



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Master i konstruksjoner og materialer,
byggkonstruksjoner

Vårsemesteret, 2021

Åpen / ~~Konfidensiell~~

Forfatter:

Marie Sigvaldsen

Fagansvarlig: Gerhard Ersdal (Universitetet i Stavanger)

Samindi Samarakoon (Universitetet i Stavanger)

Veileder(e): Gerhard Ersdal (Universitetet i Stavanger)

Magne Langeteig (Statens vegvesen)

Tittel på masteroppgaven:

Momentkapasitet av slakkarmerte og spennarmerte betongkonstruksjoner med
korrosjonsskader

Engelsk tittel:

Flexural capacity of corrosion damaged reinforced and prestressed concrete structures

Studiepoeng: 30

Emneord:

Korrosjon
Kapasitetsberegning
Slakkarmering
Spennarmering
Betongbru

Sidetall: 115

+ vedlegg/annet: 67

Stavanger, 13. juni 2021

Forord

Denne oppgaven er skrevet som en avslutning på masterstudiet i Konstruksjoner og materialer ved Universitetet i Stavanger, vårsemesteret 2021. Oppgaven er skrevet ved Institutt for maskin, bygg og materialteknologi.

Oppgaven omhandler betongkonstruksjoner med korrosjonsskader på både slakkarmering og spennarmering, ulike nedbrytningsmekanismer knyttet til dette, i tillegg er beregningsmetoder for korroderte konstruksjoner undersøkt. Kapasiteten til Hafrsfjord bru har også blitt kontrollert. Arbeidet har gitt meg et innblikk i utfordringene knyttet til beregninger av eldre konstruksjoner med ulikt skadeomfang.

Jeg ønsker å takke Magne Langeteig ved Statens Vegvesen for gode råd og bidrag vedrørende bruinspeksjon og informasjon om Hafrsfjord bru, og Samindi Samarakoon for hjelp med beregninger av betongkonstruksjoner. Jeg vil også takke John Sharp for hans tekniske bidrag og interesse for oppgaven.

Jeg ønsker å rette en stor takk til fagansvarlig og hovedveileder Gerhard Ersdal for god hjelp og veiledning gjennom hele oppgaveskrivingen. Uten hans engasjement og jevnlige møter hadde ikke masterskrivingen vært en like spennende og lærerik prosess.

Til slutt vil jeg takke samboeren min Jørgen, som har støttet og motivert meg gjennom hele studietiden.

Stavanger, 13. juni 2021

Marie Sigvaldsen

Sammendrag

I Norge finnes en rekke kystnære bruer med varierende grad av korrosjon. I kapasitetsberegninger av disse eldre konstruksjonene er normalt bare prosentvis reduksjon av bærekapasiteten tilsvarende prosentvis korrosjonstap benyttet. I denne oppgaven er en slik forenklet beregningsmetode vurdert og sammenlignet med laboratorie-forsøk av korroderte bjelker. Disse sammenligningene viser at en slik forenklet beregningsmetode gir for høy kapasitet.

I denne oppgaven er en beregningsmodell som inkluderer tverrsnittsreduksjon av armeringsjern også på grunn av groptæring etablert. Denne baserer seg på data fra målinger av groptørrelser som funksjon av gjennomsnittlig armeringskorrosjon. Den foreslåtte metoden viser bedre overensstemmelse med faktiske laboratorieforsøk. Ved å bruke den største sannsynlige verdien av groper, 95% persentil, gir beregningsmodellen et estimat av redusert kapasitet på sikker side.

Tap av spennarmering vil i de fleste tilfeller være enda mer alvorlig for en betongkonstruksjon enn tap av slakkarmering. En variant av beregningsmodellen som er etablert for slakkarmering er lagt til grunn for en beregningsmodell for å beregne tap av spennarmering, og brukes til å etablere en nedre grensemodell for kapasitet av betongbjelker med korrodert spennarmering.

