 1960-, 1970- og deler av 1980-tallet stilte standardverket kun krav til lastkapasitet og ikke bestandighet [21], noe som gjenspeiles i Tabell 3.1. Tabell 3.1 viser overdekningskravet fra de gamle håndbøkene frem til i dag.

Tabell 3.1: Oversikt over tidligere overdekningskrav [12]–[16], [22]

Håndbok	Betongkvalitet		Overdekning
	Bjelke	Påstøp	
NIB/NOB bruer '83	B45 (C55)	C35 (B30)	25 mm
NIB '89	B45 (C55)	C35 (B30)	40 mm
NOT '90	B45 (C55)	C45 (B35)	40 mm
100 – del 3 '02	B55 (C65)	B45 (C55)	50 mm
Prefab kulverter '16	B45	-	65 mm

3.1.2 Tidligere standardiserte plasstøpte broløsninger

I håndbok 100-serien var det gitt standardiserte plasstøpte løsninger både for kulverter (*Del 1 Konstruksjoner i fylling: Plasstøpte kulverter*) [17] og broer (*Del 4 Plassproduserte platebruer*) [19]. Del 4 inneholder normaler med fullstendige form- og armeringsdata for ett- og trespenns plassproduserte platebroer, i tillegg til et kapittel som beskriver estetiske forhold [19]. *Del 1 Konstruksjoner i fylling: Plasstøpte kulverter* gir anvisninger for plasstøpte kulverter i form av detaljer, dimensjoner og armeringsføring for typiske tverrsnitt. Også her er det gitt estetiske retningslinjer [17].

I 2012 gikk alle håndbøkene i 100-serien ut, men *del 3 Elementbruer* var planlagt å erstattes med en ny [23].

3.1.3 Standardisering av broer i Norge

Generelt i byggebransjen er bruken av prefabrikkerte betongelementer i sterk vekst [24]. Det finnes standardiserte betongelementer til dekker, tak og forskjellige bjelker [25]. Prefabrikkerte elementer kan gjøre byggeprosessen mer tids- og kostnadseffektiv [26].

MOT- og PLA-elementene som ble benyttet i håndbok 100 *Elementbruer del 3* kan fortsatt bestilles fra flere betongelementfabrikker [27], [28], men de er ikke lenger å anse som preaksepterte. Et annet aktuelt brokonsept er Super-I [26]. Dette konseptet kan ses på som en hybrid mellom PLA- og MOT-broene der lave I-bjelker settes tett i tett og spennes opp i tverretning. Spesielt for dette konseptet er at det ikke toppes med et plasstøpt dekke, men kun membran og slitelag. De tre prinsippene er illustrert i Figur 3.4.



Figur 3.4: Illustrasjon av MOT- (venstre), PLA- (midt), og Super-I-brokonsepter (høyre) [26]

Betongelementforeningen og Statens vegvesen har tatt initiativ til to prosjekter for å øke bruken av prefabrikkerte standardiserte løsninger innenfor brobygging med hensikt å minske byggetid, forenkle bygge- og planprosessen og gjøre det enklere å samhandle i prosjekter. Dette operasjonaliseres gjennom et kulvertprosjekt og et broprosjekt.

I mai 2016 resulterte kulvertprosjektet i 27 forskjellige prefabrikkerte kulverter med både flatt og buet tak [22]. Kulvertene har varierende innvendige dimensjoner og overfyllingshøyder med spennlengder fra 3,5 til 8 meter. Kulvertløsningene er samlet i en håndbok for prefabrikkerte betongkulverter som inneholder dimensjoneringseksempler, dimensjoneringstabeller, armeringstegninger og tabeller [29]. Kulvertelementene er prosjektert etter håndbok *N400 Bruprosjektering*. Kulvertdimensjon er valgt på bakgrunn av krav i håndbok *N100: Veg- og gateutforming*. Betongkvalitet B45 er brukt med en nominell overdekning på 65 mm [30]. Elementfabrikkene har også flere andre prefabrikkerte kulvertløsninger [31], [32].

I likhet med kulvertprosjektet skal Betongelementforeningen og Statens vegvesen utarbeide prefabrikkerte brokonsepter. Målsetningen for prosjektet er å lage prefabrikkerte standardiserte løsninger som er attraktive for markedet. Derav skal det også stilles krav til estetikk for å gjøre broene konkurransedyktige. Overordnet hensikt med prosjektet vil være å bidra til kortere byggetid og forenklet byggeprosess, i tillegg til å minske trafikkavbrudd og øke sikkerheten i byggefasen. Brokonseptene skal i utgangspunktet bestå av åtte hovedkonsepter med brolengde fra 12 til 40 meter. Maksimaltransportvekt er 50 tonn. Resultatet av prosjektet skal være dimensjoneringseksempler, dimensjoneringstabeller og armeringstegninger og -tabeller for alle broløsningene [33]. Broene er foreløpig skissert til å være omvendte T-bjelker med enten kompakt tverrsnitt der mellomrommet mellom bjelkene støpes igjen ved montering eller T-bjelker med plasstøpt dekke. Alle brokonseptene har tilhørende kantelement som skjuler endebjelkene [34].

«Normalveien» er et prosjekt startet av Nye Veier og er et ledd i Nye Veiers samfunnsoppdrag om «å bygge gode trafikksikre veier raskt, helhetlig og kostnadseffektivt». I dette prosjektet utfordres og vurderes det norske regelverket knyttet til veibygging. I et av arbeidsnotatene vurderes standardisering av broer og tiltak for å redusere kostnadene av broer [35]. I henhold til dette arbeidsnotatet er kostnadene forbundet med bygging av mindre betongbroer knyttet til reis (15 %), forskaling (15-20 %), armering (25-30 %), betong (20-25 %) og annet (5-10 %). I dokumentet gis det en oversikt over hvilke elementer som har potensiale for kostnadsinnsparing. Dette gjelder blant annet pilarer, overbygning på broer, armeringsføring og overdekning. Det ønskes en standardisering av pilarer for plate- og bjelkebroer med tilhørende systemforskaling. Det bør etterstrebes å lage platebroer rette i lengderetning, for å minimere ekstra kostnad for breddeutvidelse. I tillegg vil et

virkemiddel for økt kostnadsbesparelse være å lage standardiserte løsninger for forskalingslemmer. Når det gjelder bjelkebroer er disse ofte lange, og for broer over 100 meter er det ikke mulig å lage disse broene rette. Derfor anbefales å standardisere tverrsnitt for lange broer [35].

Det understrekes også at overdekningskravene i *N400 Bruprosjektering* er økt i forhold til kravene i *NS-EN 1992-1*. Standardisering av brotyper og geometri med utgangspunkt i effektive byggeprosesser kan i henhold til notatet gi vesentlige besparelser. Det er sentralt at prosessen for utformingen av broer begynner allerede med planlegging av veilinen, slik at blant annet korte broer kan utføres rette uten klotoider, radier og breddeutvidelser. I oppsummeringen konkluderes det at i første omgang bør det standardiseres innenfor hvert enkelt prosjekt. På lengre sikt kan følgende elementer standardiseres [35]:

- Støttemurer
- Kulverter
- Platebroer
- Viltoverganger

Nye Veier har også gjort en vurdering av betongelementbroer for bruk på motorveier [36]. De trekker frem konseptene som nevnes over som aktuelle for markedet: MOT-bro (spennlengde 12-30 meter), Super I-bro (spennlengde opptil 30 meter) og PLA-bro (spennlengde 5-20 meter). I notatet understrekes det at det er utfordringer knyttet til geometri og estetikk. I tillegg til at kostnadene er forholdsvis høye for de eksisterende elementbroene. Kostnadene ligger på samme nivå eller noe over kostnadene for plassproduserte broer. Kostnaden kan derimot reduseres ved en økende produksjon. For å øke bruken anbefales det blant annet følgende tiltak [36]:

- Utarbeide standardiserte løsninger for MOT- og PLA-broer med nye dimensjoneringstabeller etter dagens regelverk
- Tilpasse kravspesifikasjon i konkurransegrunnlag for entrepris
- Tidlig planlegging for å unngå komplisert brogeometri

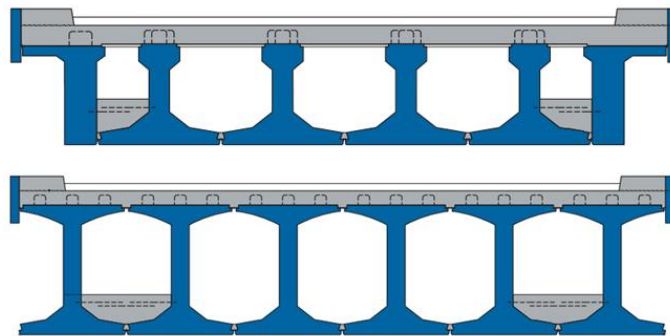
3.1.4 Standardisering av broer utenfor Norge

I noen deler av verden er vei- og brobygging vesentlig mer industrialisert sammenlignet med Norge. Nederland er et av de ledende landene innenfor bruk av prefabrikkerte brokonsepter. Der brukes slike løsninger i omtrent 80 % av tilfellene [37]. Prefabrikkerte broer blir også mye brukt i Belgia, Spania, Storbritannia, Canada og USA [11].

I Norge er prefabrikkerte broelementer som oftest begrenset til plate- eller bjelkebroer. For broer som skal krysse kortere spennlengder er platebroer hensiktsmessig på grunn av at de er enkle å montere. Platebroer er massive og har stor egenvekt. Bjelkebroene har vesentlig lenger maksimal spennlengde, men har maksimal spennlengde på 32 meter etter norske håndbøker [15]. I andre land ser det ut til at denne lengden kan være mye større. En litteraturstudie av den internasjonale betongforeningen, fib, fra 2004 oppgir at omvendte T-bjelker har bruksområde mellom 15 til 45 meter, mens I-bjelkene kan spenne opptil 55 meter [11]. Avstanden mellom bjelkene kan varieres avhengig av spennlengder og laststørrelser [11].

Figur 3.5 viser prefabrikkerte broelementer levert fra den britiske elementprodusenten Stanton Bonna. De oppgir at bjelkebroene kan spenne opptil 60 meter [38]. Som det fremgår av figuren

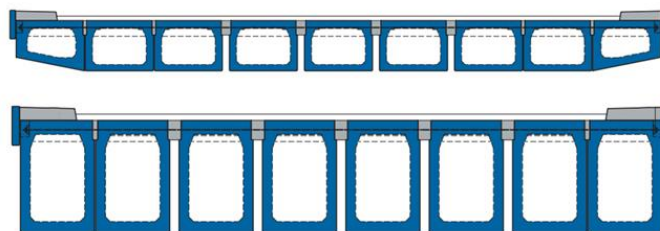
leveres brokonseptene om ønskelig med kantelementer for å skjule formen på I-bjolkene. I likhet med det norske MOT-konseptet plasstøpes dekket. I tillegg støpes ytterste bjelkeelement til nest ytterste bjelke for å gjøre broen robust mot påkjørsel.



Figur 3.5: Bjelkebrokonseptet «Girder beams» fra Stanton Bonna [38]

Et annet prefabrikkert brosystem er forspente kassebroer (box girders). Disse broene består av kassebjelker som enten kan plasseres tett inntil hverandre eller med litt avstand mellom bjelkene. Dette brosystemet kan ifølge fibs litteraturstudie fra 2004 spenne opptil 50 meter med en bjelkehøyde på 1,5 meter [11]. Det finnes flere varianter av disse kassebroene, både med plasstøpte dekker og prefabrikkerte dekker. En av disse variantene kalles «Mono-box girders» og kan spenne opptil 90 meter. På grunn av utfordringer knyttet til transport er derimot spennlengden ofte begrenset til 45 meter. Denne typen består kun av én trapesformet kassebjelke som krager ut på begge sider. Ved behov for lengre spennlengder kan derimot bjelkene transporteres i mindre segmenter og etteroppspennes [11].

Stanton Bonna leverer også prefabrikkerte kassebroer som kan spenne opp til 60 meter, se Figur 3.6. På disse broene er det mulig å legge slitelag og membran direkte på bjelkene [38]. Dette konseptet kan også leveres med spesielle kantelementer for å gi broen en bedre finish.



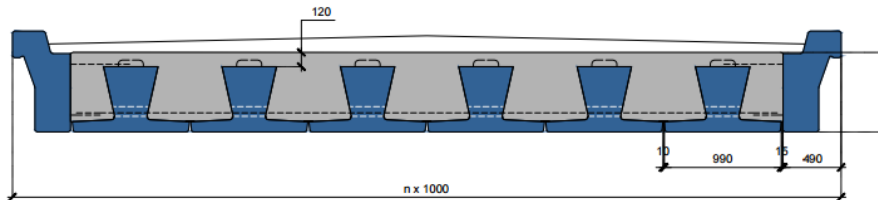
Figur 3.6: Bjelkebrokonseptet «Box girder beams» fra Stanton Bonna [38]

3.1.5 Prefabrikkerte brosystemer i Nederland

Nederland er det ledende landet i Europa på prefabrikkerte broelementer. Et av de fremste selskapene i Nederland er Spanbeton. Spanbeton produserer flere ulike broelementer. I hovedsak har Spanbeton tre ulike brosystemer:

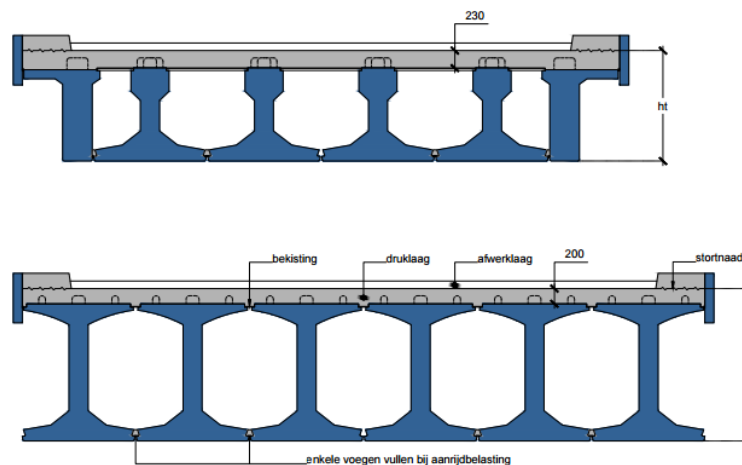
- Kompakte komposittkonstruksjoner (Solid composite constructions, kalt SJP)
- Omvendt T-bjelkekonstruksjoner (Inverted T-beam constructions, kalt ZIPXL)
- Kassebjelkekonstruksjoner (Box girder constructions, kalt SKK)

Kompakte komposittkonstruksjoner kan brukes for statisk bestemte og statisk ubestemte konstruksjoner [39]. Som illustrert i Figur 3.7 består konstruksjonen av omvendte T-bjelker. Ved montering blir mellomrommet mellom bjelkene fylt med betong, illustrert med gråfarge i figuren [40]. Denne typen bro kan brukes for spennlengder mellom 6 og 16 meter til blant annet broer, kulverter og tunneler [39].



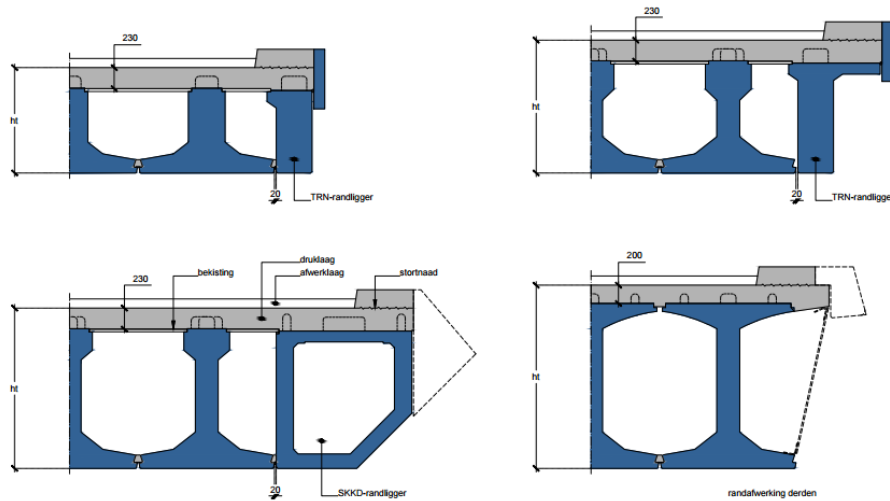
Figur 3.7: Kompakt komposittkonstruksjon fra Spanbeton [40]

Omvendte T-bjelkekonstruksjoner består av enten prefabrikkerte omvendte T-bjelker eller I-bjelker, henholdsvis med bjelkehøyde opptil 1700 mm og 2400 mm, se Figur 3.8. Bjelkebredden er 1,5 meter for begge brobjelkene. Dekket er plasstøpt med 230 mm høyde. Ved bruk av omvendte T-bjelker benyttes forskalingsplater mellom elementene, men for I-bjelkene er ikke dette nødvendig. Bjelkene står med lite mellomrom mellom underflensene for blant annet å ta opp påkjørselslaster. Mellomrommet mellom bjelkene støpes ut i lengderetning ved montering. For broer der påkjørselslast kan utelukkes kan senteravstanden mellom bjelkene økes, for å oppnå en kostnadsbesparelse. Bjelkene har også i utgangspunktet lav materialbruk [41].



Figur 3.8: Spanbetons omvendte T-bjelkekonstruksjoner [42]

For å avslutte broene i tverretning finnes det flere tilgjengelige kantelementer som vist i Figur 3.9. Disse kan være rektangulære elementer, glassfibrelementer (stiplet linje i figur) eller en type kassebjelke som endebjelke [42].



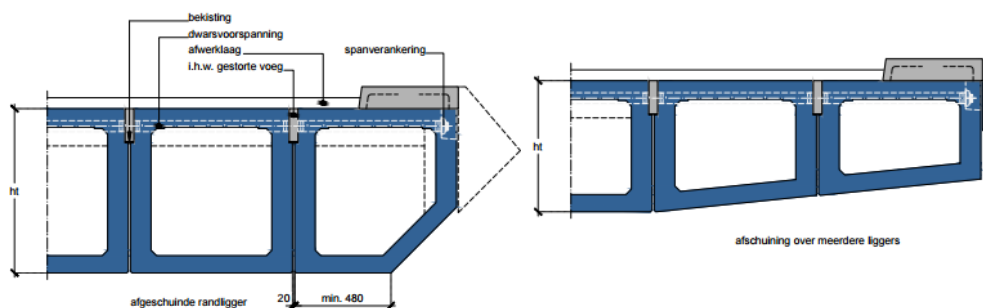
Figur 3.9: Kantelementer til bruk med Spanbetons omvendte T-bjelkekonstruksjoner [42]

Brosystemet kan brukes for statisk bestemte og statisk ubestemte konstruksjoner med spennlengder fra 20 til 60 meter. På grunn av store momenter over opplegg for statisk ubestemte konstruksjoner, anbefales statisk bestemte konstruksjoner med fritt opplagte bjelker. Støttemomentene forårsakes av setninger, temperaturpåvirkninger, svinn og kryp [41].

Spanbetons kassebjelkekonstruksjoner er kassebjelker av rektangulære forspente bjelker som monteres sammen til et brosystem med plasstøpt betong mellom bjelkene. Dette systemet er prinsipielt helt likt som brosystemet vist i Figur 3.5. Det er flere fordeler med denne brotypen. Blant annet kan bjelkehøyden reduseres, monteringsprosessen er hurtig og den har stor motstand mot kollisjon. I tillegg er det mulig å konstruere elementer med horisontalkurveradius ned til 50 meter.

Systemet kan brukes på statisk bestemte konstruksjoner og kan brukes med både rette og skrå opplegg [43]. Med maksimal bjelkehøyde på 1,9 meter kan broen spenne 55 meter, der brobredden kan varieres ved å variere bredden på den plasstøpte fugen på langs av elementene [43], [44].

Det finnes også kantelementer for dette systemet. Endebjelkene kan utformes forskjellig som vist i Figur 3.10. Som det fremgår av figuren kan helningen på avslutningselementene varieres. I tillegg er det mulig å kle elementene med glassfiberpaneler (stiplet linje i figur) [44].



Figur 3.10: Kantelementer for bruk med Spanbetons kassebjelkekonstruksjoner [44]

Alle brotypene prosjekteres for en levetid på 100 år med overdekningskrav XD3 etter NEN-EN 1992-1, Nederlands utgave av EN 1992-1 [44].

Fasthetsklassen for alle brosystemene er i utgangspunktet B60. Bjelkene legges på ett lager per bjelkeende [44].



Figur 3.11: Transport av 60 meter langt broelement fra fabrikk til lokasjon [43]

Lange elementer transporteres til byggeplass på lekter eller med spesialkjøretøy som vist i Figur 3.11.

3.1.6 Prefabrikkerte brosystemer i Danmark

I Danmark representerer Spæncom kunnskapsfronten på prefabrikkerte betongelementbroer. I likhet med Spanbeton og Stanton Bonna er de en del av Consolis-gruppen. Spæncom leverer i hovedsak omvendte T-bjelker, men har også prosjekter med kassebjelkekonstruksjoner. De omvendte T-bjelkene og kassebjelkekonstruksjonene er prinsipielt like i Danmark som i Nederland, men de maksimale spennviddene som er oppgitt fra Spæncom er noe lavere enn de maksimale spennene som oppgis av Spanbeton. De omvendte T-bjelkene kan produseres med spennlengde opp til omtrent 36 meter [45]. Kassebjelkene har også andre dimensjoner i Danmark, men prinsippene forblir de samme som forklart i 3.1.5 *Prefabrikkerte brosystemer i Nederland*.

3.1.7 Estetiske krav for broer

Når man skal vurdere krav til estetikk for broer er det naturlig å skille mellom broer som er synlige for publikum og broer som er mindre synlige. Overgangsbroer over hovedveier er et godt eksempel på synlige broer, da de vil oppleves av alle trafikanter som krysser under broen. Motstykket vil kunne være viltoverganger under veien der broen i utgangspunktet ikke skal betraktes av like mange.

Det er vanskelig å bedømme om noe er estetisk fint. Dette fordi estetikk er noe som oppfattes av sansene [46]. Det er tingenes funksjon, innhold, mening og økonomi som er viktig for den estetiske opplevelsen [47].

Prefabrikkerte broer har relativt lav status når det gjelder estetiske krav. Valgene som omhandler lokalisering, linjeføring, landkarutforming, proporsjoner og detaljering er uavhengig av om broen skal plasstøpes eller prefabrikeres. Krav til estetikk kan oppnås for elementbroer ved å gjøre viktige vurderinger av de overnevnte punktene [15].

Det kan skilles mellom to tilnæringer for utforming av konstruksjoner; å integrere eller fremheve konstruksjonen. Å integrere konstruksjonen innebærer å se på den landskapsarkitektoniske utformingen slik at konstruksjonen underordner seg landskapet og fremstår med en diskret utforming. Ved å fremheve konstruksjonen kan den oppfattes som en klar kontrast i landskapet, men

samtidig presentere det øvrige landskapsbildet [9]. En slank og enkel brokonstruksjon vil ofte gi et bedre utseende, men en massiv konstruksjon kan i noen sammenhenger fremstå som en positiv kontrast i landskapet.

Nye Veier har i samarbeid med Sweco og Rambøll kommet ut med en rapport med visjon om «å bygge gode veier raskt og smart» [9]. Her presenteres et estetisk ambisjonsnivå for å sikre god kvalitet i utforming av vei og veianleggs omgivelser, og de har i denne sammenhengen gitt føringer for hvilke kvaliteter som skal vektlegges i senere planfaser. Disse føringene er delt inn i *skal*, *bør* og *tilstrebes*, hvor alle formprinsippene ivaretar plan- og bygningslovens krav. Under *skal* er føringen juridisk bindende, og skal legges til grunn for prosjekterings- og byggefasen. *Bør* er ønskelig gjennomført og det skal redegjøres om det ikke er mulig, mens *tilstrebes* skal gjennomføres der det er aktuelt [9].

Det anbefales at broer i linjen utformes likt for å få et helhetlig uttrykk, men også for å gi gjenbruksmuligheter av forskalingselementer. En bro i linjen vil skille seg ut i landskapet den står i og funksjonen under broen vil være styrende for detaljeringen og hvor sterkt det må fokuseres på estetikken [9]. Overordnede estetiske prinsipper er presentert i Tabell 3.2:

Tabell 3.2: Overordnede prinsipper for broer i linjen etter Nye Veiers DesignVei [9]

<i>Skal</i>	<i>Bør</i>	<i>Tilstrebes</i>
Gi et visuelt lett uttrykk	Utføres som enkle konstruksjoner	En enkel utforming med få pilarer
Ikke være spesielt fremtredende konstruksjoner	Utformes nøytralt og standardisert	for bruer som krysser over dype og trange daler og føres gjennom
Løsningen skal sees i sammenheng med de stedlige forhold	Valg av brotype diskuteres for større elve- og fjordkryssinger	ulendt terreng

Overgangsbroer *bør* i størst mulig grad lokaliseres slik at en unngår terrenginngrep. Terrenginngrepene *bør* formes sammen med veiens sideterreng og som en del av landskapet. Dette kan gjøres ved å få overgangsbroen mest mulig horisontal og vinkelrett på veien den krysser. Det vil være en fordel å unngå pilarer i midtdeler da dette stykker opp veiens perspektiv, og vil i stedet gi konstruksjonen et lettere preg [47].

Når vi ser på overgangsbroer *bør* vi også se på estetikken i selve krysset. Et visuelt godt kryss skal ha gode siktforhold, harmonisere med omgivelsene, være stedstilpasset og ha veldefinerte areal for de ulike trafikantgruppene. For store kryssområder kan beplantning markere og forsterke linjer gjennom krysset og gjøre krysset mer forståelig [48].

De overordnede estetiske prinsippene for overgangsbroer er presentert i Tabell 3.3.

Tabell 3.3: Overordnede prinsipper for overgangsbroer etter Nye Veiers DesignVei [9]

Skal	Bør	Tilstrebes
Ha et innbyrdes formmessig slektskap når overgangsbroen er på tvers av hovedlinjen	Ligge mest mulig horisontalt over veien og vinkelrett	Redusere den synlige delen av landkarene
Løsningen skal sees i sammenheng med de stedlige forhold	Unngå søyle i midtdeler Unngå at plasseringen av pilarer endrer strømningsforhold negativt i elver eller bekker	Få et enhetlig og bevisst uttrykk på slagskyggen

Det nevnes i Statens vegvesens rapport nr. 300 *Vegen i landskapet – om vakre veier* at landkaret ikke skal være høyere enn 1 meter og at fundamentene plasseres slik at veiens sideterreng opprettholdes sammenhengende for overgangsbroer. Store fremstikkende brokar vil gi dårlig forankring i landskapet [47].

3.1.8 Generelle konstruksjonskrav

N400 Bruprosjektering stiller krav til god tilgjengelighet for alle eksponerte flater. På den måten kan inspeksjon og vedlikehold gjennomføres effektivt og med tilfredsstillende sikkerhet. Det stilles også krav til fuger, lager og ledd for fremtidig vedlikehold og eventuelle utskiftninger. Det skal være mulig å inspisere både lager og ledd, og broen skal kunne jekkes opp ved justering eller utskiftning. I henhold til *N400 Bruprosjektering* kan det maksimalt være to vertikale lager per akse for broer med totalbredde mindre enn 15 meter. For at prefabrikkerte betongbjelkebroer med tre eller flere bjelker skal kunne oppnå dette kravet må bjelkeendene støpes monolittisk sammen med en tverrbærer [49].

3.2 Veidimensjonering

Brokonstruksjoner fører ofte til store terrenginngrep og bør derfor forankres i landskapet på en naturlig måte. Krav til linjeføring av vei og veiens geometri påvirker også utforming av broen.

Krav til utforming av vei er beskrevet i Statens vegvesens håndbok *N100 Veg- og gateutforming* [50]. Håndboken deler veier inn i ulike dimensjoneringsklasser. Det er i alt ni dimensjoneringsklasser for nasjonale hovedveier. Fartsgrense og ÅDT er inngangsparameterne for bestemmelse av utformingskravene i de forskjellige dimensjoneringsklassene. For motorvei med fartsgrense 110 km/t gjelder eget NA rundskriv [51]. For de ulike dimensjoneringsklassene stilles det krav til tverrprofil og horisontal- og vertikalkurvatur, herunder krav til minste horisontalradius, breddeutvidelse, siktlengde, vertikalradius, overhøyde, stigning og fall. *N100 Veg- og gateutforming* setter også begrensinger for utforming av broer. Blant annet skal linjeføringer inntil og over broen vurderes med hensyn til trafiksikkerhet og estetikk [50].

Håndboken har vært ute på høring, med høringsfrist 15. mars 2017 [52]. De viktigste forslagene til endringer gjelder blant annet færre dimensjoneringsklasser og nytt beregningsgrunnlag for linjeføringskravene for vei. Høringsutgaven foreslår å gå ned fra ni dimensjoneringsklasser for nasjonale hovedveier til tre. Disse kalles H1, H2 og H3, med veibredder gitt i Tabell 3.4. Det er også endringer knyttet til siktlengde for fartsgrense 110 km/t (H3). Kravet til siktlengde er i NA-rundskrivet og høringsutkastet uavhengig av horisontalradius. I høringsutkastet er den også blitt noe redusert. For veier med fartsgrense 110 km/t er også veibredden endret [52]. I gjeldende håndbok med

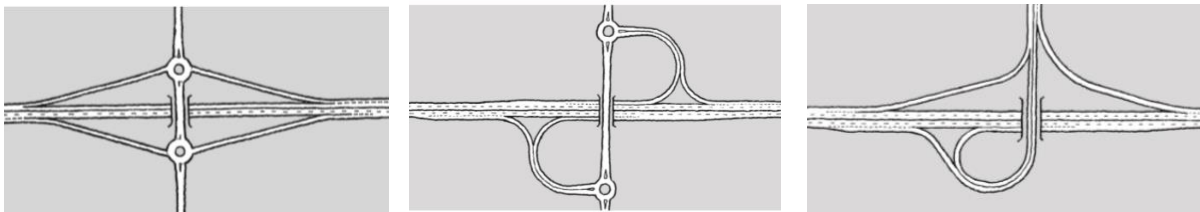
rundskriv differensieres veibredden avhengig av trafikkmengde [50], mens den i høringsutkastet er fast for dimensjoneringsklassene [52].

Tabell 3.4: Dimensjoneringsklasser for nasjonale hovedveier etter høringsutgave N100, tabell C.1 [52]

ÅDT	<6 000	6 000 – 12 000	>12 000
Fartsgrense [km/t]	80 (90)	90	110
Dimensjoneringsklasse	H1	H2	H3
Veibredde [m]	9	12,5	23

I forbindelse med høringsutgaven av håndbok *N100 Veg- og gateutforming* har Nye Veier kommet med en høringsuttalelse [53]. De foreslåtte endringene dreier seg blant annet om å endre normalprofil og redusere veibredden for de ulike dimensjoneringsklassene. Denne reduksjonen er mulig ved å redusere veiskulderen og er i henhold til svenske veinormaler. Det er forventet en betydelig økonomisk effekt av forslaget [53].

For overgangsbroer er det forskjellige måter å utforme tilhørende kryss på. Det skilles mellom plankryss og planskilte kryss. Som vist i Figur 3.12 kan plankryss utføres som ruter-/diamantkryss, halve kløverbladkryss, trompetkryss eller kombinasjon av disse. Dette er kryss som kreves på motorveier og motortrafikkveier fordi dette gir god avvikling for gjennomgående trafikkløyper. En annen fordel med planskilte kryss er at det har vist en reduksjon i antall ulykker [48].



Figur 3.12: Ruter-/diamantkryss (venstre), halvt kløverbladkryss (midt) og trompetkryss (høyre) [48]

For broer skal stoppsikt krav tilfredsstilles siden sikten begrenses av rekkverk i innersving. Siktkravet er avhengig av fartsgrense, bremsefriksjonstall og horisontalradius, og om veien har fall eller stigning. Kravene til stoppsikt er gitt i håndbok *N100 Veg- og gateutforming* for hver dimensjoneringsklasse [50]. Håndbok *V120 Premisser for geometrisk utforming av veger* beskriver metoden for siktkontroll [48].

I Nye Veiers høringsuttalelse til *N100 Veg- og gateutforming* er også stoppsikt kravet redusert utfra en økning i dimensjonerende bremsefriksjon. Denne økningen er sett i sammenheng med bremsefriksjon i andre europeiske land (Sverige, Danmark og Tyskland) som har vesentlig høyere friksjonsfaktorer, og foreslår at bremsefriksjonen i Norge tilsvarer det svenske regelverket. Reduksjonen i stoppsikt kravet fører også til en reduksjon i breddeutvidelseskrav i horisontalradius for broer i linjen, noe som vil gi en betydelig kostnadsreduksjon [53].

3.3 Ytre påkjenninger på standardiserte broer

Dette kapitlet tar for seg grunnleggende ytre påkjenninger på standardiserte broer. Standardiserte broer vil utsettes for mange av de samme påkjenningene som en tradisjonell bro. Noen av

påkjenningsene er stedsavhengige og vil derfor variere fra prosjekt til prosjekt. Dette gjelder først og fremst naturlaster.

Laster som påvirker en konstruksjon kan klassifiseres etter deres variasjon over tid, og blir ofte delt på følgende måte [49]:

- Permanente påvirkninger
- Variable påvirkninger
- Ulykkespåvirkninger

Permanente påvirkninger er tilnærmet konstant over tid, og omfatter blant annet egenlast av konstruksjonen. Variable laster varierer over tid. Eksempler på dette er trafikklast og naturlaster. Ulykkespåvirkninger er laster som opptrer som følge av uriktig operasjon, ulykkestilfelle eller unormale hendelser. For broer kan dette blant annet være påkjøringslast fra kjøretøy, brann eller eksplosjon. Seismiske laster er en form for unormal naturlast [49].

Noen variable laster er stedsavhengige. Dette er først og fremst naturlaster, det vil si laster som skyldes klima på stedet eller andre naturgitte forhold slik som jordskjelv [49].

3.3.1 Standardverk

Eurokodene med nasjonale tilleggbestemmelser er felleseuropeiske standarder som gir forutsetning for dimensjonering av konstruksjoner, herunder brokonstruksjoner. Det er i alt 10 Eurokoder og for brokonstruksjoner i betong er følgende aktuelle:

- NS-EN 1990 – Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner
- NS-EN 1991 – Eurokode 1: Laster på konstruksjoner:
 - NS-EN 1991 Del 1-3: Allmenne laster – Snølast
 - NS-EN 1991 Del 1-4: Allmenne laster – Vindlast
 - NS-EN 1991 Del 1-3: Allmenne laster – Termiske påvirkninger
 - NS-EN 1991 Del 1-7: Allmenne laster - Ulykkeslast
 - NS-EN 1991 Del 2: Trafikklast på bruer
- NS-EN 1992 – Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner
 - NS-EN 1992 Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger
 - NS-EN 1992 Del 2: Bruer
- NS-EN 1998 – Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning
 - NS-EN 1998 Del 1: Allmenne regler, seismiske laster og regler for bygninger
 - NS-EN 1998 Del 2: Bruer

For å ta hensyn til nasjonale ulikheter på områder som sikkerhet, bestandighet, klimatiske og geografiske forhold er det åpent for å ha egne nasjonale bestemmelser. Disse bestemmelsene gis i eget nasjonalt tillegg (NA) [54]. Ved standardisering av brokonstruksjoner må det norske regelverket følges. Når det gjelder brokonstruksjoner har Statens vegvesen gjennom en årrekke hatt egne håndbøker for prosjektering av broer. De gis ut på to nivåer:

- Nivå 1: Normaler (N) og retningslinjer som er godkjent av overordnet myndighet eller av Vegdirektoratet.
- Nivå 2: Veiledninger (V) som er godkjent av avdelingen som har fått fullmakt av Vegdirektoratet.

Gjeldende normal for blant annet broer i det offentlige veinettet er Håndbok *N400 Bruprosjektering*, med flere tilhørende retningslinjer og veiledere [55]. *N400 Bruprosjektering* supplerer Eurokodene med utfyllende bestemmelser. Dette gjelder beregning, dimensjonering og utforming av broer, i tillegg til stedsavhengige og særskilte krav for prosjekteringen [49]. Trafikklasten på broer skal gis ut i egen forskrift med tiden, foreløpig følges *NS-EN 1991-2* [56].

3.3.2 Grensetilstander og lastkombinering

Dimensjonering av brokonstruksjoner utføres ved å påvise at konstruksjonen overholder krav i forskjellige grensetilstander i løpet av brukstiden. Disse grensetilstandene er bruddgrensetilstand og bruksgrensetilstand, i tillegg til ulykkessituasjon. Grensetilstandene er definert i *NS-EN 1990*, som fastsetter grunnleggende krav til sikkerhet, brukbarhet og bestandighet [56]. I grensetilstandene kombineres de forskjellige lastene som forventes å opptre samtidig for å finne de dimensjonerende lastvirkningene. På grunn av en viss usikkerhet i lastverdiene, multipliseres de ulike lastene med lastkoeffisienter for å få dimensjonerende verdi for lastene. Lastkoeffisientene varierer fra lasttype, grensetilstand og lastkombinasjon.

Bruksgrensetilstand er tilstanden som påvirker konstruksjonens utseende og funksjon ved normal bruk og menneskers komfort [56]. For betongkonstruksjoner gjelder dette blant annet begrensning av nedbøyning, spenning og rissvidder [57].

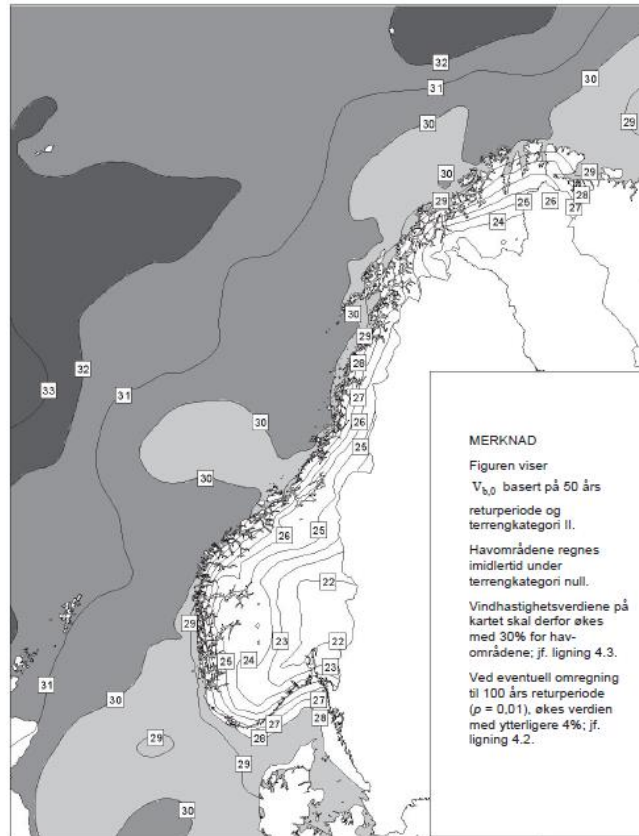
Bruddgrensetilstand er den tilstanden som har betydning for menneskers og/eller konstruksjonens sikkerhet [56]. I denne tilstanden bestemmes konstruksjonens kapasitet mot brudd for aktuelle lastvirkninger slik som bøyemoment, skjærkraft og torsjon [57].

Ulykkessituasjon på en bro må tas hensyn til under beregninger og det skal kontrolleres at konstruksjonen har tilstrekkelig kapasitet for å forhindre sammenbrudd i disse situasjonene. Forskjellige ulykkessituasjoner kan være påkjørsel, seismiske hendelser, eksplosjon eller brann [49].

3.3.3 Vindlast

Vindlast bestemmes etter *N400 Bruprosjektering* og *NS-EN 1991-1-4* [49], [58]. Vindlastene på en brokonstruksjon er avhengig av stedlige parametere og konstruksjonens utforming.

Brokonstruksjoner deles inn i vindklasser avhengig av konstruksjonens egensvingeperiode og spennvidde for å bestemme omfanget av vindlastberegningene. Broer i vindklasse I har ubetydelig dynamisk lastvirkning fra vind, med høyeste egensvingningsperiode mindre enn to sekunder. Brotyper i vindklasse I kan blant annet være platebroer og bjelkebroer i stål og betong. Vindklasse II og III har dynamisk lastvirkning med større egensvingningsperiode og/eller større spennvidder [49]. Påvirkninger fra vind avhenger av flere stedlige forhold, slik som nærliggende terreng og lokal vindhastighet. Som illustrert i Figur 3.13 varierer den lokale vindhastigheten mye fra region til region, og kan innad i regionen også variere på grunn av andre parametere knyttet til terrenget rundt brokonstruksjonen [58].



Figur 3.13 Referansevindhastighet $V_{b,0}$ etter NS-EN 1991-1-4 Figur NA.4 (901.1) [58]

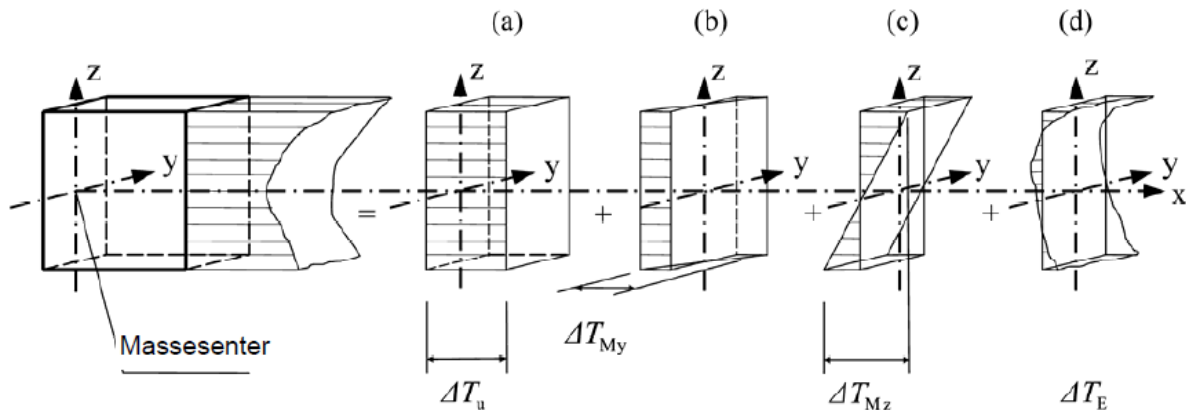
3.3.4 Snølaster

Snølast er en stedsavhengig naturlast som beregnes etter NS-EN 1991-1-3 og er avhengig av stedlige parametere som karakteristiske snømengder og høyde over havet [49], [59].

3.3.5 Termiske påvirkninger

Termiske påvirkninger er sammensatt av forskjellige virkninger. Når termiske påvirkninger på en bro skal bestemmes skiller NS-EN 1991-5 mellom fire hoveddeler illustrert i Figur 3.14. De forskjellige temperaturdifferanse er som følger [60]:

- Jevnt fordelt temperaturandel ΔT_u
- Lineært varierende temperaturdifferanse om z-z-aksen ΔT_{MY}
- Lineært varierende temperaturdifferanse om y-y-aksen ΔT_{MZ}
- Ikke-lineært varierende temperaturdifferanse ΔT_E



Figur 3.14: Temperaturfordeling i konstruksjonsdel. Hentet fra NS-EN 1991-5, Figur 4.1 [60]

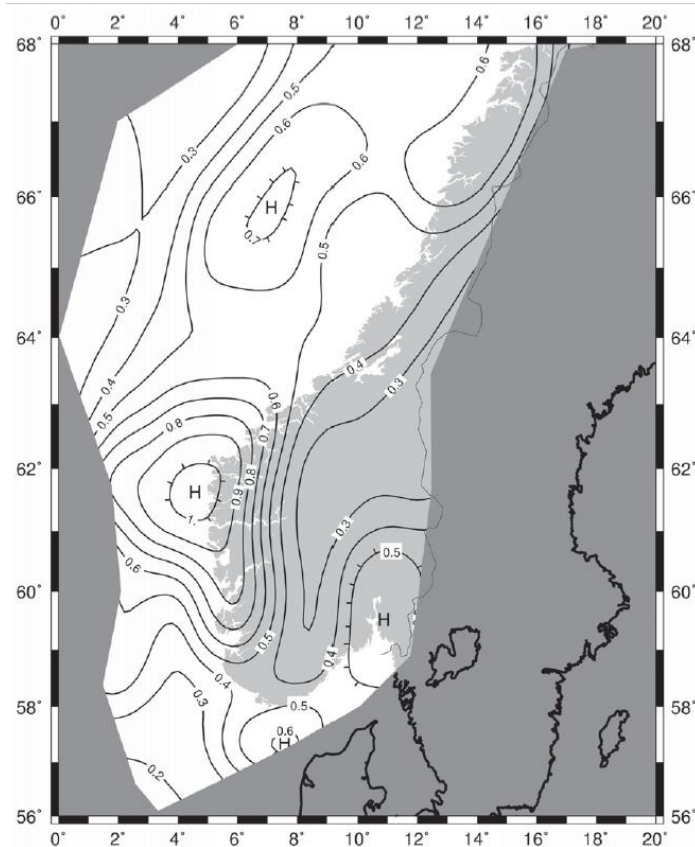
Den jevnt fordelte temperaturandelen, ΔT_u , vil gi en uniform utvidelse eller sammentrekning av materialet. Størrelsen på temperaturandelen er stedsavhengig og NS-EN 1991-5 angir isotermer for laveste og høyeste forventede temperatur i skyggen, Figur NA.A1 og A2. Dersom konstruksjonen er fastholdt mot bevegelse på to eller flere steder vil det oppstå fastholdingskrefter som må tas hensyn til i dimensjoneringen. For et enkelt fritt opplagt system vil ikke denne effekten være dimensjonerende for annet enn horisontale forskyvninger [60].