Beregningsmodellen for korrodert spennarmering dekker likevel ikke alle problemene korrosjon kan forårsake på spennarmering. Spennarmering består av høyfast stål og er utsatt for andre nedbrytningsmekanismer som hydrogensprøing (HE) og hydrogenindusert spenningskorrosjon (HISCC). Ved tilstrekkelig surt miljø, ofte i forbindelse med groptæring, vil hydrogen kunne diffundere inn i stålet, og forårsake HISCC. Dette gjør stålet mindre duktilt i tillegg til at styrken kan reduseres, og kan i ytterste konsekvens føre til sprøbrudd.

Beregningsmodellene anvendes på Hafrsfjord bru, som har omfattende korrosjonsskader på spenntau. Beregningene er utført på hovedspennet av brua, som er antatt å være det kritiske spennet. Det er i hovedsak det nederste spenntau laget i brubjelkene som er utsatt for korrosjon, på tross av dette viser beregninger at Hafrsfjord bru har tilstrekkelig bærekapasitet.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Innholdsfortegnelse	V
Figurliste	VIII
Liste over tabeller	XI
1 Introduksjon	1
1.1 Innledning	1
1.2 Standarder og regelverk	1
1.3 Oppbygning av oppgaven	2
2 Nedbrytningsmekanismer for betongkonstruksjoner	4
2.1 Introduksjon.....	4
2.2 Betongoverdekning.....	6
2.3 Korrosjon	8
2.3.1 Armeringskorrosjon	10
2.3.2 Kloridinitert armeringskorrosjon	13
2.3.3 Hydrogenindusert nedbrytning	15
2.4 Tap av heft.....	17
3 Inspeksjon av bruer	18
3.1 Ulike typer inspeksjon.....	19
3.2 Skadeklassifisering.....	20
3.3 Tilstandsvurdering basert på inspeksjon	22
4 Korrosjon av slakkarmering	24
4.1 Introduksjon.....	24
4.2 Degraderingsmekanismer for slakkarmering	25

4.3	<i>Eksperimentelt arbeid</i>	25
4.4	<i>Momentkapasitet til ikke-korroderte bjelker</i>	28
5	Kapasitetsberegning av bjelker med korrodert slakkarmering	31
5.1	<i>Påvirkning av groper</i>	31
5.2	<i>Frekvens av groper og samspillet mellom flere armeringsjern</i>	33
5.3	<i>Kapasitetsberegning av korrodert slakkarmering</i>	36
5.4	<i>Beregnet momentkapasitet av bjelker sammenlignet med forsøk</i>	38
5.5	<i>Sammenheng mellom målt korrosjonspotensial og vekttap</i>	39
6	Korrosjon av spennarmering	42
6.1	<i>Introduksjon</i>	42
6.2	<i>Degraderingsmekanismer for spennarmering</i>	45
6.2.1	<i>Tverrsnittsreduksjon</i>	45
6.2.2	<i>Utfordringer knyttet til kabelrør</i>	47
6.2.3	<i>Hydrogensprøing og tap av duktilitet</i>	50
6.3	<i>Tidligere kollapser av spennarmerte konstruksjoner</i>	52
6.4	<i>Eksperimentelt arbeid</i>	56
7	Kapasitetsberegning av bjelker med korrodert spennarmering	65
7.1	<i>Tidligere arbeid</i>	65
7.2	<i>Foreslått beregningsmodell for bjelker med korrodert spennarmering</i>	66
7.3	<i>Duktilitet av spennarmering</i>	68
7.4	<i>Beregningsmodell for korrodert spennarmering</i>	71
8	Hafrsfjord Bru	75
8.1	<i>Tilgjengelig litteratur</i>	76
8.2	<i>Beskrivelse av brua</i>	76
8.3	<i>Inspeksjon</i>	79
8.3.1	<i>Spesialinspeksjon 2014</i>	79
8.3.2	<i>Tidligere inspeksjoner</i>	84
8.4	<i>Dimensjoneringsgrunnlag</i>	86
8.4.1	<i>Betong</i>	86
8.4.2	<i>Armering</i>	87

8.4.3	Tverrsnittsparemetere for brubjelker og brudekke	89
8.5	<i>Laster og kapasitet av originalt tverrsnitt</i>	<i>91</i>
8.6	<i>Kapasitetsberegning av korrodert tverrsnitt</i>	<i>96</i>
9	Diskusjon og konklusjon.....	103
9.1	<i>Diskusjon og konklusjon</i>	<i>103</i>
9.2	<i>Videre arbeid</i>	<i>106</i>
10	Referanser	107