Temperaturdifferanse om konstruksjonsdelens z-retning, ΔT_{My} , vil i bro sammenheng tilsvare en forskjell i temperatur mellom broens to sidekanter og skal ifølge NS-EN 1991-5 tas hensyn til i spesielle tilfeller [60].

Solstråling gjør at broens overside varmes opp fortere enn undersiden. På samme måte vil utstråling mot åpen himmel føre til at oversiden kjøles ned hurtigere enn undersiden om kvelden. Dette fører til temperaturdifferanser mellom oversiden og undersiden, som igjen fører til en krumning om tverrsnittets y-akse. Hvis konstruksjonen er fritt opplagt vil man få fri krumning, men dersom den inngår i et statisk ubestemt system vil man få tvangsmomenter i konstruksjonen. For å beregne effektene fra disse temperaturdifferansene angir NS-EN 1991-5 at man kan anta at temperaturen varierer lineært over tverrsnittet. Temperaturdifferansen mellom over- og underside styres i hovedsak av konstruksjonstype og belegg på oversiden, se Tabell NA.6.1 og NA.6.2 i NS-EN 1991-5. Denne effekten er altså ikke stedsavhengig [60].

3.3.6 Seismiske laster

I henhold til Håndbok N400 *Bruprosjektering* skal seismiske påvirkninger bestemmes etter NS-EN 1998 [49]. Denne Eurokoden har fem deler, der del 1 og 2 er relevante for brooverbygning. Del 1 beskriver de generelle prinsippene som ligger til grunn og anvendelsen av disse [61], mens del 2 fokuserer spesifikt på broer [62]. Den seismiske belastningen på byggverk bestemmes på bakgrunn av en rekke stedlige parametere. Den seismiske påvirkningen for akselerasjon i berggrunnen er stedsavhengig og bestemmes av seismiske sonekart gitt i NS-EN 1998-1 og gjengitt i Figur 3.15. Jordskjelvlast er også avhengig av grunnforhold. Grunnforholdene er delt inn i grunntyper fra A til E, der A er fjell og er mest gunstig for jordskjelvberegninger og E er mest ugunstig (NA.3.1). I tillegg kommer grunntype S_1 og S_2 [61]. Disse behandles ikke i denne oppgaven.



Figur 3.15: Seismiske soner i det sørlige Norge med spissverdien for berggrunnens akselerasjon i m/s^2 (a_{g40Hz}) etter NS-EN 1998-1 Figur NA.3(901) [61]

I tillegg kommer parametere som beskriver konstruksjonens oppførsel når den utsettes for jordskjelv. Det tas også hensyn til konsekvensene ved kollaps av konstruksjonen ved at samfunnskritiske byggverk som sykehus og kraftstasjoner dimensjoneres for en høyere belastning enn mindre kritiske byggverk. Jordskjelv er en dynamisk hendelse der konstruksjonens stivhet og dermed egensvingeformer kan ha stor betydning for kreftene som genereres. NS-EN 1998-1 åpner også for å utelate beregning av jordskjelvkrefter under visse forutsetninger [61].

Konstruksjoners egensvingeperioder er avgjørende i beregningen av seismiske påvirkninger. I litteraturen ser det ut til å være uenighet ved effekten av forspenning på betongkonstruksjoner [63]. Dette betyr at det ved beregning av egenperioden må gjøres en forenkling. I denne oppgaven er det lagt til grunn betongens korttids E-modul, samt medtatt stivhetsbidraget fra spennarmeringen i henhold til vedlegg 12.3.6 *Stivheter fra MathCad* for å representere stivheten fra sammensatte tverrsnitt.

3.3.7 Egenlaster

Egenlast er en permanent påvirkning som stammer fra vekten av den permanente delen av konstruksjonen. Dette inkluderer vekten av bæresystemet, for eksempel betong, rekkverksinstallasjoner og belegning [49].

3.3.8 Trafikkklaster

Trafikkklaster på broer er stedsuavhengige, variable laster og er ofte en av de største variable påvirkningene på en brokonstruksjon. Trafikkklaster bestemmes etter *NS-EN 1991-2* [64]. De vertikale trafikklastene deles inn i fire lastmodeller kalt lastmodell 1 (LM1), 2 (LM2), 3 (LM3) og 4 (LM4) [64].

Lastmodell 1 (LM1) representerer det meste av påvirkningen fra vanlige biler og lastebiler. Denne modellen består av jevnt fordelt last og boggilast. Lastmodell 2 (LM2) er kun en enkel aksellast som representerer dynamiske effekter fra normal trafikk på korte brokonstruksjoner og er ofte dominerende for lastlengder mellom 3 og 7 meter. Lastmodell 3 representerer spesialkjøretøy, mens lastmodell 4 tar hensyn til belastning i form av menneskemengder på broen. Lastmodell 3 og 4 beregnes i de tilfeller der det er relevant. Lastmodell 4 er spesielt aktuell for broer i nærheten av byer [64].

I tillegg består trafikklastene av horisontale laster i form av bremse- og akselerasjonskrefter, sentrifugalkrefter og tverrkrefter [64].

Trafikklastene plasseres i teoretiske kjørebaneer der antall kjørebaneer er avhengig av veibanens bredde. For hver teoretisk kjørebane skal lastene plasseres i den mest ugunstige posisjonen. Samtidighet av trafikklastene, både i vertikal- og horisontalretning, bestemmes ved å dele de ulike lastene inn i forskjellige trafikklastgrupper [64].

3.3.9 Påkjørselslaster

En brokonstruksjon kan utsettes for påkjørsel på søyler og fundamenter eller ved påkjørsel fra store kjøretøy på overbygningen og bestemmes etter *NS-EN 1991-1-7* [65]. For å unngå å dimensjonere for påkjørselslaster på overbygning kan frihøyden økes fra minstekravet på 4,9 meter til 6,2 meter [50].

3.3.10 Overdekning og bestandighet

Miljøpåvirkninger må tas hensyn til når overdekningskravet bestemmes for betongkonstruksjoner for å sikre tilstrekkelig bestandighet gjennom brukstiden. I *N400 Bruprosjektering* fastsettes overdekningskravet utfra eksponeringsforhold og funksjonskrav. Det høyeste overdekningskravet er satt til 100 mm for konstruksjonsdeler i maritimt miljø og for undervannstøp. Den minste overdekningen i henhold til kravet i *N400 Bruprosjektering* er 35 mm. Dette er tillatt om konstruksjonsdelen er i tørre og tilgjengelige hulrom slik som innsiden i et kassetverrsnitt [49].

4 Forskerspørsmål

Vi har deltatt i UiA og Nye Veiers industrialiserings- og prefabrikeringsutvalg. Dette utvalget organiserer blant annet workshops om industrialisering og prefabrikkering, der hele verdikjeden og akademia diskuterer hvordan veibygging i større grad kan industrialiseres. På bakgrunn av møter i fagutvalget, innspill fra workshop og litteraturgjennomgangen i kapittel 3 har vi utarbeidet hovedforskerspørsmålet:

Hvordan kan standardisering av betongbroer benyttes ved bygging av nye firefelts motorveier?

For å svare på dette spørsmålet har vi følgende operasjonelle underspørsmål:

1. Hva kjennetegner broer på eksisterende nasjonale hovedveier mhp industrialiseringspotensial?
2. Hvilke utfordringer og potensial ser bransjen ved bruk av prefabrikkerte elementer og standardisering av brokonstruksjoner?
3. Hvilke føringer setter regelverk og veigeometri for standardiserte broer?
4. I hvilken grad påvirker de lokale forholdene lastsituasjonen for standardiserte broer?
5. Hvor er det størst potensiale for standardisering av broer?

4.1 Avgrensninger

For å kunne svare på det overnevnte forskerspørsmålet er flere avgrensninger gjort:

- Standardiserte brosystemer er ikke materialspesifikke og kan være betong-, kompositt, stål- og trekonstruksjoner. Med bakgrunn i at mesteparten av dagens brobygging utføres i betong, er betong valgt som utgangspunkt i oppgaven.
- I denne oppgaven er det valgt å begrense til brooverbygning som ligger i linjen eller over firefelts motorvei med fartsgrense 110km/t.
- Lokasjonen til ny firefelts vei er i denne oppgaven begrenset til strekninger presentert i *Riksvegutredningen* (2015). Det fremgår i denne rapporten at firefelts vei skal anlegges i Sør-Norge, se Figur 2.1. De geografisk bestemte påkjenninger er undersøkt kun i denne delen av landet.
- For å illustrere effekten av de stedlige påkjenningene vil oppgaven ta utgangspunkt i et valgt brotverrsnitt i betong.
- I den seismiske analysen analyseres ikke effekten av pelefundamentering og grunntypene S₁ og S₂.
- Brokonsepter fra ulike datterselskaper av Consolis i Europa er valgt for å gi sammenligningsgrunnlag mellom ulike land. Lignende fremgangsmåte er brukt på et annet pågående broprosjekt. Prosjektet er et samarbeid mellom Betongelementforeningen, Spenncon og Statens vegvesen hvor det arbeides med å utarbeide nye brokonsepter.
- Som et resultat av Nye Veiers definisjon av «Normalveien», tar oppgaven utgangspunkt i en mer standardisert norsk vei. Oppgaven forutsetter en mer rigid veiutforming, der de legger faste rammer for blant annet veigeometrien.
- Oppgaven baserer seg på en forutsetning om økt standardisering ved utbygging av ny firefelts vei, med faste krav til blant annet veibredder.

5 Case

Masteroppgaven omhandler standardisering av brokonstruksjoner for nasjonale hovedveier. Utfordringen er å finne de begrensende faktorene og utfordringene knyttet til bruk av standardiserte broløsninger, samt potensielle områder for økt bruk av standardiserte brosystemer. For å kunne besvare forskerspørsmålet er oppgaven delt inn i flere deler:

1. Kartlegging av eksisterende broer på nasjonal hovedvei
2. Kvalitative intervjuer av representanter fra bygg- og anleggsbransjen
3. Krav til veiens utforming over broen
4. Studie av stedsavhengige laster og deres påvirkning på lastsituasjonen

Kartlegging av eksisterende broer på to representative veistrekninger for nasjonale hovedveier gjennomføres for å belyse variasjoner og fordeling av brotyper, spennvidder og total lengder på nasjonale hovedveier i dag.

Videre skal det gjennomføres en undersøkelse blant representanter fra bygg- og anleggsbransjen. Dette gjøres med hensikt å få frem de utfordringene og potensialet i prefabrikking og standardisering som bransjen selv klarer å identifisere. Undersøkelsen skal foregå som kvalitative intervjuer.

Broer og deres utforming reguleres i vesentlig grad av veiens geometri og av regelverk spesifikt tilknyttet broer. For å kunne standardisere broer er det nødvendig med en gjennomgang av de relevante håndbøkene for veiens utforming, samt Statens vegvesens håndbok *N400 Bruprosjektering*.

Statens vegvesens håndbøker vedrørende veiens utforming og prosjektering av broer må benyttes sammen med de gjeldende Eurokodene som gir føringer for hvordan konstruksjoner må utformes for å kunne motstå ytre påkjenninger. Det vil derfor bli foretatt en gjennomgang av de relevante delene av Eurokoden for spesielt å belyse hvordan stedlige variasjoner i lastpåkjenninger påvirker broer. En representativ bro analyseres for å bestemme hvor mye stedsavhengige påkjenninger påvirker belastningen på broen i brudd- og ulykkestilstand.

Til slutt vil resultatene fra undersøkelsene nevnt over sammenfattes og det skal gjennomføres en diskusjon rundt hva som bør og må ligge til grunn for at en prefabrikkert eller standardisert broløsning skal benyttes.

6 Metode

6.1 Fremgangsmåte

For å kunne svare på forskerspørsmålet var det nødvendig å hente inn informasjon om temaene. Flere metoder ble brukt til å gjøre dette. Litteraturstudiet ble brukt for å finne kunnskapshull og dermed utforme forskerspørsmålet og for å få et teoretisk grunnlag. Deretter ble en kartlegging av eksisterende broer på nasjonale hovedveier utført ved hjelp av BRUTUS. En kvalitativ undersøkelse i form av intervjuer ble gjennomført. Gjeldende standardverk og håndbøker ble brukt for å finne ut hvordan krav til stedlige laster og krav til veidimensjoner setter begrensninger for bruk av standardiserte brosystemer. Til slutt ble funnene analysert og diskutert i lys av litteraturen og i lys av hverandre. Dette resulterte i en konklusjon og videre anbefalinger.

6.2 Litteraturstudie

I oppgaven er en litteraturstudie gjennomført basert på ulike skriftlige kilder. Litteraturstudien har i denne sammenheng hensikt å belyse kunnskapsfronter på standardisering og prefabrikkering, og finne eventuelle kunnskapshull. Litteratursøket er gjennomført ved å innhente relevant informasjon fra Statens vegvesen sine gjeldende og historiske håndbøker og det europeiske standardverket for prosjektering av konstruksjoner, Eurokodene, for å finne begrensninger og utfordringer knyttet til prosjektering av brokonstruksjoner med ulike lokale forhold. Søkemotorer er brukt for å finne informasjon om tilgjengelige prefabrikkerte broelementer på markedet både i Norge og andre deler av Europa.

6.3 Kartlegging av eksisterende brokonstruksjoner ved hjelp av BRUTUS

For å kunne kartlegge situasjonen for nasjonale hovedveier, er det registrert broer på to strekninger som anses som representative for nasjonale hovedveier i Norge. Strekningene er E18 fra svenskegrensen til Kristiansand og E6 fra svenskegrensen mot grensen til Oslo og nyere strekning mellom Gardermoen og Kolomoen. Disse to strekningene er valgt på bakgrunn av at de er sentrale ferdslårer som ikke bare knytter landsdeler sammen, men forbinder Norge med Europa. Begge strekningene er også aktuelle fordi de er under utbygging til firefelts motorvei.

Datagrunnlaget er hentet fra BRUTUS. Dette er Statens vegvesen sitt informasjons- og planleggingsverktøy for forvaltning, drift og vedlikehold av broer. BRUTUS er bygget opp av forskjellige moduler, for denne oppgaven er byggverksmodulen brukt. Byggverksmodulen gir landsdekkende oversikt og detaljert informasjon over alle broer i det offentlige veinettet [66]. Strekningene ble søkt opp i BRUTUS og systematisk gått gjennom bro for bro. Enkelte broer ble ikke registrert grunnet mangelfull informasjon, at de var revet eller at de ennå ikke var ferdig bygget. Under analysen ble det registrert i underkant av 700 broer på E18 og E6, der hovedtyngden av de registrerte broene ligger på E18. For denne oppgaven er følgende variabler registrert:

- Strekning
- Navn
- Byggeår
- Byggverkstype (bro eller kulvert)
- Totale lengde
- Lengste spennlengde
- Antall spenn

- Konstruksjonsmateriale
- Produksjonsmetode (hvis tilgjengelig)

Samtidig er antall felt på eller under broen registrert manuelt ved hjelp av digitale kart. Broene i linjen og overgangsbroer er registrert. Gangbroer er ikke registrert.

6.4 Datainnsamling – undersøkelse av bransjens synspunkter

6.4.1 Problemstilling

Grunnlaget for undersøkelsesmetoden i denne oppgaven er metodeboken *Hvordan gjennomføre undersøkelser* (2016) av Dag Ingvar Jacobsen [67]. Hensikten med undersøkelser kan hovedsakelig deles inn i to hovedtyper:

- Beskrive dagens situasjon
- Måle hvilken virkning eller effekt et tiltak har

Man kan også skille mellom problemstillinger [67]:

- Eksplorerende: Hensikten er å utdype det vi vet lite om
- Testende: Hensikten er å se rekkevidden eller omfanget av et fenomen

I denne oppgaven ønsket vi å belyse standardisering og prefabrikking av brokonstruksjoner slik det er i dag, altså en beskrivende og eksplorerende undersøkelse. I en eksplorerende undersøkelse er det ofte hensiktsmessig å benytte en kvalitativ tilnærming. Den kvalitative tilnærmingen som konsentrerer seg om få enheter er nemlig bedre egnet til å fange opp nyanser og trenge ned i dybden enn den kvantitative [67]. Derfor ble det besluttet å gjennomføre intervjuer med respondenter som kunne belyse temaet i oppgaven.

Et *tema* alene kan ikke forskes på empirisk og det ble derfor utviklet en problemstilling. For å bestemme problemstillingen var det nødvendig med en gjennomgang av følgende fire områder [67]:

- Undersøkelsens variabler, hva er det vi lurer på?
- Enhetene, hvem skal intervjues?
- Hvor skal undersøkelsen finne sted?
- Når skal undersøkelsen finne sted?

For å utforske temaet lurte vi blant annet på utbredelsen av bruken av prefabrikasjon og standardisering, men også hvilken holdning bransjen har til denne industrialiseringen av produksjon. *Hvor* undersøkelsen skal finne sted ble i denne sammenheng ikke et geografisk område eller en enkelt organisasjon, men snarere bygg- og anleggsbransjen i Norge. For å få et representativt bilde av bransjens syn på temaet ble det besluttet å intervjuer personer som i kraft av nåværende stilling eller erfaring visste mye om brobygging generelt og/eller standardisering og prefabrikking. Undersøkelsens plassering i tid følger naturlig av temaet som er bransjens oppfatning i dag og ble derfor utført fortløpende på vårparten 2017. Problemstillingen som ble dannet for undersøkelsen var:

Hvilke utfordringer og potensial ser bransjen ved bruk av prefabrikkerte elementer og standardisering av brokonstruksjoner?

Når problemstillingen var satt hadde vi et klart ønske om hva vi ønsket å se på, men avgrensningen gjorde også at vi hadde bestemt oss for hva vi *ikke* skulle se på [67]. Dette kan være bevisst eller ubevisst. Den valgte problemstillingen fokuserer for eksempel ikke veldig mye på potensialet ved plasstøpte bjelke-platebroer. Dette var et bevisst valg, ettersom det ikke var ønskelig å sammenligne plasstøpt med prefabrikkering og standardisering direkte. En ubevisst eller implisitt ekskludering var at undersøkelsen ikke fanget opp folk flest sin oppfatning av hva som er estetisk pent. Dette kunne for all del vært interessant å undersøke videre, men ville fordret en annen undersøkelsesmetode.

En problemstilling bør være spennende, enkel og fruktbar. Dette innebærer at resultatet ikke er kjent fra starten av, mulig å svare på, mulig å undersøke empirisk og tilføre ny kunnskap [67].

Problemstillingen nevnt over er spennende i form av at resultatet ikke nødvendigvis er kjent fra før. Den var mulig å undersøke empirisk gjennom å spørre bransjen og også mulig å svare på ved å oppsummere hvilke utfordringer og hvor potensialet ligger for prefabrikkerte elementer og standardisering. Kunnskapen som ble innhentet er ikke nødvendigvis ny, da den fantes der ute fra før, men denne undersøkelsen kan samle kunnskapen på én plass og muligens identifisere de største utfordringene eller det største potensialet.

I denne undersøkelsen ble det valgt en uklar problemstilling, med utgangspunkt i at vi ønsket å belyse et tema som det finnes relativt lite samlet kunnskap om [67]. Dette i motsetning til en klar problemstilling som for eksempel: «Fører en endring fra hovedentrepriser til totalentrepriser i veibygging til mer bruk av prefabrikasjon og standardisering?». Igjen en interessant problemstilling som gjerne kan omtales i en annen sammenheng.

Det siste punktet som var viktig da vi utformet undersøkelsen og problemstillingen var generalisering. Om det var ønskelig å kunne trekke konklusjoner fra undersøkelsen for å representere flere enn enhetene som ble undersøkt [67]. Ønsket med undersøkelsen var å finne ut hva bygg- og anleggsbransjen i Norge mener om standardisering og prefabrikkering og hadde derfor et behov for å være generaliserbar.

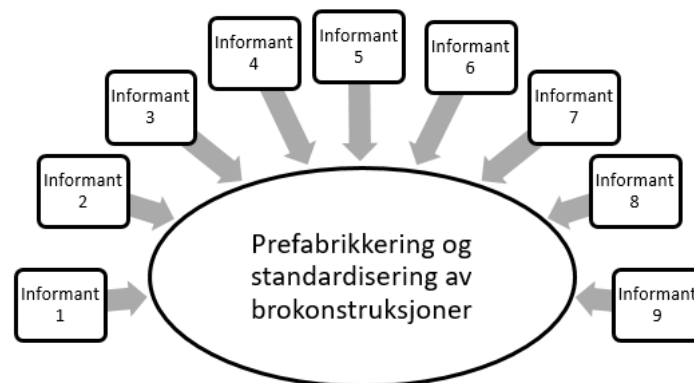
6.4.2 Undersøkelsesopplegg

Generelt bør det velges det undersøkelsesopplegget som passer best til den spesielle problemstillingen. Det skiller mellom design som kan kalles beskrivende eller korrelasjonelle, og de som kalles kausale. For å beskrive en situasjon og hvilke forhold som forekommer samtidig foretas en undersøkelse som tar et tverrsnitt på et bestemt tidspunkt. For årsak og virkning bør det velges et design som inneholder opplysninger fra flere tidspunkter, såkalte tidsseriedata [67]. I denne oppgaven ble det valgt et beskrivende undersøkelsesopplegg. Variasjon over tid var ikke interessant i denne sammenheng.

Det er også et skille mellom intensive og ekstensive undersøkelsesopplegg. Intensive undersøkelsesopplegg går i dybden på et fenomen og retter seg mot å få en detaljert forståelse. Det studeres mange nyanser, men relativt få enheter, noe som gjør dem godt egnet for teoretisk generalisering. At man ut fra et mindre tall observasjoner danner en mer generell teori om hvordan fenomener henger sammen. Ekstensive undersøkelsesopplegg går i bredden og studerer mange enheter med vanligvis få variabler [67].

Undersøkelsesopplegget som her ble brukt var en utvalgsundersøkelse, nærmere bestemt et små-N-studie [67], der ni respondenter deltok. Hovedfokuset var prefabrikkering og standardisering av

brokonstruksjoner som fenomen hvor respondentene var ulike aktører fra bygg- og anleggsbransjen. Hensikten var å få frem ulike forståelser av prefabrikking og standardisering av brokonstruksjoner for på den måten å få frem de forskjellige oppfatningene forskjellige aktører i bransjen sitter med, se Figur 6.1. Typisk for små-N-studier er få respondenter, vanligvis mellom fem og ti, hvor du har fokus på et spesifikt fenomen men som belyses fra ulike ståsteder. Styrken ved denne undersøkelsesmetoden var at man får en nokså rik beskrivelse av fenomenet vi undersøkte og et godt grunnlag for å forstå fenomenet bedre [67], men som navnet tilsier var det relativt få enheter som ble undersøkt. Dette kan gi utfordringer i generaliseringen av resultatene.



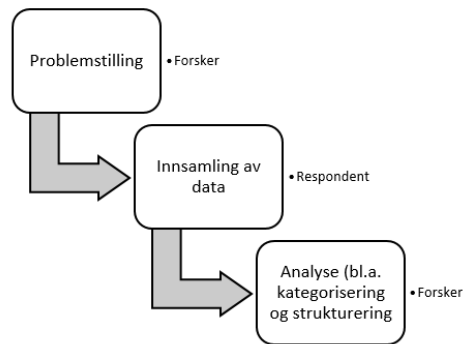
Figur 6.1: Små-N-studie for å belyse fenomenet prefabrikking og standardisering av brokonstruksjoner. Tilpasset fra [67]

6.4.3 Valg av type informasjon, kvalitativ eller kvantitativ

En testende problemstilling vil ofte ha som hensikt å finne omfanget, hyppigheten eller utstrekningen av et fenomen. Problemstillingen ønsker å gå i bredden og å undersøke mange. Dette blir et ekstensivt opplegg eller en metode som undersøker få nyanser, men rekker over mange enheter. Med slike problemstillinger velges en kvantitativ eller lukket tilnærming.

En eksplorerende problemstilling vil ofte kreve en metode som får fram nyanserte data, går i dybden og er følsom for uventede forhold og dermed åpen for kontekstuelle forhold. Dette medfører ofte få undersøkelsesenheter som skal få frem mange nyanser. Slike metoder egnes til innsamling av kvalitative data.

I denne oppgaven var det ønskelig å få en «virkelighetsnær» informasjon, som ga en bedre forståelse av fenomenet, men med få undersøkelsesenheter. Derfor ble det besluttet å benytte en kvalitativ tilnærming. Denne tilnærmingen krevde ikke at vi kategoriserte og strukturerte informasjonsinnhentingene med bakgrunn i tidligere kunnskap og åpnet for mange forskjellige typer informasjon og emner, se Figur 6.2. Dette i motsetning til den kvantitative metoden der man som forsker må legge klare føringer for hvilken type informasjon man kan forvente og risikerer å ende opp med en mer virkelighetsfjern forståelse [67]. Videre er det en forutsetning for kvantitative undersøkelser at man til en viss grad kan tallfeste fenomenet man undersøker. Dette var ikke tilfelle i denne oppgaven.



Figur 6.2: Grad av åpenhet i den kvalitative tilnærmingen. Legg merke til at kategorisering og strukturering foregår etter datainnsamlingen [67]

Når man velger undersøkelsesmetode er det også viktig å forstå styrkene og svakhetene ved metoden. Hva angår kvalitative data kan man trekke frem at man gjennom å samle inn ord fremfor tall vil man kunne oppnå en større informasjonsrikdom. Man får en nærhet til respondenten og det er respondenten som i større grad styrer hvilken type informasjon som kommer frem. Dermed kan man påstå at kvalitativ tilnærming vil ha en høy relevans, altså at man får frem den «riktige» forståelsen av et fenomen. Man sier gjerne at en kvalitativ undersøkelse skal ha *intern gyldighet*. I tillegg vil man kunne fange opp det spesielle, eller nyansene, vedrørende fenomenet. Dette kan være med på å gi en dypere forståelse. Den siste fordelen er et potensiale som forskeren selv kan ta aktivt i bruk, nemlig fleksibilitet. Ettersom en kvalitativ undersøkelse skrider frem vil man kunne få en bedre forståelse av problemstillingen etter hvert som man samler inn data. Da vil man kunne tilpasse problemstillingen eller undersøkelsesopplegget til den nye informasjonen [67].

Som nevnt er det også viktig å forstå begrensningene ved metoden. Kvalitative data er ressurskrevende å behandle, derfor må man ofte undersøke få enheter. At man kun rekker over et fåtall enheter gir også utfordringer med å generalisere resultatene, det er nemlig ikke sikkert at utvalget representerer flere enn seg selv [67]. Dette gir problemer med det man kaller *ekstern gyldighet*. Altså hvor godt resultatene beskriver virkeligheten utenfor gruppen man har undersøkt. Nærheten som ble nevnt som en fordel over kan også bli for tett, noe som kan gå ut over forskerens objektivitet, men denne effekten er størst der man tilbringer mye tid sammen. I tillegg kan den nevnte nærheten føre til at den som undersøkes ikke oppfører seg naturlig eller svarer ærlig, dette kalles *undersøkelseeffekten*. Flexibiliteten kan også være en fallgrube å være obs på. Dersom man til stadighet endrer på opplegget vil man risikere å aldri bli ferdig eller å undersøke noe helt annet enn det man startet med [67].

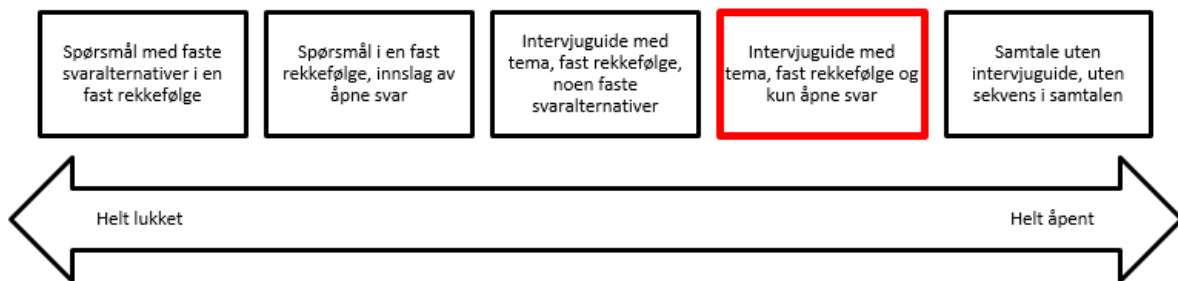
6.4.4 Innsamling av informasjon

En kvalitativ datainnsamling begynner med innsamling av primærdata, der observasjon, det åpne individuelle intervjuet og gruppeintervjuet er de viktigste typene. Deretter kan man supplere med sekundærdata, kildegransking [67]. Sekundærdata ble ikke brukt for å belyse problemstillingen nevnt i 6.4.1 *Problemstilling*, men det ble brukt data fra andre kilder for å belyse den overordnede problemstillingen i oppgaven.

I denne undersøkelsen ble det benyttet åpne intervjuer. Et intervju egnet seg best da det var få enheter som skulle undersøkes og det var interessant med individuelle synspunkter og fortolkninger av et fenomen. Det skiller mellom fire ulike former for intervju: ansikt-til-ansikt, telefon, chat og e-

post. Ved å utføre et intervju ansikt-til-ansikt vil en annen type nærhet være til stede sammenlignet med de tre andre formene, og det etableres tillit, åpenhet og god flyt i samtalen på grunn av mindre distraksjoner. Men det er også noen svake sider med denne formen for intervju. Hvis vi skulle være til stede under selve intervjuet kunne dette medføre høye kostnader. Derfor ble intervjuene utført ansikt-til-ansikt der det var mulig. På grunn av geografiske hindringer ble to av intervjuene gjort ved hjelp av videotelefoni, Skype. Denne metoden vil være svakere på å etablere tillit og åpenhet, men vil fremdeles gi god flyt i samtalen. Siden disse ble gjort over Skype ble det opprettholdt en god kontroll over intervjusituasjonen.

Som nevnt tidligere er den kvalitative tilnærmingen god på å få frem nyanser ved at den er åpen for mange forskjellige innspill. Det er likevel et poeng å ikke la intervjuet være helt åpent rundt et tema for å unngå alt for mye etterarbeid. Derfor ble det benyttet en intervjuguide som skulle sørge for at alle deltemaene ble gjennomgått, se vedlegg 12.1.3 *Intervjuguide*. Intervjuguiden bestod av forskjellige temaer og la til rette for åpne svar og på skalaen ustrukturert/strukturert ble intervjuet semi-strukturert som illustrert i Figur 6.3.



Figur 6.3: Grader av strukturering av et intervju. Undersøkelsens grad av strukturering markert med rødt. Etter [67]

I forkant av intervjuene

Intervjuene skulle foregå et sted det ville føles naturlig for respondenten. Dette ble derfor gjort på deres arbeidsplass med unntak av en som ønsket å gjennomføre intervjuet på universitetet. Omgivelsene var derfor kjent for alle respondentene nettopp for å skape en så naturlig samtale som mulig. Hensikten med intervjuet var også klargjort på forhånd og i begynnelsen av intervjuet slik at respondenten ikke skulle være skeptisk til hva resultatene skulle brukes til. Alle intervjuene ble tatt opp ved hjelp av smarttelefon slik at det ikke ble nødvendig med grundig notering. Da fikk vi med oss alt respondenten sa, helt ordrett, og dette kunne transkribes senere. Siden opptak kan reageres negativt på ble dette alltid opplyst om før intervjuet startet slik at respondenten fikk mulighet til å si fra dersom dette ikke var ønskelig. I tillegg ble det presisert at alle intervjuer ville bli anonymiserte.

Respondentene ble valgt ut fra deres jobbstilling slik at temaet i intervjuet skulle belyses fra flere synspunkter. Alle ble kontaktet over telefon hvor oppgaven ble presentert og respondenten fikk en kort introduksjon av oss. Etter at respondenten sa seg villig til å stille til intervju ble det sendt ut en mail med det avtalte tidspunktet for intervjuet, hvor intervjuet ville finne sted, varigheten på intervjuet og spørsmålene som ville bli stilt under selve intervjuet, se vedlegg 12.1.1 *Intervjuspørsmål* og 12.1.2 *Informasjonsskriv intervju*. Det ble også lagt ved litt om masteroppgaven og temaet som skulle diskuteres slik at respondenten kunne, om ønskelig, stille forberedt til intervjuene. Det ble også opplyst i mailen at dersom respondenten skulle endre mening og ikke ønske å stille til intervju hadde selvfølgelig respondenten mulighet til å avlyse.

Det ble gjort engangsintervjuer. Ut ifra omfanget og antall spørsmål som skulle stilles ble varigheten satt til en time.

Under intervjuene

Selv om det ble sendt ut et informasjonsskriv på forhånd med informasjon om intervjuets tema og spørsmål, ble dette gjennomgått i starten av intervjuet. Vi introduserte oss med relevant bakgrunn og forklarte hensikten med intervjuet og hvorfor respondenten var av interesse til intervjuet. Respondenten fikk deretter mulighet til å introdusere seg selv med relevant bakgrunn for intervjuet. Intervjuene startet derfor på en åpen og rolig måte slik at det ikke ble krevd mye av respondenten i starten [67].

Spørsmålene ble stilt åpne slik at det som respondenten mente var viktig kom frem med egne ord. Spørsmålene som ble stilt på intervjuet var:

1. Hvilke fordeler og ulemper mener du det er med prefabrikkerte broelementer?
2. Bruker dere prefabrikkerte broer i dag?
3. Hvordan gjenbraker dere løsninger fra tidligere prosjekter?
4. Har du hørt om/brukt noen form for standardiserte løsninger i deres tidligere prosjekter?
5. Hvilke fordeler og ulemper ser du med en standardisert løsning?
6. Hva skal til for at en standardisert broløsning skal bli benyttet?
7. Hvordan lærer dere fra tidligere prosjekter?

Vi lyttet og tok enkle notater. Det var viktig at respondenten fikk snakke fritt, ikke ble avbrutt eller stilt for mange spørsmål [67].

Det ble avsluttet med et generelt spørsmål hvor respondenten fikk mulighet til å legge til ytterlig informasjon dersom han eller hun mente noe viktig ikke hadde kommet med under intervjuet. På denne måten ble det rundet av på en naturlig måte og uten at respondenten satt igjen med informasjon som ikke hadde kommet frem [67]. Siden varigheten på intervjuene hadde blitt satt til en time ble det naturlig å runde av når det nærmet seg. Det var satt av mer tid, fra vår side, dersom respondenten ønsket å fullføre noe eller komme med mer informasjon.

6.4.5 Utvelgelse av enheter

Utvalgsriteriet gikk på informasjon, nettopp fordi dette passet til problemstillingen [67]. De utvalgte respondentene var ansatt i ulike bedrifter med tilknytning til veibygging både på byggherresiden, entreprenørsiden og rådgiversiden og hadde erfaring fra ett eller flere av følgende områder:

- Bygging med prefabrikkerte elementer som utførende eller byggherre (generelt, ikke nødvendigvis i tilknytning til veiprosjekter)
- Prosjektering av brokonstruksjoner
- Bygging av brokonstruksjoner
- Drift og vedlikehold av brokonstruksjoner
- Byggherrerolle i veiprosjekter

Det ble valgt ti respondenter, hvor ni sa seg villig til å stille til intervju. De fleste respondentene hadde også deltatt på workshop i regi av UiA og Nye Veier som omhandlet prefabrikasjon og industrialisering. Oversikt over respondentenes bakgrunn og nåværende funksjon er gitt i Tabell 6.1.

Tabell 6.1: Oversikt over respondentenes bakgrunn og nåværende funksjon

<i>Respondent</i>	<i>Nåværende funksjon</i>	<i>Tidligere erfaring</i>
1	Entreprenør/leverandør	Over 5 år som rådgivende ingeniør, over 10 år hos entreprenør
2	Byggherre	Kombinert erfaring: Over 25 år hos entreprenør, over 25 år med vedlikehold av bro*
3	Rådgiver	Over 30 års erfaring med broprosjektering, også erfaring med vedlikehold
4	Rådgiver	Over 30 års erfaring som rådgivende ingeniør, blant annet erfaring med broer. Mye erfaring med vedlikehold av bro
5	Entreprenør/leverandør	Rådgivende ingeniør, byggherre og over 10 år som entreprenør
6	Entreprenør/leverandør	Over 20 års erfaring fra broprosjektering- og bygging
7	Rådgiver	Over 25 års erfaring som rådgiver i samferdselsprosjekter
8	Byggherre	Variert erfaring som rådgiver, over 15 års erfaring som byggeleder
9	Entreprenør/leverandør	Tidligere rådgivende ingeniør, nesten 20 års erfaring hos entreprenør

* Under intervjuet var to respondenter til stede. Disse ble behandlet som én i analysen.

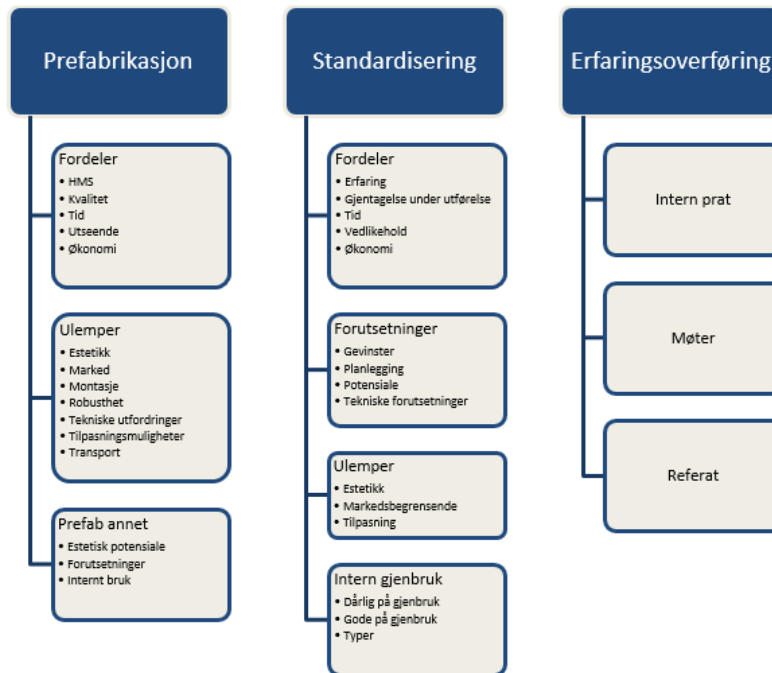
6.4.6 Analyse

Informasjonen som ble samlet inn i forbindelse med intervjuene måtte etterbehandles. Først ble alle intervjuopptakene transkribert. Dette ble gjort på bokmål for å opprettholde en skjult identitet til respondentene, men skrevet direkte av. Med transkriberte intervjuer ble det lettere å bevege seg i teksten i tillegg til at det var mulig å benytte analyseprogrammet NVivo (versjon 10.0.641.0 SP6). NVivo er en programvare for kvalitative data. Det er designet for å hjelpe med organisering, analysering og strukturering i kvalitative eller ustrukturerte data. Det inneholder også verktøy som kan være til hjelp for å effektivisere analyseringen av dataene [68].

Ettersom intervjuet ble transkribert ordrett ble det en del ufullstendige setninger hvor respondenten avbryter seg selv og noen pauser i intervjuene ble notert ned. Transkriberingen ble begynt på før alle intervjuene var fullført. Dette gjorde at det ble utviklet noe kunnskap underveis, men spørsmålene forble de samme gjennom hele løpet.

Etter at transkriberingen var gjort for alle de ni respondentene ble de gjennomgått. De ble lest og hørt samtidig og hovedpunkter ble markert. Deretter ble transkriberingen lastet inn i programmet NVivo. Det ble her gjort åpen koding, også kalt første-syklus-koding, som er en forenkling av kompliserte og detaljerte data [67]. Her ble ord, setninger og avsnitt delt inn i kategorier. Det begynte med prefabrikasjon, standardisering, erfaringsoverføring og annet som de fire første kategoriene. Svarene fra hver respondent ble gjennomgått grundig og dataene fra intervjuene ble sortert i disse fire kategoriene. De fire kategoriene ble delt inn i underkategorier for å gjøre dataene analyserbare. På denne måten ble det en oversikt over de ulike temaene og respondentenes meninger.

Siden disse intervjuene var åpne ble også mye utenfor spørsmålene sagt av respondentene. Dette ble satt i kategorier som ble kalt *annet*. Disse fikk kategorier under seg som ble dannet ut i fra hva respondentene selv tok opp og var ikke kategorier forberedt på forhånd, se 12.1.4 *Tabell med kategoriene fra NVivo*. Det ble satt et krav om at kategoriene minst skulle inneholde meninger fra to forskjellige respondenter for å kvalifisere som en kategori [67]. Kategoriene som til slutt ble stående er illustrert i Figur 6.4.



Figur 6.4: Kategorier for kvalitative intervjuer

Ved hjelp av programmet NVivo var det mulig å se hvor mange som hadde sagt noe under de ulike kategoriene. Det var også mulig å gå tilbake til konteksten hvor ord, setninger eller avsnitt var hentet fra.

Etter denne kategoriseringen og systematiseringen satt vi igjen med en rekke utsagn innenfor flere ulike kategorier. Innenfor samfunnsvitenskapen for øvrig er det på dette punktet forskeren begynner å se etter *kausale sammenhenger*, altså *hvorfor* et fenomen er som det er og gjerne også om det finnes en sammenheng med respondentenes bakgrunn og deres opplevelse av et fenomen [67]. Selv om det i denne undersøkelsen kanskje kunne vært interessant å undersøke om det finnes en forskjell mellom hvilke utfordringer og potensial respondentene trekker og deres posisjon i bransjen har vi valgt å ikke gå videre inn på dette. I stedet har fokuset vært på å samle informasjon fra flere kilder som gjerne kan utfylle hverandre og analysen av informasjonen ble dermed avsluttet etter at alle relevante og interessante utsagn hadde blitt kategorisert. Informasjonen presenteres samlet i 7.2 *Hovedfunn fra intervjuer*.

6.5 Datainnsamling – studietur

Vi innhentet også data gjennom en studietur i regi av Betongelementforeningen. Studieturens hensikt var å se på planlegging, produksjon, bygging og bruk av prefabrikkerte broer i Nederland og Danmark. De norske deltakerne var personer i bygg- og anleggsbransjen, herunder entreprenører, byggherrer og betongelementleverandører. Programmet for turen er gitt i vedlegg i 12.1.5 *Program*

fra studietur til Nederland og Danmark. I Nederland ble betongelementprodusenten Spanbeton besøkt, for å lære om deres brokonsepter og se på deres prosjekter. I tillegg var det en omvisning på fabrikken der de prefabrikkerte betongelementene ble produsert. Selv om broelementene er vesentlig større i Nederland, var formålet å se på de konseptuelle tekniske løsningene, logistikk og montering. Dansk brobygging er på liknende nivå som i Norge, men Norge ligger fremdeles lenger bak. I Danmark besøkte gruppen flere prosjekter hos betongelementprodusenten Spæncom og brokonseptene deres ble presentert.

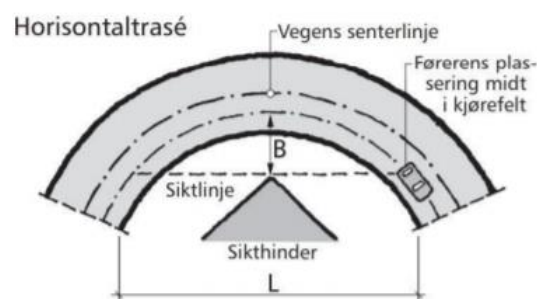
En annen metode for å få kunnskap på turen utenom presentasjoner og omvisninger, var å stille spørsmål til de norske deltakerne og de ansvarlige for omvisningene fra Spanbeton og Spæncom. Vi førte deretter referat for å samle funnene.

6.6 Fastsettelse av overordnede dimensjoner på standardiserte broer

Broforming fastsettes utfra krav til veiutforming og stoppsikt i håndbøkene til Statens vegvesen [50], [51], [69].

Normalprofilet bestemmes i henhold til NA-rundskriv for 110 km/t [51]. Kravet til minste horisontalradius på broer må tilfredsstilles etter samme rundskriv [51]. Det må også gjøres valg om broen skal være robust nok til å takle variasjoner i tverrfall eller ikke. Variasjoner i tverrfall er avhengig av horisontalradius.

Nødvendig stoppsikt over broen må tilfredsstilles. Dette ble gjort i henhold til håndbok V120 *Premisser for geometrisk utforming av veg* [69]. Figur 6.5 viser prinsippskisse for siktkontroll, der L er stoppsikt, R er horisontalradius og B er avstanden fra siktlinje til midten av kjørefelt.



Figur 6.5 Prinsippskisse for siktkontroll (Figur 5.3) i V120 *Premisser for geometrisk utforming av veg* [69]

Ligning (6.1) ble benyttet for å finne verdien for B [53]. Denne er gjeldende for store radier.

$$B = \frac{L^2}{8R}, \quad (6.1)$$

der faktorene B, L og R er avstandene gitt i prinsippskissen i Figur 6.5. Basert på veigeometriske krav og funn fra kartleggingen og datainnsamlingen fra bransjen, ble det valgt en representativ bro for lastanalyse.

6.7 Fastsettelse av ytre påkjenninger på en standardisert bro

I kapittelet presenteres metodene for å finne representative laster for standardiserte broer, med hovedvekt på de stedsavhengige lastene. For å finne i hvilken grad de stedsavhengige lastene

påvirker et standardisert brosystem er en representativ prefabrikkert bro analysert med laster i bruddgrensetilstand og ulykkestilstand.

6.7.1 Lastkombinasjoner

Lastene ble kombinert i de ulike grensetilstandene for å finne mest ugunstige lastkombinasjon i de ulike grensetilstandene. Dette ble gjort i henhold til *NS-EN 1990* [56]. I denne oppgaven var bruddgrensetilstand og ulykkestilstand aktuelle. Tabell NA.A2.5 i *NS-EN 1990* ble brukt for å finne dimensjonerende verdier for laster i kombinasjoner med ulykkeslaster. Tabellen er gjengitt i Tabell 6.3. I bruddgrensetilstand ble Tabell NA.A2.4(B) med ligning 6.10 a og 6.10 b brukt, som vist i Tabell 6.2. Bruddgrensetilstanden STR, som er brudd eller deformasjon i konstruksjonen, ble brukt for å bestemme belastningen. I de forskjellige kombinasjonene ble det brukt lastfaktorer γ for de ulike lastene og kombinasjonsverdier for variable påvirkninger, ψ -faktorer. $G_{k,j,sup}$ er øvre karakteristiske verdier for permanente laster og $G_{k,j,inf}$ er nedre karakteristiske verdier. $Q_{k,1}$ er karakteristiske verdi for dominerende variable påvirkninger og $Q_{k,i}$ er ikke-dominerende variable laster [56].

Tabell 6.2: Dimensjonerende verdier for laster i bruddgrensetilstand (STR/GEO) (Sett B). Hentet fra *NS-EN 1990*, Tabell NA.A2.4(B) [56]

Vedvarende og forbigående dimensjonerende situasjoner	Permanente laster		Forspenning	Dominerende variabel last	Øvrige variable laster
	Ugunstig	Gunstig			
Ligning 6.10 a	$\gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_P P$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
Ligning 6.10 b	$\xi \gamma_{G,j,sup} G_{k,j,sup}$	$\gamma_{G,j,inf} G_{k,j,inf}$	$\gamma_P P$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

$\gamma_{G,j,sup} = 1,35$ for permanente laster
 $\gamma_{G,j,inf} = 1,0$ for permanente laster
 $\xi = 0,89$ for egenvekt
 $\gamma_Q = 1,35$ for veitrafikk
 $\gamma_Q = 1,35$ for vind
 $\gamma_Q = 1,2$ for temperaturlast
 $\gamma_Q = 1,5$ for øvrige variable laster

Tabell 6.3: Dimensjonerende verdier for laster i kombinasjon med seismiske laster. Hentet fra *NS-EN 1990*, Tabell NA.A2.5 [56]

Dominerende situasjon (ligning 6.11a/b)	Permanente laster		Forspenning	Ulykkeslast eller seismisk last	Øvrige variable laster
Ulykkestilstand	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	P	A_d	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
Seismisk situasjon (ligning 6.12a/b)	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	P	$A_{Ed} = \gamma_1 A_{Ek}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

Tabell 6.4 viser de aktuelle ψ -faktorer for en standardisert broløsning i denne oppgaven.

Tabell 6.4: ψ -faktorer for aktuelle laster. Hentet fra NS-EN 1990. Tabell NA.A2.1 [56]

Påvirkning	Symbol		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Trafikklaster	gr1a	Boggilast	0,7	0,7	0,2/0,5
		Jevnt fordelt last	0,7	0,7	0,2/0,5
		Horisontal last	0,7	0,7	0,2/0,5
	gr1b (enkel aksling)	0,7	0,7	0,2/0,5	
	gr2 (horisontale krefter)	0,7	0,7	0,2/0,5	
	gr4 (laster fra folkemengder)	0,7	0,7	0,2/0,5	
	gr5 (spesial kjøretøy)		-	-	-
Vindkrefter	F_{wk} (vedvarende dimensjonerende situasjoner)		0,7	0,6	0/0,5
Temperatur	T_k		0,7	0,6	0/0,5
Snølast	$Q_{sn,k}$ (under utførelse)		0,8	-	-

Der vindlaster er den dominerende lasten, bør ψ_0 settes til 0.

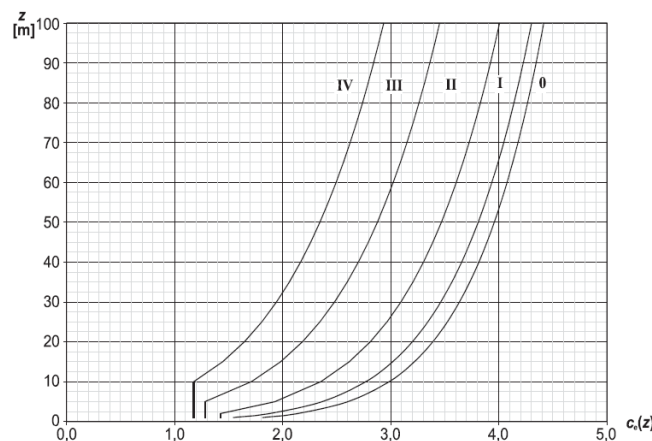
6.7.2 Vindlaster

NS-EN 1991-1-4 ble brukt for å finne karakteristiske vindlaster for standardiserte broer [49], [58]. De karakteristiske vindlastene varierer mye fra region til region (3.3.3 *Vindlaster*).

I henhold til NS-EN 1991-1-4 kan forenklet beregningsmetode for vindkraft benyttes der dynamisk responsberegning ikke er nødvendig [58]. Denne forenklet metoden ble brukt etter ligning (6.2),

$$F_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x}, \quad (6.2)$$

der ρ er lufttettheten, $A_{ref,x}$ er referansearealet som bestemmes utfra brotype og konstruksjonens dimensjoner, V_b er basisvindhastigheten og C er vindlastfaktoren. Vindlastfaktoren er en funksjon av eksponeringsfaktoren C_e og C_f . $C_{f,z}$ er en kraftfaktor som i z-retning tar hensyn til påvirkning av potensiell helning av brodekket i tverretning, terrengets helning og fluktuasjoner i vindretningen i forhold til brodekkets turbulens. For flatt terreng kan eksponeringsfaktoren, C_e , angis som en funksjon av konstruksjonens høyde over terrenget og terrengkategori, se Figur 6.6. Terrenget er delt inn i fem kategorier fra åpent hav (terrengkategori 0) til storby (terrengkategori IV). Konstruksjoner i kategori 0 vil få de største påvirkningene fra vind [58].



Figur 6.6: Eksponeringsfaktor C_e som funksjon av høyde over havet og terrengkategori. Fra NS-EN 1991-1-4, Figur 4.2 [58]

Både basisvindhastighet og vindlastfaktoren er avhengig av stedlige parametere. For å kunne si noe om de lokale forskjellene ble stedlige påvirkninger registrert. Referansevindhastighet varierer fra

kommune til kommune og er angitt i *NS-EN 1991-1-4*. I henhold til *Riksvegsutredningen (2015)* vil den fremtidige firefeltsveien gå gjennom Østfold, Akershus, Oslo, Hedmark, Oppland, Buskerud, Telemark, Aust-Agder, Vest-Agder, Rogaland, Hordaland, Møre- og Romsdal og Sør-Trøndelag [3]. Derfor ble de referansevindhastighetene for kommunene i disse fylkene registrert. I denne oppgaven ble stedlige forhold vurdert ved å lage tre ulike vindlaster; maksimum-, minimum- og sannsynlig påvirkning. Minimum vindlast ble bestemt ved å velge terrengpåvirkning som gir lavest vindlast og referansevindhastighet som tilsvarte den laveste av de registrerte lastene. I motsatt ende av skalaen ble det valgt referansevindhastighet, terrengkategori og broens høyde over terreng som ga størst vindpåvirkning. 30 meter ble valgt som maksimal høyde over terreng, selv om det er mulig å velge større høyder etter Figur 4.2 i *NS-EN 1991-1-4* [58]. For sannsynlig påvirkning ble 98. prosentil av de aktuelle referansevindhastighetene valgt, og en terrengkategori tilsvarende terreng med lav vegetasjon og spredte hindringer ansett som mest aktuell for broer på firefeltsmotor vei.

Vindhastigheten er ikke modifisert etter årstid, høyde over havet, vindretning og eventuelt om returperioden er forskjellig fra normalen på 50 år. I henhold til håndbok *N400 Bruprosjektering* skal ikke returperioden forandres, selv om broens levetid er 100 år [49].

I henhold til *N400 Bruprosjektering* skal punkt 4.3 i *NS-EN 1991-1-4* benyttes ved beregning av vindlast for borer i vindklasse I, men i oppgaven er likevel forenklet metode brukt [49].

6.7.3 Snølast

NS-EN 1991-1-3 gir ingen spesielle retningslinjer for beregning av snølast på broer. Karakteristiske snølast er finnes etter *NS-EN 1991-1-3*, Tabell NA.4.1(901) for de forskjellige kommunene, og om nødvendig justeres den karakteristiske verdien dersom høyden over havet, H , er større enn en definert høydegrense H_g [59]. Snølast skal ikke kombineres med øvrige laster og vi går derfor ikke videre inn på metode for å bestemme snølast [49].

6.7.4 Termiske påvirkninger

De stedsavhengige termiske påvirkningene stammer fra en uniform utvidelse eller sammentrekning av brotverrsnittet [60]. For fastholdte konstruksjoner vil dette kunne føre til tvangskrefter. Som det fremgår av 7.6.2 *Snølast og termisk påvirkning* vil ikke det undersøkte brokonseptet være utsatt for disse tvangskreftene.

Den vertikale temperaturdifferansen over brotverrsnittet vil føre til krumning og eventuelt tvangsmomenter i statisk ubestemte systemer, men ettersom denne påvirkningen ikke er stedsavhengig og heller ikke forårsaker tvangsmomenter i statisk bestemte konstruksjoner vil vi ikke gå videre inn på metode for å bestemme temperaturlaster.

6.7.5 Seismiske laster

I arbeidet med å utforske stedsavhengige lasters effekt på standardiserte broer mente vi det var svært relevant å undersøke seismiske påvirkninger nærmere. Derfor ble det gjort en modalanalyse av en bro i FEM-Design 3D. Dette programmet er et finite-element-program som blant annet kan regne ut konstruksjoners egenfrekvenser og seismiske påvirkninger ved hjelp av modalanalyse. Under følger en gjennomgang av metoden for seismisk dimensjonering i henhold til *NS-EN 1998-1* og 2 [61], [62].

Statens vegvesens håndbok *N400 Bruprosjektering* angir at broer skal prosjekteres i henhold til *NS-EN 1998-2* såfremt de ikke faller inn under bestemmelsen i standardens punkt 1.1.1(4). I dette punktet oppgir standarden at hengebroer, broer av tre, broer av murstein og mobile broer skal prosjekteres etter *NS-EN 1998-1* [49].

Tabell NA.2(904) angir krav til analysemetode basert på broens seismiske klasse og $a_g S$. Broens seismiske klasse skal bestemmes i samsvar med Tabell NA.2(901) som deler broer i forskjellige seismiske klasser basert på samfunnsmessig viktighet og total lengde [62].

Denne klassifiseringen bestemmer videre seismisk sikkerhetsfaktor, γ_l , ved hjelp av tabell NA.2(903). Denne faktoren brukes for å bestemme grunnens dimensjonerende akselerasjon [62],

$$a_g = \gamma_l \cdot a_{gR}, \quad (6.3)$$

der a_{gR} er referansespissverdien av berggrunnens akselerasjon [61],

$$a_{gR} = 0.8 \cdot a_{g40Hz}. \quad (6.4)$$

Spissverdien for berggrunnens akselerasjon, a_{g40Hz} , finnes fra Figur NA.3(901) og (902). Disse figurene angir isotermer som viser variasjonen av berggrunnens akselerasjon ved en jordskjelvhendelse med 475 års returperiode [61].

Etter at grunnens dimensjonerende akselerasjon er bestemt må grunnforholdene på stedet tas i betraktning. Grunntypen på stedet har også stor betydning for størrelsen av den seismiske påkjenningen. Generelt øker påkjenningen med synkende stivhet i grunnen. *NS-EN 1998-1* skiller mellom flere grunntyper og definisjonen av de forskjellige er gitt i Tabell NA.3.1. Valget av grunntype bestemmer igjen formen på det elastiske responspekteret. I Tabell NA.3.3 er skaleringsparameterne S , T_B , T_C og T_D for de respektive responspektrene gitt. På dette tidspunktet i seismisk dimensjonering er det vanlig å sjekke om konstruksjonen tilfredsstillende krav til svært lav seismisitet som angitt i NA.3.2.1(5). Dette punktet åpner for å sløyfe videre analyse dersom ett eller flere av følgende krav er oppfylt [61]:

- Konstruksjonen er i seismisk klasse I
- Produktet $a_g \cdot S < 0.49 \text{ m/s}^2$
- $S_D < 0.49 \text{ m/s}^2$

I samme punkt heter det at for broer i seismisk klasse IV skal det gjøres en analyse av krefter og motstand i en seismisk situasjon [61].

Videre kan det gjøres en vurdering om broen kan dimensjoneres etter bestemmelser for lav seismisitet. For betongkonstruksjoner innebærer dette å bruke bestemmelsene i *NS-EN 1992* og ikke bruke detaljeringsreglene som er angitt i *NS-EN 1998-1* og 2 som innebærer å dimensjonere konstruksjonen for duktil oppførsel. Å ikke dimensjonere for duktil oppførsel betyr at konstruksjonen må antas å ha lav duktilitet og den plasseres da i *Ductility Class Low* (DCL). Dette vil si at konstruksjonen oppfører seg tilnærmet elastisk og at det ikke dannes plastiske ledd som kan absorbere energien fra et jordskjelv. Konstruksjonsfaktoren, q , velges på bakgrunn av duktilitetsklasse og reduserer de opptredende kreftene i konstruksjonen ved å skalere det elastiske responspekteret, se ligning (3.13) – (3.16) i *NS-EN 1998-1*. For konstruksjoner som kun skal

detaljerer etter *NS-EN 1992* må q være mindre enn 1,5 (DCL). Konstruksjonsfaktoren kan økes dersom detaljeringsprinsippene i *NS-EN 1998* følges [61]. Effekten av dette ble ikke undersøkt i denne oppgaven. For å fastslå om konstruksjonen kan dimensjoneres etter prinsippet om lav seismisitet må kravet angitt i *NS-EN 1998-1* NA.3.2.1(4) oppfylles [61]. Dette kravet angir at lav seismisitet kan antas når

$$a_g S = \gamma_l (0,8 \cdot a_{g40Hz}) S < 0,98 \text{ m/s}^2, \quad (6.5)$$

og konstruksjonsfaktoren er mindre enn 1,5.

Det stilles også krav til analysemetode for broer på bakgrunn av seismisk klasse og seismisitet. *NS-EN 1998-2* Tabell NA.2(904) er førende her og bestemmer om det kan gjøres en forenklet eller utvidet analyse av broen, metodene som beskrives er [62]:

- 0 – Ingen spesielle krav
- 1 – Analyse med én frihetsgrad
- 2 – Flerfrihetsgradsanalyse, i denne oppgaven gjort ved hjelp av en modalanalyse

Flerfrihetsgradsanalyse gjøres ofte i elementprogrammer. I denne oppgaven ble FEM-Design 3D, v16.00.003 benyttet. Programmet er et *finite element*-program som kan beregne krefter og forskyvninger i tre dimensjoner basert på skall og bjelkeelementer. Det er ikke mulig å definere romlige elementer i programmet. Programmet har også en modul for beregning av jordskjelvkrefter. Denne modulen ble benyttet i denne oppgaven.

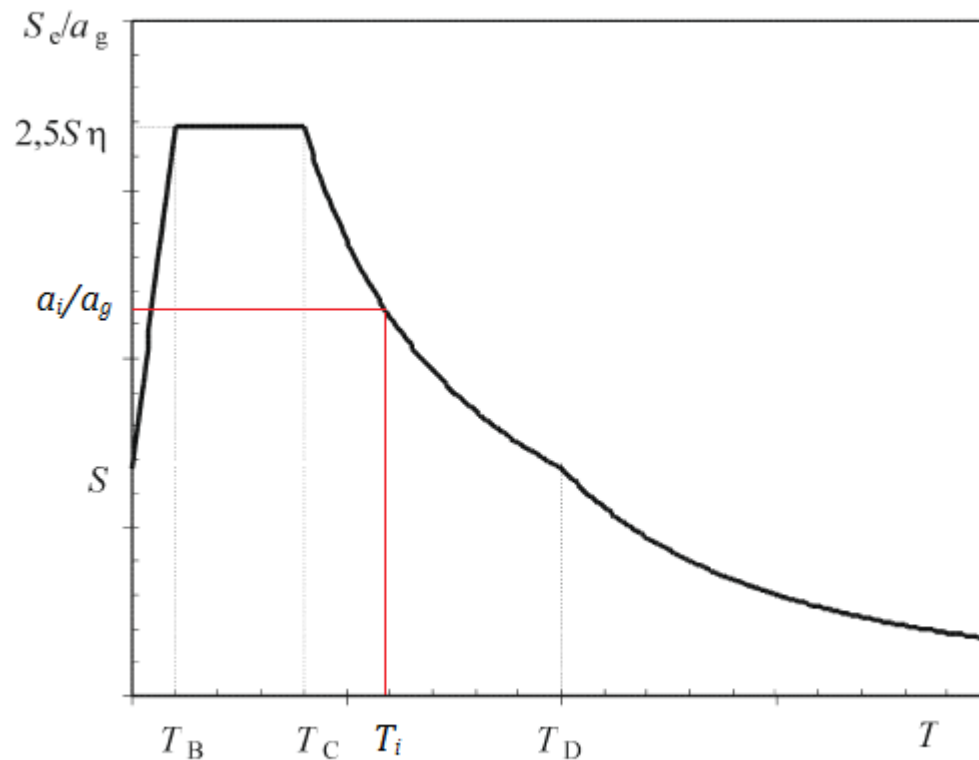
For å beregne virkninger av et jordskjelv på en konstruksjon i programmet må først konstruksjonen modelleres med representative plate- og bjelkeelementer. Disse elementene får tilskrevet et tverrsnitt som angir romlig utbredelse og som igjen danner grunnlag for egenlaster, arealer og treghetsmomenter. Sammenkoblingene mellom elementene må gjenspeile kapasiteten i overgangene. Materialeegenskapene for de forskjellige elementene er predefinert med et bibliotek i programmet, men kan overstyres av brukeren. For å få realistiske resultater er det viktig med realistiske opplagerbetingelser. Opplagere kan modelleres som punktopplegg, linjeopplegg eller flateopplegg med valgfri grad av fastholding mot rotasjon og translasjon. For å bestemme lastpåkjenninger på konstruksjonen må også permanente og variable laster modelleres. Disse kan i likhet med opplegg defineres i punkter, langs linjer eller over flater.

Programmet regner så ut egensvingefrekvensene til den sammensatte konstruksjonen og hvor stor del av konstruksjonens masse som følger denne svingeformen. For en bro er disse svingeformene hovedsakelig vertikale.

Jordskjelvparametere som grunntype, dimensjonerende akselerasjon og konstruksjonsfaktor mates inn i programmet for å definere det dimensjonerende elastiske responspekteret. Ved å se hvor mye av konstruksjonens masse som svinger med hver svingeform og svingeformens frekvens regner programmet ut kreftene som virker på konstruksjonen etter følgende konsept:

1. Konstruksjonens svingeformer og egenfrekvenser bestemmes.
2. Andelen av konstruksjonens totale masse som settes i svingning for hver svingeform regnes ut.

3. Det elastiske responsspekteret viser den tilhørende akselerasjonen til hver egenfrekvens, se Figur 6.7.
4. Andelen av konstruksjonens masse for hver svingeform multipliseres med akselerasjonens andel av tyngdens akselerasjon, g ($9,81 \text{ m/s}^2$), for å gi horisontale krefter.
5. Kraftene i hver retning summeres hver for seg for å gi seismisk påkjenning i to ortogonale retninger.



Figur 6.7: Prinsipiell representasjon av trinn 3 i beregning av jordskjelvkrefter iht responsspektrummetoden. Bakgrunn hentet fra NS-EN 1998-1, Figur 3.1

De karakteristiske seismiske kreftene i to retninger må så kombineres med øvrige laster iht seismisk lastkombinasjonen for å gi dimensjonerende påkjenning på konstruksjonen. I denne oppgaven har vi valgt å se på broens tværr- og lengderetning hver for seg for oversiktens skyld.

6.7.6 Egenlaster

Egenlastene avhenger av hvilket bæresystem som er valgt og hvilke permanente installasjoner som er plassert på broen [49]. Egenvekten til betongen ble bestemt til 25 kN/m^3 [49]. Rekkverket som ble benyttet var av typen H2 etter Håndbok N101 Rekkverk- og vegens sideområde [70]. I tillegg ble vekten av belegning fastsatt i henhold til N400 Bruprosjektering, Tabell 5.1 [49].

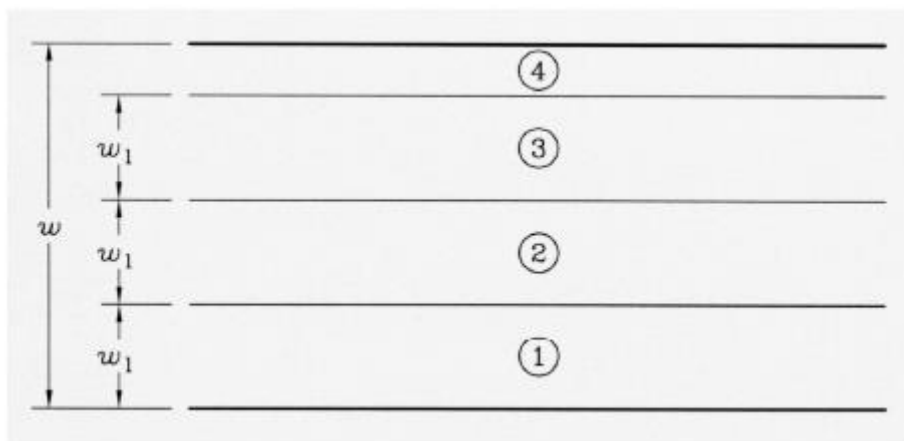
6.7.7 Trafikklaster

For å beregne trafikklasten ble NS-EN 1991-2 lagt til grunn [64]. Lastmodell 1 ble fordelt over et gitt antall teoretiske kjørebaneler, der antallet kjørebaneler og respektive bredder regnes ut som vist i Tabell 6.5.

Tabell 6.5: Inndeling av brooverbygning i teoretiske kjørebener. Etter NS-EN 1991-2, Tabell 4.1 [64]

Veibanens bredde w	Antall kjørebener	Bredde av kjørebener w_1	Bredde av resterende areal
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_1=1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_1=2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1=\text{Int}(\frac{w}{3})$	3 m	$w - 3 \times n_1$

Veibanens bredde, w , er den bredden av broen som er tilgjengelig for kjøretøy innenfor fysiske begrensninger som rekkverk eller fortauskanter. Broens bredde ble delt inn i ett eller flere lastfelt som prinsipielt ser ut som vist i Figur 6.8 [64].



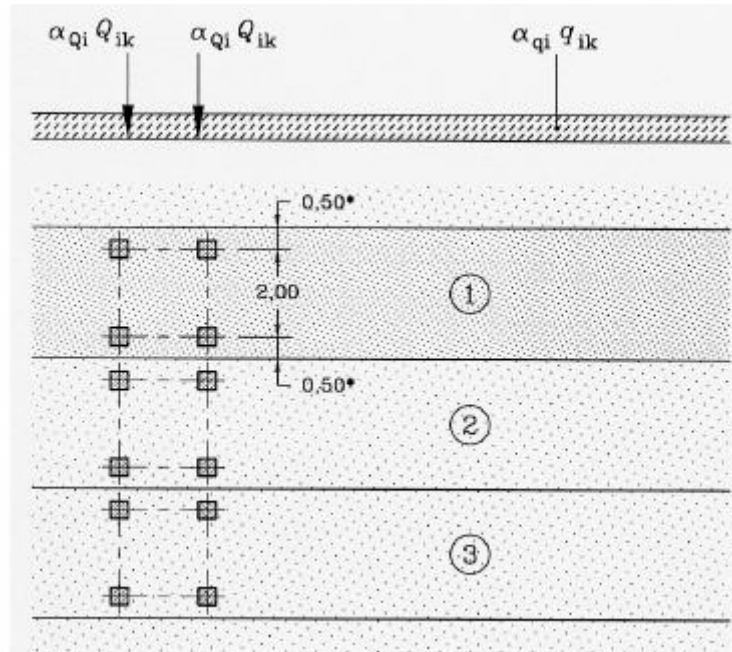
Figur 6.8: Inndeling av bro i teoretiske kjørebener. Fra NS-EN 1991-2, Figur 4.1 [64]

Lastmodell 1 består av to aksellaster og en jevnt fordelt last. De karakteristiske verdiene for aksellastene og den jevnt fordelt lasten er vist i Tabell 6.6. Disse verdiene ble multiplisert med korreksjonsfaktor α_{Qi} og α_{Qj} , etter det nasjonale tillegget, punkt NA.4.3.2(3) [64].

Tabell 6.6: Karakteristiske verdier for Lastmodell 1. Etter NS-EN 1991-2, Tabell 4.2 [64]

Område	Aksellast Q_{ik} [kN]	Jevnt fordelt last, q_{ik} [kN/m ²]
Kjørebane 1	300	9
Kjørebane 2	200	2,5
Kjørebane 3	100	2,5
Øvrige kjørebener	0	2,5
Resterende område	0	2,5

Det er verdt å merke seg at lastene tilhørende kjørebane 1, 2, 3 i Tabell 6.6 ikke nødvendigvis hører sammen med nummereringen i Figur 6.8, men lastene skal plasseres der de har den mest ugunstige effekt i lengde- og tverretning. Avstander og prinsipiell skisse av aksellast og jevnt fordelt last kan ses i Figur 6.9 [64].



Figur 6.9: Prinsipiell plassering av laster for LM1. Hentet fra NS-EN 1991-2, Figur 4.2A [64]

Lastmodell 2 består av en enkelt aksellast. Denne lastmodellen er gjerne dimensjonerende for konstruksjonsdeler med kort utstrekning [64].

Lastmodell 3 representerer spesialkjøretøy og verdien for denne lasten fastsettes i hvert enkelt prosjekt. Lastmodell 4 tar hensyn til belastning i form av menneskemengder på broen og angis i NS-EN 1991-2 til å være 5 kN/m^2 . Lastmodell 3 og 4 beregnes i de tilfeller der det er relevant, og ble ikke tatt med i denne oppgaven [64].

De horisontale trafikklastene består av bremse- og akselerasjonskrefter og kan settes som:

$$Q_{lk} = 0,6 \cdot \alpha_{Q1} (2 \cdot Q_{1k}) + 0,1 \cdot \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot w_1 \cdot L, \quad (6.6)$$

der Q_{1k} er aksellasten og q_{1k} er den jevnt fordelte lasten i lastmodell 1. α_{Q1} og α_{q1} er korreksjonsfaktorer.

Sentrifugalkrefter kan oppstå for horisontalradier mindre enn 1500 meter [64].

Samtidigheten av trafikklastene ble bestemt etter Tabell NA.4.4a, som er gjengitt i Tabell 6.7 [64].

Tabell 6.7: Samtidige grupper av trafikklast. Hentet fra NS-EN 1991-2, Tabell NA.4.4a [64]

Lastmodell		KJØREBANE					GANGBANE OG FORTAU	
		Vertikale krefter			Horisontale krefter		Bare vertikale krefter	
Referanse		4.3.2	4.3.3	4.3.4	4.3.5	4.4.1	4.4.2	5.3.2-(1)
Lastsystem		LM1 (Boggilast og jevnt fordelt last)	LM2 (Enkel aksling)	LM3 (Spesialkjøretøyer)	LM4 (Belastning i form av menneskemengde)	Bremsekrefter og akselerasjonskrefter ^a	Sentrifugalkrefter og tverkkrefter ^a	Jevnt fordelt last
Lastgrupper	gr1a	Karakteristisk verdi						Kombinasjons-verdi ^b
	gr1b		Karakteristisk verdi					
	gr2	Ofte forekommende verdi				Karakteristisk verdi	Karakteristisk verdi	
	gr3 ^d							Karakteristisk verdi ^c
	gr4				Karakteristisk verdi			Karakteristisk verdi
	gr5	Se tillegg A		Karakteristisk verdi				
Påvirkning fra dominerende komponent (betegnet som komponent som tilhører gruppen)								
^a For gr1a brukes karakteristiske verdier for lastreferanse 4.4.1 (bremsekrefter og akselerasjonskrefter) og lastreferanse 4.4.2 (sentrifugalkrefter og tverkkrefter). Sentrifugalkrefter og bremsekrefter eller akselerasjonskrefter opptrer ikke samtidig i gr1a. ^b For gr1a brukes kombinasjonsverdi for lastreferanse 5.3.2(1) (jevnt fordelt last på gangbane/fortau), dvs. 2,5 kN/m ² . ^c Se 5.3.2.1(2) Ved tosidig gangbane/fortau regnes det ene belastet der det er ugunstigere enn at begge er belastet samtidig. ^d Denne lastgruppen er ikke aktuell der gr4 benyttes.								

På bakgrunn av formålet med lastberegningen, ble kun gr1a og gr1b vurdert.

6.7.8 Påkjørselslaster

Ulykkeslaster ble bestemt i henhold til *N400 Bruprosjektering*. Påkjørsel fra kjøretøy på brooverbygning eller bærende underbygning ble fastsatt etter *NS-EN 1991-1-7* [65]. Verdier for dimensjonerende støtkrefter fra kjøretøy ble angitt som ekvivalente statiske krefter etter Tabell NA.4.2 i *NS-EN 1991-1-7* for brooverbygning og Tabell 4.1 for understøttende konstruksjonsdeler [65].

6.7.9 Modellering av lastsituasjon

En modellering av lastsituasjonen ble gjort for å finne i hvilken grad de stedsavhengige lastene påvirker et standardisert brosystem. Som utgangspunkt for dette ble en representativ prefabrikkert bro brukt som case og lastene ble analysert i bruddgrensetilstand for bøyemoment. Den representative broen ble modellert i programmet Focus Konstruksjon 2017 v17.1.0.0. I programmet kan konstruksjonen bestå av rette bjelke- eller stavsegmenter og man analyserer i 2D og 3D. Vi har fulgt deler av fremgangsmåten i en masteroppgave fra NTNU der de dimensjonerte en prefabrikkert MOT-bro [71]. Modelleringen ble delt opp i lengderetning og tverretning. For å finne lastene som påvirket bjelkene i lengderetning, ble en dekkestripe med bredde på én meter fritt opplagt på ni opplegg som representerte bjelkene. Denne forenklingen anses å være representativ for lastsituasjonen, til tross for at samvirket mellom brodekket og bjelkene vil gi en toveisvirkning. Brodekket ble modellert med høyde tilsvarende dekketykkelsen (300 mm). Egenlaster (slitelag, rekkverk og kantdragere) og jevnt fordelt trafikklast (LM1) ble påført dekkestripes. Den jevnt fordelte trafikklasten ble plassert i tre posisjoner for å undersøke i hvilken bjelke de største kreftene oppstod. Opplagerkreftene ble deretter plassert som linjelaster i lengderetning for den mest belastede bjelken. Bjelken ble modellert som en ideell fritt opplagt bjelke med spennvidde lik 18 meter.

Boggilasten i lastmodell 1 og aksellasten i lastmodell 2 ble påført i lengderetning i mest ugunstige posisjon. Deretter ble lastanalysen gjennomført med karakteristiske laster og bøyemomenter ble registrert for hvert enkelt lasttilfelle. I Excel ble bøyemomentene kombinert i bruddgrensetilstand i henhold til 6.7.1 *Lastkombinasjoner*.

6.7.10 Sammenligning av horisontale krefter

Den seismiske belastningen ble sammenlignet med de dominerende variable lastene i broens lengde- og tverretning. I lengderetning er last fra bremsing og akselerasjon dominerende, mens i tverretning er påkjørselslast dominerende. For å sammenligne disse lastene må man ta hensyn til lastfaktorene og materialfaktorene i de ulike grensetilstandene. Lastfaktorene som skal benyttes med de karakteristiske lastene kan finnes i *NS-EN 1990* Tabell NA.A2.4(B) og Tabell NA.A2.5 og er vist i Tabell 6.8 [56].

Tabell 6.8: Lastfaktorer benyttet ved sammenligning av horisontale laster [56]

<i>Last</i>	<i>Grensetilstand</i>	<i>Lastfaktor for sammenligning</i>
Seismisk	Ulykke	1,0
Påkjørsel	Ulykke	1,0
Bremse/akselerasjon	Brudd	1,5

I tillegg til lastfaktorene varierer materialfaktoren for betong og armering etter hvilken grensetilstand som vurderes etter *NS-EN 1992-1* [57]. De aktuelle faktorene er vist i Tabell 6.9.

Tabell 6.9: Materialfaktorer brukt for sammenligning av horisontale laster [57]

<i>Material</i>	<i>Bruddgrense</i>	<i>Ulykke</i>
Betong	1,5	1,2
Armerings- og spennstål	1,15	1,0

Seismiske laster og påkjørselslast skal begge vurderes i en ulykkestilstand og de karakteristiske lastene er dermed direkte sammenlignbare. For å sammenligne lastvirkningene fra seismisk situasjon og bremse/akselerasjon kan sammenhengen vist under benyttes. Materialfaktoren for armerings- og spennstål benyttes i sammenligningen, ettersom denne har lavest variasjon mellom brudd- og ulykkestilstand.

$$F_{seismisk,x} \cdot 1,0 \leq \frac{R}{1,0}$$

$$F_{brems} \cdot 1,5 \leq \frac{R}{1,15}$$

$$R \geq F_{seismisk,x}$$

$$R \geq F_{brems} \cdot 1,725$$

$$F_{seismisk,x} = F_{brems} \cdot 1,725, \quad (6.7)$$

De seismiske kreftene er altså dimensjonerende dersom den karakteristiske seismiske lasten er mer enn 1,725 ganger større enn den karakteristiske bremse- og akselerasjonskraften. For å illustrere i

hvilke tilfeller seismisk påkjenning er dimensjonerende plottes de karakteristiske seismiske lastene i x- og y-retning mot henholdsvis dimensjonerende bremse- og akselerasjonslast og karakteristisk påkjørselslast.

7 Resultat

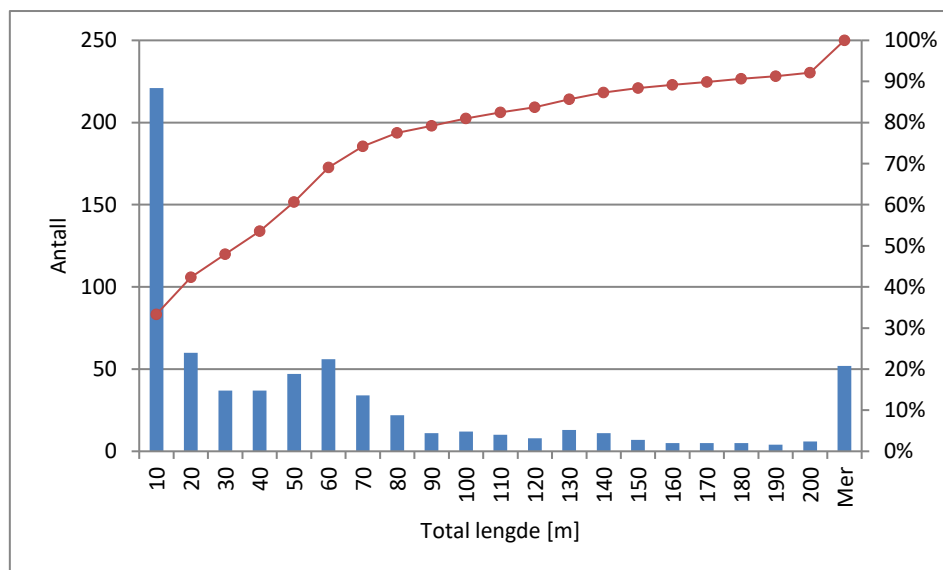
I dette kapitlet presenteres først resultatene fra kartleggingen av broer på eksisterende hovedveier i 7.1 *Kartlegging av eksisterende broer*. Deretter følger en presentasjon av hovedfunn fra intervjuene i 7.2 *Hovedfunn fra intervjuer*. I 7.3 *Studietur* presenteres observasjoner og informasjon som kom frem under studieturen til Nederland og Danmark. Det redegjøres videre i 7.4, *Veigeometriens påvirkning på broers overordnede dimensjoner*, for hvordan normalprofilens oppbygning og tilhørende veitekniske krav definerer broens overordnede dimensjoner. Det neste underkapitlet, 7.4 *Potensielle prefabrikkerte og standardiserte løsninger*, er basert på funn fra de tre foregående og presenterer forslag til standardiserte brooverbygninger. Til slutt velges det et brokonsept for en studie av stedlige lasters påvirkning på en mulig standardisert bro og lastpåvirkningene på denne broen presenteres i 7.6 *Effekt av stedsavhengige laster på lastsituasjonen*.

7.1 Kartlegging av eksisterende broer

For å danne et bilde av hvor det kan være hensiktsmessig å benytte standardiserte broer har det blitt foretatt en registrering av eksisterende veistrekninger. Hensikten med denne registreringen er å identifisere bro lengder og -typer som opptrer ofte. I denne sammenheng ble Statens vegvesens register over norske broer, BRUTUS, benyttet.

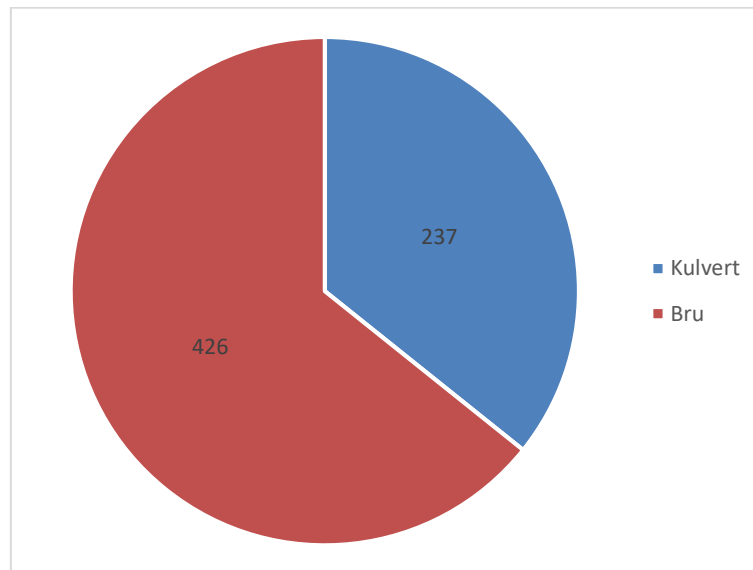
7.1.1 Samlet registrering

Som vist i Figur 7.1 er de aller fleste kryssningene kortere enn ti meter. Utover dette ser man at antallet kryssninger med total lengde mellom 10 og 80 meter fordeler seg jevnt i lengdeintervallene. Fra 80 meter og lenger kan man se at antallet per lengdeintervall er ganske likt og relativt lavt.



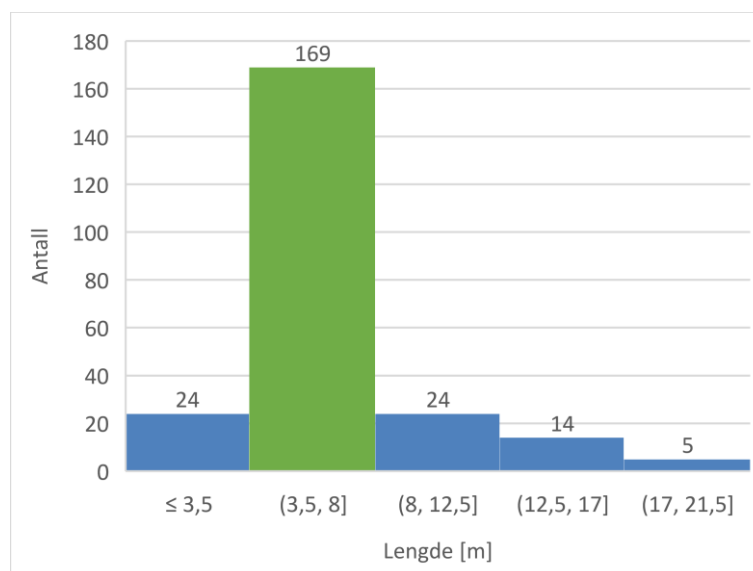
Figur 7.1: Variasjon i total lengde for alle registrerte broer og kulverter

I broregisteret er det oppgitt om kryssingen er gjort med kulvert eller bro. Som vist i Figur 7.2 er 237 av de 663 registrerte kryssningene definert som kulverter i Statens vegvesens register.



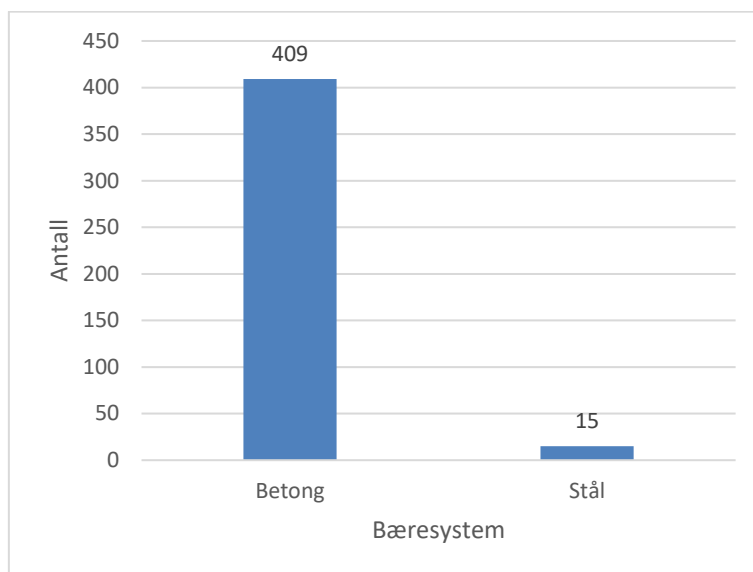
Figur 7.2: Fordeling av kryssningstyper på de registrerte strekningene

I Figur 7.3 er det også verdt å merke seg at lengder opptil 21,5 meter i noen tilfeller blir løst med kulvert. En stor andel av kulvertene kan dekkes av de nye prefabrikkerte kulvertene til Statens vegvesen og Betongelementforeningen, som senere diskuteres i 8.1.1 *Kulverter*. I BRUTUS er det sågar registrert en kulvert på 79 meter. Denne er ikke medtatt i Figur 7.3, ettersom det antas å være en feilregistrering.

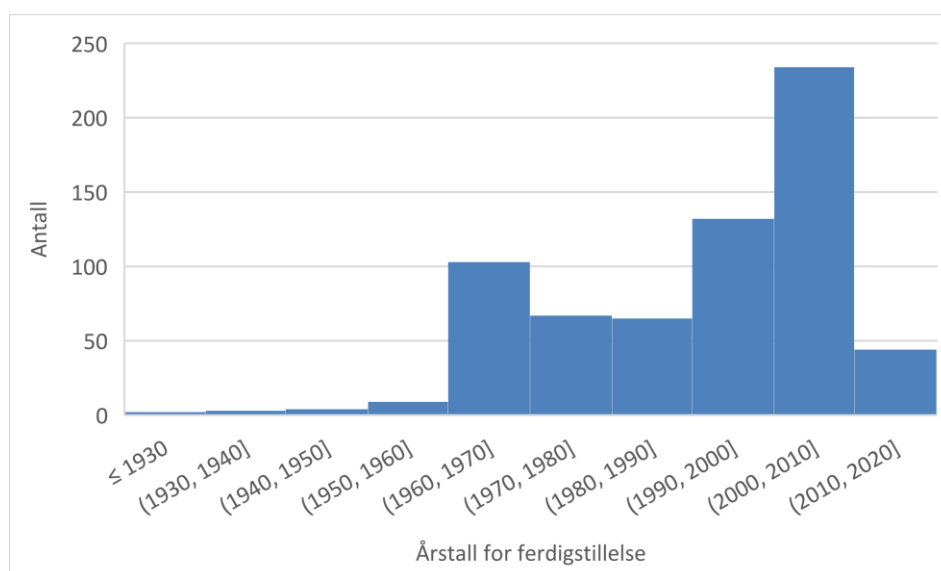


Figur 7.3: Lengder av kryssinger definert som kulvert i BRUTUS, alle registrerte strekninger

Fordelingen av de to forskjellige bæresystemene for broer kan ses i Figur 7.4. Av figuren går det tydelig frem at bæresystemer i betong er klart dominerende.