Figurliste

Figur 1: Le/lo-effekten [4]	4
Figur 2: Betongdegradering. Basert på [5, kap. 16.5 fig. 14]	5
Figur 3: Utvikling av krav til betongoverdekning	7
Figur 4: Konsekvenser av korrosjon [5, kap. 16.1 fig. 16.1]	9
Figur 5: Detaljert oversikt over korrosjonsprosessen [14, fig. 1]	10
Figur 6: Grafisk fremstilling av initierings- og propageringsfasen [15, fig. 221]	11
Figur 7: Elektrokjemisk fremstilling av korrosjonsprosessen [15, fig. 23]	12
Figur 8: Armeringsstang med svartrust [17]	13
Figur 9: Terskelverdi for korrosjonsinitiering [5, kap 16, fig. 16.3]	14
Figur 10: Groptæring på armeringsstand fra Hafrsfjord Bru [18, 10/7 2001]	15
Figur 11: Oppsummering av bruinspeksjonsprosessen [30, fig. 2-1]	18
Figur 12: Spenning-tøyningskurve for slakkarmering [25, fig. 3.7]	24
Figur 13: Bjelketverrsnitt med trykkarmering	28
Figur 14: Sammenligning av teoretiske og eksperimentelle verdier av momentkapasiteten til ikke-korroderte bjelker	30
Figur 15: Største grop	32
Figur 16: Sammenheng mellom graden av korrosjon og gropens dybde/radius [41, fig. 11] .	32
Figur 17: Illustrasjon av A_0 , A_{pit} og A_{uni} [39, fig. 2.1]	34
Figur 18: Frekvens av groper ved ulike tilnærminger for et armeringsjern med 10% vekttap [39, fig. 2.1]	34
Figur 19: Gropstørrelser som funksjon av gjennomsnittlig armeringskorrosjon [41, fig. 11].	35
Figur 20: Kapasitet ved ulike distanser mellom groper for nærliggende armeringsjern [39, fig. 2.4]	36
Figur 21: Sammenligning av teoretiske og eksperimentelle verdier av momentkapasiteten til korroderte bjelker	38
Figur 22: Sammenligning av ulike måter å redusere kapasiteten	39
Figur 23: Metalltap sammenlignet med prosentvis vekttap, uavhengig av original diameter .	40
Figur 24: Spenning-tøyningskurve for spennarmering [25, fig. 3.1a]	42
Figur 25: Illustrasjon av oppbygningen av spenntau.	43
Figur 26: Fremgangsmåte for førøppspent bjelke [42, fig. 1.3]	44
Figur 27: Fremgangsmåte for etterøppspent bjelke [42, fig. 1.4].	44