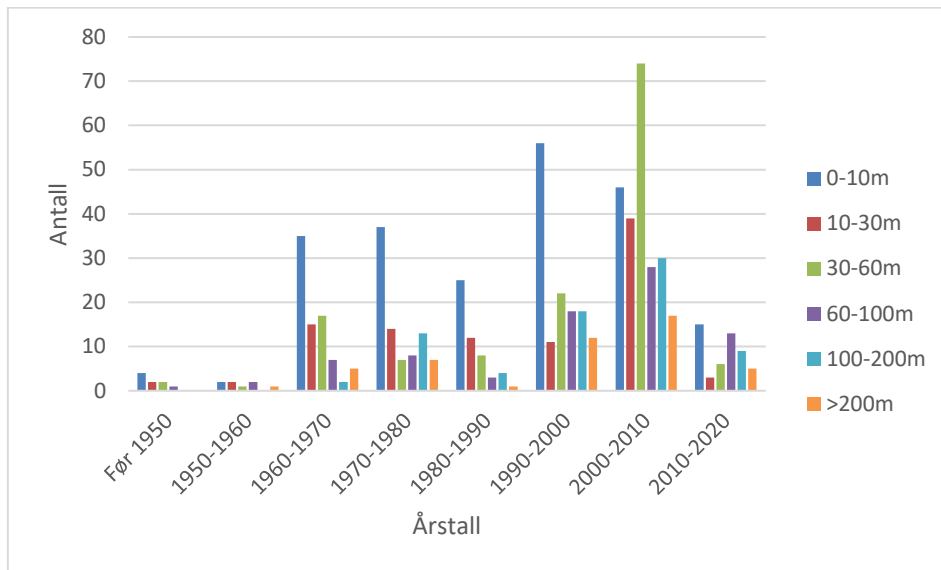


Figur 7.4: Fordeling av bæresystem for broer på alle de registrerte strekningene

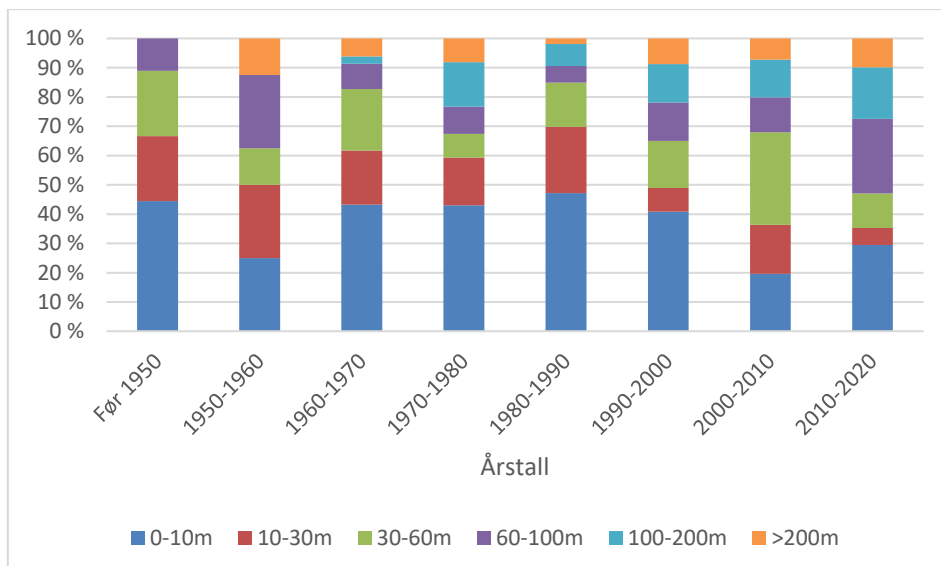


Figur 7.5: Ferdigstillelsesår for krysninger i drift på de registrerte strekningene

Som vist i Figur 7.5 er de fleste krysningene som i dag er i drift bygget etter 1960. En stor andel av krysningene som ble ferdigstilt på 2000-tallet er broer som ble oppgradert i forbindelse med bygging av ny vei. Om man også deler inn etter antall krysninger av en viss lengde, som vist i Figur 7.6 og normalisert i Figur 7.7, får vi et inntrykk av hva som ble bygget og når.



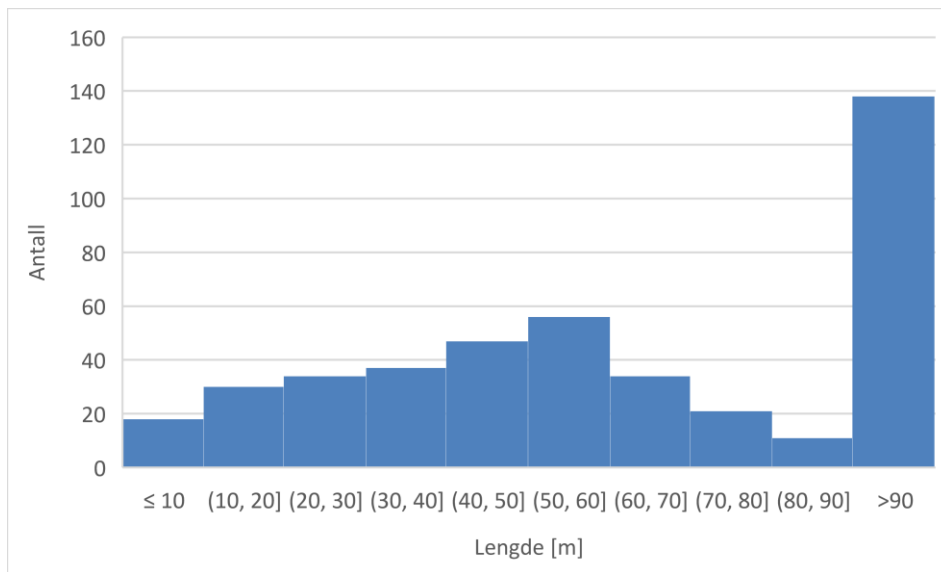
Figur 7.6: Antall broer og kulverter av gitt lengde etter byggeår på de registrerte strekningene



Figur 7.7: Normalisert andel broer og kulverter av gitt lengde etter byggeår på de registrerte strekningene

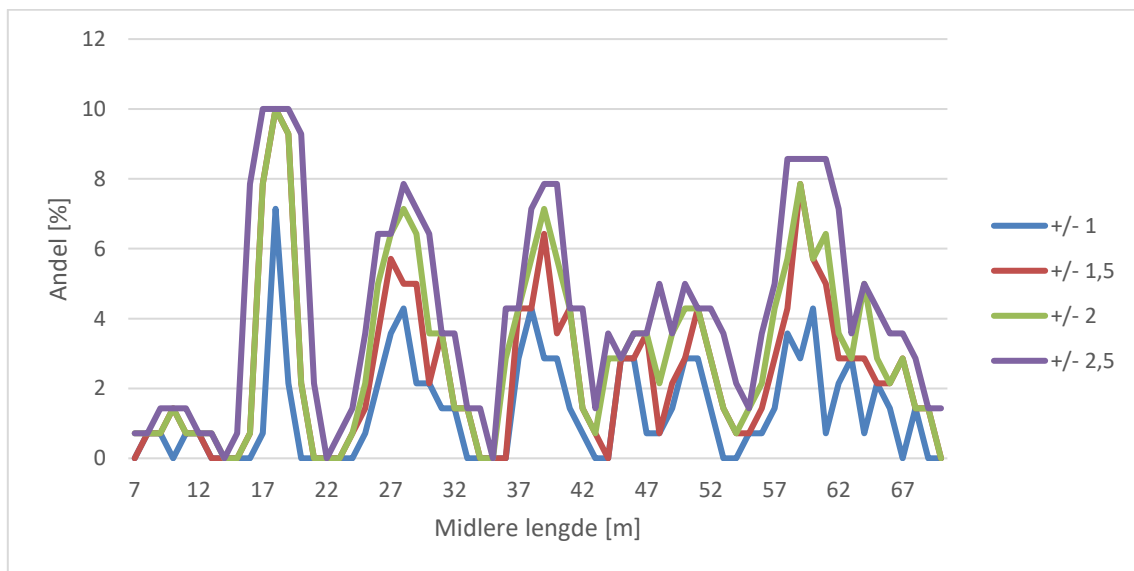
Hvis man sorterer bort krysningene som defineres som kulverter og kun ser på krysninger definert som bro, vil fordelingen med hensyn på lengde se ut som i Figur 7.8. Som nevnt i forbindelse med Figur 7.1, er det få broer med innbyrdes lik spennlengde over 90 meter. Fra Figur 7.8 ser vi at

total lengder mellom 20 og 70 meter opptrer ofte og det dominerende intervallet er med liten margin 50-60 meter.



Figur 7.8 Fordeling av total lengde for kryssinger definert som bro på de registrerte strekningene

Figur 7.9 gir en oversikt over hvor tett gruppert total lengdene for broer i linjen er på firefelts motorvei. Dette viser hvilke lengder som går igjen, men også hvor mye det varierer rundt disse total lengdene. Figur 7.9 viser at det er flest broer som har en total lengde rundt 18 meter, 28 meter, 38 meter og 60 meter.



Figur 7.9: Oversikt over total lengde for broer i linjen med ulike intervaller. Kun medtatt broer på firefelts motorvei kortere enn 70 meter

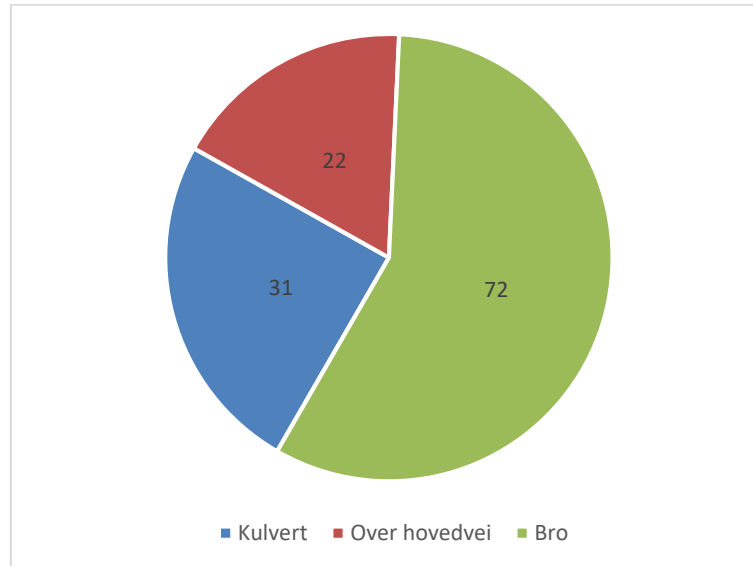
7.1.2 Nyere E18

Etttersom det i Nasjonal transportplan er lagt vekt på utbygging av omtrent 1200 km ny firefelts motorvei har vi tatt de nyere strekningene langs E18 nærmere i øyesyn og registrert brodata for følgende delstrekninger bygget etter 2006:

- Gulli-Langangen
- Kristiansand-Grimstad

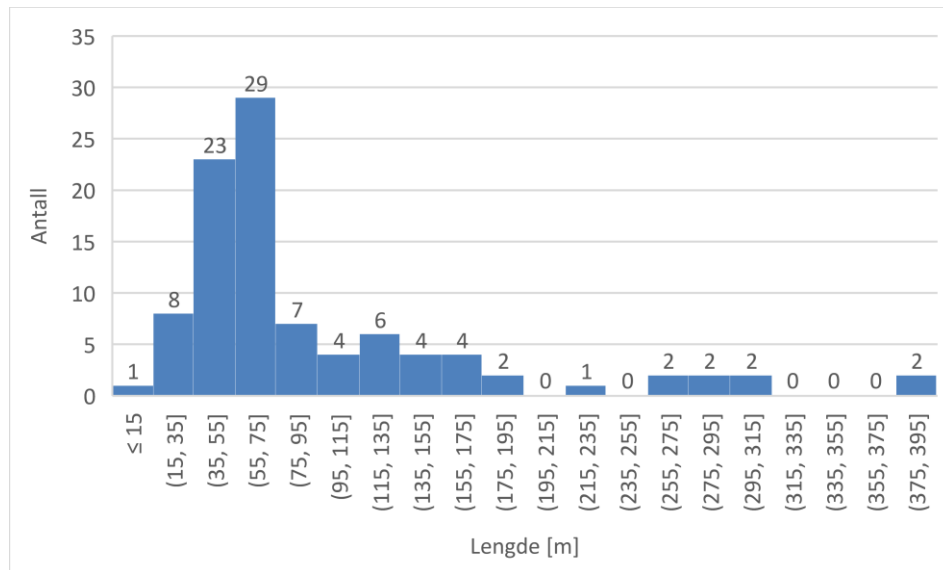
Disse to delstrekningene blir i det følgende omtalt som *nyere E18*.

I Figur 7.10 vises en oversikt over hvilke typer de forskjellige krysningene kan deles inn i. I dette diagrammet er undergruppen broer delt inn i broer som ligger i veilinjen og broer som krysser hovedveien.



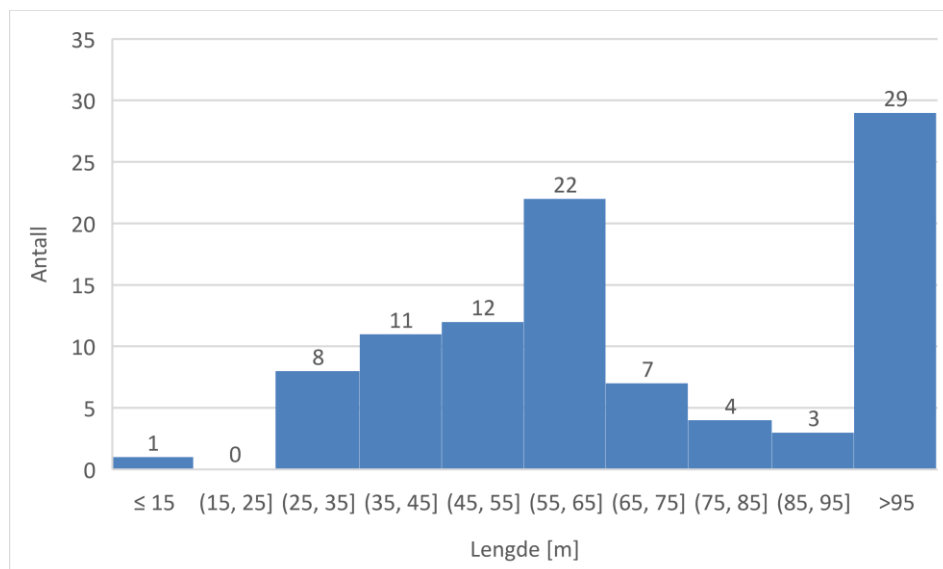
Figur 7.10: Fordeling av brotyper langs nyere E18

Som det fremgår av 8.1.1 *Kulverter* er behovet for standardiserte kulverter i stor grad dekket, derfor fokuseres det videre kun på broer langs og over nyere E18. På Figur 7.11 kan vi se at det er i intervallet 15 til 95 meter det befinner seg flest broer og det er her det kan ligge et potensiale for standardisering av bro lengder.



Figur 7.11: Fordeling av lengde for broer langs og over nyere E18, grovgradert

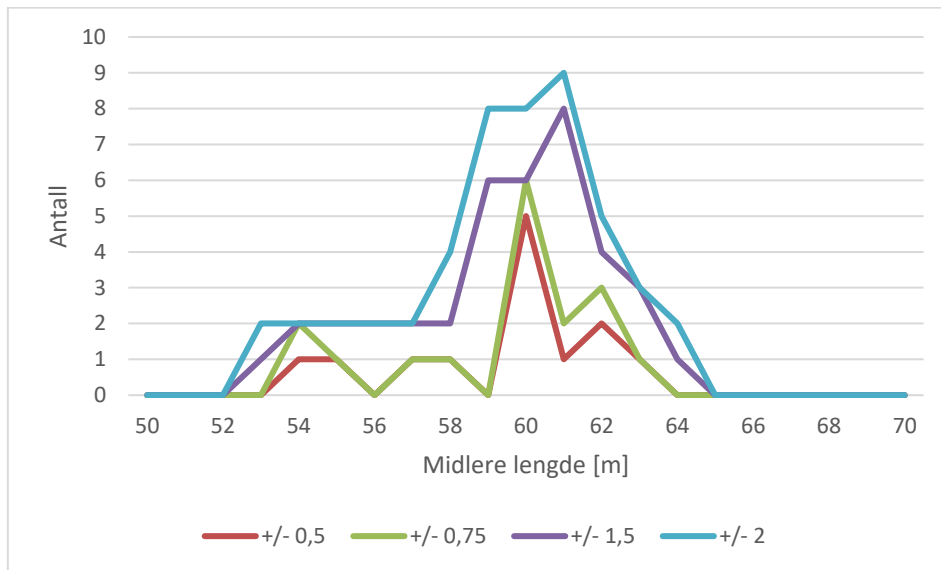
Om vi ser litt nærmere på fordelingen av lengder vil oversikten se ut som i Figur 7.12. Her kan vi se at i intervallet 55 til 65 meter befinner det seg nesten dobbelt så mange broer som i hvert av de andre intervallene.



Figur 7.12: Fordeling av brolengder langs og over nyere E18, fingradert

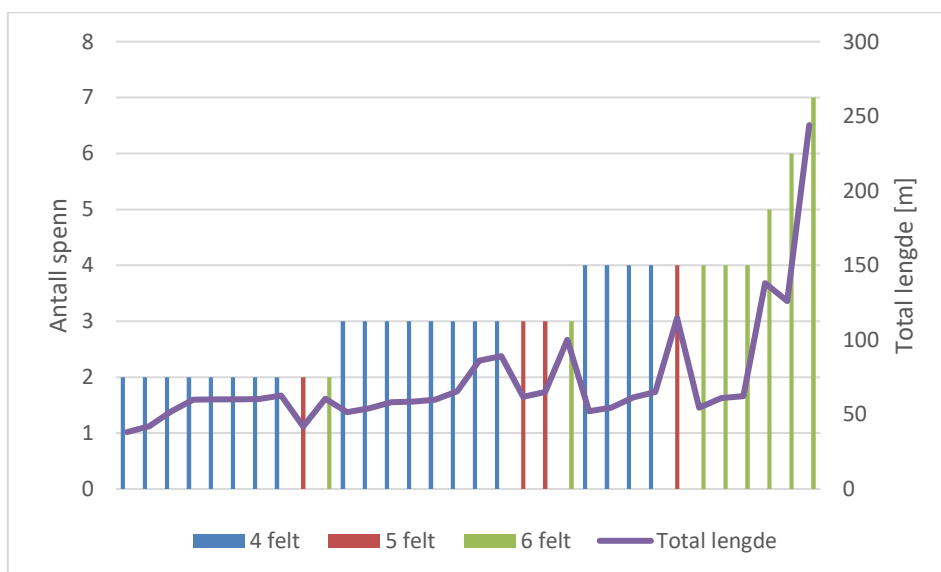
Utslaget mellom 55 og 65 meter skyldes i stor grad plankryss. Plankryss i denne sammenheng er definert som varianter og kombinasjoner av ruter-/diamantkryss, halve kløverbladkryss og trompetkryss, som vist tidligere Figur 3.12.

Ved å se nærmere på lengden på overgangsbroer på nye E18 og E6, ble oversikten som i Figur 7.13. Dette bekrefter utslaget fra Figur 7.12. Kryss som på grunn av stedlig tilpasning har bratt skråningshelning fra landkar til hovedvei er ikke medtatt i dataene. Lengden på broer i tilknytning til plankryss varierer mellom 54,6 og 62,14 meter på de undersøkte strekningene.



Figur 7.13: Oversikt over total lengder for overgangsbroer over nye E18 og E6 med ulike intervall

Figur 7.14 viser sammenhengen mellom antall spenn, total lengde og antall felt under overgangsbroene på nyere del av E18 og E6.



Figur 7.14: Oversikt over overgangsbroenes spenn over antall felt med total lengde langs nye E18 og E6

7.2 Hovedfunn fra intervjuer

Funn fra intervjuene er delt inn i samme kategorier som under etterbehandlingen (se Figur 6.4): prefabrikasjon, standardisering og erfaringsoverføring. For å gi et overordnet bilde av funnene fra intervjuene er en ordsky laget. Denne er vist i Figur 7.15.



Figur 7.15: Ordsky fra alle intervjuene. Hentet fra NVivo

7.2.1 Prefabrikasjon

I løpet av intervjuene ble det trukket frem flere forskjellige fordeler ved å bruke prefabrikasjon, både ved bygging av broer og i byggebransjen generelt.

Gevinster knyttet til helse, miljø og sikkerhet (HMS) var den fordelen flest av respondentene trakk frem. Disse HMS-gevinstene kan høstes både i forhold til arbeidet på anleggsplassen og for berørte trafikanter. Dersom prefabrikkering benyttes vil færre arbeidstimer tilbringes på mindre hensiktsmessige steder. Byggetiden på anleggsplass blir i tillegg kortet ned og færre personer involveres i arbeidet. Respondent 6 mente at dette ville gi en statistisk HMS-gevinst og redusere risikoen for uønskede hendelser. Respondent 5 informerte om at erfaringer viser at anleggsplassen i prosjekter med prefabrikasjon gjerne var roligere og mindre preget av stress, noe som i sin tur førte til færre stressrelaterte sykemeldinger. I tillegg til fordelene på anleggsplassen ble det uttalt at prefabrikasjon vil kunne gi økt trafikkikkerhet under byggeprosessen der broene bygges i tilknytning til eksisterende vei. Dette ble nevnt i sammenheng med at det tidligere har skjedd alvorlige ulykker der stillas har falt sammen under byggeprosessen.

Bruk av prefabrikkerte elementer kan føre til kortere trafikkavbrudd og raskere planleggings- og godkjenningssfasen. I tillegg kan produksjonen av elementene foregå parallelt med andre prosesser, slik at arbeidet med brooverbygningen på stedet begrenser seg til montering av elementer. I sum vil dette kunne føre til kortere byggetid, noe som ble fremhevet av flere av respondentene. Kortere byggetid trekkes frem av respondent 4 som en stor fordel ved utskiftning av overbygning på eksisterende broer, spesielt i tilfeller der omkjøringsmulighetene er begrenset. Da vil bruk av elementer redusere trafikkavbrudd.

Mange av respondentene var av den oppfatning at broer basert på prefabrikkerte elementer er billigere enn plasstøpte brokonsepter. Det er uvisst hvor mye faktisk erfaring respondentene har med bruk av prefabrikkerte broelementer. Respondent 6 baserte sin uttalelse på et tidligere prosjekt der

det var benyttet både plasstøpte og prefabrikkerte kulverter. I prosjektet ble kulvertene produsert samtidig, og prissammenligningen i ettertid viste at prisen for de prefabrikkerte kulvertene ble om lag det halve av prisen for de plasstøpte. Oppfatningen om at prefabrikkerte elementbroer er billigere i innkjøp enn plasstøpte gjenspeiles også i respondent 2s uttalelse om et pågående prosjekt:

«(...) kvadratprisen vi har fått ligger på høyde med plasstøpt. Men det skal være billigere (...) I teorien er det mye billigere å gjøre det slik»

Kvalitet og bestandighet er viktige temaer i brobygging, og flertallet av respondentene mente kvaliteten på prefabrikkerte elementer er bedre enn plasstøpte. Årsaken til dette er at prefabrikasjon gir bedre kontroll, herdebetingelser og klimapåvirkninger. Respondent 4 trakk frem at også etterbehandlingen vil kunne gjøres på en bedre måte. Med utgangspunkt i sin bakgrunn innen bolig- og kontorbygg kom respondent 9 med en tilleggskommentar om at prefabrikasjon vil kunne gi en høyere kvalitet, men at de ikke alltid opplever å få noe igjen for den økte kvaliteten.

Som det fremgår under neste avsnitt trekker de fleste respondentene frem at prefabrikkerte elementer har klare estetiske begrensninger. Samtidig var det tre respondenter som fremhevet at prefabrikkerte broer gjerne kan oppfylle krav til estetikk, og at de kan bli både kreative og fine. Respondent 9 stilte et spørsmål som er representativt for flere av respondentenes oppfatning av de estetiske kvalitetene til elementbroer:

«(...) trenger det å se stygt ut?»

Som nevnt i slutten av forrige avsnitt trakk et klart flertall av respondentene frem at prefabrikasjon knyttet til brobygging og bygging generelt gir klare begrensninger når det gjelder utforming. Vurderingene går videre ut på at dette vil begrense det arkitektoniske uttrykket, gjennom flere rette linjer og skarpe kanter. Blant annet trakk respondent 5 frem at man vil kunne få et mer oppstykket visuelt inntrykk på grunn av flere synlige skjøter.

Til tross for at mange av respondentene så klare estetiske begrensninger for prefabrikkerte elementer, var det også noen som så potensiale. Blant annet ble det foreslått å bruke kantelementer, og det ble også poengtert at det er fullt mulig å utfordre den tradisjonelle prefabrikkerte utformingen. I noen av intervjuene ble også viktigheten av estetikk for samfunnet tatt opp. Respondent 4 snakket om utbyggerens estetiske ansvar overfor samfunnet:

«(...) man har som utbygger et samfunnsmessig ansvar for at det skal oppleves bra og ikke ser ut som et Biltemakjøp».

Et annet synspunkt kom fra respondent 1 som stilte spørsmålsteget ved hvor pen en bro egentlig må være:

«Det er klart at noe kjedeligere blir det hvis alle broene er helt like (...) men jeg mener ikke nødvendigvis at det er helt feil. Hvis man vil ha estetikk kan man bygge det innimellom».

Prefabrikasjon foregår ofte langt unna anleggsplassen. Flertallet av respondentene fremhever utfordringer knyttet til transport som en vesentlig ulempe ved bruk av prefabrikkerte elementer. Transporten er en utfordring på to måter. De fleste identifiserte utfordringene ved at broelementer gjerne er lange og tunge, og kan være vanskelige å transportere på vei, både eksisterende vei og vei

under bygging. Blant annet vil rundkjøringer kunne begrense lengden av broelementene. I tillegg vil det være en utfordring knyttet til å transportere broelementer på anleggsvei der broen skal monteres på nybygd vei. Transport av ferdige elementer kan også være mindre effektivt enn å frakte fersk betong og armering, ved at man som respondent 5 sa:

«(...) du begynner å transportere luft.»

I tillegg til transportutfordringene nevnt over kan transportkostnadene bli høyere ved bruk av prefabrikkerte elementer.

Ved å velge prefabrikkerte elementer introduserer man også løfte- og monteringsoperasjoner som kan være krevende. Tre av respondentene har vært inn på dette. Både de tekniske utfordringene og den økte HMS-risikoen knyttet til løfting og flytting av store elementer trekkes frem som ulemper.

Store bjelkeelementer krever store fabrikker og stort utstyr. I et marked med relativt få leverandører var det noen respondenter som så potensiale for å skape monopoler eller oligopoler. Oppfatningen var at dette kunne være konkurransehennende og at enkelte leverandører vil kunne bli ekskludert på grunn av kapasitetsbegrensninger.

Respondent 1 og 6 trakk frem en opplevd motstand fra Statens vegvesen som en utfordring for økt bruk av prefabrikkerte elementer i broer. Den ene respondenten sa:

«Jeg vet at det tradisjonelt har vært en viss motstand mot elementbroer fra vegvesenet.»

Den norske topografien og tradisjon for stedstilpasning av broer var et gjentakende tema i de fleste intervjuene. Respondentene trakk frem at prefabrikkerte elementer er vanskeligere å stedstilpasse siden de er rette, og at det vil være vanskeligere å integrere broene fint i terrenget. I tillegg ble det nevnt at det er en utfordring med horisontalkurvatur over broer som bygges opp av rette elementer.

Forskjellige tekniske utfordringer knyttet til regelverk ble også nevnt som ulemper ved bruk av prefabrikkerte broelementer. Flere av respondentene gikk inn på at det i håndbok N400 stilles krav om maksimalt to lager per broakse, og at dette fører til tekniske og estetiske utfordringer. Kravet om én fuge i hver ende av broen ble også fremhevet som en utfordring ved dimensjonering av prefabrikkerte broer.

Det virket å være en utbredt oppfatning blant respondentene at prefabrikkerte elementbroer var utsatt for bestandighetsproblemer. Dette ble sagt med bakgrunn i erfaring fra tidligere broer, der skadene var mange og utbredt. Problemene som ble trukket frem var blant annet manglende overdekning, dårlig geometrisk utforming og dårlig utstøping. Noen respondenter var av en litt annen oppfatning. Disse mente at bestandighetsproblemene i stor grad var knyttet til standardverket som ble benyttet tidligere, og manglende kunnskap om nedbrytningsmekanismer generelt. Blant annet hevder respondent 6 at plasstøpte broer fra 70- og 80-tallet er like utsatt for bestandighetsproblemer, som elementbroer fra samme periode. Videre ble det påstått at elementer produsert etter dagens standardverk ikke vil ha de samme problemene med bestandighet, og at referansen til eldre elementbroer *«(...) er en helt absurd argumentasjon»*. Et annet poeng som kom frem i diskusjonen rundt bestandighet var at på en bjelkeelementbro vil det være et større eksponert areal, og som vil gi en større sannsynlighet for skader knyttet til nedbrytningsmekanismer.

Norske broer er underlagt et relativt strengt inspeksjonsregime. I dette regimet er det forutsatt at man skal kunne inspisere konstruksjonen visuelt. Noen av respondentene trakk frem at brobjelker som står for tett gjør det vanskelig å inspisere konstruksjonen, og vanskeliggjør vedlikeholdsarbeid. For å tilrettelegge for enkel inspeksjon og vedlikehold ønsket disse respondentene at bjelkene skulle stå med god avstand mellom hverandre. På den annen side nevnte andre respondenter at bjelkene kanskje burde stå tett i tett for å øke motstanden mot påkjørselslaster. På spørsmål om dette ikke gjorde inspeksjon og vedlikehold vanskelig ble det hevdet at inspeksjon mellom brobjelkene ikke var nødvendig.

I løpet av intervjuene kom det frem en rekke forutsetninger som respondentene mente var nødvendige for at det skal være hensiktsmessig å bruke prefabrikkerte broer. Broen må fungere med veiens kurvatur og ha en viss grad av fleksibilitet. Dette kan ses i sammenheng med en annen forutsetning, som var at en vurdering av prefabrikkering eller ikke må gjøres på et tidlig tidspunkt, før veilinjen er bestemt. Dette kan ifølge respondentene tilrettelegge for rette broer uten breddeutvidelse. Den ene respondenten presenterte en vurdering som bør gjøres i tilknytning til valg av veilinje og prefabrikkering. Nemlig hvor mye det koster å tilpasse veilinjen for å få en rett linje over broen. Dette bør ses i sammenheng med eventuelle besparelser ved å velge prefabrikkering av broen. En annen forutsetning som ble tatt opp var at broene måtte være lette å drifte og vedlikeholde. Det ble også poengtert at under prosjektering og utførelse, er det viktig at de involverte har god kompetanse. De fleste respondentene mente potensialet for å benytte prefabrikkerte broelementer er størst for korte, rette broer, gjerne på mindre veier.

Alle respondentene ble spurt om de benyttet prefabrikkerte broer i sine pågående prosjekter. Det store flertallet bruker ikke prefabrikkerte elementer for broer, men noen kunne informere om at de relativt nylig hadde brukt prefabrikkerte kulverter i sine prosjekter. Det ble trukket frem av flere av respondentene på rådgiver-/entreprenørsiden at de ikke hadde påvirkningsmulighet på om det skulle benyttes prefabrikkerte eller plasstøpte broer, ettersom denne avgjørelsen blir tatt før de kommer inn i prosjektet. Én respondent kunne vise til at de planlegger å benytte flere prefabrikkerte broer i et kommende prosjekt. Noen hadde også brukt prefabrikkerte broer tidligere, men da på mindre veier.

7.2.2 Standardisering

Respondentene ble utfordret til å komme med fordeler og ulemper i tilknytning til standardisering. Til tross for at det ble presisert fra vår side at fokuset var ment å være på standardiserte, plasstøpte broer gled mange av respondentene inn på standardiserte eller normerte elementbroer. Det ble derfor gjort en jobb i etterkant for å analysere hva respondentene *egentlig* kommenterte. I det følgende har vi forsøkt å klargjøre for leseren når det snakkes om normerte elementer og når det snakkes om standardiserte plasstøpte broer.

En av respondentene var opptatt av at en standardisert, plasstøpt bro vil kunne føre til forutsigbarhet og læring gjennom gjentakelse. Respondenten var av den oppfatning at forutsigbarheten og læringen kan redusere sannsynligheten for feil. En annen fordel som ble trukket frem var at entreprenøren slipper å forstå tegningene på nytt og at dette vil bidra til effektivitet og tidsbesparelser. Tidsbesparelse ble også nevnt som en potensiell fordel gjennom at en standardisert bro kan være preakseptert av Vegdirektoratet, og at man da slipper unna den relativt omfattende godkjenningprosessen nye broer må gjennom. På den måten kan også bestillinger av nødvendige materialer og utstyr skje på et tidligere tidspunkt. Når det gjelder utførelse trakk respondentene frem

at gjentakelsen ikke bare kunne føre til læring, men også til gjenbruk av forskalingssystemer, stillas og produksjonsteknikker. Dette vil igjen kunne gi kostnadsbesparelser, som illustrert av respondent 5:

«Det er minimum ti prosent besparelse bare ved å gjenta det du gjorde forrige gang».

Respondent mente at standardisering av både plasstøpte og prefabrikkerte broer innad i prosjekter kan gi store besparelser:

«Bare det å standardisere fem broer vil ha en enorm kostnadseffekt»

Krav til estetikk ble sett på som en utfordring også for standardiserte plasstøpte broer. Dette henger sammen med repeterende utforming og at mange broer blir veldig like. Det ble også nevnt at arkitekturen fort kan bli lite spennende og variasjon er viktig som poengtert av respondent 4:

«Det er ikke tvil om hva som hadde lønnet seg (...). Det er å bygge alt likt. Men det hadde blitt dødskjedelig!»

Flere av respondentene uttrykker en bekymring for at standardisering av plasstøpte broer eller elementer, vil kunne ha negative konsekvenser for konkurransen i markedet. For plasstøpte konstruksjoner begrunnes dette med at entreprenørbedriftene gjerne har egne forskalingssystemer, som sannsynligvis ikke vil være kompatible med de standardiserte broene. Det ble hevdet at konsekvensen av dette kan være høyere pris på grunn av investeringer i nye forskalingssystemer og mindre konkurranse.

Tilpasningsmulighetene ved standardiserte plasstøpte og prefabrikkerte broer ble nevnt som en mulig utfordring. Broen må ha potensiale for tilpasning til lokale forhold for å sikre integrasjon i landskapet, og det bør ikke være nødvendig med omfattende terrenginngrep for å ta i bruk broen. Det ble nevnt av flere respondenter at man i de fleste tilfeller må gjøre små tilpasninger for å ta hensyn til veiens geometri og grunnforholdene på stedet.

Alle respondentene hadde en viss formening om hvilke forutsetninger som må ligge til grunn for at en standardisert bro, plasstøpt eller prefabrikkert, skal bli benyttet. De fleste var enige om at involvering av entreprenører og rådgivere tidlig i veiplanleggingen er en viktig forutsetning for å legge til rette for standardisering, og unngå komplisert geometri. Som en kommentar til tidlig involvering trakk den ene respondenten frem at det er viktig med kontinuitet i prosjektet, og at tradisjonen for hovedentreprisekontrakter gjør det vanskelig for rådgivere å følge prosjektet fra start til slutt. I tillegg ble det poengtert at det er mange interessenter som det må tas hensyn til. Respondent 5 var opptatt av at standardisering generelt må ha rom for utvikling, og at man ikke skal tenke at man standardiserer en gang for alle:

«Standardisering er en reise».

Fire av respondentene trakk frem at for å benytte seg av en standardisert løsning må det foreligge gevinster i form av tid, kostnad eller miljø.

I tillegg til de omtalte forutsetningene ble det nevnt noen selvfølgheter som at en standardisert bro må være komfortabel å kjøre på, og ha tilstrekkelig overdekning for å sikre god bestandighet.

Respondent 7 var en av flere som kom inn på at det er viktig å vurdere hva som er smart å standardisere og hva som er smart å industrialisere. Én tilnærming som ble nevnt er å standardisere deler av produktet og da helst de delene som er mest effektive for produksjonen. Respondent 9 hevdet at man kan standardisere 80 prosent av et produkt, og at de resterende 20 prosent kan brukes til å gjøre ønskede tilpasninger, og trakk sammenligninger til bilbransjen. Samme respondent virket å mene at standardisering av et helt produkt kan gå ut over brukbarheten og forringe sluttverdien.

7.2.3 Erfaringsoverføring

Erfaringsoverføring mellom enkeltindivider og organisasjonsenheter ble også diskutert i intervjuene. Dette med bakgrunn i at en god erfaringsoverføring kan være et steg i retning av økt industrialisering av byggebransjen. Alle respondentene opplyste at de drev med erfaringsoverføring gjennom uformelle samtaler mellom kollegaer. Fem av respondentene skriver sluttrapporter etter endte prosjekter slik at disse kan brukes for fremtidig referanse. Noen respondenter deltar også på formelle evalueringsmøter i etterkant av prosjekter for å spre erfaringer i bedriften. Felles for alle respondentene er at de mener de kan og må bli bedre på erfaringsoverføring, og at det er en viktig del av utviklingen.

Noen av respondentene trakk sammenligninger mellom veibygging i Norge og utlandet. Her ble det av de fleste understreket at den norske topografien er veldig spesiell, og at det ikke er lett å finne relevante land å sammenligne seg med. Likevel var det flere som trakk paralleller til alpelandene, og at de i stor grad bygger veien over terrenget fremfor å integrere den. Det fremgikk ikke av intervjuene om respondentene syntes dette var en bra eller dårlig fremgangsmåte, men at dette var en måte å gjøre det på. En annen sammenligning med utlandet som kom frem i det ene intervjuet var entrepriseformen som benyttes i Nederland. Respondenten trakk frem at veier i Nederland bygges basert på offentlig-privat samarbeid (OPS) og at dette gir entreprenøren relativt stor frihet i linjeføring og konstruksjonsvalg. I tillegg får entreprenøren vedlikeholdsansvaret for veien i de første 30 årene etter åpning, noe respondenten trekker frem som et positivt virkemiddel for å sikre god kvalitet:

«Det vil si at entreprenøren også er tjent med å bygge noe som varer».

7.2.4 Oppsummering

I Tabell 7.1 er hovedfunnene fra dybdeintervjuene oppsummert i tabellform.

Tabell 7.1: Hovedfunn fra intervjuer oppsummert

Hovedtema	Undertema	Funn
Prefabrikasjon	Fordeler	<ul style="list-style-type: none"> • HMS-gevinster kan høstes både i forhold til arbeidet på anleggsplassen og for berørte trafikanter • Produksjonen av elementer kan foregå parallelt med andre prosesser • Kortere trafikkavbrudd siden monteringen går raskt • Raskere planleggings- og godkjenningsfase • Mulige økonomiske gevinster • Forbedret kvalitet gjennom kontrollerte klimabetingelser
	Ulemper	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenser det arkitektoniske uttrykket • Transport av tunge og store elementer • Montering av elementene krever løft • Konkurranseshemmende og enkelte leverandører vil kunne bli ekskludert på grunn av kapasitetsbegrensninger • Vanskeligere å stedstilpasse rette elementer • Utfordringer i regelverket • Har en historikk med bestandighetsproblemer • Større overflate vil kunne gi en større sannsynlighet for skader knyttet til nedbrytningsmekanismer • Tilsynelatende negative holdninger hos byggherre
Standardisering	Fordeler	<ul style="list-style-type: none"> • Forutsigbarhet og læring gjennom gjentakelse • Tidsbesparelse ved at konstruksjonen er preakseptert og slipper godkjenningsfase • Gjenbruk av forskalingssystemer, stillas og produksjonsteknikker • Kan gi kostnadsbesparelse
	Ulemper	<ul style="list-style-type: none"> • Repeterende utforming kan oppfattes kjedelig • Entreprenørenes forskalingssystemer er ikke nødvendigvis compatible • Kan være utfordrende å tilpasse terrenget til konstruksjonen
	Forutsetninger	<ul style="list-style-type: none"> • Tidlig involvering av entreprenører og rådgivere • Gevinster i form av tid, kostnad eller miljø • Standardisere de delene av produktet som er mest effektive for produksjonen • Være komfortabel å kjøre på og ha tilstrekkelig overdekning for å sikre god bestandighet
Erfaringsoverføring		<ul style="list-style-type: none"> • Uformelle samtaler mellom kollegaer • Sluttrapporter etter endte prosjekter • Formelle evalueringsmøter i etterkant av prosjekter

7.3 Studietur

7.3.1 Prefabrikasjon i Nederland

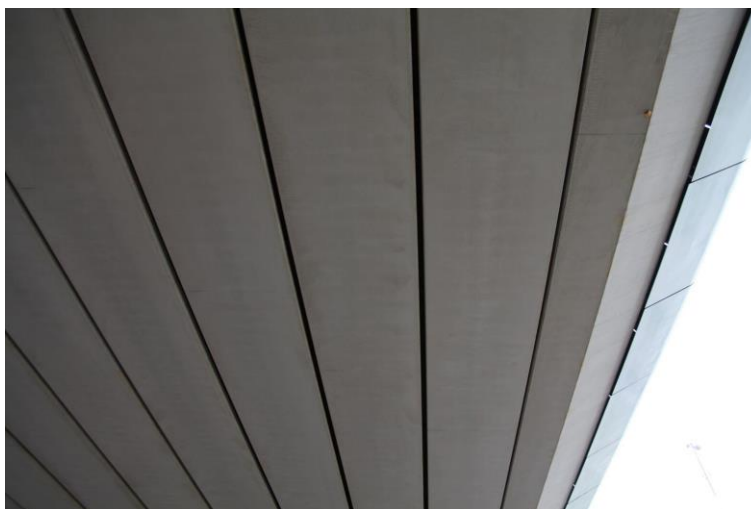
I Nederland er 80 % av broene prefabrikkerte (tall fra 2015), og til forskjell fra Norge blir plasstøpt betong kun brukt til monumentale broer. Spanbeton oppga at de konkurrerer på logistikk og transport og ikke på pris. De nevnte også at deres prefabrikkerte elementer ofte er dyrere enn plasstøpt.

Ved omvisning på prosjektet til Spanbeton, SAA A1-A6 Muiderberg, fikk vi se flere prefabrikkerte broer. På grunn av krav til minimal stopp av trafikk blir broene stort sett montert i løpet av natten. Broene gikk over flere spenn, med enten omvendte T-bjelker, I-bjelke eller kassebjelker. Alle broene på prosjektet var fritt opplagte med en fleksibel fuge av betong for å gjøre broen statisk bestemt. I det aktuelle prosjektet hadde alle bjelkene ett lager per bjelke, med stor plass under for å kunne jekke opp. Som vist på Figur 7.16 ble kantelementer av glassfiber brukt for å skjule endebjelkene. Effekten av disse kantelementene er betydelig ettersom de myker opp et i utgangspunktet kantete tverrsnitt.



Figur 7.16: Prefabrikkert bro i Nederland med glassfiber kantelementer (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)

Som illustrert i Figur 7.17 lå alle bjelkene tett inntil hverandre for å sikre tilstrekkelig kapasitet mot påkjørsel. Mellom underflensene for omvendte T-bjelker og I-bjelker støpes det betong for å øke kapasiteten mot påkjørsel. Avstanden mellom bjelkene varierte over bro lengden for å muliggjøre en viss breddeutvidelse. Siden jordskjelv ikke er utbredt i Nederland, ble ikke broene dimensjonert for dette.



Figur 7.17: Undersiden av prefabrikkert bro i Nederland (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)

En av kassebjelkebroene er vist i Figur 7.18. Kassebjelker ble brukt for å muliggjøre en horisontalradius på 220 meter.



Figur 7.18: Kassebjelkebro i Nederland med horisontalradius på 220 meter (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)

På studieturen fikk vi en omvisning på fabrikken til Spanbeton. På fabrikken produserte de omvendte T-bjelker, I-bjelker, kantelementer, kassebjelker og kassebjelker med utkraget underkantflens. Som vist i Figur 7.19 lagres elementene på utsiden av fabrikken før de transporteres til anleggsplassen. Spennlengdene kunne varieres med bjelkehøyden. Kassebjelkene kan spenne opptil 60 meter med bjelkehøyde på 2,4 meter. 60 meter er maksimal spennlengde på grunn av begrensninger knyttet til maksimal oppspenningskraft og kapasiteten til kranen som løfter elementene. Bredden på omvendte T-bjelker og I-bjelker var i de aller fleste tilfeller låst til 1,5 meter. Kompakte omvendte T-bjelker, der dekket ble støpt på plassen, var mest gunstig for kortere spennlengder. For kassebjelkene var det ikke nødvendig med plaststøpt dekke, noe som gjorde byggeprosessen mer effektiv.



Figur 7.19: Omvendte T-bjelker fra Spanbeton (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)

Alle broene til Spanbeton ble dimensjonert og justert til det spesifikke prosjektet. Formene var standardisert, men mengden armering og elementlengde varierte fra gang til gang. Derfor ble det ikke laget elementer som ikke var bestilt, bortsett fra spennarmerte jernbanesviller. I enkelte prosjekter ble elementene etteroppspent, men hovedvekten av produksjonen var forspente elementer.

Elementene ble transportert ved hjelp av spesialtransport med kapasitet opptil 60 meter. Elementene kunne også transporteres til andre land. Spanbeton hadde blant annet transportert elementer flere ganger til Belgia.

Betongen i alle bjelkene var selvkomprimerende og trengte derfor ikke å vibreres. Fastheten var minimum B65, men kunne være opptil B105. Normalt ble elementene avforskalt etter ett døgn, men for større elementer ble dette gjort etter to døgn. Som vist i Figur 7.20 dannet det seg ofte porer på oversiden av underflensen på grunn av luft i betongen som ikke slapp ut og ble samlet her.



Figur 7.20: På oversiden av underflensen til omvendte T-bjelker og I-bjelker dannes det porer

7.3.2 Prefabrikasjon i Danmark

Etterspørselen i Danmark er mye mindre enn i Nederland, og prefabrickerte brosystemer konkurrerer mot plasstøpte løsninger. Markedet likner mer på forholdene i Norge, selv om de muligens kan ha kommet noe lenger i utviklingen. Spæncor er et av de største prefabrickeringselskapene i Danmark og produserer TT-bjelker, omvendte T-bjelker (OT-bjelker) og kassebjelker. TT-bjelkene ble brukt både til gangbroer og kortere veibroer, men var svake ved påkjørsel og vanskelige å reparere. De var også mer ustabile. OT-bjelken ble mest brukt og kunne spenne lenger enn TT-bjelker. Maksimal lengde for disse broene var 28 meter, men de produserte vanligvis broer mellom 14 og 18 meter. Bjelkene stod i likhet med i Nederland tett i tett for å øke kapasiteten mot påkjørselsskader. En av broene vi undersøkte hadde fått påkjørselsskader, uten at dette gikk nevneverdig utover broen.



Figur 7.21: Undersiden av prefabrickert bro i Danmark med påkjørselsskade (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)

Til forskjell fra Nederland var det åpent mellom underflensene og de opplyste at de ikke hadde opplevd noen problemer med bestandighet.

Spæcom brukte også kassebroer, men med mye mindre dimensjoner enn i Nederland. Dette var blant annet fordi kranen i fabrikken ikke hadde høyere kapasitet. De standardiserte heller ikke sine broer, men dimensjonerte broene til det spesifikke prosjektet.

Figuren under viser undersiden av en prefabrikkert bro i linjen på motorvei. Her ble det også brukt ett lager per bjelke slik som i Nederland. I Danmark var det vanlig å lage kontinuerlige broer med samvirke mellom bjelker og påstøp.

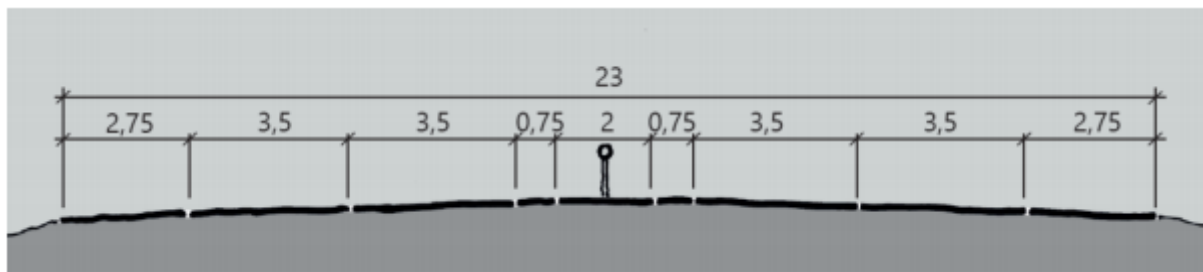


Figur 7.22: Undersiden av prefabrikkert bro i Danmark (Foto: John-Erik Reiersen, Betongelementforeningen)

7.4 Veigeometriens påvirkning på broers overordnede dimensjoner

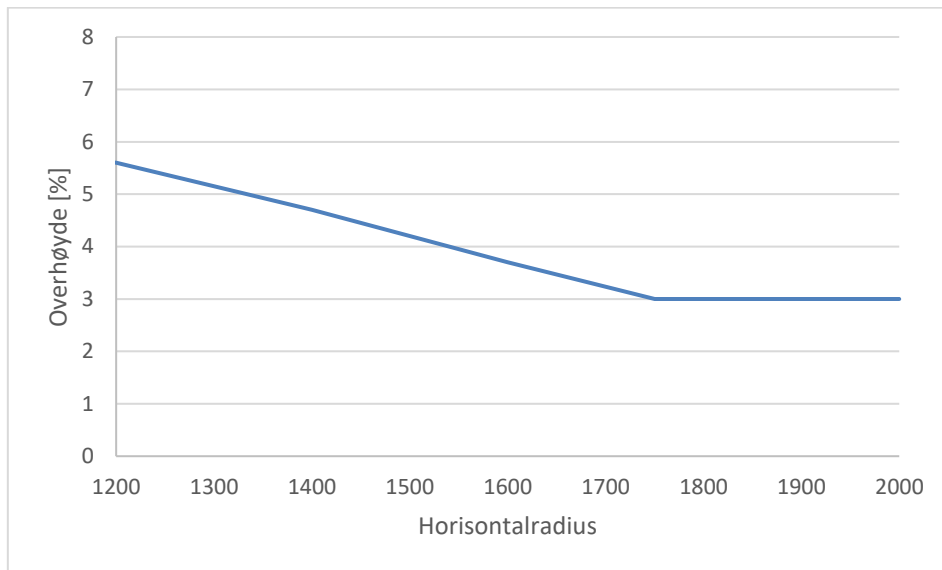
Veidimensjonene påvirker bredden av broen. I tillegg stiller håndbøkene krav knyttet til blant annet stoppsikt og minste horisontale kurveradius. Kravene for standardiserte løsninger for broer i linjen for denne oppgaven følger gjeldende Håndbok N100 Veg – og gateutforming og dimensjoneringsklasse for motorvei med 110 km/t fartsgrense i NA rundskriv [50], [51].

Normalprofilen som legges til grunn for den representative standardiserte broen er gitt i Figur 7.23.



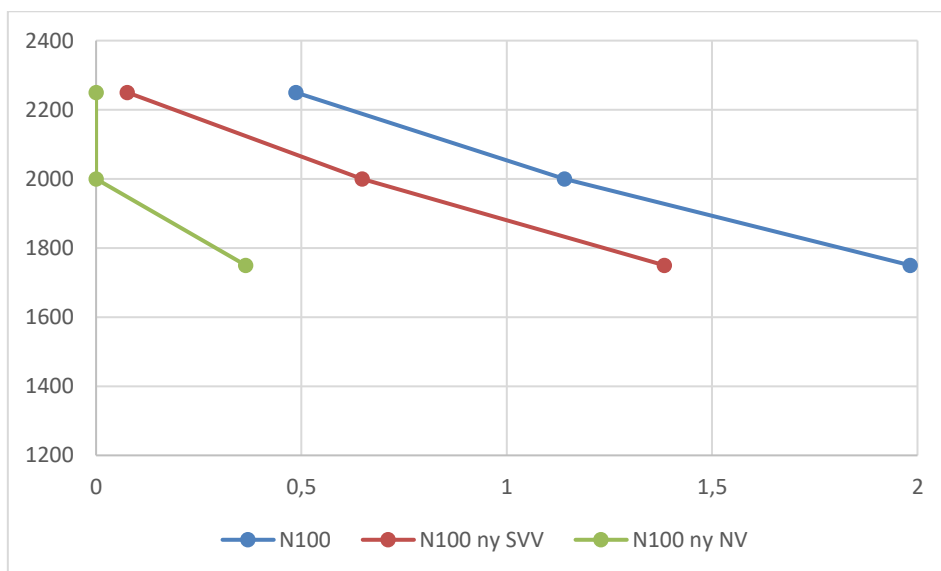
Figur 7.23: Normalprofil for 110 km/t [51]

For broer økes minste tillatte horisontalradius med 50 % for dimensjoneringsklassen. I den aktuelle klassen er derfor minste tillatte horisontalradius for broer 1200 meter. Kjørebanelens tverrfall over broen er avhengig av horisontalkurve. Som illustrert i Figur 7.24 er overhøyde for vei med horisontalradius lik 1200 meter 5,6 %. Takfallet på rett vei er 3 % og for å oppnå likt fall på alle standardiserte broer kan overhøyden være lik dette fallet (3%). Dette oppnås ved å begrense horisontalradiusen til 1750 meter. Dette legges til grunn for den representative broen.



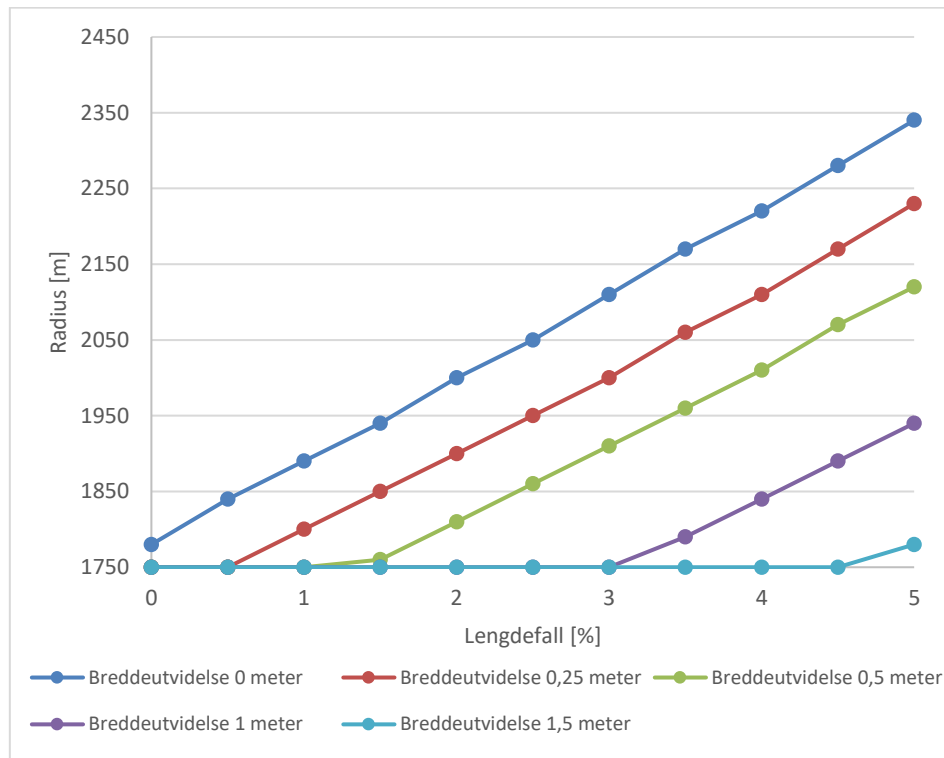
Figur 7.24: Overhøyde for nasjonale hovedveier med 110 km/t fartsgrense

I dag er *N100 Veg – og gateutforming* på høring [52]. I tillegg har Nye Veier kommet med en høringsuttalelse med andre krav til blant annet stoppsikt på bro [53]. Forskjellene i stoppsiktkrav vil påvirke breddeutvidelsen på bro, dersom broen har horisontalradius. For horisontalradius på 1750 meter uten lengdefall er breddeutvidelsen minimal etter gjeldende håndbok (0,08 meter, se 12.2.1 *Breddeutvidelse*), men ved maksimalt lengdefall kreves større breddeutvidelse. Figur 7.25 viser forskjellen i breddeutvidelse for maksimalt fall på broen for gjeldende håndbok, Nye Veiers høringsuttalelse og Statens vegvesen høringsutkast.



Figur 7.25: Krav til breddeutvidelse på bro med maksimalt fall for forskjellige versjoner av håndbok N100

Figur 7.26 viser hvordan krav til breddeutvidelse endrer seg med lengde fall og horisontalradius. For å kunne ha maksimalt fall over broen uten breddeutvidelse kan minste horisontalradius være 2340 meter. Med breddeutvidelse på 1,5 meter er minimum horisontalradius med maksimalt lengdefall 1780 meter.



Figur 7.26: Sammenheng mellom breddeutvidelse, lengdefall og minimum horisontalradius etter håndbok N100

Basert på det overnevnte er det valgt å legge til grunn kravene i Tabell 7.2 for standardiserte broer for nasjonale hovedveier med 110 km/t fartsgrense.

Tabell 7.2: Prosjekteringstabell standardisert bro på nasjonal hovedvei med 110 km/t fartsgrense

Horisontal kurvatur			Vertikal kurvatur	
RH min [m]	Siktlengde [m]	Breddeutvidelse [m]	Overhøyde [%]	Maks stigning [%]
1750	260	0,5	3	1,5
1860	260	0,5	3	2,5
1960	260	0,5	3	3,5
2010	260	0,5	3	4,5
2120	260	0,5	3	5

7.5 Potensielle prefabrikkerte og standardiserte løsninger

Basert på funn fra kapittel 7.1 *Kartlegging av eksisterende broer*, 7.2 *Hovedfunn fra intervjuer* og 7.3 *Studietur* har vi identifisert ni potensielle brokonsepter som vist i Tabell 7.3. I tabellen er konseptene delt inn i henhold til produksjonsmetode, antall spenn, plassering på veien og hvorvidt de er normert eller ikke. Med normert i denne sammenheng menes at prosjekteringen er standardisert og robust nok til at broene kan brukes flere steder uten vesentlig tilpasning. Potensialet for implementering av disse konseptene diskuteres videre i 8.5 *Potensielle prefabrikkerte og standardiserte løsninger*.

Tabell 7.3: Oversikt over potensielle standardiserte broløsninger

Produksjonsmetode	Plassering	Antall spenn	Normering	Koding
Prefabrikkert	I linjen	Ett spenn	Normert	1.1.1.1
			Ikke normert	1.1.1.2
		Flere spenn	Normert	1.1.2.1
		Ikke normert	1.1.2.2	
	Overgangsbro	Flere spenn	Normert	1.2.2.1
			Ikke normert	1.2.2.2
Plasstøpt	I linjen	Ett spenn	Normert	2.1.1.1
		Flere spenn	Normert	2.1.2.1
	Overgangsbro	Flere spenn	Normert	2.2.2.1

Tabell 7.4 viser hva som taler for og mot, samt forventede gevinster og hva som må ofres ved benyttelse av de ni forskjellige brokonseptene ut fra forskjellige vurderingskriterier, som er forklart i Tabell 7.5.

Tabell 7.4: Vurderingsmatrise for standardiserte brokonstruksjoner

	Taler for								Taler mot				Gevinster			Ofre			
Koding	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s
	Anbefalt	Behov iht. kartlegging	Produksjonsmulighet	Inspeksjonsmulighet	Mindre krav til estetikk	Terrengtilpasning	Linjetilpasning	Kjent søyleplassering	Horisontalkurvatur	Variierende søyleplassering	Høye krav til estetikk	Synlig terrengbearbeiding	Redusert byggetid	Lettere utskifting	Raskere godkjenningssprosess	Overdimensjonering	Terrengtilpasning	Tilpasning av velling	Mindre frihet i utforming
1.1.1.1	x	x	x	x	x			-		-			x	x	x	x	x	x	x
1.1.1.2	x		x	x	x			-		-			x	x				x	x
1.1.2.1		x	x	x	x			-	x	x			x	x	x	x	x	x	x
1.1.2.2			x	x	x			-	x				x	x				x	x
1.2.2.1		x	x			x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x
1.2.2.2			x			x	x	x			x	x	x	x				x	x
2.1.1.1	x	x		x				-		-					x	x	x	x	x
2.1.2.1		x		x				-	x	x					x	x	x	x	x
2.2.2.1		x		x		x	x	x			x	x			x	x	x	x	x

Tabell 7.5: Forklaring av begrepene i vurderingsmatrisen

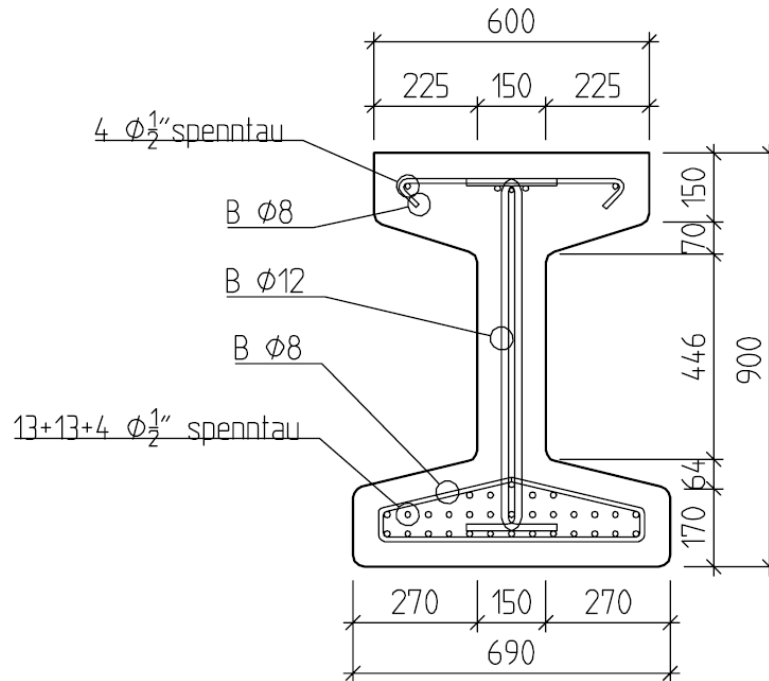
Koding	Begrepsforklaring
a	Respondentene i undersøkelsen mente at denne typen broer hadde størst potensiale for industrialisering
b	Kartleggingen av broer på firefelts vei viste at det var et potensiale for denne løsningen
c	Løsningen kan produseres i eksisterende betongelementfabrikker
d	Broer i linjen har redusert påkjenning fra påkjørsel og kan dermed ha mellomrom mellom bjelker for å muliggjøre inspeksjon og eventuelt vedlikehold
e	Broer i linjen kan ha reduserte estetiske krav
f	Gode muligheter for tilpasning av terrenget til broen
g	Gode muligheter for tilpasning av veilinjen til broen
h	Kjent søyletilpassing, søyleplasseringen bestemmes av underliggende vei
i	Lengre total lengde gir større sannsynlighet for horisontalkurvatur
j	Terreng og grunnforhold under broen samsvarer nødvendigvis ikke med normert søyleplassering
k	Broen blir veldig synlig og det må legges særlig vekt på estetikk
l	Terrengbearbeiding i kryssområder blir særlig synlig. Må hensyntas
m	Redusert byggetid på anleggsplassen på grunn av parallell produksjon
n	Elementer kan føre til enklere utskifting ved skader/repasasjon
o	Normerte broer kan være preakseptert og gi raskere godkjenning hos Vegdirektoratet
p	For å kunne være robust til bruk flere steder vil broen være overdimensjonert i de fleste tilfeller
q	Terrenget må tilpasses broens begrensninger
r	Veilinjen må tilpasses broens begrensninger
s	Frihet i utforming er begrenset på grunn av normering og/eller prefabrikking

7.6 Effekt av stedsavhengige laster på lastsituasjonen

For å gi et bilde av hvordan de stedlige lastene påvirker lastsituasjonen til standardiserte broer ble en representativ bro valgt. Deretter er representative laster bestemt, her legges det størst vekt på de stedsavhengige lastene. Effekten av vind som stedsavhengig last vurderes ut fra momentbidraget i bruddgrensetilstand. Seismiske påkjenninger er behandlet i kapittel 7.6.5 *Seismiske laster* og danner grunnlag for en sammenligning med andre laster i de horisontale retningene.

7.6.1 Valg av representativt brosystem og broutforming for standardiserte broer

Brosystemet i oppgaven er basert på den tidligere preaksepterte MOT-broen. MOT-broen anses som representativ for prefabrikkerte broer, siden denne bjelken er den siste preaksepterte broelementbjelken fra Statens vegvesen. Lengden på broen er satt til 18 meter, på bakgrunn av resultatene fra Figur 7.9 som viser at mange av broene i linjen er gruppert rundt 18 meter. Broen har bredde på 12,6 meter, derav 11 meter er fri veibane i henhold til valgene tatt i 7.4 *Veigeometriens påvirkning på broers overordnede dimensjoner*. Disse dimensjonene vil gjøre broen brukbar for horisontalradius ned til 1750 meter. Broen er bygget opp av ni spennarmerte MOT900-bjelker, med tilstrekkelig senteravstand for å sikre inspeksjonsmuligheter, 1,5 meter mellom alle bjelkene utenom ytterbjelkene der senteravstanden var 1,3 meter. Ytre dimensjoner er bestemt etter håndboken for elementbruer, men endret noe for å ta hensyn til økte overdekningskrav. På grunn av dagens økte lastpåkjenninger og overdekningskrav, er det valgt å bruke et tverrsnitt med høyere kapasitet enn håndboken for elementbruer anbefaler, se Figur 3.3. Tverrsnittet er ikke dimensjonert, men antas å ha tilstrekkelig kapasitet, se Figur 7.27.



Figur 7.27: Oppdatert MOT 900

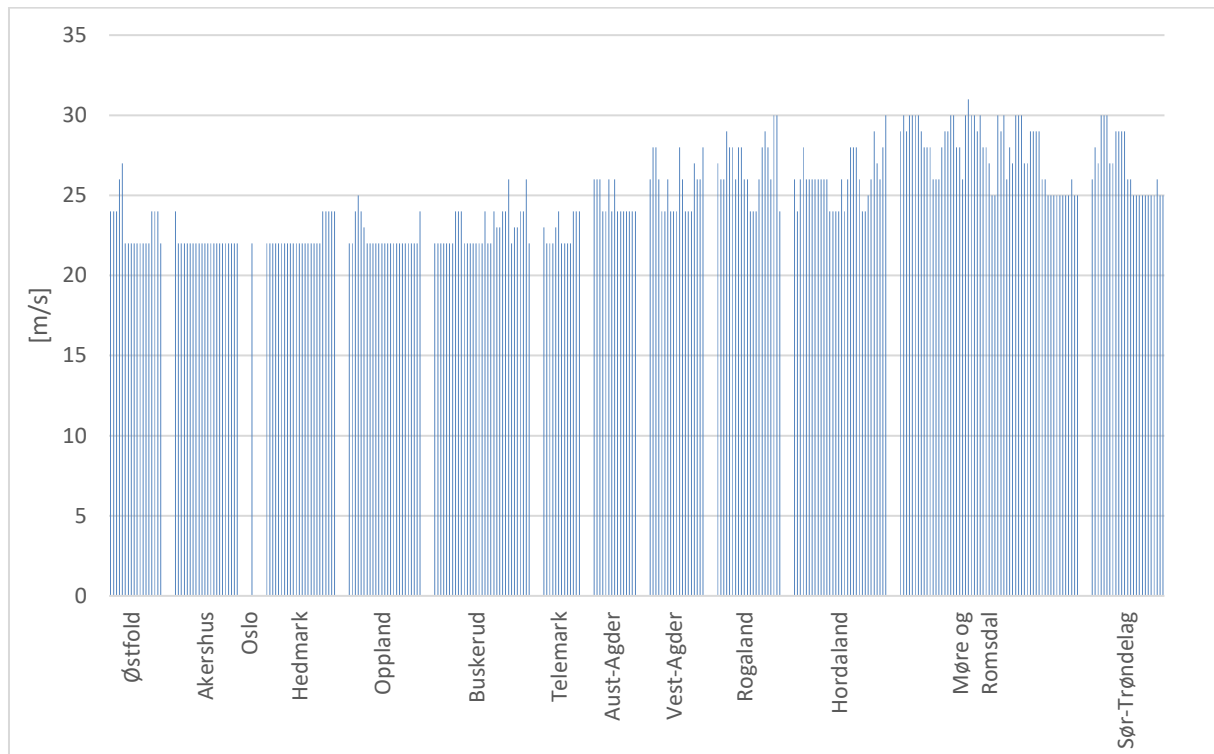
7.6.2 Snølast og termisk påvirkning

Snølast skal som nevnt i metodekapittelet ikke kombineres med øvrige laster i ferdig situasjon. Derfor er ikke snølast medregnet i den videre lastsammenligningen.

På en fritt opplagt bro, som er tilfelle i denne analysen, vil termiske laster kun ha effekt på krumning og lengdeutvidelse i bruksgrensetilstand. Bidrag fra termiske laster er derfor ikke medregnet i den videre lastsammenligningen.

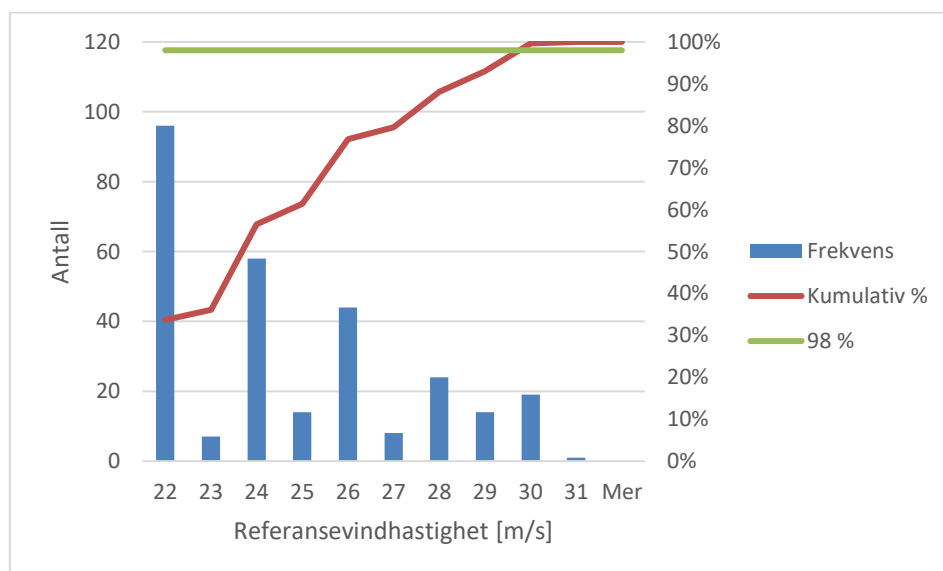
7.6.3 Vindlaster

Figur 7.28 viser at vindlasten i Norge varierer både på fylkesnivå og kommunenivå. Vindlastene er hentet fra *NS-EN 1991-4* [58].



Figur 7.28: Referansevindhastigheten for de aktuelle kommunene, sortert etter fylker

Figur 7.29 viser et histogram over referansevindhastigheten i de aktuelle kommunene etter *NS-EN 1991-4* [58]. Figuren viser i tillegg 98. prosentil. Vindhastigheten for 98. prosentil er 30 m/s for påvirkningskategorien *sannsynlig*. Minste referansevindhastighet er 22 m/s og maksimale er 31 m/s.



Figur 7.29: Histogram over referansevindhastighet i de aktuelle kommunene

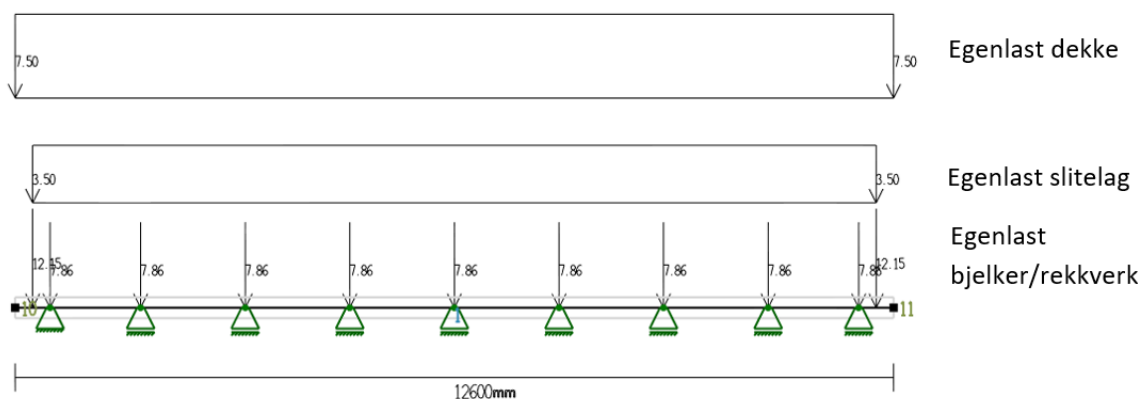
Karakteristiske vindlaster i z-retning for påvirkningskategoriene bestemt i denne oppgaven er gitt i Tabell 7.6. Verdier for krefter i x- og y-retning er gitt i 12.3.1 *Laster påført konstruksjonen fra MathCad*.

Tabell 7.6: Karakteristiske vindlaster i z-retning for de tre påvirkningskategoriene i oppgaven

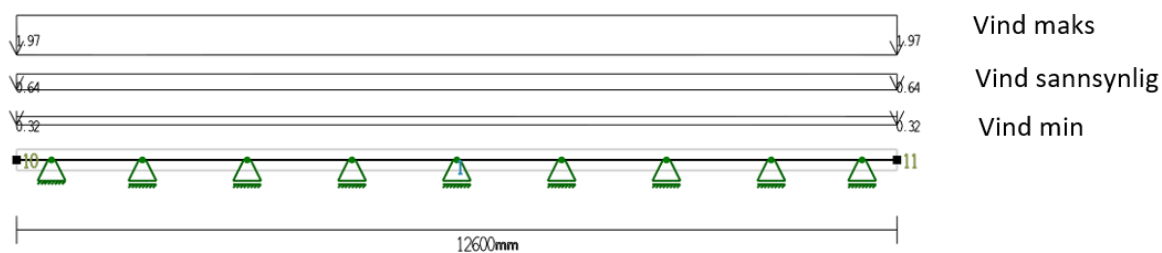
Påvirkningskategori	Referansevindhastighet [m/s]	Terrengkategori	Høyde over terreng [m]	$F_{w,z}$ [kN]
Minimum	22	0	<10	72,3
Sannsynlig	30	II	10	145,1
Maksimum	31	IV	30	447,5

7.6.4 Dimensjonerende momenter i lengderetning

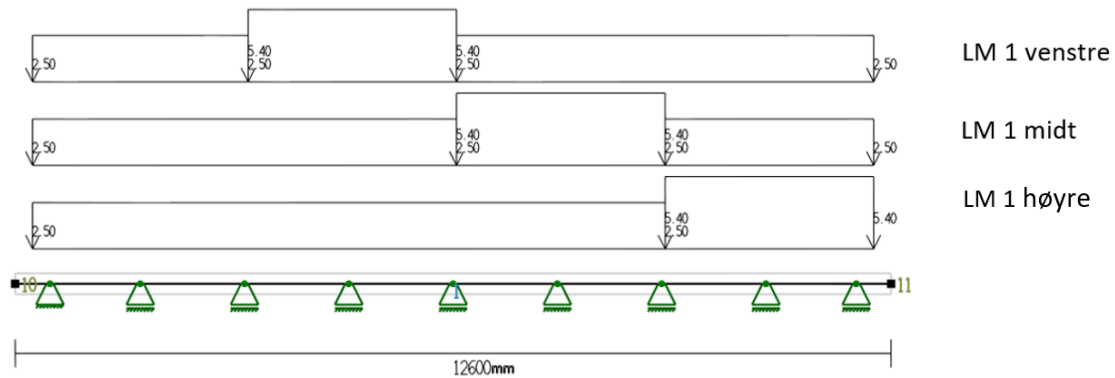
Lastsituasjonen ble modellert i tverretning og lengderetning i Focus Konstruksjon. Egenlaster, vindlaster (minimum, maksimum og sannsynlig) og jevnt fordelt trafikklaster (LM1) ble påført i tverretning, se Figur 7.30 til Figur 7.32.



Figur 7.30: Egenlaster modellert i Focus Konstruksjon

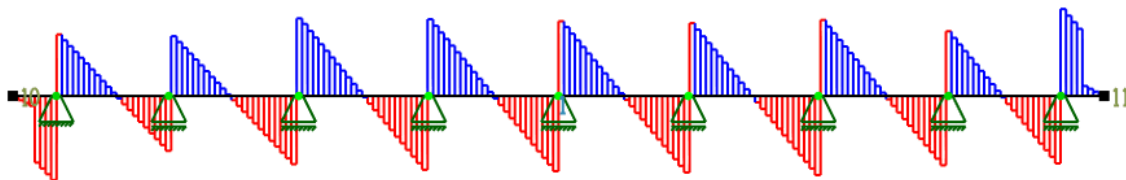


Figur 7.31: Vindlaster modellert i Focus Konstruksjon



Figur 7.32: Alternative plasseringer av trafikklast LM 1 modellert i Focus Konstruksjon

Opplagerkreftene for hvert lasttilfelle ble hentet ut ved utskrift av analysen. Det viste seg at dimensjonerende bjelke var ytterbjelkene med trafikklasten plassert til høyre som angitt i Figur 7.32. En utskrift av dekkestripens skjærdiagram er vist i Figur 7.33 og karakteristiske laster på ytterbjelke er vist i Tabell 7.7.



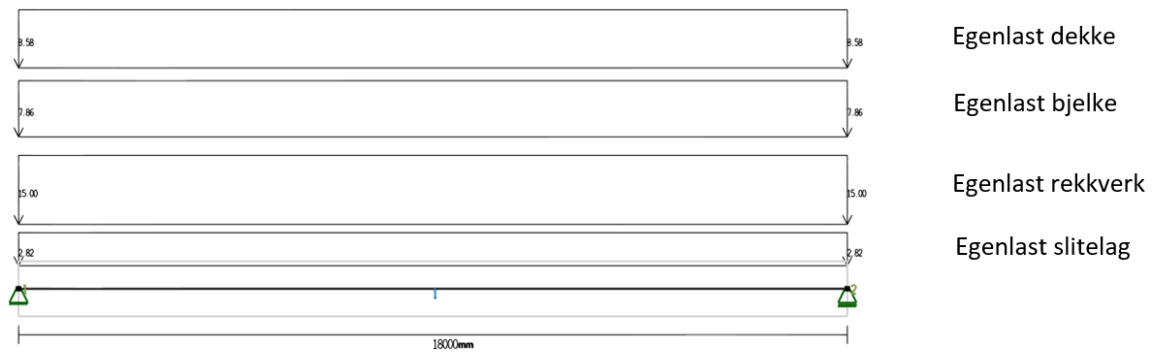
Figur 7.33: Skjærdiagram for dekkestripe fra Focus Konstruksjon

Opplagerkreftene som oppstod på grunn av disse lastene ble fordelt på ytterbjelkene i lengderetning som linjelaster.

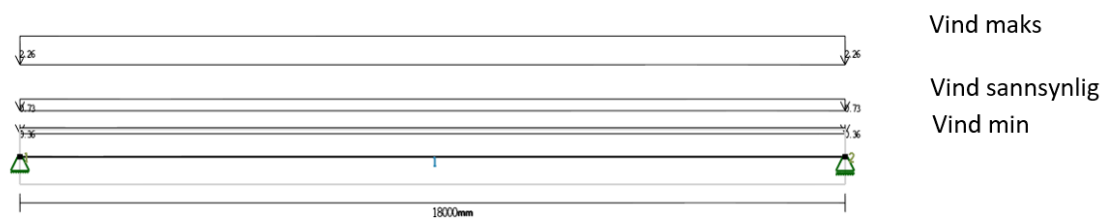
Tabell 7.7: Opplagerkrefter for karakteristiske laster fra Focus Konstruksjon.

Laster	Opplagerkrefter	Opplagerkrefter	Opplagerkrefter
	$m/\text{min vindlast}$	$m/\text{sann vindlast}$	$m/\text{maks vindlast}$
	[kN]	[kN]	[kN]
Egenlast dekke	8,58	8,58	8,58
Egenlast bjelke	7,86	7,86	7,86
Egenlast rekkverk	15	15	15
Egenlast slitelag	2,82	2,82	2,82
Vindlast minimum	0,36	-	-
Vindlast sannsynlig	-	0,73	-
Vindlast maksimal	-	-	2,26
Lastmodell 1	4,31	4,31	4,31

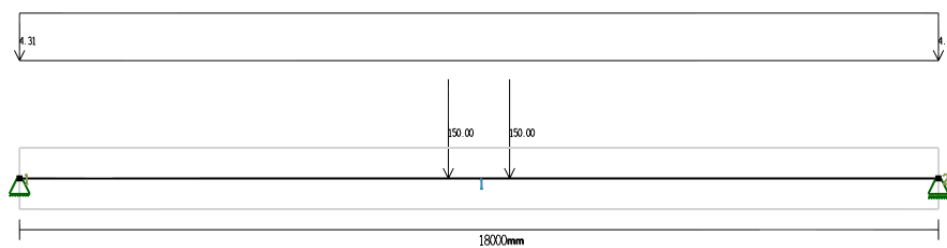
Figur 7.34 til Figur 7.37 viser hvordan opplagerkreftene fra beregning av dekkestripe ble fordelt på ytterbjelken. I tillegg vises punktlaster tilhørende LM 1 og LM 2 som ble plassert midt i spennet, da dette gir størst momentbelastning på bjelken.



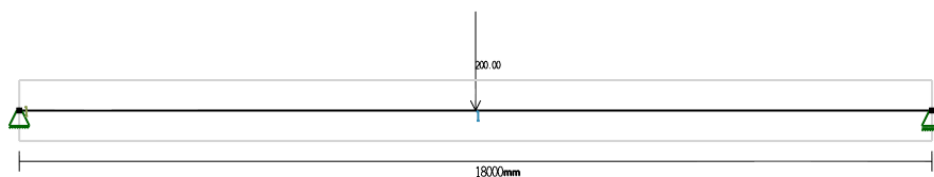
Figur 7.34: Egenlaster på ytterbjelke som modellert i Focus Konstruksjon



Figur 7.35: Vindlast på ytterbjelke som modellert i Focus Konstruksjon



Figur 7.36: LM 1 på ytterbjelke som modellert i Focus Konstruksjon



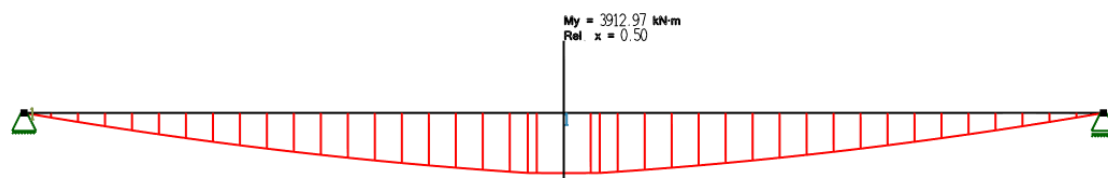
Figur 7.37: LM 2 på ytterbjelke som modellert i Focus Konstruksjon

Dimensjonerende lastsituasjon i bruddgrensetilstand ble ligning 6.10 b med trafikklast som dominerende last. Se 12.3.5 *Lastkombinasjon og momentberegning for maksimum vindlast* for de andre lastkombinasjonene. Tabell 7.8 viser maksimalt moment for de ulike påvirkningskategoriene for vind.

Tabell 7.8: Dimensjonerende moment for de ulike påvirkningskategoriene for vind

Laster	Lastfaktor	Moment m / minimum vindlast	Moment m / sannsynlig vindlast	Moment m / maksimal vindlast
		[kNm]	[kNm]	[kNm]
Egenvekt	1,2	1665,0	1665,0	1665,0
gr1a Jevnt fordelt last	1,5	261,8	261,8	261,8
gr1a Boggilast	1,5	1890,0	1890,0	1890,0
Vind minimum	1,05	15,3	0,0	0,0
Vind sannsynlig	1,05	0,0	31,0	0,0
Vind maksimum	1,05	0,0	0,0	96,1
Maksimalt moment		3832,2	3847,9	3913,0

Figur 7.38 viser momentdiagrammet i lengderetning for maksimal vindlast fra Focus Konstruksjon.



Figur 7.38: Momentdiagram i bruddgrense for ytterbjelke med maksimal vindlast fra Focus Konstruksjon

7.6.5 Seismiske laster

Stedlige parametere og seismisk klasse

En bro på firefelts motorvei med total lengde 18 meter plasseres i seismisk klasse II eller IV, avhengig av hvordan man anvender fotnote a) i Tabell NA.2(901) *NS-EN 1998-2* [62]. Dersom broen blir ansett som samfunnsviktig skal den plasseres i klasse IV. Hvorvidt broen er samfunnsviktig eller ikke kan bli en diskusjon med byggherren [62]. Dette valget vil kunne få store konsekvenser for dimensjoneringsjobben ettersom man fort ender opp med å anvende dimensjoneringsregler i henhold til *NS-EN 1998-1* og 2. Dette gjør prosjekteringen mer omfattende.

Dersom broen plasseres i seismisk klasse IV settes seismisk faktor, γ , til 2.0. I følge *NS-EN 1998-1* NA.3.2.1(5) [61], må det gjøres en kontroll av jordskjelvpåvirkning og motstand. Etter ligning (6.3) og (6.4) blir dimensjonerende akselerasjon

$$a_g = 2.0 \cdot 0.8 \cdot a_{g40Hz}. \quad (7.1)$$

NS-EN 1998-1 Figur NA.3(901) og (902) viser stor variasjon i spissverdien for berggrunnakselerasjonen. I beregningene er det benyttet varierende a_{g40Hz} fra 0,1 m/s^2 til 0,9 m/s^2 , med intervaller på 0,1 m/s^2 . Verdier for a_g er vist i Tabell 7.9 [61].

Tabell 7.9: Verdier for a_g benyttet i analyse

$a_g [m/s^2]$	$a_{g40Hz} [m/s^2]$
0,1	0,16
0,2	0,32
0,3	0,48
0,4	0,64
0,5	0,8
0,6	0,96
0,7	1,12
0,8	1,28
0,9	1,44

Kravet som regulerer hvorvidt konstruksjonen kan dimensjoneres med antagelse om lav seismisitet er gitt i ligning (6.5). I analysen er det forutsatt at alle grunntypene fra A til E i *NS-EN 1998-1* Tabell NA.3.1 og 3.3 kan forekomme over alt. Dette betyr at produktet $a_g S$ varierer fra $0,16 \text{ m/s}^2$ til $2,376 \text{ m/s}^2$, se Tabell 7.10 [61].

Tabell 7.10: Oversikt over produktet $a_g S$ som funksjon av referansespissverdi for berggrunnens akselerasjon og grunntype med seismisk faktor lik 2,0

$a_g [m/s^2]/S$	1	1,3	1,4	1,55	1,65
0,16	0,16	0,208	0,224	0,248	0,264
0,32	0,32	0,416	0,448	0,496	0,528
0,48	0,48	0,624	0,672	0,744	0,792
0,64	0,64	0,832	0,896	0,992	1,056
0,8	0,8	1,04	1,12	1,24	1,32
0,96	0,96	1,248	1,344	1,488	1,584
1,12	1,12	1,456	1,568	1,736	1,848
1,28	1,28	1,664	1,792	1,984	2,112
1,44	1,44	1,872	2,016	2,232	2,376

Kravet for å dimensjonere konstruksjonen kun etter *NS-EN 1992-1* er at $a_g S$ må være mindre enn $0,98 \text{ m/s}^2$ [61]. Som man ser fra tabellen kan dette kun gjøres for 19 av de totalt 45 kombinasjonene. En bro som skal kunne brukes over store deler av landet bør kunne brukes stort sett over alt. I dimensjoneringen står man da overfor tre alternativer:

- Å dimensjonere broen etter *NS-EN 1992-1* for de tilfeller $a_g S$ er mindre enn $0,98 \text{ m/s}^2$ og akseptere et begrenset bruksområde
- Å dimensjonere broen etter *NS-EN 1992-1* med tilhørende tilleggsbestemmelser i *NS-EN 1998*
- Å revurdere valget av seismisk klasse på bakgrunn av redundans

I denne oppgaven er det valgt å forfølge det siste alternativet over for å se hvordan dette vil påvirke belastningen på broen.

Valget av seismisk klasse avhenger av samfunns viktighet, det vil si hvor kritisk broen er for samfunnet. Argumentet for å dimensjonere en standardisert motorveibro med utgangspunkt i

seismisk klasse IV er at broen mest sannsynlig vil ligge på en vei som binder sammen regioner, dette nevnes som et kriterium for å plassere broen i klasse IV. Det som taler mot å plassere broen i klasse IV er at broene skal plasseres parvis. Dersom man definerer de to broene som ett system vil de sammen utgjøre et parallelt system. I en ulykkessituasjon der den ene broen blir ubrukelig vil den andre kunne fungere som omkjøringsvei. Sannsynligheten for at begge broene feiler i den dimensjonerende situasjonen og det tilhørende pålitelighetsnivået kan regnes ut nøyaktig i henhold til *NS-EN 1990, Tillegg C*, men dette er ikke utforsket videre i denne oppgaven [56]. Vi mener det er rimelig å påstå at et parallelt system av to komponenter der hver komponent er dimensjonert for en ulykkessituasjon har tilstrekkelig pålitelighet og at dette kan dokumenteres ved en senere anledning. I det videre forutsettes dermed seismisk klasse II.

Med seismisk klasse II blir seismisk faktor γ_i lik 1,0 og resultatet av ligning (6.3) og (6.4) blir

$$a_g = 1.0 \cdot 0.8 \cdot a_{g40Hz}. \quad (7.2)$$

Innholdet i Tabell 7.10 endres til Tabell 7.11.

Tabell 7.11: Oversikt over produktet $a_g S$ som funksjon av referansespissverdi for berggrunnens akselerasjon og grunntype med seismisk faktor lik 1,0

$a_g [m/s^2]/S$	1	1,3	1,4	1,55	1,65
0,08	0,08	0,104	0,112	0,124	0,132
0,16	0,16	0,208	0,224	0,248	0,264
0,24	0,24	0,312	0,336	0,372	0,396
0,32	0,32	0,416	0,448	0,496	0,528
0,4	0,4	0,52	0,56	0,62	0,66
0,48	0,48	0,624	0,672	0,744	0,792
0,56	0,56	0,728	0,784	0,868	0,924
0,64	0,64	0,832	0,896	0,992	1,056
0,72	0,72	0,936	1,008	1,116	1,188

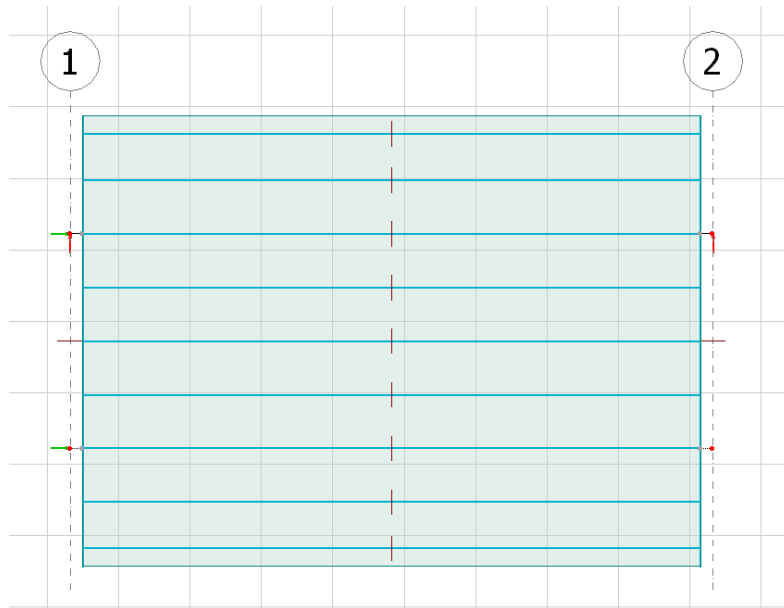
Som det fremgår av Tabell 7.11 er produktet $a_g S$ i de aller fleste kombinasjonene mindre enn 0,98 m/s^2 . Dette vil gi broen et utbredt bruksområde både hva gjelder grunnforhold og stedlig, seismisk, akselerasjon.