Figur 28: Korrosjonsutvikling på spenntau [44, fig 12]	46
Figur 29: Eksempel på kabelrør med korrosjon i forbindelse med oppsmuldring av mørtel [49]	48
Figur 30: Korrosjon i forbindelse med oppsmuldret mørtel [49]	50
Figur 31: Duktil og sprø last-nedbøyningskurve	51
Figur 32: Idealisert last-nedbøyningskurve [42, fig. 6.22].	51
Figur 33: Katodisk beskyttelse [55, s. 210]	52
Figur 34: Kollapsede bruer som følge av korrosjon [58, 21:00].....	53
Figur 35: Ynys-y-Gwas etter kollaps [60, s. 40].....	54
Figur 36: Groptæring på føroppspente spennkabler [61, fig. 2]	55
Figur 37: Last-nedbøyningskurver for spennarmerte bjelker [63, fig. 13]	59
Figur 38: Bøyemoment-nedbøyningskurve for forsøk 1 [43, fig. 2b].	60
Figur 39: Bøyemoment-nedbøyningskurve for forsøk 3 [43, fig. 3a].....	61
Figur 40: Bøyemoment-nedbøyningskurve for forsøk 4 [43, fig. 5b].	62
Figur 41: Bøyemoment-nedbøyningskurve for forsøk 6 [43, fig. 7a].....	63
Figur 42: Bøyemoment-nedbøyningskurve for forsøk 7 [43, fig. 9a].....	64
Figur 43: Tap av momentkapasitet ved økende korrosjonsnivå [43, fig. 11]	66
Figur 44: Tverrsnitt av spenntau	66
Figur 45: Stegvis reduksjon av tverrsnitt på spenntau	67
Figur 46: Spenning-tøyningskurver for ladet og uladet stål [69].....	69
Figur 47: Nominell spenning-tøyningskurve for stål ladet med hydrogen [70]	70
Figur 48: Styrke og duktilitet ved ulike mengde hydrogen [71]	71
Figur 49: Reduksjon av kapasitet ved økende kapasitet, med ulike tilnærminger.....	72
Figur 50: Reduksjon av kapasitet ved økende kapasitet, inkludert nummererte bjelker	73
Figur 51: Oversiktsbilde av Hafrsfjord bru [32]	75
Figur 52: Oversiktsbilde av spenn	77
Figur 53: Tverrsnitt av hovedspenn	77
Figur 54: Dagens tverrsnitt av hovedspenn	78
Figur 55: Tverrsnitt av bjelker i hovedspenn	78
Figur 56: Korrosjon på nederste spenntaulag på vestre bjelke i hovedspenn [9, s.11].....	80
Figur 57: Korrosjon på nederste spenntaulag i akse 2 [9, s. 11].....	81
Figur 58: Korrosjon på bjelke inn mot landkar, Akse 11 [9, Vedlegg 3 s. 13].....	81
Figur 59: Korrosjon på nederste spenntaulag og bøylearmering [18, 6/9 2001]	85
Figur 60: Spenntråder har røket på grunn av korrosjon på spenntau [18, 6/9 2001]	86

Figur 61: Tverrsnitt av brubjelker ved støtte og i felt [73, fig. 7.1].....	89
Figur 62: Tverrsnitt av brubjelker og brudekke ved støtte og i felt [73, fig. 12.1].....	90
Figur 63: Tøyninger og indre krefter ved brudd [25, fig. 7.6].....	92
Figur 64: Tøyninger ved brudd for et balansert spennarmeringstverrsnitt [25, fig. 7.5].....	93
Figur 65: Tøyninger og indre krefter ved brudd ved støtte [73 fig. 12.4].....	95
Figur 66: Reduksjon av momentkapasitet på grunn av korrosjon på nederste spenntaulag	98
Figur 67: Stegvis reduksjon av momentkapasitet ved korrosjon på nederste spenntaulag.....	99
Figur 68: Reduksjon av momentkapasitet på grunn av korrosjon på de to nederste spenntaulagene.....	100
Figur 69: Stegvis reduksjon av momentkapasitet på grunn av korrosjon på de to nederste spenntaulagene.....	101
Figur 70: Reduksjon av momentkapasitet på grunn av korrosjon på all spennarmering.....	102

Liste over tabeller

Tabell 1: Oppbygning av oppgaven.....	3
Tabell 2: Krav til overdekning av hensyn til bestandighet i Håndbok N400 [10, s. 86-87].....	8
Tabell 3: Oversikt over konsekvenser og tilstand for ulike konsekvenstyper	21
Tabell 4: Beskrivelse av ulike skadegrader for armeringskorrosjon.....	22
Tabell 5: Forsøk 1	26
Tabell 6: Forsøk 2	26
Tabell 7: Kjemisk sammensetning i injiseringsmørtel [51, tabell 1]	49
Tabell 8: Relevant informasjon fra forsøk	56
Tabell 9: Skader med behov for tiltak etter spesialinspeksjon 2014	80
Tabell 10: Kloridmålinger på brubjelker i 2014 [9, tabell 3.4].....	82
Tabell 11: Kritiske grenser for kloridinnhold [9, s. 8]	82
Tabell 12: Målte kloridverdier [9, tabell 3.5 og 3.6]	83
Tabell 13: Målte kloridverdier [9, tabell 3.7]	83
Tabell 14: Kloridmålinger i hovedspenn i 2014 og 1995 [9, Vedlegg 4, Kloridprofil CP 22]	84
Tabell 15: Materialeegenskaper for betongfasthet B20	87
Tabell 16: Materialeegenskaper for armering.....	88
Tabell 17: Tverrsnittsparemetere for brubjelker og brudekke	90
Tabell 18: Dimensjonerende feltmoment på Hafrsfjord bru.....	91
Tabell 19: Dimensjonerende støttemoment på Hafrsfjord bru	91
Tabell 20: Dimensjonerende laster og original momentkapasitet for Hafrsfjord bru	96
Tabell 21: Oversikt over ulike alternativer	97