NS-EN 1998-2 Tabell NA.2(904) stiller krav om analysemetode basert på seismisk klasse og produktet $a_g S$ [62]. Broen i denne analysen kan analyseres med forenklet metode med én frihetsgrad, men det er likevel gjort en modalanalyse i FEM-Design 3D for å hente ut realistiske krefter til sammenligning med øvrige horisontale krefter. For å kunne sammenligne lastpåvirkningene direkte er det valgt en konstruksjonsfaktor, q , lik 1,5.

FEM-Analyse

Broen er modellert som skissert i 7.6.4, med ni oppdaterte MOT 900 bjelker med en spennvidde på 18 meter. I hver akse samles bjelkene av en endetverrbjelke $b \times h = 700 \times 1200$ for å oppfylle gjeldende krav til lager i hver akse. Et plasstøpt dekke med tykkelse 300 mm er modellert oppå bjelkene og det forutsettes i modellen at bjelker og dekke har fullt samvirke. Dekket er modellert

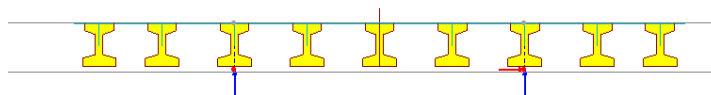
som et skallelement, mens bjelkene er modellert som bjelkeelementer, se Figur 7.39, Figur 7.40 og Figur 7.41.



Figur 7.39: 3D-modell for seismisk dimensjonering, plan



Figur 7.40: 3D-modell for seismisk dimensjonering, lengdesnitt



Figur 7.41: 3D-modell for seismisk dimensjonering, tverrsnitt

Endetverrbjelken og dekket er modellert som B45 med fasthetsparametere fra *NS-EN-1992-1* [57]. MOT-bjelkene er modellert som B55 med modifisert E-modul. I litteraturen ser det ut til å være uenighet vedrørende effekten spennarmering har på egenfrekvenser, jfr teorikapittel i denne rapporten. Det er derimot liten tvil om at stivheten av betongbjelker med spennarmering avhenger av mengden spennarmering. Dette er hensyntatt i modelleringen med en modifisert E-modul som representerer stivhetsbidraget fra både betong og spennkabler. E_{cm} er derfor satt til 39719 MPa for MOT-bjelkene, se vedlegg 12.3.6 *Stivheter fra MathCad* for beregning av effektiv E-modul. Dette vil øke broens stivhet om y-aksen og følgelig heve egenfrekvensen i samme retning.

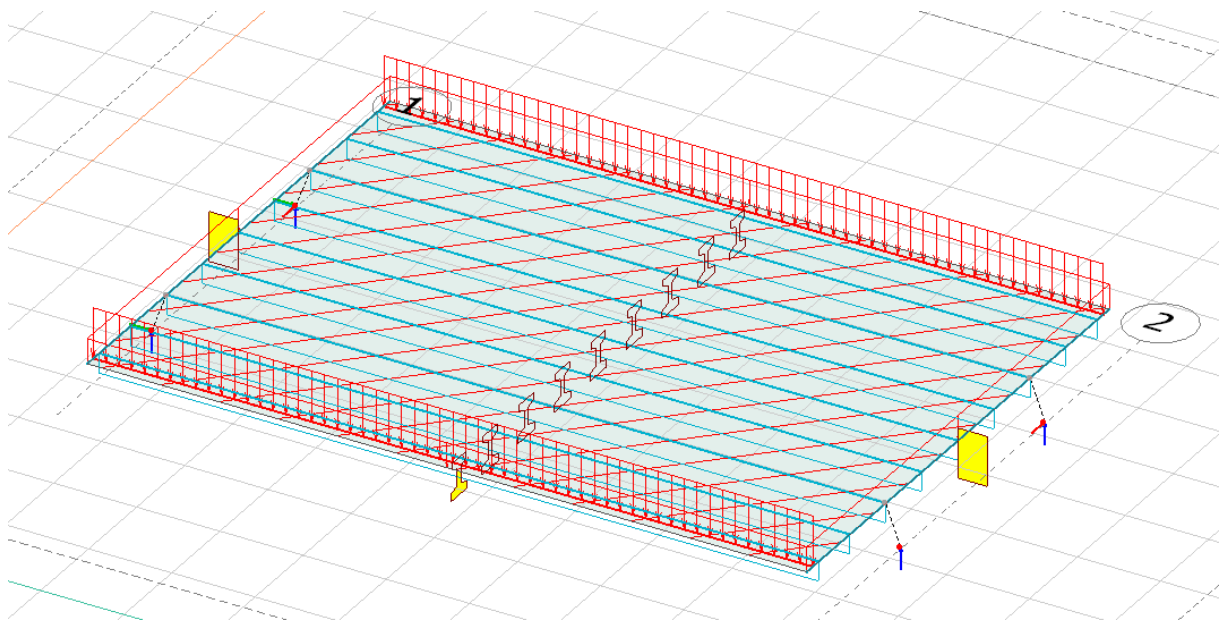
Som nevnt er det modellert to lagre i hver akse, totalt fire lagre. Alle oppleggspunkt har fastholding i z-retning. I akse 1 er begge lagre fastholdt i x-retning (broens lengdeakse) og ett fastholdt i y-retning (broens tverretning). I akse 2 er det ene lageret fastholdt i y-retning. Det ville vært uendelig mange måter å fastholde broen i de to horisontale retningene, men ettersom broens dominerende

svingeformer først og fremst er vertikale svingeformer, vurderes det at modelleringen av den horisontale fastholdingen er tilstrekkelig nøyaktig.

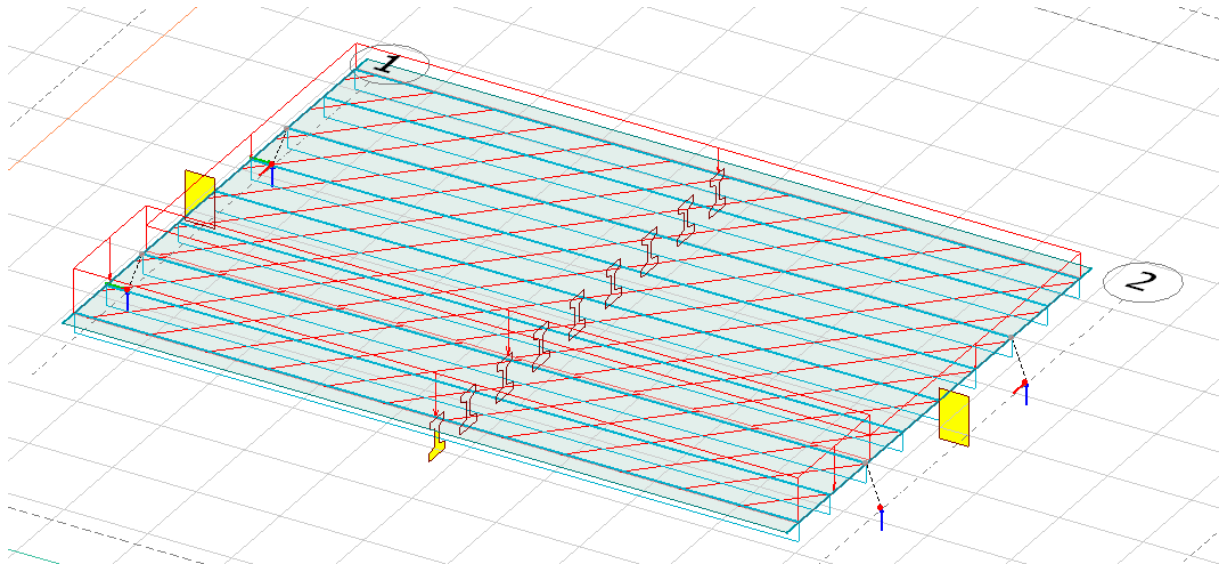
Lasttilfellene i modellen er beskrevet i Tabell 7.12 og prinsipielt vist i Figur 7.42 og Figur 7.43.

Tabell 7.12: Modellerte laster for seismisk dimensjonering

Lasttilfelle	Opprinnelse	Type	Utbredelse	Intensitet [kN/m, kN/m ²]
AutoEgenvekt	Konstruksjonsdeler	Flatelast	Automatisk	Automatisk
Påført Egenvekt	Slitelag	Flatelast	Hele dekket	3,0
	Rekkverk	Linjelast	Langs kant, 250 mm fra ytterkant, begge sider	12,15
Trafikklast	Trafikk, LM1	Flatelast	Hele bro lengden, 11,7 meter av bredden, symmetrisk. Ytterste 3 meter økte intensitet	3,0/5,4



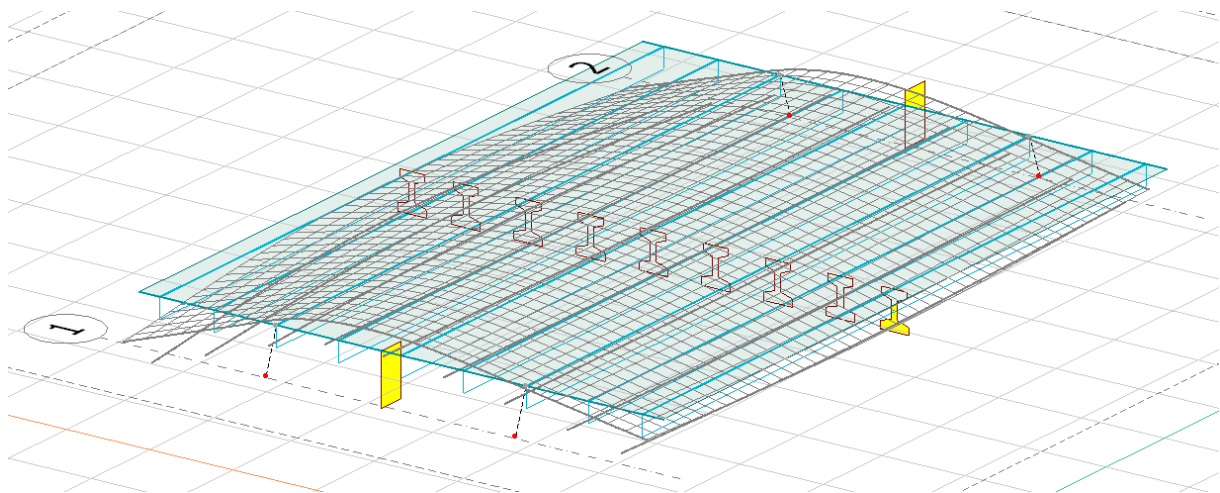
Figur 7.42: Lasttilfelle "Påført egenvekt" fra FEM-modell



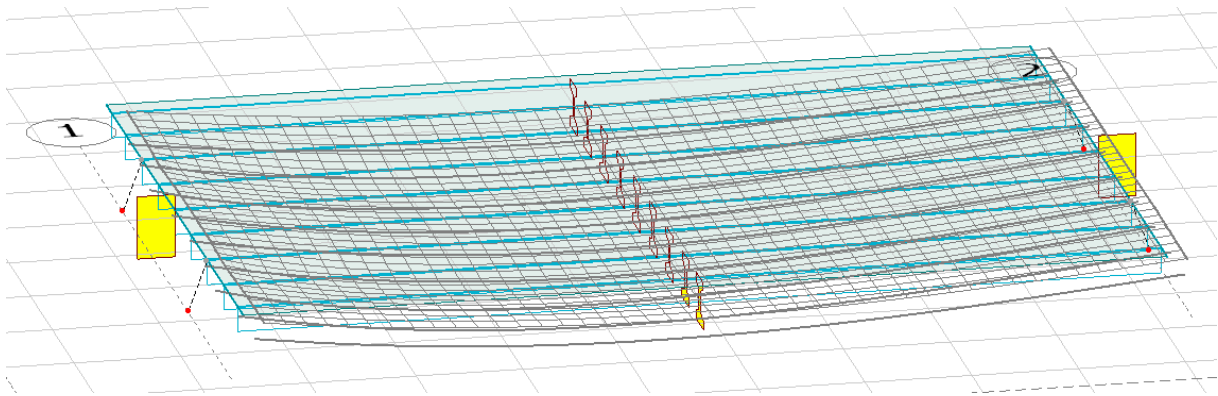
Figur 7.43: Lasttilfelle «LM 1» i FEM-modell

Andelen av totale masser som skal antas å virke i en jordskjelvsituasjon bestemmes i henhold til *NS-EN 1998-2* 4.1.2 (3) og Tabell NA.4(901) [62]. All egenvekt og 20 % av den jevnt fordelte lasten i LM 1 skal regnes å virke i den seismiske situasjonen.

De dominerende svingeformene for broen kan ses i Figur 7.44 og Figur 7.45.



Figur 7.44: Første svingeform, $f = 12,998\text{Hz}$, 98,4 % medsvingende masse i y -retning



Figur 7.45: Andre svingeform, $f = 15,610$ Hz, 99,7 % medsvingende masse i x-retning

Etter *NS-EN 1998-1* 4.3.3.3.1 (3) skal modalanalysen baseres på svingeformer som inkluderer minst 90 % av konstruksjonens masse i hver retning [61]. Ved å inkludere disse svingeformene i hver sin retning i den seismiske analysen er dette kravet dekket, og den seismiske analysen ble derfor gjort basert kun på de to viste svingeformene. De to svingeformene generer krefter i hver sin retning og det er derfor ikke aktuelt å kombinere bidraget fra hver svingeform i hver retning. Svarene fra den seismiske analysen er derfor gitt som lastpåvirkninger i to retninger og kan ses i Tabell 7.13 og Tabell 7.14.

Tabell 7.13: Ekvivalente krefter på broen i y-retning (tverretning) som funksjon av spissverdien av berggrunnens akselerasjon og grunntype, [kN]

Grunntype	a_g [m/s ²]								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
A	54,2	108	163	217	271	325	380	434	488
B	70,4	141	211	282	352	423	493	564	634
C	75,9	152	228	304	379	455	531	607	683
D	69	138	207	276	345	414	483	552	621
E	89,4	179	268	358	447	537	626	716	805

Tabell 7.14: Ekvivalente krefter på broen i x-retning (lengderetning) som funksjon av spissverdien av berggrunnens akselerasjon og grunntype, [kN]

Grunntype	a_g [m/s ²]								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
A	50	100	150	200	250	300	350	400	450
B	65,1	130,2	195,3	260,4	325,6	390,7	455,8	520,9	586
C	70,1	140,2	210,3	280,4	350,6	420,7	490,8	560,9	631
D	64,9	129,8	194,7	259,56	324,4	389,3	454,2	519,1	584
E	82,6	165,1	247,7	330,2	412,8	495,3	577,9	660,4	743

7.6.6 Bremse- og akselerasjonslast

Bremse- og akselerasjonslast er bestemt etter *NS-EN 1991-2* og ligning (6.6) i oppgaven [64].

Karakteristisk verdi for lasten er vist i Tabell 7.15. Utregning for lasten kan finnes i vedlegg 12.3.1

Laster påført konstruksjonen fra MathCad.

Tabell 7.15: Horisontalkraft fra akselerasjon- og bremsekrefter på brooverbygningen

Last	Karakteristisk horisontalkraft
Bremse- og akselerasjonslast	389,2 kN

7.6.7 Påkjørselslast

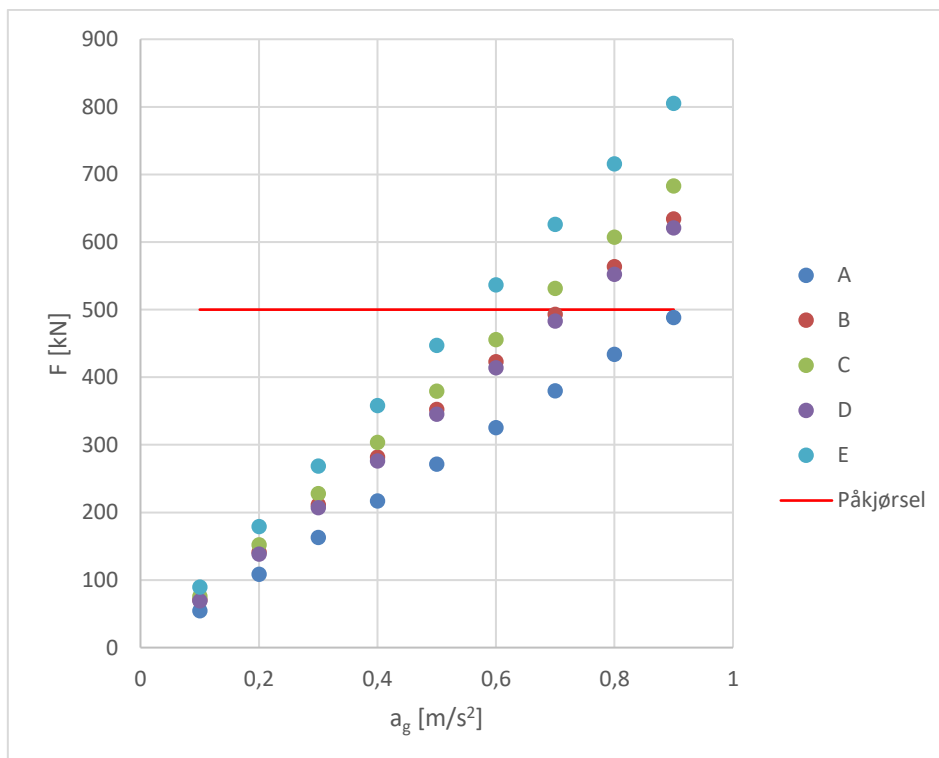
Påkjørsel fra kjøretøy på brooverbygning eller bærende underbygning er bestemt etter *NS-EN 1991-1-7* [65]. Verdier for dimensjonerende støtkraft fra kjøretøy er gitt i Tabell 7.16.

Tabell 7.16: Påkjørselslast på brooverbygningen

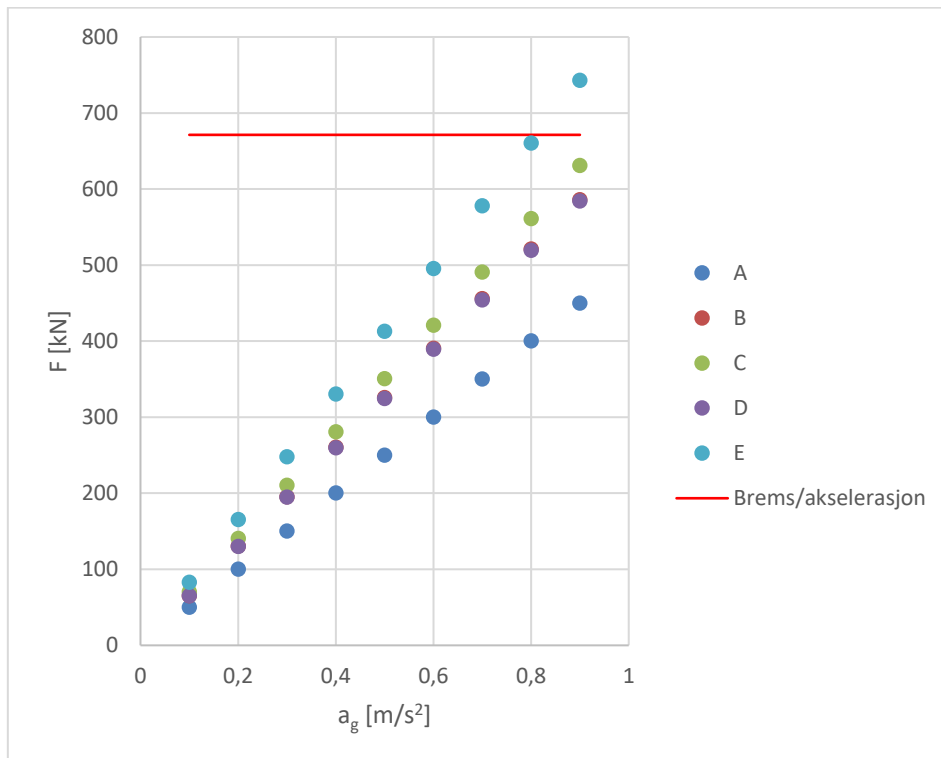
Last	Ekvivalent statisk dimensjonerende kraft
Påkjørselslast på overbygning	500 kN

7.6.8 Sammenligning av horisontale krefter

Under vises en sammenligning av karakteristiske seismiske krefter i y-retning (tverretning) og karakteristisk påkjørselslast (Figur 7.46) og karakteristiske seismiske krefter i x-retning (lengderetning) og dimensjonerende bremse- akselerasjonskraft (Figur 7.47).



Figur 7.46: Sammenligning av påkjørsel og seismisk last etter grunntype og berggrunnens akselerasjon, begge laster karakteristiske verdier



Figur 7.47: Sammenligning av seismisk last og bremse-/ akselerasjonskrefter etter grunntype og berggrunnens akselerasjon. Karakteristisk seismisk last, bremselast multiplisert med 1,725

8 Diskusjon

I de følgende underkapitlene diskuteres resultatene i lys av teorien og i lys av hverandre.

8.1 Kartlegging av eksisterende broer og kulverter på nasjonale hovedveier

8.1.1 Kulverter

Figur 7.2 viser fordelingen mellom kulverter og broer som ble registrert i kartleggingen av dagens brosituasjon. Som figuren viser utgjør kulverter om lag en tredjedel av alle registrerte krysninger. Sett i sammenheng med Figur 7.1 er det nærliggende å tro at flertallet av de korte krysningene er gjort med kulverter. Fra de to figurene kan man trekke en slutning om at det innenfor et nokså begrenset lengdeintervall benyttes svært mange kulverter. I en standardiseringsammenheng er dette interessant, da man vil kunne dekke et stort behov med relativt få varianter. I Figur 7.3 er fordelingen av kulvertlengder vist. Som figuren viser er over 70 prosent av kulvertene på eksisterende vei mellom 3,5 og 8 meter lange. Inndelingen av lengdeintervallene i figuren er ikke tilfeldig, men basert på Statens vegvesens og Betongelementforeningens nye standardiserte, prefabrickerte kulverter. Gjennom registreringer i BRUTUS var det i mange tilfeller mangelfull informasjon om produksjonsmetode for både kulverter og broer. Derfor er det vanskelig å tallfeste hvor mange av dagens kulverter som er plasstøpt eller prefabrickerte, men i løpet av registreringen fikk vi inntrykk av at majoriteten av kulvertene var utført med plasstøpt betong. Gjennom intervjuene fikk vi inntrykk av at den erfaringen respondentene hadde med prefabrickering i veibygging stort sett begrenset seg til kulverter. Noen av respondentene i intervjuene hadde allerede tatt i bruk de nye kulvertene i sine prosjekter. Det var kun én av respondentene som ga innsikt i den faktiske prisforskjellen mellom plasstøpte og prefabrickerte kulverter. Han kunne fortelle at i et prosjekt der prefabrickerte og plasstøpte kulverter ble produsert parallelt, var prisen halvert for de prefabrickerte kulvertene.

8.1.2 Byggemateriale og kompetanse

En av forutsetningene i denne oppgaven var å forsøke å optimalisere eller standardisere allerede kjente produksjonsmetoder. For å oppnå dette er det hensiktsmessig å få kartlagt hvilket materiale som er det dominerende for bæresystemene i eksisterende broer. Figur 7.4 viser at betong er nærmest enerådende som materiale i bæresystemene. Dette er på ingen måte oppsiktsvekkende, men snarere en bekreftelse på inntrykket vi satt med ved starten av oppgaven. At en så stor andel av dagens broer er utført i betong gir grunn til å tro at det etter hvert er opparbeidet svært mye kompetanse på betongkonstruksjoner, både hos rådgivere og entreprenører. For å dra nytte av dette tror forfatterne at det er hensiktsmessig å effektivisere bruken av betong ytterligere, fremfor å radikalt endre bransjens tradisjoner gjennom å bruke andre materialer. Tankegangen med å standardisere eller prefabrickere betong til bruk i brobygging er ikke ny. Siden 1960-tallet har det i Norge eksistert kompetanse på bruken av betongelementer i brobygging. Dette manifesterte seg i flere håndbøker som beskrev både standardiserte plasstøpte broer og standardiserte prefabrickerte broelementer.

8.1.3 Broer

Figur 7.5 viser ferdigstillelsesåret for broene på de registrerte strekningene. Som figuren viser er de fleste broene i drift på veiene i dag ferdigstilt etter 1960. Det kan være flere årsaker til dette. Én av årsakene kan være at utbyggingen av motorvei i Norge begynte på 1960-tallet. Det er nærliggende å tro at traseen for de nye motorveiene da ble lagt utenom eksisterende riksveinett, uten at vi har

noen klare kilder på dette. En annen årsak kan være at mange av broene fra før 1960 er revet og erstattet med nye broer, eventuelt oppgradert til ny standard og dermed faller utenfor registreringen. Figuren viser også at det fremdeles er mange broer i drift som ble bygget mellom 1960 og 1990. I perioden fra 1960-tallet til midt på 1980-tallet anga standardverket svært lave krav til overdekning og det er grunn til å forvente at en viss andel av disse broene vil måtte rehabiliteres eller skiftes ut i relativt nær fremtid.

Den relativt store andelen broer som ble ferdigstilt mellom 2000 og 2010 er et resultat av en intensivert veiutbygging i denne perioden og mange av disse broene er eldre broer som ble bygget på i forbindelse med ny utbygging. Den siste søylen i Figur 7.5 indikerer at det i perioden 2010 til 2020 vil bli bygget langt færre broer enn i foregående tiårsperiode. Dersom antallet per april 2017 ekstrapoleres til 2020 vil det i denne perioden bli bygget færre broer enn i noen tiårsperiode siden før 1960-tallet. Det er likevel grunn til å tro at tallene lyver noe. Én årsak til den tilsynelatende nedgangen kan være at det i forrige tiårsperiode ble ferdigstilt svært mange broer på de registrerte strekningene og at behovet for nybygg og oppgradering på strekningene i noen grad er dekket. I tillegg er det for tiden flere delstrekninger under utbygging som vil bidra til å øke antallet ferdigstilte broer. Registreringen i BRUTUS kan også være forsinket, da dette legges inn manuelt.

Figur 7.6 og Figur 7.7 viser henholdsvis antall og andel av broer og kulverter med gitt total lengde fordelt etter byggeår (registrert ferdigstillelse). Fordelingen før 1960 og etter 2010 er mindre interessant ettersom det er svært få krysninger i drift fra før 1960 og perioden 2010-2020 er enda ikke ferdig bygget ut og registrert. I de øvrige periodene kan man merke seg at både andelen og antallet krysninger under 10 meter holder seg relativt stabilt fra 1960 til og med 1990-tallet, før den tilsynelatende synker noe frem mot 2010. Disse krysningene er i stor grad gjort med kulverter. I perioden 2000-2010 er andelen korte krysninger på sitt laveste noensinne, men dette har sammenheng med en voldsom vekst i antallet lengre krysninger. I likhet med broer er det mange kulverter på de registrerte strekningene som ble bygget mellom 1960 og 1990, med de samme lave kravene til overdekning. Dermed er det grunn til å tro at også disse vil måtte skiftes eller rehabiliteres i nær fremtid. Stabiliteten i antall nybygde kulverter kombinert med et sannsynlig behov for utskifting av mange kulverter gir grunn til å tro at det i fremtiden vil være et betydelig behov for kulverter. Som nevnt tidligere i dette kapittelet kom det frem at prefabrikkerte kulverter kan være opptil halvparten så billige som plasstøpte. I sum tyder dette på at det vil være et behov og marked for prefabrikkerte kulverter i morgendagens veibygging.

Et annet trekk ved Figur 7.6 og Figur 7.7 er at det på 2000-tallet ble ferdigstilt svært mange broer med lengde mellom 10 og 30, og 30 og 60 meter. I samme tidsrom ble det som nevnt over bygget ut svært mye ny firefelts motorvei. En av følgene av å bygge vei med høy hastighet er at kravene til minste horisontal- og vertikalkradius øker. Dette vil være med på å øke behovet for broer ettersom det blir vanskeligere å følge terrenget med veien.

For å undersøke potensialet for standardisering av brooverbygninger er det interessant å se om det er total lengder som går igjen i de registrerte broene. I Figur 7.8 viser fordelingen av totale brolengder at antallet broer i de forskjellige intervallene er relativt lik. Man ser riktignok en topp i intervallet 50-60 meter, men uten å vite spredningen er det ikke innlysende at et potensiale for standardisering finnes i dette intervallet. Det som i alle tilfeller er mulig å trekke ut fra figuren er at det er lite

hensiktsmessig å forsøke å standardisere hele broer med lengde over 80 meter, simpelthen fordi det ikke er mange nok til å høste fruktene av standardiseringen.

Som nevnt over er det interessant å se om det er brolengder som gjentar seg for å identifisere muligheter for standardisering. I Figur 7.9 ser man at det for 18, 28, 38 og 60 meter finnes mange broer innenfor små intervaller. Med andre ord er det relativt mange broer med tilnærmet samme lengde. Av figuren kan man lese at 7 % av broene under 70 meter på firefelts motorvei har total lengde 18 +/- 1 meter. I tillegg har litt over 4 % av broene total lengde 27-29 meter. Ytterligere 4 % er i intervallet 37-39 meter og den samme andelen har total lengde 59-61 meter. Her kan det finnes muligheter for industrialisering.

Sammenlignet med fordelingen mellom kulverter og broer langs E18 og E6 i forrige kapittel er andelen kulverter noe lavere på de nye strekningene

8.1.4 Overgangsbroer

På Figur 7.11 ser man at de fleste broene på og over nyere E18 har total lengde mellom 35 og 75 meter. Figur 7.12 er i prinsippet samme figur men viser et litt mer nyansert resultat. I figuren ser man at broer med total lengde 55-65 meter er overrepresentert. Dette skyldes i stor grad at mange av overgangsbroene i forbindelse med planskilte kryss ligger i dette intervallet. For å undersøke nærmere ble total lengden for alle overgangsbroer tilknyttet regulære plankryss på nyere E18 og nyere E6 nord for Oslo registrert. Figur 7.13 viser i hvor stor grad total lengden av overgangsbroer over nyere E18 og E6 er samlet. Som det fremgår av figuren er det svært mange av overgangsbroene som er 60 +/- 0,5 meter. Hvis man utvider intervallet til +/- 2 meter ser man at de aller fleste overgangsbroene har total lengde mellom 58 og 62 meter. At broene er såpass like er ikke uventet, ettersom disse lengdene i stor grad styres av veien som passerer under broen. En viss variasjon er også å forvente med tanke på at det under overgangsbroene alltid går minst fire felt, muligens i tillegg til ett eller to akselerasjonsfelt. For å undersøke denne sammenhengen ble Figur 7.14 utformet.

Variasjonen i overgangsbroer ble først antatt å være knyttet til antall felt broene krysser. Etter å ha sett nærmere på dette viste det seg å ikke nødvendigvis være tilfellet. Som Figur 7.14 viser ser vi at total lengden på broene ikke varierer stort om det er fire felt eller fem felt under. Figur 7.14 viser også at antall spenn broene er bygget opp av varierer fra to spenn til fire spenn selv om total lengden på broen ikke øker. Total lengden øker når broene krysser seks felt og kommer opp i fem, seks og syv spenn.

8.2 Intervjuer

Det ble trukket frem en rekke fordeler og ulemper om både standardisering og prefabrikkering under intervjuene. I det følgende vil disse diskuteres i lys av øvrig teori og resultater der det er relevant.

8.2.1 Prefabrikkering

Den fordel som ble trukket frem av flest respondenter når det ble snakket om prefabrikkering var tidsbesparelser. Tiden kunne spares på mange måter og spesielt det at produksjonen av elementer ble gjort på en annen plass enn broens endelige plassering ble fremhevet som en stor fordel. Dette er en av de store forskjellene mellom plaststøpt og prefabrikasjon, nemlig at en stor del av produksjonen kan foregå parallelt. Dersom tidsbesparelse i form av raskere godkjenningsprosess hos Vegdirektoratet skal kunne høstes må prefabrikerte elementer normeres eller være preaksepterte.

Tidligere har dette vært tilfelle med blant annet Håndbok 100 *del 3 Elementbruer*. Dersom en slik publikasjon kommer i oppdatert utgave vil dette kunne legge til rette for raskere godkjenning. Den siste tidsbesparelsen var redusert trafikkavbrudd i forbindelse med arbeid over eksisterende vei eller utskifting av broer. For nyere veier er spesielt arbeid over trafikkert vei aktuelt og sikkerheten rundt slike operasjoner har tidligere blitt satt i fokus etter uhell med sammenbrudd av forskaling. Både reduksjon av nedetid på veier under nye broer og mulig økt sikkerhet ved oppføring av bro over trafikkert vei vil ha en positiv samfunnsøkonomisk effekt.

Den andre store fordelen ved bruk av prefabrikasjon som ble trukket frem i intervjuene er at elementene produseres under kontrollerte forhold. Dette bør gi økt kvalitet på sluttproduktet i form av økt bestandighet. Tidligere har prefabrikkerte betongelementer vært utsatt for bestandighetsproblemer og det virker som at dette sitter igjen hos flere av respondentene. Som teorikapittelet viser var det tidligere svært lave krav til overdekning for både prefabrikkerte elementer og plasstøpte konstruksjoner og dette må ta sin del av skylden for at konstruksjoner bygget på 1970- og 1980-tallet led av bestandighetsproblemer. Uten at vi har kunnet oppdrive dokumentasjon antar vi at plasstøpte broer lider av de samme bestandighetsproblemene som broelementene bygget etter standardverket på 1970- og 1980-tallet. Det er i så fall bemerkelsesverdig at elementbroer har fått et såpass dårlig omdømme. Dagens standard setter langt strengere krav til overdekning på brokonstruksjoner og såfremt disse kravene overholdes skal prefabrikkerte elementer ha de samme forutsetningene for god bestandighet som plasstøpt.

Det virker som store deler av bransjen sitter med et inntrykk av at prefabrikkerte elementer ikke kan gjøres pent, eller i det minste at det er begrenset hvor pen en elementbro kan bli. Dette kan ha sammenheng med at mange prefabrikkerte broer tidligere er blitt utført som NIB, NOB, NOT eller MOT-broer. Disse har helt klart begrensede estetiske kvaliteter. Underflensene står gjerne med mellomrom for å gi rom for inspeksjon og bjelkeprofilene er godt synlige. Felles for disse brosystemene er at de var basert på bruken av I-bjelker der bjelketverrsnittet gjerne er godt synlig etter ferdigstillelse, noe som gjerne gir broene et *hardt* uttrykk. Under studieturen ble vi presentert for kantelementer av glassfiber. Disse var svært effektive i å myke opp broenes form og ga broen et litt lettere visuelt uttrykk. Dette bør være mulig å overføre til norske prefabrikkerte broer, der estetikk spiller en rolle. Et viktig spørsmål angående estetikk er *hva er fint nok?* Nye Veiers Normalveien forsøker å materialisere dette i en rekke *skal-, bør- og tilstrebeskrav*. Disse kravene er på ingen måte revolusjonerende, men er viktige å ha med seg når man setter krav til estetikk for nye broer.

Transport og logistikk knyttet til frakting av store elementer ble av mange fremhevet som en utfordring ved bruk av prefabrikkerte elementer. Eksisterende veinett setter i dag en begrensning på både lengden og vekten av elementene. Lengden begrenses av veiens kurvatur, mens vekten kan begrenses av kapasiteten til transportkjøretøyet. I tillegg vil fabrikkens egen utrustning for løfting av elementene være begrensende. Det vil være vanskelig for fabrikkene å investere i større lokaler og utstyr før etterspørselen øker. Ser man til Nederland og Danmark viser dette seg tydelig. I Nederland er etterspørselen stor og fabrikkene har derfor investert i utstyr, som igjen har ført til en økende utvikling av prefabrikasjon. I Danmark derimot, har ikke etterspørselen vært like stor og fabrikkene har dermed moderat kapasitet. Her er også transporten en begrensende faktor i større grad enn i Nederland.

Håndbøkene presenterer noen utfordringer for bruk av prefabrikkerte broelementer. Én av disse er kravet om to lager i hver akse. Dette kravet tilfredsstilles gjerne ved å støpe bjelkeendene monolittisk sammen i en tverrbjelke. Denne påvirker det visuelle uttrykket negativt. Kravet om én fuge i hver ende av broen setter begrensninger når det skal bygges flere spenn. Dette gjør det mer tungvint å følge håndbøkene og standardverket. Kravet om to lagre per akse gjelder ikke i Nederland og Danmark. På studieturen var det klart at hver brobjelke hadde ett lager i hver ende. Et argument for å kun ha to lager per broakse kan være utskifting. Med flere lagre øker sannsynligheten for at et lager må skiftes ut. I tillegg er det viktig med god tilgjengelighet. Tilgjengelighet er avhengig av utformingen av konstruksjonen og en god konstruktør klarer å ivareta dette. Sannsynligheten for at et lager må skiftes ut avhenger av lagerets kapasitet og kan også tas hensyn til i dimensjoneringen, men dette må ses i sammenheng med kostnadene forbundet med å skifte ut lageret. I tillegg til at håndbøkene fra Statens vegvesen setter begrensninger for bruken av prefabrikkerte broelementer opplever noen av respondentene at det er en viss motstand mot bruken av prefabrikkert betong i brobygging. Vi har ingen forutsetning for å bekrefte eller avkrefte dette, men registrerer at denne motstanden oppleves.

8.2.2 Standardisering

Da standardisering ble tatt opp på intervjuene oppfattet vi at det i flere tilfeller var forskjell mellom vår og respondentenes definisjon av standardisering. Der vi ønsket å utforske bransjens holdninger til standardisering av hele brooverbygninger virket det som flere av respondentene til tider oppfattet standardiserte brooverbygninger som en form for prefabrikkering. Dette til tross for at vi forsøkte å presisere begrepsbruken både i starten av og under intervjuene. En årsak til denne begrepsforvirringen kan være at konseptet med å standardisere en brooverbygning, ved at den er ferdig prosjektert og robust nok til å brukes flere steder, er litt fjernt fra respondentenes hverdag. Flere av respondentene ga også uttrykk for at dette kanskje ikke var veien å gå for å industrialisere veibygging. Vår hypotese var at det ville være relativt enkelt å tilpasse terrenget til broen fremfor å tilpasse broen til terrenget. Dette ble problematisert av noen av respondentene med argumenter om at grunnforholdene i stor grad setter premissene for hvor lange spenn som er hensiktsmessig å bruke. For lange total lengder med flere spenn er dette sannsynligvis tilfelle. For korte total lengder som kan utføres med ett spenn er ikke dette en relevant problemstilling.

Én av respondentene mente at bare ved å gjenta en prosess to ganger var det mulig å hente mange gevinster i form av tid, penger og kvalitet. Blant annet slipper man å forstå tegninger på ny, problemer i produksjonen kan avdekkes og erfaringene fører til forutsigbarhet på anleggsplassen. En slik gjentakelse kan ses på som en form for industrialisering som kan bidra til mer effektiv bygging. Denne fordelene med standardisering drar nytte av erfaringsutvikling hos de involverte. Erfaringsutvikling kan skje på minst to måter: Gjennom personlig læring eller erfaringsoverføring. I intervjuene kom det frem at bedriftene hadde flere måter å overføre erfaringer. Felles for alle respondentene var en oppfatning av at bransjen kan bli mye bedre på å dele erfaringer i organisasjonene og at det ofte er satt av for lite tid til erfaringsoverføring.

En annen positiv effekt av standardisering som ble trukket frem var muligheten for å gjenbruke utstyr og materiell. Med et standardisert tverrsnitt kan forskalingsystemer, stillas og produksjonsteknikker gjenbrukes, slik som også Nye Veier nevner i sin rapport om Normalveien. I samme rapport hevdes det at et standardisert brotverrsnitt vil gi et helhetlig inntrykk som igjen kan være med på å heve veiens estetiske kvalitet. Mange av respondentene var av motsatt oppfatning og mente at

repeterende utforming kan oppfattes kjedelig, og at veien blir mer interessant med spennende arkitektur. Estetikk er et subjektivt fenomen og er på den måten vanskelig å måle. I Normalveien poengteres det at kravene til estetikk for broer avhenger av hvor synlig broen er. En overgangsbro i plankryss har vidt forskjellige forutsetninger fra en viltovergang når det kommer til estetiske krav.

Forutsetningen for å ta i bruk eller øke bruken av standardiserte brooverbygninger som vektlegges mest i intervjuene og litteraturen er at entreprenører og rådgivere må involveres på et tidlig tidspunkt. Dette vil føre til at både entreprenører og rådgivere har større påvirkningskraft og kan oppnås gjennom nye entrepris- og kontraktsformer som totalentreprise og OPS-kontrakter. I Nederland bygges en stor andel av veiprojektene som OPS der entreprenøren også har ansvar for vedlikeholdet etter at prosjektet er ferdigstilt. En positiv bieffekt av slike kontrakter kan tenkes å være at entreprenørene bygger med høyere kvalitet for å minimere jobben etter ferdigstilling.

I løpet av intervjuene fikk vi inntrykk av at bransjen ikke var veldig positiv til normerte brooverbygninger i plasstøpt betong, som angitt tidligere i *Håndbok 100 del 4 Plassproduserte platebruer*. Å gjenbruke prosjekteringsgrunnlaget med tegninger og beregninger fullstendig på flere steder ble av mange sett på som urimelig med argumenter om at forutsetningene aldri er like fra én bro til en annen. De fleste mente at en helt standardisert brooverbygning ville være vanskelig å ta i bruk ettersom denne setter veldig klare begrensninger på veigeometrien og terrengutformingen. Respondentene foreslo i stedet å standardisere deler av brooverbygningen, for eksempel tverrsnitt, slik at forskaling og utstyr kan gjenbrukes. Dette vil i så fall gi noen av fordelene ved at utførelsesfasen kan bli mer effektiv, mens det fremdeles er mulig å tilpasse broen. En årsak til denne motstanden mot standardisering av hele brooverbygningen kan være at det både i Statens vegvesens formingsveiledere og Nye Veiers «Normalveien» anbefales at broer i størst mulig grad skal tilpasses terrenget og ikke motsatt.

8.2.3 Svakheter ved undersøkelsen

Undersøkelsesopplegget som ble valgt var små-N-studie som beskrevet i 6.4.2 *Undersøkelsesopplegg*. Dette medfører få enheter og det er derfor vanskelig å gjøre en generalisering ut fra dataene. Siden det ble gjort intervjuer ansikt-til-ansikt og over Skype, ble disse tidkrevende å analysere og begrenset antallet intervjuer som kunne gjennomføres. Opplevelsen under Skype-intervjuene var god, men det førte til noen problemer. Det var ikke like enkelt å holde god flyt i samtalen sammenlignet med ansikt-til-ansikt-intervjuene. Når intervjuerne og respondenten ikke hadde møttes før var det vanskelig å få et helhetlig og riktig inntrykk av hverandre. Respondentene satt i et åpent kontorlandskap som kan ha satt begrensninger på hva respondenten ønsket å uttale seg om.

Mange av respondentene blandet sammen prefabrikasjon og standardisering, noe som gjorde det vanskelig å få frem deres mening om temaet. Dette gjorde det vanskelig å kategorisere intervjuene. Det er mulig at noen av meningene kan ha blitt blandet, både for standardisering og prefabrikering. Når dataene ble delt inn i kategorier ble dette gjort av oss. På denne måten kan vi ha ubevisst ha hentet ut informasjon som virket viktig for oppgaven og oversett meninger som respondenten mente var viktig. Noe som ikke ble gjort, men som kunne ha styrket validiteten i resultatene, var å sende ut resultatene til respondentene. På denne måten kunne respondentene sagt seg enig eller uenig i om det som var hentet ut fra intervjuene var riktig og at det representerte deres meninger. Dette ble det ikke tid til.

Ulempen med et åpent intervju er at respondenten lett kan spore av. Dette skjedde under et par av intervjuene, hvor respondenten var veldig opptatt av noe annet enn det oppgaven gikk ut på.

Intervjuerne fikk gjennom undersøkelsesopplegget sine egne oppfatninger om temaene. Dette kan ha ført til at det ble stilt ledende spørsmål og påvirket respondentene til å svare noe annet enn hva de ellers ville gjort. Det virket også som om noen av respondentene svarte det bedriften står for og mener, og at de følte seg pliktet til å representere bedriften og kanskje ikke sine egne meninger.

Undersøkelsene måtte settes i gang tidlig for å rekke å gjennomføre dem. Dette gjorde at spørsmålene ble formet etter hvor mye informasjon som var samlet inn så langt. Etter intervjuene var gjennomført og annen informasjon var samlet inn gjennom litteratur dukket det opp andre spørsmål som kunne vært interessante å få svar på, men det ble ikke tid til et andreintervju.

8.3 Veigeometri

En standardisert brooverbygning må være robust nok til å kunne benyttes der veien har en horisontalradius og eventuelt fall i lengderetning.

Fall i lengde- eller tverretning vil føre til at vertikale laster vil få komponenter i broens tverr- og lengderetning. Maksimalt lengdefall på motorvei er 5 prosent. Dette vil gi en liten økning i normalkrefter langs broen, men dette bidraget er svært lite i forhold til eventuelle spennkrefter. Tverrfallet over bro er begrenset til 5,6 prosent og vil utsette broen for moment om vertikal akse. De fleste brotverrsnitt har sin sterke akse i denne retningen og dette vil heller ikke ha stor innvirkning på dimensjoneringen.

De største konsekvensene for brooverbygningen som følger av veiens geometri er broens overordnede mål i bredde og lengderetning. Lengden bestemmes i stor grad av omkringliggende terreng. Bredden må være i overensstemmelse med normalprofilen som angitt i håndbok i tillegg til en eventuell breddeutvidelse på grunn av siktkrav. Nødvendig breddeutvidelse for en gitt radius påvirkes av stoppsikt og lengdefall. For at en standardisert brooverbygning skal kunne brukes på vei med horisontalkurvatur bør den ha rom for breddeutvidelse. I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i at den standardiserte brooverbygningen har en fast bredde og et maksimalt tverrfall på 3 prosent. I følge dimensjoneringstabellen gir dette rom for en horisontalradius på maksimalt 1750 meter. For vei uten lengdefall med horisontalradius 1750 meter må breddeutvidelsen være 0,5 meter. Med lengdefall på 5 prosent og 0,5 meter breddeutvidelse blir maksimal horisontalradius 2120 meter. En slik standardisert brooverbygning med fastsatt bredde vil ha god brukbarhet på flere steder.

Et alternativ til å fastsette en bredde for overbygningen ville vært å dimensjonere overbygningen slik at den kan bygges med varierende bredde, enten ved å krage ut brodekket eller øke avstanden mellom eventuelle prefabrikkerte bjelker under broen. Det sistnevnte er brukt i Nederland, men her er ikke overbygningen standardisert. Prosjekteringen knyttet til et slikt konsept blir noe mer omfattende, men brukbarheten kan bli desto større.

8.4 Effekten av stedsavhengige laster på standardiserte broer

I oppgaven er det tatt utgangspunkt i en fritt opplagt prefabrikkert bro med lengde 18 meter og bredde 12,6 meter på bakgrunn av øvrige observasjoner. Analysen av effekten av stedsavhengige laster viser veldig klart at vindlast *ikke* er dimensjonerende og utgjør svært lite av den

dimensjonerende vertikale belastningen på broen. I analysen kom det frem at dersom man legger til grunn den verst tenkelige vindlasten vil dette ha minimal effekt på vertikale krefter.

Temperatureffekter og snølaste ble ikke analysert i denne oppgaven. Snølaste vil etter all sannsynlighet ikke være dimensjonerende for brooverbygninger av typen som ble analysert her, men kan bli en utfordring for andre konsepter. Dette må selvfølgelig kontrolleres ved utviklingen av en standardisert overbygning. Temperatureffekter kan bli dimensjonerende i bruddgrense for andre systemer enn fritt opplagte og må i så fall kontrolleres. I tillegg vil de kunne være dimensjonerende i bruksgrense for fritt opplagte broer ettersom de fører til krumning.

Jordskjelvlaster varierer veldig mye avhengig av geografisk plassering. I tillegg er det stor variasjon som følge av grunnforhold. Den kanskje viktigste parameteren er derimot valget av seismisk klasse. Som nevnt i 7.6.5 *Seismiske laster* kan korte broer i linjen på motorvei plasseres i seismisk klasse II eller IV avhengig av hvordan man definerer en samfunns viktig bro. Det vil være å foretrekke å klassifisere broen i klasse II, ettersom dette vil halvere de seismiske kreftene og tillater at broen kan dimensjoneres etter *NS-EN 1992* alene uten tilleggsbestemmelser i *NS-EN 1998*. Som nevnt i 7.6.5 *Seismiske laster* står broer på motorvei ofte i par og danner et parallelt system. Dette systemet vil totalt ha en langt høyere pålitelighet enn de to broene har isolert. Uten at vi har analysert dette vil vi tørre å påstå at en tilstrekkelig pålitelighet av broene som system vil kunne dokumenteres ved hjelp av *NS-EN 1990* Tillegg C.

Som det fremgår av 7.6.8 *Sammenligning av horisontale krefter* er de verste kombinasjonene av grunnens akselerasjon og grunnforhold dimensjonerende i begge retninger. I broens lengderetning er det kun for grunntype E og $a_g = 0,9 \text{ m/s}^2$ at seismiske krefter blir dimensjonerende. I broens tverretning er det derimot langt flere kombinasjoner av grunntyper og berggrunnsakselerasjon som er dimensjonerende. De seismiske lastene er likevel av samme størrelsesorden som påkjørselslasten. Dette betyr at man ved å dimensjonere broen for den seismiske situasjonen med grunntype E og akselerasjon, a_g , lik $0,9 \text{ m/s}^2$ ikke vil overdimensjonere broen i alt for stor grad. Dette vil gi broen god brukbarhet. Disse resultatene er ikke direkte overførbare til andre broer, men det vil være en god tilnærming når det skal vurderes hvor robust en standardisert bro skal dimensjoneres.

8.5 Potensielle prefabrikkerte og standardiserte løsninger

Felles for alle normerte brokonsepter er at man må akseptere at terrenget og veilinjen i noen grad må tilpasses broen. Dette gjelder også for prefabrikkerte elementbroer som ikke er normert. Alle de potensielle løsningene gir også begrensninger i utformingen av brooverbygningen. En annen generell fordel for normerte broer er muligheten for preakseptering hos Vegdirektoratet som kan gi raskere oppstart av byggingen. Normerte broer er også nødvendigvis overdimensjonerte for å kunne benyttes flere plasser. Dette er prisen å betale for nødvendig robusthet.

En forutsetning for å bruke prefabrikkerte elementer er at spennlengden må gjenspeile produksjonskapasiteten og mulighetene for transport. Elementer opp mot 60 meter vil sannsynligvis ikke være mulig å produsere og frakte i Norge. Tidligere har maksimal elementlengde for MOT-bjelker vært om lag 30 meter og vi tror derfor produksjonen er oppad begrenset til dette. Dette vil kunne være en begrensende faktor for brukbarheten av elementbroer.

Undersøkelsene i denne rapporten viser at det største potensialet for implementering av en standardisert (normert) brooverbygning på firefelts vei er å standardisere korte, ett-spenns broer i

linjen. Denne anbefalingen bygger på oppsummeringen av de forskjellige brokonseptenes egnethet som vist i Tabell 7.4. Korte broer over ett spenn ble også trukket frem av respondentene i undersøkelsen, dette veier tungt i vår anbefaling. Andre årsaker er at kartleggingen viser at det bør finnes et behov for disse broene, at det ikke skal brukes søyler som må plasseres basert på grunnforhold og at kravene til estetikk for broer i linjen er noe lavere enn for broer over veien. Produksjonsmetoden kan være prefabrikkert eller plasstøpt betong, men prefabrikkering har noen iboende gevinster som man ikke har ved bruk av plasstøpt betong. Raskere byggetid er kanskje det viktigste argumentet i denne sammenheng. I tillegg kommer muligheten for å skifte ut enkeltelementer ved skader. Å bruke prefabrikerte elementer i linjen gir også mulighet for å tilrettelegge for inspeksjon mellom bjelkene.

En annen mulighet for industrialisering er standardisering og normering av overgangsbroer i plankryss. Kartleggingen viste at de aller fleste overgangsbroene i regulære planskilte kryss har totallengde tett gruppert rundt 60 meter. De forutsetningene som taler for en standardisering av overgangsbroer er at det i alle tilfeller gjøres en terrengbearbeiding i kryssområdet. Veilinjen under broen er også kjent og setter klare føringer for søyleplassering. I tillegg kan man lettere tilpasse veilinjen over.

Å industrialisere og standardisere brobygging kan også gjøres gjennom ikke-normerte, prefabrikerte broelementer. Ellers i verden benyttes prefabrikerte broelementer i stor grad på denne måten ved at bjelketverrsnittet er standardisert, men hver bro prosjekteres individuelt i hvert prosjekt. Dette vil gi bedre muligheter for stedstilpasning og optimalisering av konstruksjonen, samtidig som man kan få fordelene ved redusert byggetid. Ettersom elementene ikke er normert gjennom robust prosjektering vil godkjenningprosessen nødvendigvis bli noe mer omfattende, men ved gjenbruk av kjente tværnsnitt vil det allikevel være mulig å spare noe tid. Elementer kan benyttes i linjen, der kravene til estetikk er lavere. De kan også benyttes over firefelts motorvei der det estetiske uttrykket kan forbedres ved bruk av kantelementer. Litteraturstudiet og studieturen indikerte at omvendte T-bjelker er et konsept med stort potensiale ved at konseptet har realistiske spennvidder og kan gjøres pent ved behov. At bruken i utlandet er utbredt kan også tyde på at dette er et godt konsept.

9 Konklusjon

Analysen av eksisterende broer ga et godt bilde av dagens situasjon. Dette ga bakgrunn for å svare på underspørsmål én:

Hva kjennetegner broer på eksisterende nasjonale hovedveier?

- Hver bro er tilsynelatende unik
- Utføres i betong
- Mange broer bygget før 1980 er fremdeles i drift
- Det bygges mange broer rundt 18 meter, 28 meter, 38 meter og 60 meter på firefelts motorvei
- Overgangsbroer i regulære planskilte kryss over firefelts motorvei er 60 +/- 2 meter
- Overgangsbroers lengde i regulære planskilte kryss over firefelts motorvei er ikke nødvendigvis avhengig av antall felt under eller antall spenn på broen

Gjennom intervjuene fikk vi mange gode tilbakemeldinger om utfordringer og potensiale ved bruk av prefabrikkerte og standardiserte broer. De viktigste synspunktene er gjengitt i Tabell 9.1 og skal svare på underspørsmål to:

Hvilke utfordringer og potensial ser bransjen ved bruk av prefabrikkerte elementer og standardisering av brokonstruksjoner?

Tabell 9.1: Konkluderende funn fra intervjuene

	<i>Prefabrikasjon</i>	<i>Standardisering</i>
Utfordringer	<ul style="list-style-type: none"> • Transport • Estetikk • Regelverk 	<ul style="list-style-type: none"> • Liten arkitektonisk variasjon • Grunnforhold • Konkurranshemmende
Potensial	<ul style="list-style-type: none"> • Tidsbesparende • Økt kvalitet 	<ul style="list-style-type: none"> • Gjenbruk av utstyr og materiell • Optimalisering av produksjon

Litteraturstudiet og intervjuene ga svar på underspørsmål tre:

Hvilke føringer setter regelverk og veigeometri for standardiserte broer?

- Veigeometrien i Norge er svært varierende og styres av normalprofiler og dimensjoneringstabeller i håndbøkene til Statens vegvesen. Det er også en tradisjon for å integrere veien i landskapet. Dette fører til horisontalradius over de fleste broer, som igjen fører til behov for breddeutvidelse. En standardisert bro må være robust nok til å håndtere dette, noe som igjen fører til overdimensjonering av broen. Denne robustheten må begrenses for å ikke kaste bort fordelene ved standardisering.
- Regelverket for broer i Håndbok *N400 Bruprosjektering* begrenser bruken av prefabrikkerte elementbroer ved at det stilles krav om to lagre per broakse. Dette fører til behov for tverrbjelker som virker negativt på det estetiske inntrykket og reduserer brukbarheten av prefabrikkerte broer.

Analysen av lastpåvirkninger på et realistisk utkast til en standardisert bro ga videre svar på underspørsmål fire:

I hvilken grad påvirker de lokale forholdene lastsituasjonen for standardiserte broer?

- Den vertikale komponenten av vindlast har neglisjerbar påvirkning på dimensjonerende moment i bruddgrensetilstand, selv med maksimal vindlast. Dette indikerer at en eventuell standardisering kan ta høyde for en svært høy vindlast uten at dette gir broen for mye overkapasitet.
- Temperaturpåvirkninger gjør seg først og fremst gjeldende i bruksgrense for fritt opplagte broer. For kontinuerlige broer vil temperaturen også ha påvirkning på bruddgrensetilstanden, men det er i denne oppgaven ikke konkludert med hvor stor denne eventuelle påvirkningen er.
- Snølast er ikke dimensjonerende i bruddgrensetilstand da denne kun skal analyseres i byggefase. Den kan være dimensjonerende for andre brokonsepter enn fritt opplagte, men det er i denne oppgaven ikke konkludert med hvor stor denne eventuelle belastningen er.
- Valg av seismisk klasse er svært avgjørende for størrelsen av seismiske krefter. Korte broer på nasjonale hovedveier plasseres i utgangspunktet i den høyeste seismisk klassen (IV), men plasseres gjerne i par og bør dermed vurderes plassert i seismisk klasse for øvrige korte broer (II).
- Seismiske krefter avhenger av geografisk plassering og stedlige forhold. Dersom en kort bro i seismisk klasse II dimensjoneres etter DCL (lav duktilitetsklasse) vil den seismiske belastningen fra den mest ugunstige kombinasjonen av berggrunnsakselerasjon ($0,9 \text{ m/s}^2$) og grunnforhold (E) være betydelig større enn påkjørselslasten, men av samme størrelsesorden. Den samme kombinasjonen av berggrunnsakselerasjon og grunnstype er, sammenlignet med bremse- og akselerasjonskrefter, også marginalt dimensjonerende i broens lengderetning. Å dimensjonere broen etter påkjenningene fra verst tenkelige seismiske last vil ikke føre til en vesentlig overdimensjonering av broen i tverr- og lengderetning. Dette vil gi en standardisert bro god brukbarhet.

Kartleggingen av eksisterende broer på representative veistrekninger ga sammen med litteraturstudiet, intervjuer og studieturen svar på det siste underspørsmålet vårt:

Hvor er det størst potensiale for standardisering av broer?

- Ett-spenns, korte, broer i linjen, enten som prefabrikkerte elementer eller plasstøpt, har størst potensiale. Det eksisterer også et potensiale for å normere broer med 18 og 28 meter lengde.
- Overgangsbroer i planskilte kryss kan normeres, enten som prefabrikkerte elementer eller plasstøpt. De fleste overgangsbroer er rundt 60 meter og veilinjene under er svært lik mellom prosjekter, noe som gir forutsigbare spennvidder og søyleplassering. Omkringliggende terreng skal uansett behandles og gir gode forutsetninger for terrengtilpasning.
- Prefabrikkerte elementbroer vil medføre raskere byggeprosess og enklere utskifting.
- Ikke-normerte prefabrikkerte broer kan brukes i linjen og over veien. Disse vil bidra til industrialisering av vei- og brobyggingen. Ved at de ikke er normerte vil de heller ikke være

overdimensjonerte og kan tilpasses det enkelte prosjekt. Denne løsningen er dominerende for prefabrikkerte broer i utlandet.

- Standardisering av hele overbygninger eller tverrsnitt innad i prosjekter vil også ha betydelige positive effekter.

De fem underspørsmålene må ses i sammenheng for å svare på det overordnede forskerspørsmålet i denne oppgaven:

Hvordan kan standardisering av betongbroer benyttes ved bygging av nye firefelts motorveier?

- Nasjonal standardisering av betongbroer kan i første omgang gjøres ved å standardisere korte brooverbygninger, gjerne prefabrikkerte elementer.
- Standardisering på prosjektnivå.
- Det ser ikke ut til at stedlige påvirkninger har stor innvirkning på belastningene på korte broer og en standardisering som tar utgangspunkt i maksimale karakteristiske verdier for stedlige laster vil ikke føre til en vesentlig overdimensjonering av korte broer.
- Diskusjonen om bruk av standardisering i det enkelte prosjekt bør tas før veigeometrien er satt for å legge til rette for enkle, rette broer.

10 Anbefalinger

I arbeidet med oppgaven har vi kommet over noen områder som kunne være interessante å forske videre på. Disse følger i de neste avsnittene.

For å gi prefabrikkerte broelementer et bedre estetisk uttrykk bør det gjennomføres et prosjekt for å utvikle nye brobjelker med ytterligere fokus på estetikk. Bjelkene kan for eksempel være kassetverrsnitt eller omvendte T-bjelker. Omvendte T-bjelker er sannsynligvis mest realistisk å ta i bruk i Norge.

Reglene som angir to lagre per broakse kan revurderes for å øke brukbarheten av prefabrikkerte broelementer. Om reglene blir stående ville det vært interessant å utforske muligheten for å ta i bruk integrerte tverrbjelker som også kan overføre strekkrefter mellom brobjelkenes underflenser.

En uavhengig sammenligning av miljøfotavtrykket og livsløpskostnader mellom prefabrikkerte og plasstøpte broer.

Undersøke nedbrytningspotensial og bestandighet for elementbroer med begrenset inspeksjonsmulighet.

En eventuell standardisering av brokonsepter bør gjennomføres etter at ny utgave av *N100, Veg- og gateutforming* er gitt ut.

11 Referanser

- [1] Statens vegvesen, "Tilsammen 600 km firefelt på vegnettet," 2015. [Online]. Available: <http://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/nasjonalt/tilsammen-600-km-firefelt-pa-vegnettet>.
- [2] Meld. St. 33 (2016–2017), (2017). *Nasjonal transportplan 2018–2029*. Oslo: Samferdselsdepartementet.
- [3] Statens vegvesen, *Riksvegutredningen*. 2015. [Online]. Available: http://www.ntp.dep.no/Forside/_attachment/819672/binary/1022261?_ts=14c21f917f8
- [4] Meld. St. 25 (2014-2015), (2015). *På rett vei — Reformen i veisektoren*. Oslo: Samferdselsdepartementet.
- [5] Nye Veier, "Veiprojektene," 2017. [Online]. Available: <http://www.nyeveier.no/veiprojektene/>.
- [6] Å. Homleid, "Nye Veier vurderer prefab-bruer," *bygg.no*, 2016. [Online]. Available: <http://www.bygg.no/article/1293702>.
- [7] Nye Veier, "Nye Veier prioriterer fem strekninger i første fase," 2016. [Online]. Available: <http://www.nyeveier.no/nye-veier-as-prioriterer-fem-strekninger-i-forste-fase/>.
- [8] Statens vegvesen, *Håndbok V420 Utforming av bruer*. Vegdirektoratet, 2014.
- [9] Rambøll & Sweco for Nye Veier, "DesignVEI," 2017. [Online]. Available: https://www.songdalen.kommune.no/globalassets/dokumenter/teknisk/horinger---ettersyn/e-39-kristiansand-ost-sogne-vest/offentlig-ettersyn/rap-001_designvei.pdf
- [10] T. F. Berg, "Industrialisering og systematisering av boligbyggproduksjon, Prosjektrapport nr. 20," 2008.
- [11] fib Fédération internationale du béton, *Precast Concrete Bridges: State-of-the-art report*. 2004.
- [12] Statens vegvesen, *Bruprosjektering-09 NOB-bruer*. Oslo: Vegdirektoratet, 1983.
- [13] Statens vegvesen, *Bruprosjektering-08 NIB-bruer*. Oslo: Vegdirektoratet, 1989.
- [14] Statens vegvesen, *Bruprosjektering-09 NOT-bruer*. Oslo: Vegdirektoratet, 1990.
- [15] Statens Vegvesen, *Håndbok 100-3 Elementbruer*. Vegdirektoratet, 2002.
- [16] Statens vegvesen, *Bruprosjektering-09 NIB-bruer*. Oslo: Vegdirektoratet, 1983.
- [17] Statens vegvesen, *Håndbok 100-1 Konstruksjoner i fylling: Plastøpte kulverter*. Vegdirektoratet, 1996.
- [18] Statens vegvesen, *Håndbok 100-3 Støttemurer*. Vegdirektoratet, 1990.
- [19] Statens vegvesen, *Håndbok 100-4 Plassproduserte platebruer*. Vegdirektoratet, 2002.
- [20] Statens vegvesen, *Håndbok 100-5 Gangvegbruer*. Vegdirektoratet, 1985.
- [21] E. Rodum and Statens vegvesen, *Kapittel 13 Bruer og kaier*. 2011.
- [22] Statens vegvesen; Betongelementforeningen, "Prefabrikkerte kulvertelementer." 2016.
- [23] Statens vegvesen, "Håndbokendringer," 2012. [Online]. Available: <http://www.vegvesen.no/fag/teknologi/Bruer/Nyhetsarkiv+bru/handbokendringer>.
- [24] J. V. Thue, "prefabrikasjon," *I Store norske leksikon*, 2009. [Online]. Available: <https://snl.no/prefabrikasjon>.
- [25] A. Sven and L. Vinje, *Betongelementboka Bind A*. Betongelementforeningen, 2010.
- [26] John-Erik Reiersen, *Betongelementer samferdsel*. Betongelementforeningen, 2005.
- [27] Nor Element, "Broer." [Online]. Available: http://www.norelement.no/?page_id=92.
- [28] Spenncon, "Broer." [Online]. Available: <http://spenncon.no/spenncon/konsepter/infrastruktur/>.
- [29] Betongelementforeningen, "Oppsummering for kulvertprosjektet." Oslo, 2016.
- [30] Statens Vegvesen; Betongelementforeningen, "Grunnlag og beregningsforutsetninger." 2016.
- [31] Spenncon, "Kulvert." [Online]. Available: <http://spenncon.no/spenncon/konsepter/infrastruktur/kulvert/>.
- [32] NOBI, "Kulvert." [Online]. Available: <https://www.nobi.no/bygg/kulvert/>.
- [33] Norsk Betongforening v/Morten Bjerke, "Broprosjektet – bakgrunn, fremdrift og

- begrensninger.” Oslo, 2016.
- [34] Betongelementforeningen, “Bruprojektet [PowerPoint-presentasjon].” 2017.
- [35] E. Rønnes for Nye Veier, “Normalveien - Arbeidsnotat : Bruer i linja,” 2017.
- [36] E. Rønnes For Nye Veier, “Normalveien - Arbeidsnotat: Elementbruer,” 2017.
- [37] Bygg.no, “Betongelementforeningen på studietur i Nederland og Danmark,” 2015. [Online]. Available: <http://www.bygg.no/article/1255026?image=dp-image71199-1255033>.
- [38] Stanton Bonna, “Standard precast concrete bridge beams,” 2008. [Online]. Available: <http://www.stanton-bonna.co.uk/wp-content/uploads/2015/10/Stanton-Bonna-Bridge-Beam-Info-2017.pdf>.
- [39] Spanbeton, “SOLID COMPOSITE CONSTRUCTIONS - SJP/SJPFLEX.” [Online]. Available: <https://www.spanbeton.nl/en/solid-composite-constructions-sjp-sjpflex/>.
- [40] Spanbeton, “SJP + SJP FLEX tverrsnitt,” 2017. [Online]. Available: https://www.spanbeton.nl/content/files/Files/Kennisportaal/Volstortliggers/WEBSITE__SJP.pdf.
- [41] Spanbeton, “INVERTED T-BEAM CONSTRUCTIONS - ZIPXL.” [Online]. Available: <https://www.spanbeton.nl/en/inverted-t-beam-constructions-zipxl/>.
- [42] Spanbeton, “ZIPXL-tverrsnitt,” 2017. [Online]. Available: https://www.spanbeton.nl/content/files/Files/Kennisportaal/Railbalk/WEBSITE__ZIPXL.pdf.
- [43] Spanbeton, “BOX GIRDER CONSTRUCTIONS - SKK.” [Online]. Available: <https://www.spanbeton.nl/en/box-girder-constructions-skk/>.
- [44] Spanbeton, “SKK-tverrsnitt,” 2017. [Online]. Available: https://www.spanbeton.nl/content/files/Files/Kennisportaal/Kokerbalk/WEBSITE__SKK.pdf.
- [45] Spæcom, “Broer.” [Online]. Available: http://spaencom.dk/UserFiles/file/Byggesystemer/broer/BRObrochure_WEB.pdf.
- [46] E. Tjønneland, “Estetikk,” *I Store norske leksikon*, 2016. [Online]. Available: <https://snl.no/estetikk>.
- [47] I. Amundsen, *Vegen i landskapet - om vakre veier*. Oslo: Statens Vegvesen, 2014.
- [48] Statens Vegvesen, *Håndbok V121 Geometrisk utforming av veg- og gatekryss*. Vegdirektoratet, 2013.
- [49] Statens vegvesen, *Håndbok N400 Bruprojektering*. Vegdirektoratet, 2015.
- [50] Statens vegvesen, *Håndbok N100 Veg- og gateutforming*. Vegdirektoratet, 2013.
- [51] Statens Vegvesen, “Statens vegvesen Vegdirektoratet NA-rundskriv 2015 / 2 - Fartsgrenser og motorveger - Ny dimensjoneringsklasse for motorveg med fartsgrense 110 km / t,” 2015.
- [52] Statens vegvesen, *Veg- og gateutforming Høringsutgave*, Vegdirektoratet, 2016.
- [53] Nye Veier, “Nye Veier høringsuttalelse til ny håndbok N100,” 2017. [Online]. Available: <http://www.nyeveier.no/nye-veiers-horingsuttalelse-handbok-n100/>.
- [54] Standard Norge, “Eurokoder.” [Online]. Available: <http://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/eurokoder1/>.
- [55] Vegdirektoratet, “Statens vegvesens håndbøker inndelt etter hovedtema og med nytt nummersystem,” 2014. [Online]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/657809/binary/1006413?fast_title=Oversikt+over+Statens+vegvesens+håndbøker+inndelt+etter+hovedtema+med+nye+nummer+pr.+15.12.2014.pdf.
- [56] Standard Norge, *Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*, NS-EN 1990, Standard Online, 2010.
- [57] Standard Norge, *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*, NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008, Standard Online, 2008.
- [58] Standard Norge, *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster*, NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009, Standard Online, 2009.
- [59] Standard Norge, *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster*, NS-EN 1991-1-3:2003+NA:2008, Standard Online, 2008.
- [60] Standard Norge, *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-5: Allmenne laster - Termiske*

- påvirkninger*, NS-EN 1991-1-5:2003+NA:2008, Standard Online, 2008.
- [61] Standard Norge, *Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning - Del 1: Allmenne regler, seismiske laster og regler for bygninger*, NS-EN 1998-1:2004+A1:2013+NA:2014, Standard Online, 2014.
- [62] Standard Norge, *Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning - Del 2: Bruer*, NS-EN 1998-2:2005+A1:2009+A2:2011+NA:2014, 2014.
- [63] D. Noble, M. Nogal, A. O'Connor, and V. Pakrashi, "The effect of prestress force magnitude and eccentricity on the natural bending frequencies of uncracked prestressed concrete beams," *J. Sound Vib.*, vol. 365, pp. 22–44, 2016.
- [64] Standard Norge, *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 2: Trafikklaster på bruer*, NS-EN 1991-2:2003+NA:2010, Standard Online, 2010.
- [65] Standard Norge, *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-7: Allmenne laster - Ulykkeslaster*, NS-EN 1991-1-7:2006+NA:2008, Standard Online, 2008.
- [66] Statens vegvesen, *Bruregistrering Håndbok V440*. Vegdirektoratet, 2014.
- [67] D. I. Jacobsen, *Hvordan gjennomføre undersøkelser? Innføring i samfunnsvitenskapelig metode*, 3. utgave. Oslo: Cappelen Damm AS, 2016.
- [68] QSR International Pty Ltd., "WHAT IS NVIVO?" [Online]. Available: <http://www.qsrinternational.com/what-is-nvivo>.
- [69] Statens vegvesen, *Håndbok V120 Premisser for geometrisk utforming av veier*. Vegdirektoratet, 2014.
- [70] Statens vegvesen, *Håndbok N101 Rekkverk og vegens sideområder*. Vegdirektoratet, 2013.
- [71] A. Hermundsdal and A. Pétursson, "Beregning av betongelementbru," Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, 2015.

12 Vedlegg

12.1 Vedlegg vedrørende datainnsamling fra bygg- og anleggsbransjen

12.1.1 Intervjuspørsmål

Intervjuspørsmål

Standardisering av brokonstruksjoner

Følgende spørsmål vil være hovedfokuset i samtalen:

1. Hvilke fordeler og ulemper mener du det er med prefabrikkerte broelementer?
2. Bruker dere prefabrikkerte broer i dag?
3. Hvordan gjenbraker dere løsninger fra tidligere prosjekter?
4. Har du hørt om/brukt noen form for standardiserte løsninger i deres tidligere prosjekter?
5. Hvilke fordeler og ulemper ser du med en standardisert løsning?
6. Hva skal til for at en standardisert broløsning skal bli benyttet?
7. Hvordan lærer dere fra tidligere prosjekter?

Prefabrikking i denne sammenheng: Betongkonstruksjoner eller deler av betongkonstruksjoner som heises på plass etter å ha blitt støpt et annet sted.

Standardisering i denne sammenheng: Ferdig prosjektert konstruksjonsdel der omgivelsene tilpasses delen. For eksempel en brooverbygning med spenn på 30 meter der terrenget tilpasses spennet og landkar prosjekteres fra gang til gang.

12.1.2 Informasjonsskriv intervju

Forespørsel om deltakelse i forskningsprosjekt

Standardisering av brokonstruksjoner

Bakgrunn og formål

Denne masteroppgaven vil fokusere på standardisering av brokonstruksjoner. En del av oppgaven er å kartlegge forutsetninger som må være på plass, samt utfordringer med standardisering. Her tror vi at dere i bransjen kan være til hjelp med erfaringer og tanker rundt temaet.

Oppgaven skrives for Universitet i Agder. Gruppen består av Anette Heimdal (masterstudent og Vit.ass ved UiA), Thomas Norheim (masterstudent, Vit.ass ved UiA og ansatt ved Rambøll Kristiansand) og Ingrid Lande Larsen (masterstudent og stipendiat ved UiA).

Du er valgt som aktuell deltaker på bakgrunn av din stilling og erfaring med veiprosjekter, brokonstruksjoner og/eller prefabrikkering.

Hva innebærer deltakelse i studien?

Deltakelsen i studien innebærer et intervju med varighet maksimalt 60 minutter. Intervjuet vil i stor grad foregå som en samtale sentrert rundt få åpne spørsmål. Spørsmålene vil sendes til deltakeren på forhånd. Spørsmålene vil omhandle standardisering og prefabrikkering av brokonstruksjoner i veibygging. Dataene fra intervjuet registreres ved lydopptak.

Hva skjer med informasjonen om deg?

Alle personopplysninger vil bli behandlet konfidensielt. Kun prosjektgruppen vil ha tilgang til intervjuene.

Deltakeren vil ikke kunne gjenkjennes i publikasjonen. Kun stilling/funksjon vil kunne kobles mot svar.

Prosjektet skal etter planen avsluttes 30.05.2017. Personopplysninger, opptak og datamaterialet som ikke er anonymisert vil bli slettet ved prosjektslutt.

Dersom du har spørsmål til studien, ta kontakt med Ingrid Lande Larsen på epost, ingrid.larsen@uia.no.

Med vennlig hilsen

Anette Heimdal

Thomas Norheim

Ingrid Lande Larsen

12.1.3 Intervjuguide

Tema	Hoved- og underspørsmål
	Kan du fortelle litt om deg selv? Faglig bakgrunn?
Prefab i denne sammenheng: Betongkonstruksjoner eller deler av betongkonstruksjoner som heises på plass etter å ha blitt støpt et annet sted.	Hvilke fordeler og ulemper mener du det er med prefab broelementer? <i>Estetikk Stedstilpasning Bestandighet Økonomi Tid Kompetanse</i>
	Bruker dere prefab broer i dag? <i>Hvorfor (ikke)? Har du evt vært borti det? Hvor? Veitype? Hvilke typer? (PLA, MOT etc.)</i>
Definere standardisering: Ferdig prosjektert konstruksjonsdel der omgivelsene tilpasses delen. For eksempel en brooverbygning med spenn på 30 meter der terrenget tilpasses spennet og landkar prosjekteres fra gang til gang.	Hvordan gjenbraker dere løsninger fra tidligere prosjekter? <i>Innad i samme prosjekt? I senere, tilsvarende prosjekter? Hvorfor, hvorfor ikke?</i>
	Har du hørt om/brukt noen form for standardiserte løsninger i deres tidligere prosjekter? <i>Generelt ferdig prosjekterte konstruksjoner. Spesielt brokonstruksjoner.</i>
	Hvilke fordeler og ulemper ser du med en standardisert løsning? <i>Utfordringer? Gjennomførbart? Hadde det blitt brukt? Hvor ser du for deg at en standardisert løsning kan bli brukt? I linjen/over?</i>
	Hva skal til for at en standardisert broløsning skal bli benyttet? <i>Godkjent av SVV? Lønnsom? Er det realistisk at dette blir tatt i bruk?</i>
	Hvordan lærer dere fra tidligere prosjekter? <i>Positivt og negativt. Hvordan spres dette i firmaet? Ikke bare broer.</i>
	Har du noe å tilføye, andre kommentarer? Savner du noen temaer?

12.1.4 Tabell med kategoriene fra NVivo

Navn	Respondenter	Referanser
Annet	9	405
Bemerkelser	9	235
Problemer	9	82
Sammenligninger til utlandet	9	98
Topografi	9	131
Erfaringsoverføring	9	314
Intern prat	9	28
Møter	2	5
Referat	5	9
Prefabrikasjon	9	157
Bemerkelser	9	67
Fordeler	9	359
HMS	7	22
Kvalitet	6	31
Tid	7	24
Utseende	3	3
Økonomi	6	23
Prefab annet	9	498
Estetisk potensiale	8	39
Forutsetninger	9	66
Internt bruk	9	24
Ulemper	9	49
Estetikk	7	21
Marked	6	11
Montasje	3	10
Robusthet	5	34
Tekniske utfordringer	3	15
Tilpasningsmuligheter	5	11
Transport	6	21
Standardisering	9	509
Bemerkelser	9	122
Fordeler	8	29
Erfaring	3	3
Gjentagelse under utførelse	7	13
Tid	5	13
Vedlikehold	2	2
Økonomi	6	10
Forutsetninger	9	71
Gevinster	4	10
Planlegging	9	29
Potensiale	8	31
Tekniske forutsetninger	8	20
Intern gjenbruk	7	18
Dårlig på gjenbruk	2	7
Gode på gjenbruk	8	41
Typer	6	16
Ulemper	8	31
Estetikk	4	7
Markedsbegrensende	4	10
Tilpasning	6	13

12.1.5 Program fra studietur til Nederland og Danmark

Study travel to Netherlands and Denmark

May 10-11 2017

Industrialized bridging products



Program

Wednesday, May. 10 2017 - Netherland

08:20	Departure from Oslo (SK 821)
10:10	Arrival Schiphol
10:45	Departure from Schiphol by bus
11:30 – 12:30	Excursion to project SAA A1-A6 Muiderberg
12:30 – 13:15	Travel to Spanbeton (Koudekerk ad Rijn)
	Lunch
14:30 – 15:30	Factory Visit
15:30 – 17:30	Presentations and discussions
18:00 – 18:30	Travel to Schiphol airport
19:00 (ca)	Dinner at Schipol Airport (we need to find a suitable restaurant when we arrive)
20:20	Fly out from Schiphol (SK554 to København, 20:20-21:40)
22:30	Arrival at hotel

Remarks:

The project SAA A1-A6 is 20 km from the airport. Because of the traffic at the end of the day and the schedule of the contractor we have to visit the project in the morning.

Factory-visit: *we will visit the factory early in the afternoon since there are no activity later. We will have the best outcome of presentations and discussions after having seen the construction site and the factory production.*

Safety: **We will need personal safety equipment on site and in the factory, bring your own safety shoes. Spanbeton BV will provide helmets and visibility jackets.**

Thursday, May. 11 2017 - Denmark

09:30	Transport from hotel
Ca 10:15	Excursion to bridge projects <ul style="list-style-type: none"> a) Ølsemaglevej, 4600 Køge (see attachment 1) b) Karlslunde Mosevej, 4600 Køge (see attachment 2)
Ca 12:00	Mini bus to SPÆNCOM AS headquarters (Akacievej 1 DK-2640 Hedehusene)
Ca 13:00	SPÆNCOM program <ul style="list-style-type: none"> -Presentation and discussion of SPAENCOM concepts for bridges -Discussion
15:30	Latest time for transport to Kastrup
18:10	SK462, arrival Oslo at 19:20

Remarks:

Safety: **The bridges are in use and under traffic, bring your own visibility jacket/west.**

12.2 Vedlegg vedrørende veidimensjonering

12.2.1 Breddeutvidelse

	Radius	Stopsikt	tillegg pga 0%fall	tillegg pga maks fall	Total stopsikt u/fall	Siktbredde	Tilgjengelig siktbredde	Breddeutvidelse	Total stopsikt m/fall	Siktbredde	Breddeutvidelse
N100	1750	260	0	47	260	4,83	4,75	0,08	307	6,73	1,98
N100 ny SVV	1750	240	0	47	240	4,11	4,50	0,00	287	5,88	1,38
N100 ny NV	1750	193	0	47	193	2,66	3,75	0,00	240	4,11	0,36

	Radius	Stopsikt	tillegg pga 0%fall	tillegg pga maks fall	Total stopsikt m/fall	Tilgj. Bredder N100	Tilgj. Bredder ny N100	Tilgj. Bredder NV	Siktbredde	Breddeutvidelse N100	Breddeutvidelse ny N100	Breddeutvidelse NV
N100	2250	260	0	47	307	4,75	4,50	3,75	5,24	0,49	0,74	1,49
N100 ny SVV	2250	240	0	47	287	4,75	4,50	3,75	4,58	0,00	0,08	0,83
N100 ny NV	2250	193	0	47	240	4,75	4,50	3,75	3,20	0,00	0,00	0,00

Følger gjeldende N100 med rundskriv											
	Radius	Stopsikt	tillegg pga 0%fall	tillegg pga maks fall	Total stoppsikt u/fall	Siktbredde	Tilgjengelig siktbredde	Breddutvidelse	Total stoppsikt m/fall	Siktbredde	Breddutvidelse
	1750	260	0	38	260	4,83	4,75	0,08	298	6,34	1,59
	1800	260	0	38	260	4,69	4,75	0,00	298	6,17	1,42
	1850	260	0	38	260	4,57	4,75	0,00	298	6,00	1,25
	1900	260	0	38	260	4,45	4,75	0,00	298	5,84	1,09
	1950	260	0	38	260	4,33	4,75	0,00	298	5,69	0,94
	2000	260	0	38	260	4,23	4,75	0,00	298	5,55	0,80
	2050	260	0	38	260	4,12	4,75	0,00	298	5,41	0,66
	2100	260	0	38	260	4,02	4,75	0,00	298	5,29	0,54
	2150	260	0	38	260	3,93	4,75	0,00	298	5,16	0,41
	2200	260	0	38	260	3,84	4,75	0,00	298	5,05	0,30
	2250	260	0	38	260	3,76	4,75	0,00	298	4,93	0,18
	2300	260	0	38	260	3,67	4,75	0,00	298	4,83	0,08
	2350	260	0	38	260	3,60	4,75	0,00	298	4,72	0,00
	2400	260	0	38	260	3,52	4,75	0,00	298	4,63	0,00
	2450	260	0	38	260	3,45	4,75	0,00	298	4,53	0,00
	2500	260	0	38	260	3,38	4,75	0,00	298	4,44	0,00

Siktbredde B_0		4,75	m								
Maksimal stigning		5	%								
Sikttillegg maks stigning		38	m								
				Breddutvidelse	0	0,25	0,5	1	1,5		
				Totalbredde	4,75	5	5,25	5,75	6,25		
Lengdefall	Stopsikt	Sikttillegg pga	Total stoppsikt	Breddutvidelse	Breddutvidelse	Breddutvidelse	Breddutvidelse	Breddutvidelse	Breddutvidelse	MINSTE PRAKTISKE RADIUS	
0	260	0	260	1780	1690	1610	1470	1360	1750		
0,5	260	3,8	263,8	1840	1740	1660	1520	1400	1750		
1	260	7,6	267,6	1890	1800	1710	1560	1440	1750		
1,5	260	11,4	271,4	1940	1850	1760	1610	1480	1750		
2	260	15,2	275,2	2000	1900	1810	1650	1520	1750		
2,5	260	19	279	2050	1950	1860	1700	1560	1750		
3	260	22,8	282,8	2110	2000	1910	1740	1600	1750		
3,5	260	26,6	286,6	2170	2060	1960	1790	1650	1750		
4	260	30,4	290,4	2220	2110	2010	1840	1690	1750		
4,5	260	34,2	294,2	2280	2170	2070	1890	1740	1750		
5	260	38	298	2340	2230	2120	1940	1780	1750		

12.3 Vedlegg vedrørende lastpåvirkning

12.3.1 Laster påført konstruksjonen fra MathCad

Stedsuavhengie

Egenlast

$$\gamma_c := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Areal broplate

$$h_d := 300\text{mm}$$

$$b_d := 12.6\text{m}$$

$$A_d := h_d \cdot \gamma_c = 7.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Areal kantelement

$$A_k := 1 \cdot (0.54 \cdot 0.9) \text{m}^2 = 0.486\text{m}^2$$

$$g_k := \gamma_c \cdot (A_k) = 12.15 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$A_{c,\text{bjelke}} := (3.145 \times 10^5 \text{mm}^2)$$

$$g_b := \gamma_c \cdot A_{c,\text{bjelke}} = 7.862 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Linjelast rekkverk

$$g_{\text{rekk}} := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Slitelag

$$g_{\text{slit}} := 3.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Nyttelast

Lastmodel 1

$$w_1 := 3\text{m} \quad L_{\text{max}} := 18\text{m}$$

Tandem-last

$$Q_{1k} := 300\text{kN} \quad \alpha_{Q1} := 1$$

$$Q_{2k} := 200\text{kN} \quad \alpha_{Q2} := 1$$

$$Q_3 := 100\text{kN} \quad \alpha_{Q3} := 1$$

Jevnt fordeltlast

$$q_{1k} := 9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \alpha_{q1} := 0.6$$

$$q_{2k} := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \alpha_{q2} := 1$$

$$q_{3k} := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \alpha_{q3} := 1$$

$$q_1 := q_{1k} \cdot \alpha_{q1} = 5.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_2 := q_{2k} \cdot \alpha_{q2} = 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_3 := q_{3k} \cdot \alpha_{q3} = 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Bremse- og akselasjonslast

$$Q_{1k} := 0.6 \alpha_{Q1} \cdot (2 \cdot Q_{1k}) + 0.1 \cdot \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot w_1 \cdot L = 389.16\text{kN}$$

Lastmodel 2

$$Q_{ak} := 400\text{kN}$$

$$\beta_Q := 1$$

$$Q_a := \beta_Q \cdot Q_{ak} = 400\text{kN}$$

Vind last

$$\rho := 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_{\text{dir}} := 1$$

$$c_{\text{season}} := 1$$

$$c_{\text{prob}} := 1$$

$$c_{\text{alt}} := 1$$

$$v_{\text{b0.maks}} := 31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{b0.min}} := 22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{b0.sann}} := 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{b.maks}} := c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot c_{\text{alt}} \cdot c_{\text{prob}} \cdot v_{\text{b0.maks}} = 31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{b.min}} := c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot c_{\text{alt}} \cdot c_{\text{prob}} \cdot v_{\text{b0.min}} = 22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{b.sann}} := c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot c_{\text{alt}} \cdot c_{\text{prob}} \cdot v_{\text{b0.sann}} = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_{\text{emaks}} := 3.65$$

$$c_{\text{emin}} := 1.17$$

$$c_{\text{esann}} := 2.35$$

Terrengkategori 0
4,5 (30 m)

$$c_{f,y} := 1.25$$

$$c_{f,z} := 0.9$$

$$c_0 := 1$$

$$C_{1maks} := c_{emaks} \cdot c_{f,y} = 4.563$$

$$C_{1min} := c_{emin} \cdot c_{f,y} = 1.462$$

$$C_{1sann} := c_{esann} \cdot c_{f,y} = 2.938$$

Terreng kategori IV, h<10 m

$$C_{2maks} := c_{emaks} \cdot c_{f,z} = 3.285$$

$$C_{2min} := c_{emin} \cdot c_{f,z} = 1.053$$

$$C_{2sann} := c_{esann} \cdot c_{f,z} = 2.115$$

Terreng kategori II,
10 meter over bakken

$$d := 1280\text{mm}$$

$$d_{\text{tot},y} := d + 1.2\text{m} = 2.48\text{m}$$

$$b := 12.6\text{m}$$

$$L_{\text{spenn}} := 18\text{m}$$

$$A_{\text{ref},y} := d_{\text{tot},y} \cdot L_{\text{spenn}} = 44.64\text{m}^2$$

$$A_{\text{ref},z} := b \cdot L_{\text{spenn}} = 226.8\text{m}^2$$

$$F_{W,ymaks} := 0.5 \cdot \rho \cdot v_{b,maks}^2 \cdot C_{1maks} \cdot A_{\text{ref},y} = 122.329\text{kN}$$

$$F_{W,ymin} := 0.5 \cdot \rho \cdot v_{b,min}^2 \cdot C_{1min} \cdot A_{\text{ref},y} = 19.749\text{kN}$$

$$F_{W,ysann} := 0.5 \cdot \rho \cdot v_{b,sann}^2 \cdot C_{1sann} \cdot A_{\text{ref},y} = 73.761\text{kN}$$

$$F_{W,xmaks} := 0.5 F_{W,ymaks} = 61.165\text{kN}$$

$$F_{W,xmin} := 0.5 F_{W,ymin} = 9.875\text{kN}$$

$$F_{W,xsann} := 0.5 F_{W,ysann} = 36.88\text{kN}$$

$$F_{W,zmaks} := 0.5 \cdot \rho \cdot v_{b,maks}^2 \cdot C_{2maks} \cdot A_{\text{ref},z} = 447.488\text{kN} \quad (6.2)$$

$$F_{W,zmin} := 0.5 \cdot \rho \cdot v_{b,min}^2 \cdot C_{2min} \cdot A_{\text{ref},z} = 72.243\text{kN} \quad (6.2)$$

$$F_{W,zsann} := 0.5 \cdot \rho \cdot v_{b,sann}^2 \cdot C_{2sann} \cdot A_{\text{ref},z} = 145.104\text{kN} \quad (6.2)$$