1 Introduksjon

1.1 Innledning

I Norge finnes det omtrent 18 000 bruer [1], og en stor del av disse bruene er bygget på 1960- og 1970-tallet [2]. Kravene til bruer var da mindre omfattende i henhold til bestandighet og miljøpåvirkning enn de er i dag. Dette har ført til at flere bruer, spesielt i værharde kyststrøk, har korrosjonsskader av ulikt omfang i dag. Mangelfull betongoverdekning og betong av varierende kvalitet er blant årsakene til armeringskorrosjon.

Denne oppgaven skal ta for seg hvordan korrosjon av slakk- og spennarmering påvirker betongkonstruksjoner. Reduksjon av momentkapasitet blir studert nærmere, i tillegg til andre relevante nedbrytningsmekanismer som følge av korrosjon. Målet med oppgaven er å undersøke hvordan korrosjonsskader på armeringen påvirker kapasiteten til Hafrsfjord bru, og om dagens metoder gir en tilstrekkelig vurdering av reduksjon i kapasitet.

1.2 Standarder og regelverk

Det finnes ingen standard for beregning av eldre betongkonstruksjoner med korrosjonsskader, ei heller en universell måte å gjøre dette på. Ulike håndbøker fra Statens Vegvesen er lagt til grunn for deler av oppgaven, i tillegg til NS3473 Prosjektering av betongkonstruksjoner og Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner.

Håndbok V441 Bruinspeksjon gir veiledning til hvordan ulike inspeksjoner skal utføres og hvordan inspeksjonene skal loggføres. Den gir en beskrivelse av hvordan skader skal klassifiseres og hvilke målinger og tiltak som er aktuelle for ulike skader.

Håndbok R412 Bruklassifisering gir beskrivelse av ulike laster som virker på ei bru, og hvordan disse skal beregnes. I tillegg beskrives eldre fasthetsklasser av stål og betong, og gir retningslinjer for hvilke materialfastheter dette tilsvarer i dag.

Håndbok R610 Standard for drift og vedlikehold av riksveger gir retningslinjer for drift og vedlikehold av riksveger, i tillegg til krav til funksjon og tilstand for objekter og utførelse av drift og vedlikehold.

Håndbok N400 Bruprosjektering brukes ved prosjektering av bruer og ferjekaier. Denne håndboka tar for seg alle krav og regelverk knyttet opp mot pålitelighet og bæreevne, bestandighet, trafiksikkerhet, framkommelighet og vedlikehold. I hovedsak er håndboka brukt for å sammenligne dagens krav med eldre krav eller prosjekterte brutegninger.

1.3 Oppbygning av oppgaven

Oppgavens oppbygning er oppsummert i Tabell 1. Oppgaven tar for seg teori i to deler. Første del inkluderer kapittel 2 og kapittel 3 som tar for seg nedbrytningsmekanismer for betongkonstruksjoner og inspeksjon av bruer. Nedbrytningsmekanismer som blir gjennomgått er mangelfull betongoverdekning, ulike typer korrosjon og tap av heft. Kapittel 3 oppsummerer ulike typer inspeksjon, og skadeklassifisering og tilstandsvurdering som følge av inspeksjon. Andre teoridel inkluderer kapittel 4 og kapittel 6. Kapittel 4 tar for seg de teoretiske aspektene ved korrosjon for slakkarmering, samt tidligere utførte laboratorie-forsøk. Kapittel 6 tar for seg de teoretiske aspektene ved korrosjon for henholdsvis spennarmering, samt tidligere utførte laboratorie-forsøk.