12.3.2 Lastkombinasjoner

Lastkombinasjon		
6.10a	Dominerende	Tekst
	1 gr1a	$1,35 \cdot \text{Egenvekt} + 1,05 \cdot \text{Temp} + 1,05 \cdot \text{gr1a} + 1,05 \cdot \text{Vind}$
	2 gr1b	$1,35 \cdot \text{Egenvekt} + 1,05 \cdot \text{Temp} + 1,05 \cdot \text{gr1b} + 1,05 \cdot \text{Vind}$
	5 Vind	$1,35 \cdot \text{Egenvekt} + 1,05 \cdot \text{Temp} + 1,05 \cdot \text{Vind}$
	7 Temp	$1,35 \cdot \text{Egenvekt} + 1,05 \cdot \text{Temp} + 1,05 \cdot \text{Vind}$
6.10b		
	10 gr1a	$1,2 \cdot \text{Egenvekt} + 1,05 \cdot \text{Temp} + 1,5 \cdot \text{gr1a} + 1,05 \cdot \text{Vind}$
	11 gr1b	$1,2 \cdot \text{Egenvekt} + 1,05 \cdot \text{Temp} + 1,5 \cdot \text{gr1b} + 1,05 \cdot \text{Vind}$
	14 Vind	$1,2 \cdot \text{Egenvekt} + 1,05 \cdot \text{Temp} + 1,5 \cdot \text{Vind}$
	16 Temp	$1,2 \cdot \text{Egenvekt} + 1,5 \cdot \text{Temp} + 1,05 \cdot \text{gr1a} + 1,05 \cdot \text{Vind}$
	17 Temp	$1,2 \cdot \text{Egenvekt} + 1,5 \cdot \text{Temp} + 1,05 \cdot \text{gr1b} + 1,05 \cdot \text{Vind}$
Tiln perm		
	30 gr1a	$1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr1a} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	31 gr1b	$1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr1b} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	34 Vind	$1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	36 Temp	$1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
Ulykke		
	40 gr1a	$1 \cdot \text{Ulykke} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr1a} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	41 gr1b	$1 \cdot \text{Ulykke} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr1b} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	42 gr2	$1 \cdot \text{Ulykke} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr2} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	43 gr4	$1 \cdot \text{Ulykke} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr4} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	44 Vind	$1 \cdot \text{Ulykke} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,6 \cdot \text{Vind}$
	45 Snø	$1 \cdot \text{Ulykke} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{Snø} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	46 Temp	$1 \cdot \text{Ulykke} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
Seismisk		
	50 gr1a	$1 \cdot \text{Jordskjelv} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr1a} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	51 gr1b	$1 \cdot \text{Jordskjelv} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr1b} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	52 gr2	$1 \cdot \text{Jordskjelv} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr2} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	53 gr4	$1 \cdot \text{Jordskjelv} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{gr4} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	54 Vind	$1 \cdot \text{Jordskjelv} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	55 Snø	$1 \cdot \text{Jordskjelv} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{Snø} + 0,5 \cdot \text{Vind}$
	56 Temp	$1 \cdot \text{Jordskjelv} + 1 \cdot \text{Egenvekt} + 0,5 \cdot \text{Temp} + 0,5 \cdot \text{Vind}$

12.3.3 Lastkombinasjon og momentberegning for minimum vindlast

Egenvekt	Lastfaktor	1min	46,251	Lastfaktor	2min	46,251	Lastfaktor	5/7min	46,251	Lastfaktor	10 min	41,112	Lastfaktor	11 min	41,112	Lastfaktor	14 min	41,112	Lastfaktor	16 min	41,112	Lastfaktor	17 min	41,112
gr1a J	1,05	4,5255	0	0	0	0	0	0	0	1,5	6,465	0	0	0	0	0	0	0	1,05	4,5255	0	0	0	
gr1a P	1,05	157,5	0	0	0	0	0	0	0	1,5	225	0	0	0	0	0	0	0	1,05	157,5	0	0	0	
gr1b	0	0	210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	210
Vind min	1,05	0,378	0,378	1,05	0,378	0,378	0,378	0,378	0,378	1,05	0,378	0,378	1,05	0,378	0,378	1,05	0,54	0,54	1,05	0,378	0,378	1,05	0,378	0,378
Vind maks	1,05	0	0	1,05	0	0	0	0	0	1,05	0	0	1,05	0	0	1,05	0	0	1,05	0	0	1,05	0	0
Vind sann	1,35	0	0	1,05	0	0	0	0	0	1,05	0	0	1,05	0	0	1,05	0	0	1,05	0	0	1,05	0	0
Egenvekt	1,35	1873,2	1,35	1873,2	1,35	1873,2	1,35	1873,2	1,35	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1665,0
gr1a J	1,05	183,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	1,5	261,8	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	1,05	183,3	0	0	0,0	0,0
gr1a P	1,05	1323,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	1,5	1890,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	1,05	1323,0	0	0	0,0	0,0
gr1b	0	0,0	1,05	945,0	0	0,0	0	0,0	0	0	0,0	0	0,0	1350,0	0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0	0,0	945,0
Vind min	1,05	15,3	1,05	15,3	1,05	15,3	1,05	15,3	1,05	1,05	15,3	1,05	15,3	15,3	1,05	15,3	21,9	21,9	1,05	15,3	15,3	1,05	15,3	15,3
Vind maks	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	1,05	0,0	1,05	0,0	0,0	1,05	0,0	0,0	0,0	1,05	0,0	0,0	1,05	0,0	0,0
Vind sann	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	1,05	0,0	1,05	0,0	0,0	1,05	0,0	0,0	0,0	1,05	0,0	0,0	1,05	0,0	0,0
Sum moment		3394,8		2833,5		1888,5		1888,5		3832,2		3030,3		3030,3		1686,9		1686,9		3186,6		2625,3		2625,3
Moment LL		2071,8		1888,5		1888,5		1888,5		1942,2		1680,3		1680,3		1686,9		1686,9		1863,6		1680,3		1680,3
Moment Pa		1323,0		0,0		0,0		0,0		1890,0		0,0		1350,0		0,0		0,0		1323,0		0,0		945,0
Moment Pb		0,0		945,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		945,0
Moment		3394,8		2833,5		1888,5		1888,5		3832,2		3030,3		3030,3		1686,9		1686,9		3186,6		2625,3		2625,3

12.3.4 Lastkombinasjon og momentberegning for sannsynlig vindlast

	lastfaktor	1samm	lastfaktor	2samm	lastfaktor	5/7samm	lastfaktor	10samm	lastfaktor	11samm	lastfaktor	14samm	lastfaktor	16samm	lastfaktor	17samm
Egenvekt	1,35	46,251	1,35	46,251	1,35	46,251	1,2	41,112	1,2	41,112	1,2	41,112	1,2	41,112	1,2	41,112
gr1a J	1,05	4,5255	0	0	0	0	1,5	6,465	0	0	0	0	1,05	4,5255	0	0
gr1a P	1,05	157,5	0	0	0	0	1,5	225	0	0	0	0	1,05	157,5	0	0
gr1b	0	0	1,05	210	0	0	0	0	1,5	300	0	0	0	0	1,05	210
Vind min	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,5	0	1,05	0	1,05	0
Vind maks	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,5	0	1,05	0	1,05	0
Vind sann	1,05	0,7665	1,05	0,7665	1,05	0,7665	1,05	0,7665	1,05	0,7665	1,5	1,095	1,05	0,7665	1,05	0,7665
Egenvekt	1,35	1873,2	1,35	1873,2	1,35	1873,2	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1665,0
gr1a J	1,05	183,3	0	0,0	0	0,0	1,5	261,8	0	0,0	0	0,0	1,05	183,3	0	0,0
gr1a P	1,05	1323,0	0	0,0	0	0,0	1,5	1890,0	0	0,0	0	0,0	1,05	1323,0	0	0,0
gr1b	0	0,0	1,05	945,0	0	0,0	0	0,0	1,5	1350,0	0	0,0	0	0,0	1,05	945,0
Vind min	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,5	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0
Vind maks	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,5	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0
Vind sann	1,05	31,0	1,05	31,0	1,05	31,0	1,05	31,0	1,05	31,0	1,5	44,3	1,05	31,0	1,05	31,0
Sum moment		3410,5		2849,2		1904,2		3847,9		3046,1		1709,4		3202,4		2641,1
Moment LL		2087,5		1904,2		1904,2		1904,2		1696,1		1709,4		1879,4		1696,1
Moment Pa		1323,0		0,0		0,0		1890,0		0,0		0,0		1323,0		0,0
Moment Pb		0,0		945,0		0,0		0,0		1350,0		0,0		0,0		945,0
Moment		3410,5		1904,2		1904,2		3847,9		1696,1		1709,4		3202,4		1696,1

12.3.5 Lastkombinasjon og momentberegning for maksimum vindlast

	Lastfaktor	1maks	Lastfaktor	2maks	Lastfaktor	5/7maks	Lastfaktor	10 maks	Lastfaktor	11 maks	Lastfaktor	14 maks	Lastfaktor	16 maks	Lastfaktor	17 maks
Egenvekt	1,35	46,251	1,35	46,251	1,35	46,251	1,2	41,112	1,2	41,112	1,2	41,112	1,2	41,112	1,2	41,112
gr1a J	1,05	4,5255	0	0	0	0	1,5	6,465	0	0	0	0	1,05	4,5255	0	0
gr1a P	1,05	157,5	0	0	0	0	1,5	225	0	0	0	0	1,05	157,5	0	0
gr1b	0	0	1,05	210	0	0	0	0	1,5	300	0	0	0	0	1,05	210
Vind min	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,5	0	1,05	0	1,05	0
Vind maks	1,05	2,373	1,05	2,373	1,05	2,373	1,05	2,373	1,05	2,373	1,5	3,39	1,05	2,373	1,05	2,373
Vind sann	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,05	0	1,5	0	1,05	0	1,05	0
Egenvekt	1,35	1873,2	1,35	1873,2	1,35	1873,2	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1665,0	1,2	1665,0
gr1a J	1,05	183,3	0	0,0	0	0,0	1,5	261,8	0	0,0	0	0,0	1,05	183,3	0	0,0
gr1a P	1,05	1323,0	0	0,0	0	0,0	1,5	1890,0	0	0,0	0	0,0	1,05	1323,0	0	0,0
gr1b	0	0,0	1,05	945,0	0	0,0	0	0,0	1,5	1350,0	0	0,0	0	0,0	1,05	945,0
Vind min	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,5	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0
Vind maks	1,05	96,1	1,05	96,1	1,05	96,1	1,05	96,1	1,05	96,1	1,5	137,3	1,05	96,1	1,05	96,1
Vind sann	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0	1,5	0,0	1,05	0,0	1,05	0,0
Sum moment		3475,6		2914,3		1969,3		3913,0		3111,1		1802,3		3267,4		2706,1
Moment Ll		2152,6		1969,3		1969,3		2023,0		1761,1		1802,3		1944,4		1761,1
Moment Pa		1323,0		0,0		0,0		1890,0		0,0		0,0		1323,0		0,0
Moment Pb		0,0		945,0		0,0		0,0		1350,0		0,0		0,0		945,0
Moment		3475,6		1969,3		1969,3		3913,0		1761,1		1802,3		3267,4		1761,1

12.3.6 Stivheter fra MathCad

Beregning av effektiv E-modul for MOT-900

Materialdata

$$f_{ck, \text{bjelke}} := 55 \text{MPa}$$

$$f_{cm, \text{bjelke}} := 63 \text{MPa}$$

$$f_{ctm, \text{bjelke}} := 4.2 \text{MPa}$$

$$E_{cm, \text{bjelke}} := 38 \text{GPa}$$

Bjelke dimensjoner

$$h_b := 900 \text{mm}$$

$$h_1 := 150 \text{mm}$$

$$h_2 := 70 \text{mm}$$

$$h_4 := 64 \text{mm}$$

$$h_5 := 170 \text{mm}$$

$$h_3 := h_b - h_1 - h_5 = 580 \text{mm}$$

$$b_1 := 600 \text{mm}$$

$$b_2 := 225 \text{mm}$$

$$b_4 := 270 \text{mm}$$

$$b_5 := 690 \text{mm}$$

$$b_3 := 150 \text{mm}$$

Areal for konstruksjonselementene (A2 og B4 er 2 trekanter)

$$A_{c1} := b_1 \cdot h_1 = 9 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{c4} := b_4 \cdot h_4 = 1.728 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{c2} := b_2 \cdot h_2 = 1.575 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{c5} := b_5 \cdot h_5 = 1.173 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{c3} := b_3 \cdot h_3 = 8.7 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{c, \text{bjelke}} := A_{c1} + A_{c2} + A_{c3} + A_{c4} + A_{c5} = 3.273 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_c := A_{c, \text{bjelke}} = 3.273 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

$$g_b := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot A_{c, \text{bjelke}} = 8.183 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$f_{p,0.1k} := 1664 \text{MPa}$$

$$f_{pk} := 1860 \text{MPa}$$

Beregning av bjelkestivheter

$$f_{p0.1k} := 1664 \text{MPa}$$

$$E_p := 195 \text{ GPa}$$

$$A_{p,\text{tau}} := 100 \text{ mm}^2$$

$$\gamma_s := 1.15$$

$$n_{\text{tau}} := 34$$

$$A_p := n_{\text{tau}} \cdot A_{p,\text{tau}} = 3.4 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$\sigma_{p0} := \min(0.75 \cdot f_{pk}, 0.85 \cdot f_{p0.1k}) = 1.395 \times 10^3 \cdot \text{MPa}$$

$$P_0 := \sigma_{p0} \cdot A_p = 4.743 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Høyde armering

$$h_{\text{lag1}} := 71.5 \text{ mm} \quad n_{\text{lag1}} := 13$$

$$h_{\text{lag2}} := 113.7 \text{ mm} \quad n_{\text{lag2}} := 13$$

$$h_{\text{lag3}} := 156 \text{ mm} \quad n_{\text{lag3}} := 4$$

$$h_{\text{lag4}} := 826 \text{ mm} \quad n_{\text{lag4}} := 4$$

$$A_{p1} := A_{p,\text{tau}} \cdot n_{\text{lag1}} = 1.3 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{p2} := A_{p,\text{tau}} \cdot n_{\text{lag2}} = 1.3 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{p3} := A_{p,\text{tau}} \cdot n_{\text{lag3}} = 400 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{p4} := A_{p,\text{tau}} \cdot n_{\text{lag4}} = 400 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{p,\text{ok}} := A_{p4} = 400 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{p,\text{uk}} := A_{p1} + A_{p2} + A_{p3} = 3 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Tyngdepunkt spennarmering

$$h_{p,\text{ok}} := h_{\text{lag4}} = 826 \cdot \text{mm}$$

$$h_{p.uk} := \frac{h_{lag1} \cdot A_{p1} + h_{lag2} \cdot A_{p2} + h_{lag3} \cdot A_{p3}}{A_{p1} + A_{p2} + A_{p3}} = 101.053 \cdot \text{mm}$$

$$h_p := \frac{h_{lag1} \cdot A_{p1} + h_{lag2} \cdot A_{p2} + h_{lag3} \cdot A_{p3} + h_{lag4} \cdot A_{p4}}{A_{p1} + A_{p2} + A_{p3} + A_{p4}} = 186.341 \cdot \text{mm}$$

Eksentrisitet betong og stål fra uk

$$e_1 := h_b - \frac{h_1}{2} = 825 \cdot \text{mm}$$

$$e_2 := h_b - h_1 - \frac{h_2}{3} = 726.667 \cdot \text{mm}$$

$$e_3 := h_5 + \frac{h_3}{2} = 460 \cdot \text{mm}$$

$$e_4 := h_5 + \frac{h_4}{3} = 191.333 \cdot \text{mm}$$

$$e_5 := \frac{h_5}{2} = 85 \cdot \text{mm}$$

Beregning av tyngepunkt

$$\eta_{k.bjelke} := \frac{E_p}{E_{cm.bjelke}} = 5.132$$

$$A_{t.k} := A_{c.bjelke} + (\eta_{k.bjelke} - 1) \cdot A_p = 3.414 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

$$z_{A_{c.bjelke.k}} := A_{c1} \cdot e_1 + A_{c2} \cdot e_2 + A_{c3} \cdot e_3 + A_{c4} \cdot e_4 + A_{c5} \cdot e_5 = 1.39 \times 10^8 \cdot \text{mm}^3$$

$$z_{A_{s.k}} := (\eta_{k.bjelke} - 1) \cdot (h_{lag1} \cdot A_{p1} + h_{lag2} \cdot A_{p2} + h_{lag3} \cdot A_{p3} + h_{lag4} \cdot A_{p4}) = 2.618 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

$$z_{t.k} := \frac{z_{A_{c.bjelke.k}} + z_{A_{s.k}}}{A_{t.k}} = 414.818 \cdot \text{mm}$$

Beregning av treghetsmoment korttid

$$I_{z.1.k} := \frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot h_1^3 + A_{c1} \cdot (z_{t.k} - e_1)^2 = 1.531 \times 10^{10} \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.2.k} := \frac{2}{36} \cdot b_2 \cdot h_2^3 + A_{c2} \cdot (z_{t.k} - e_2)^2 = 1.536 \times 10^9 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.3.k} := \frac{1}{12} \cdot b_3 \cdot h_3^3 + A_{c3} \cdot (z_{t.k} - e_3)^2 = 2.617 \times 10^9 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.4.k} := \frac{1}{12} \cdot b_4 \cdot h_4^3 + A_{c4} \cdot (z_{t.k} - e_4)^2 = 8.69 \times 10^8 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.5.k} := \frac{1}{12} \cdot b_5 \cdot h_5^3 + A_{c5} \cdot (z_{t.k} - e_5)^2 = 1.304 \times 10^{10} \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.\text{bjelke.k}} := I_{z.1.k} + I_{z.2.k} + I_{z.3.k} + I_{z.4.k} + I_{z.5.k} = 3.337 \times 10^{10} \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.p1.k} := (\eta_{k.\text{bjelke}} - 1) \cdot A_{p1} \cdot (z_{t.k} - h_{\text{lag1}})^2 = 6.331 \times 10^8 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.p2.k} := (\eta_{k.\text{bjelke}} - 1) \cdot A_{p2} \cdot (z_{t.k} - h_{\text{lag2}})^2 = 4.87 \times 10^8 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.p3.k} := (\eta_{k.\text{bjelke}} - 1) \cdot A_{p3} \cdot (z_{t.k} - h_{\text{lag3}})^2 = 1.107 \times 10^8 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.p4.k} := (\eta_{k.\text{bjelke}} - 1) \cdot A_{p4} \cdot (z_{t.k} - h_{\text{lag4}})^2 = 2.794 \times 10^8 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.p.k} := I_{z.p1.k} + I_{z.p2.k} + I_{z.p3.k} + I_{z.p4.k} = 1.51 \times 10^9 \cdot \text{mm}^4$$

$$I_{z.k} := I_{z.\text{bjelke.k}} + I_{z.p.k} = 3.489 \times 10^{10} \cdot \text{mm}^4$$

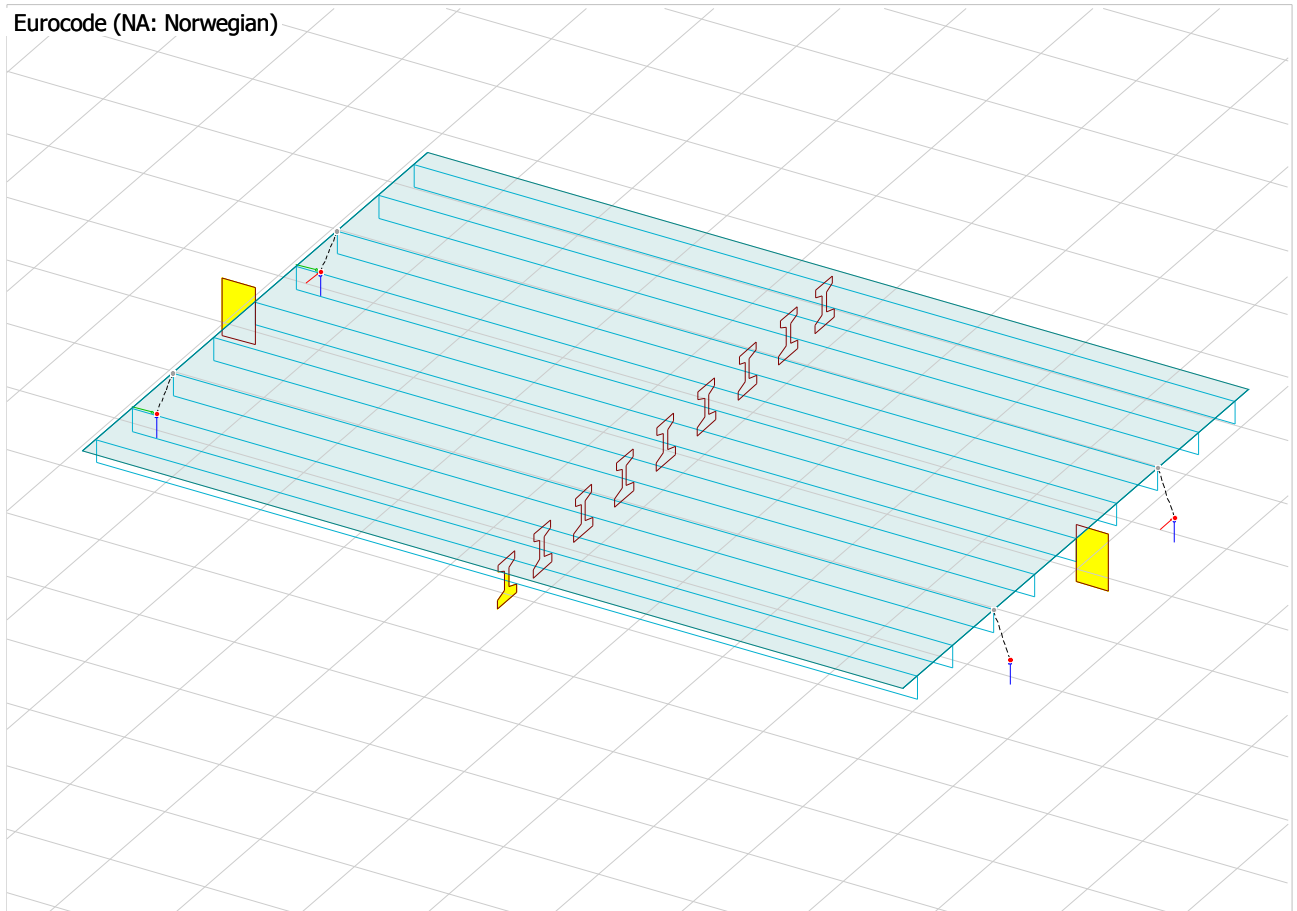
Stivheter og E-moduler for elementene

Korttid

$$EI_{\text{bjelke.k}} := E_{\text{cm.bjelke}} \cdot (I_{z.\text{bjelke.k}} + I_{z.p.k}) = 1.326 \times 10^{15} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$E_{\text{ekv.k}} := \frac{EI_{\text{bjelke.k}}}{I_{z.\text{bjelke.k}}} = 39719 \text{ MPa}$$

12.3.7 Utskrift av seismisk modellering fra FEM-Design 3D



Jordskjelvberegning MOT-900-bro

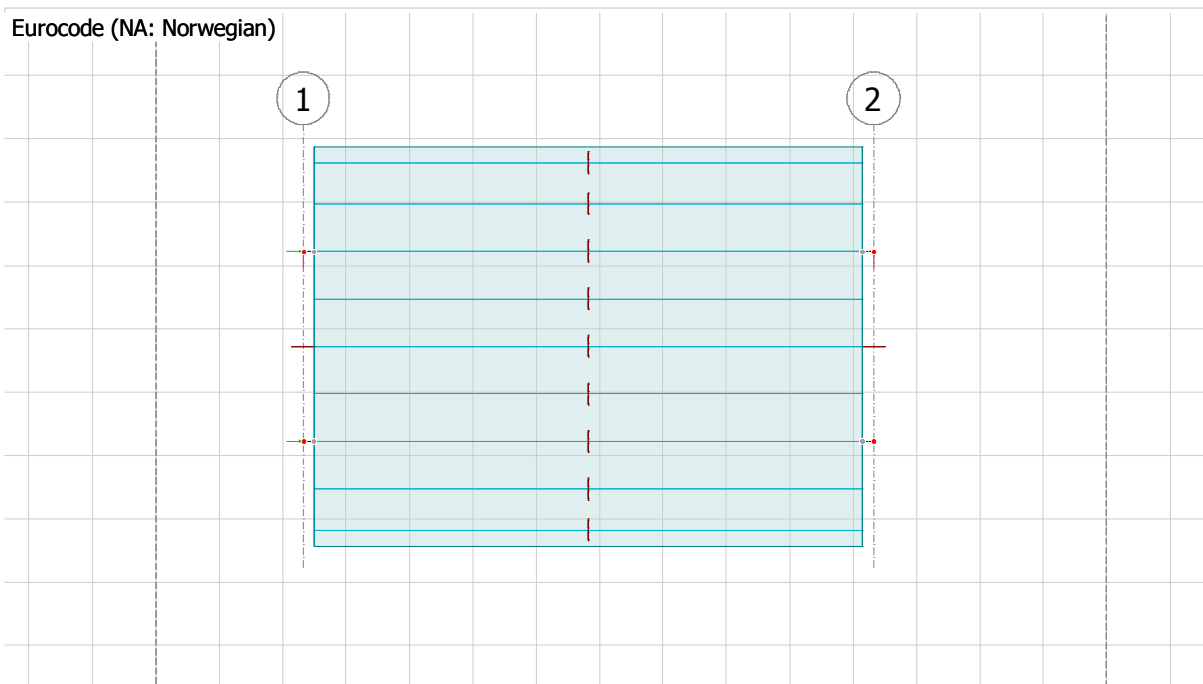
$a_g = 0,72 \text{ m/s}^2$

Grunntype E

FEM-Design 3D Structure	Contents
1 Geometri / Structure.....	3
1.1 Grafisk presentasjon geometri / Graphic presentation geometry.....	3
1.2 Materiale / Material.....	3
2 Laster / Loads.....	5
2.1 Grafisk presentasjon laster / Graphic presentation loads.....	5
2.2 Laster / Loads.....	6
3 Elementnett / Finite elements.....	7
3.1 Element inndeling / Mesh.....	7
4 Statikk / Analysis.....	8
4.1 Likevekt / Equilibrium.....	8
4.2 Egenfrekvenser / Eigenfrequencies.....	8
4.2.1 Masser / Masses.....	8
4.2.2 Svingeformer / Vibration shapes.....	9
4.3 Jordskjelv analyse / Seismic analysis.....	9
4.3.1 Inndata jordskjelv / Input data seismic.....	9
4.3.2 Jordskjelvslaster / Equivalent loads.....	10

1 Geometri / Structure

1.1 Grafisk presentasjon geometri / Graphic presentation geometry



1.2 Materiale / Material

Concrete materials

No.	Name	Fck	Fctm	Fctk	Ecm	Yield strain	Ultimate strain
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]
1	C45/55	45.000	3.800	2.700	36000.000	0.00175	0.00350

Gamma c	Gamma c, acc	Gamma cE	Gamma s	Gamma s, acc	Alfa cc	Alfa ct
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1.50	1.20	1.20	1.15	1.00	0.85	0.85

Density	Therm. coeff.	Poisson's ratio	Creep coefficient, SLS	Creep coefficient, ULS
[t/m ³]	[1/°C]	[-]	[-]	[-]
2.548	0.000010	0.200	2.700	2.700

Shrinkage	Dyna r.	Stab r.
[-]	[-]	[-]
0.450	1.000	1.000

MSc Bygg 2017 - Standardisering av brokonstruksjoner

No.	Name	Fck	Fctm	Fctk	Ecm	Yield strain	Ultimate strain
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]
2	C55/67_MOD	55.000	4.200	3.000	39719.000	0.00180	0.00310

Gamma c	Gamma c, acc	Gamma cE	Gamma s	Gamma s, acc	Alfa cc	Alfa ct
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1.50	1.20	1.20	1.15	1.00	0.85	0.85

Density	Therm. coeff.	Poisson's ratio	Creep coefficient, SLS	Creep coefficient, ULS
[t/m ³]	[1/°C]	[-]	[-]	[-]
2.548	0.000010	0.200	2.700	2.700

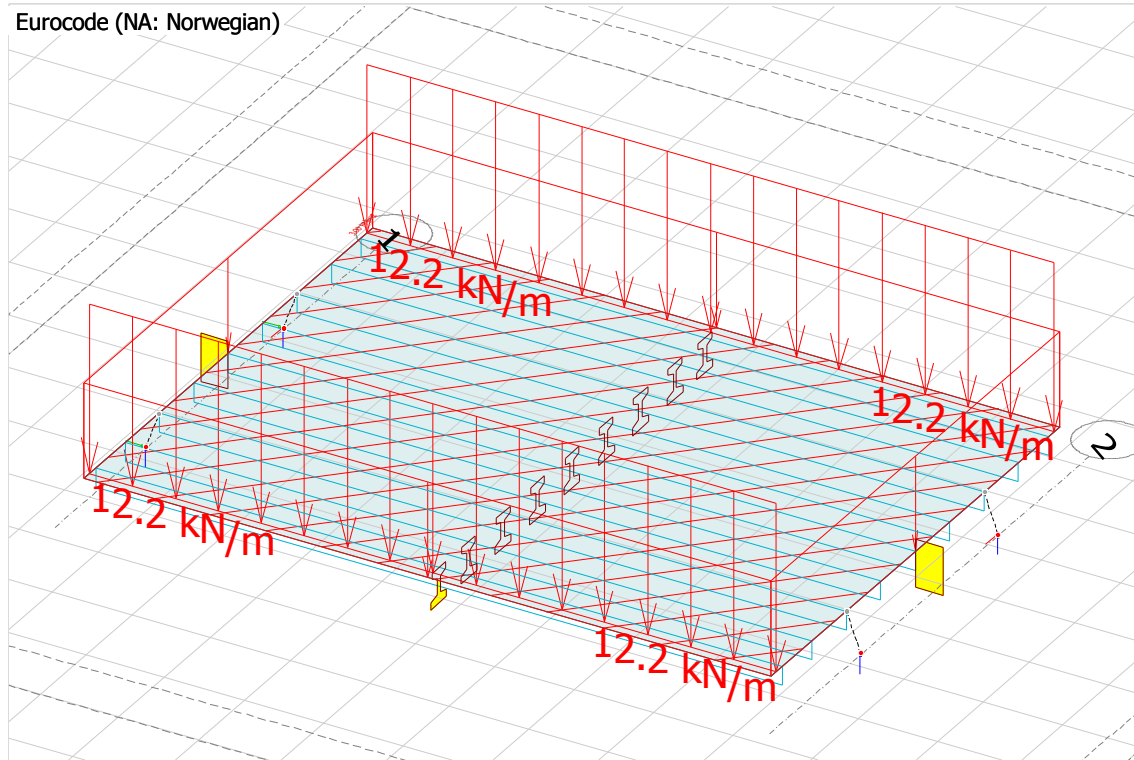
Shrinkage	Dyna r.	Stab r.
[-]	[-]	[-]
0.450	1.000	1.000

2 Laster / Loads

2.1 Grafisk presentasjon laster / Graphic presentation loads

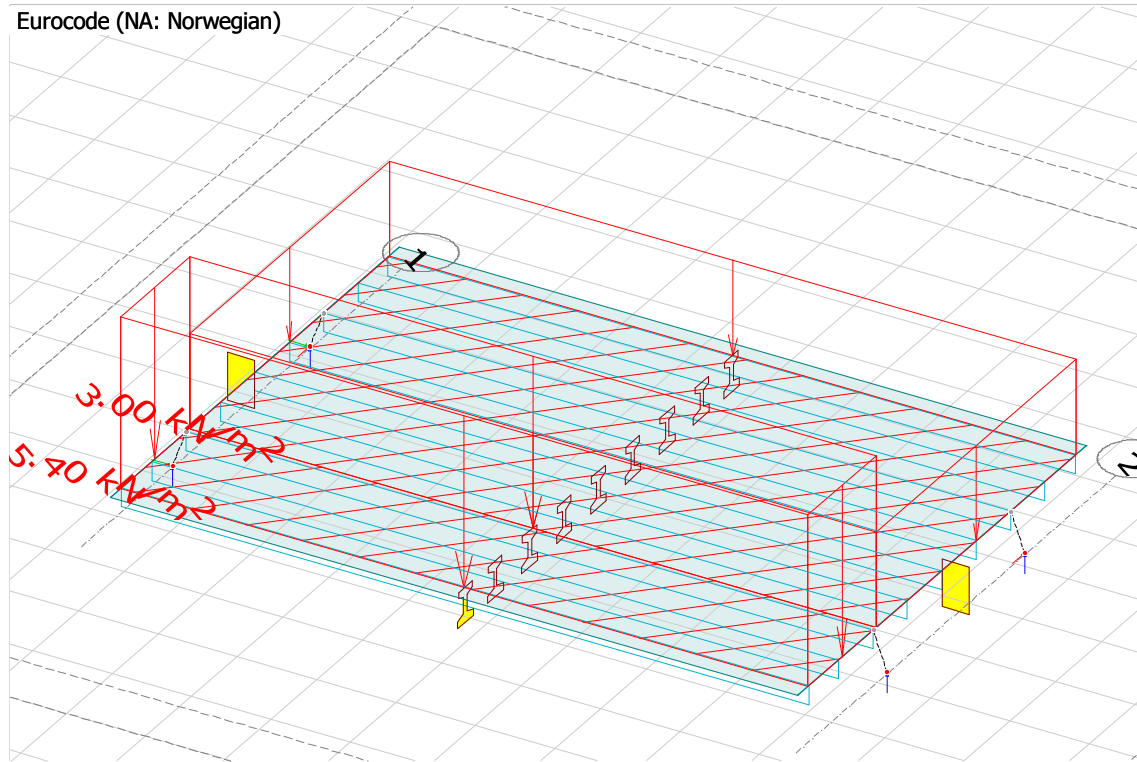
Påført egenlast

Eurocode (NA: Norwegian)



LM 1

Eurocode (NA: Norwegian)



2.2 Laster / Loads

Load cases

No.	Name	Type	Duration class
1	AutoEgenvekt	+Struc. dead load	Permanent
2	Påført egenvekt	Ordinary	Permanent
3	LM1	Ordinary	Permanent

3 Elementnett / Finite elements

3.1 Element inndeling / Mesh



4 Statikk / Analysis

4.1 Likevekt / Equilibrium

Equilibrium

Load case	Component	Loads	Reactions	Error
[-]	[-]	kN(m)	kN(m)	[%]
AutoEg...	Fx'	0.000	0.000	-
	Fy'	0.000	0.000	-
	Fz'	-3484.600	3484.599	0.00
	Mx'	-46856.393	46856.380	0.00
	My'	47546.903	47546.889	0.00
	Mz'	0.000	-0.002	-
Påført e...	Fx'	0.000	0.000	-
	Fy'	0.000	0.000	-
	Fz'	-1074.330	1074.330	0.00

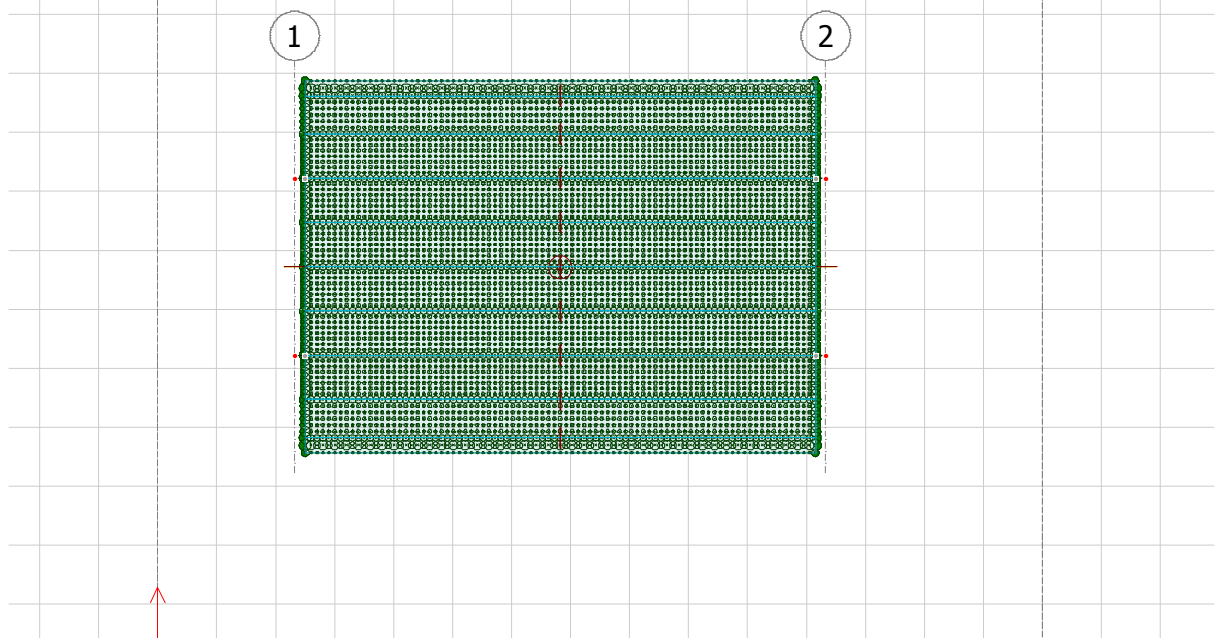
Load case	Component	Loads	Reactions	Error
[-]	[-]	kN(m)	kN(m)	[%]
LM1	Mx'	-14446.200	14446.195	0.00
	My'	14659.089	14659.084	0.00
	Mz'	0.000	-0.000	-
	Fx'	0.000	0.000	-
	Fy'	0.000	0.000	-
	Fz'	-731.790	731.790	0.00
	Mx'	-9298.562	9298.559	0.00
	My'	9985.177	-9985.174	0.00
	Mz'	0.000	-0.000	-

4.2 Egenfrekvenser / Eigenfrequencies

4.2.1 Masser / Masses

Load case - mass conversion

Eurocode (NA: Norwegian) code: Eigenfrequencies - Converted masses - [t]



Load case - mass conversions

No.	Factor	Load case
1	1.000	AutoEgenvekt
2	1.000	Påført egenvekt
3	0.200	LM1

MSc Bygg 2017 - Standardisering av brokonstruksjoner

4.2.2 Svingeformer / Vibration shapes

Eigenfrequencies

Shape	Frequency	Period
[-]	[Hz]	[s]
1	12.998	0.077
2	15.610	0.064
3	19.546	0.051
4	50.578	0.020
5	59.519	0.017
6	61.815	0.016
7	77.420	0.013
8	83.686	0.012
9	86.699	0.012
10	91.868	0.011

4.3 Jordskjelv analyse / Seismic analysis

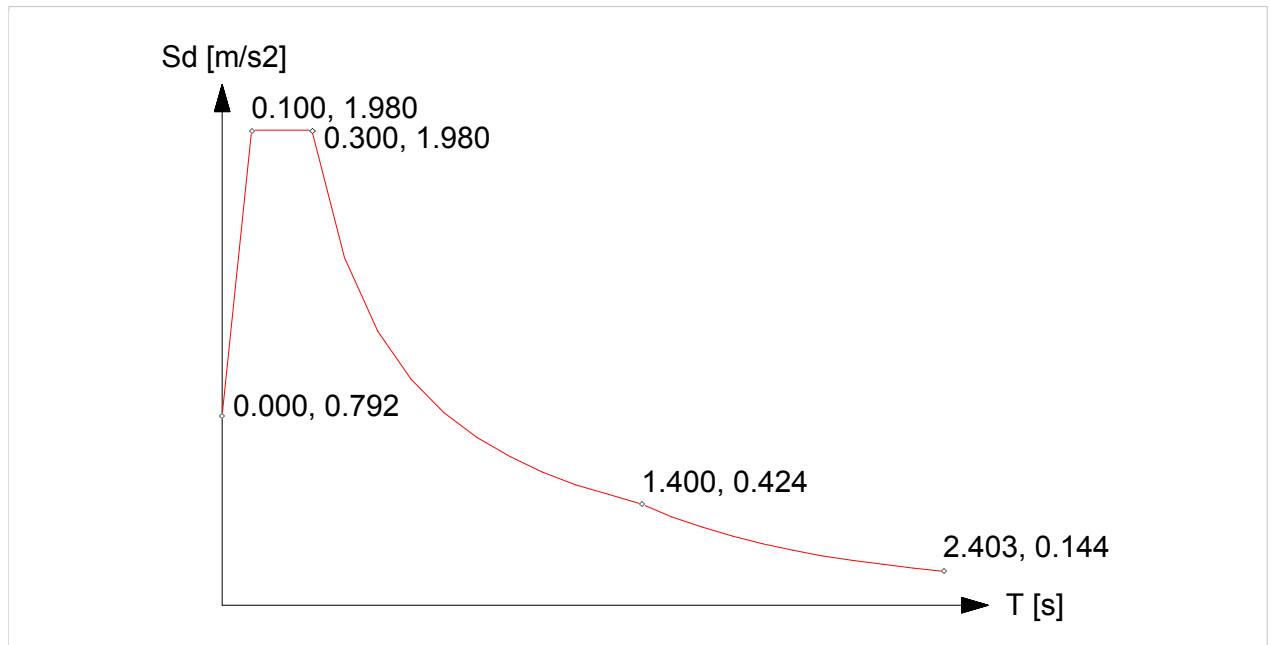
4.3.1 Inndata jordskjelv / Input data seismic

Effective/Modal masses in the x'-y'-z' coordinate system

Shape no.	T	mx'	my'	mz'	mx'	my'	mz'
[-]	[s]	[%]	[%]	[%]	[t]	[t]	[t]
1	0.077	0.0	98.4	0.0	0.000	471.844	0.000
2	0.064	99.7	0.0	0.0	478.428	0.000	0.000
3	0.051	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000
4	0.020	0.0	0.5	0.0	0.000	2.555	0.000
5	0.017	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000
6	0.016	0.0	0.6	0.0	0.000	2.692	0.000
7	0.013	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000
8	0.012	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000
9	0.012	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000
10	0.011	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000

Seismic load, structure information

Value	Quantity
Structure type	Non-building structure
ξ (damping factor) [%]	5.000
q_d (behaviour factor for displacements)	1.000



Seismic load, horizontal sp., standard

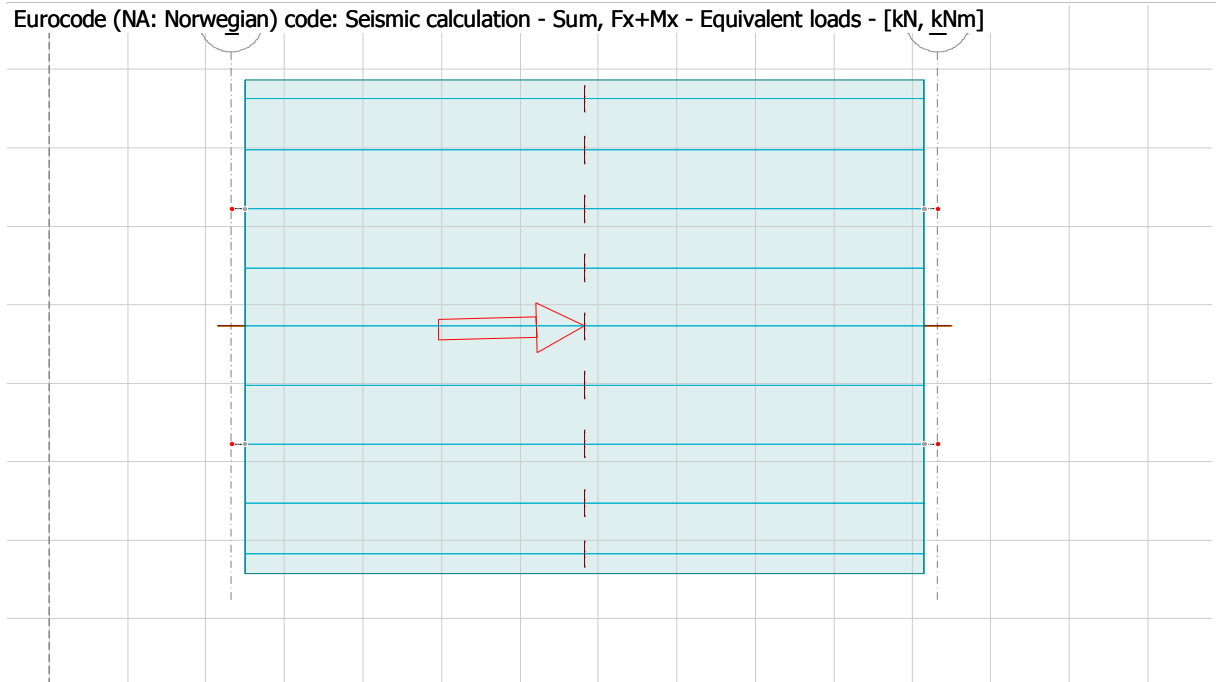
Value	Quantity
Type	1
Ground	E
ag [m/s ²]	0.720
S	1.650
TB [s]	0.100

Value	Quantity
TC [s]	0.300
TD [s]	1.400
q	1.500
beta	0.200

4.3.2 Jordskjelvslaster / Equivalent loads

MSc Bygg 2017 - Standardisering av brokonstruksjoner

Equivalent loads - X

Eurocode (NA: Norwegian) code: Seismic calculation - Sum, F_x+M_x - Equivalent loads - [kN, kNm]

Equivalent loads - Y

Eurocode (NA: Norwegian) code: Seismic calculation - Sum, F_y+M_y - Equivalent loads - [kN, kNm]