Videre tar oppgaven for seg foreslåtte metoder, beregninger og resultater i kapittel 5 og kapittel 7. I kapittel 5 blir groptærings påvirkning på reduksjon av armeringstverrsnitt vurdert og diskutert, og en beregningsmodell for reduksjon av armeringstverrsnitt for slakkarmering blir foreslått. Deretter blir teoretiske kalkulasjoner på bakgrunn av den foreslåtte beregningsmodellen sammenlignet med resultater fra laboratorie-forsøk. I kapittel 7 blir en beregningsmodell for spenntråder foreslått, i tillegg til at spennarmerings tap av duktilitet blir undersøkt. Til slutt blir teoretiske kalkulasjoner på bakgrunn av den foreslåtte beregningsmodellen også her sammenlignet med resultater fra laboratorie-forsøk.

I kapittel 8 blir Hafrsfjord brua studert nærmere. Tilgjengelig litteratur blir gjennomgått, samt beskrivelse av brua, funn fra inspeksjoner og dimensjoneringsgrunnlaget. Resultatene fra

foregående kapitler blir deretter anvendt for å vurdere kapasiteten av Hafrsfjord bru. Til slutt følger kapittel 9, som går gjennom en oppsummering av resultatene fra ulike kapitler og konkluderer på bakgrunn av dette.

Tabell 1: Oppbygning av oppgaven

Teori – generell del:	
Kapittel 2: Nedbrytningsmekanismer for betongkonstruksjoner	
Kapittel 3: Inspeksjon av bruer	
Teori – armering:	
Kapittel 4: Korrosjon på slakkarmering	Kapittel 6: Korrosjon på spennarmering
Foreslåtte metoder, beregninger og resultater:	
Kapittel 5: Kapasitetsberegning av bjelker med korrodert slakkarmering	Kapittel 7: Kapasitetsberegning av bjelker med korrodert spennarmering
Anvendelse av foreslåtte metoder:	
Kapittel 8: Hafrsfjord bru	
Diskusjon og konklusjon:	
Kapittel 9: Diskusjon og konklusjon	

2 Nedbrytningsmekanismer for betongkonstruksjoner

2.1 Introduksjon

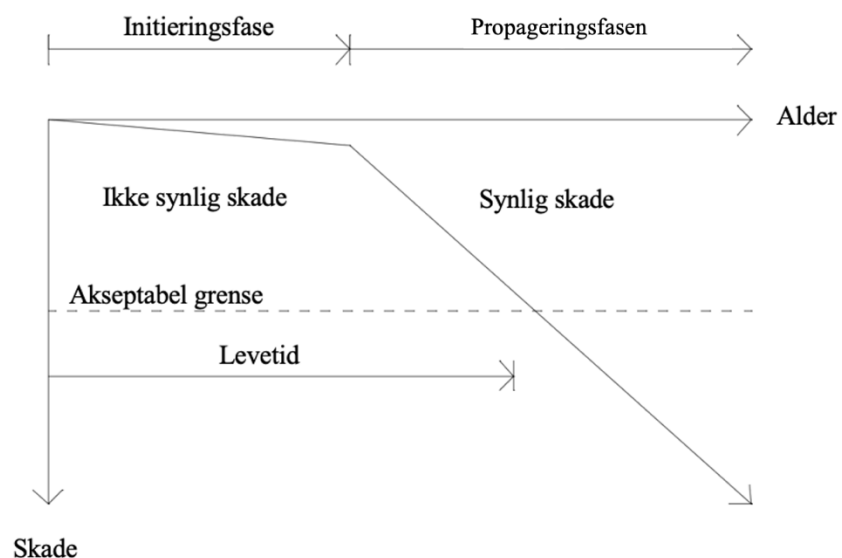
Over tid vil alle konstruksjoner, også bruer, bli påvirket av nedbrytningsmekanismer ved økende alder. For bruer i et kystnært miljø vil blant annet salt fra sjøvann og veisalt være med på å forringe konstruksjonen, for kystnære konstruksjoner kan en i mange situasjoner tydelig se forskjell på lo- og le-siden av konstruksjonen. Lo/le-effekten forklarer hvordan flater på konstruksjonen som ligger i le for vind og nedbør kan være mer preget av klorider, på grunn av undertrykk og mangel på regnbelastning, i forhold til flater på lo-siden som jevnlig blir vasket ned av regn og vind [3, s. 22]. Lo/le-effekten er illustrert i **Feil! Fant ikke referanseskilden.**, på en av pilarene på Klubbasund bru på Bømlo. Det mørke området viser hvor regnvann når og klorider ikke vaskes bort av regnvann. Også bjelkesteg, underkant av bruplate og vinger er mer utsatt for klorider. Disse områdene er ikke utsatt for sjøsprøyt, men luftbårne klorider fra perioder med sterk vind og uvær [4]. Et annet interessant aspekt ved figuren under er at vindretningen er ulik for de to pilarene, på grunn av måten landskapet dreier vinden.



Figur 1: Le/lo-effekten [4]

For å hindre at klorider fra sjøvann og veisalt trenger inni betongen og potensielt fører til korrosjon i armeringen, kreves det tilstrekkelig betongoverdekning, med betong av lav permeabilitet. God varighet av betongkonstruksjonen krever at riktig betongoverdekning og betong er en del av prosjekteringen, og at utførelsen av betongarbeidet sikrer dette i den fysiske konstruksjonen. At det blir tatt høyde for beskyttelse mot vær og vind i området kan være avgjørende for levetiden til ei bru.

Betongdegradering og nedbrytningsmekanismer kan deles inn i to faser; initieringsfasen og propageringsfasen. Initieringsfasen er den første fasen, hvor potensielt skadelige stoffer, eksempelvis CO₂ og klorider, trenger inn i betongen. Propageringsfasen er neste fase, hvor inntrengningen av disse stoffene medfører skade på konstruksjonen [5, kap. 16.5]. Avhengig av byggherre, standarder og type skade vil levetiden på konstruksjonen variere. Figuren under viser en grafisk fremstilling av problemstillingen. Videre i kapitlet og i kommende kapitler vil det diskuteres hvordan visse typer skader kan ha ulik innvirkning på forskjellige materialer.



Figur 2: Betongdegradering. Basert på [5, kap. 16.5 fig. 14]

2.2 Betongoverdekning

Betongoverdekning er viktig for å hindre kloridinntrenging i betongen, men også for hemme utviklingen av sprekkdannelse. Mangel på god nok overdekning er, i tillegg til kloridholdige materialer, noe som har ført til utfordringer for eldre betongbruer i Norge. I en undersøkelse hvor 227 norske etteroppspente bjelkebruer ble undersøkt, viste det seg at 37% hadde armeringskorrosjon. Årsaken til denne korrosjonen var mangelfull overdekning. Overdekningen tilfredstilte heller ikke kravene til overdekning i byggeåret. De verste kloridinitierte korrosjonsskadene ble funnet på de indre brubjelkene på eller i nærheten av støtter og bæreelementer, vanligvis den andre eller tredje bjelken fra lo-siden [6, s. 1].

Tilstrekkelig overdekning er et effektivt tiltak for å sikre holdbarheten for en ny konstruksjon. Å redusere betongoverdekningen med bare 10 mm kan halvere tiden før initieringsfasen av skader starter [7, s. 10-13]. Levetid for bruer ble lenge bare antatt å være en selvfølge. Først på 1990-tallet ble 100 års levetid fastsatt som et krav ved prosjektering [8, s. 2]. I sammenheng med dette har også kravene som blir stilt til betongoverdekning endret seg. I 1962 ble det i NS427 A satt krav til 50 mm betongoverdekning for bjelker og søyler i konstruksjoner i nærheten av sjøvann, men i NS3473 fra 1973 var kravet redusert til 25 mm for utendørs ubeskyttede konstruksjoner. Til tross for dette er Hafrsfjord bru prosjektert i 1967 med kun 20-30 mm overdekning [9, s. 10]. I NS3473 fra 1989 er kravet igjen på vei oppover og det ble satt krav til 40-50 mm, avhengig av om armeringen er korrosjonsømfintlig eller ikke, for konstruksjoner i miljøklasse MA (meget aggressivt miljø) som blant annet gjelder konstruksjoner i sjøvann og for konstruksjoner utsatt for klorider, eksempelvis sjøsprøyt [8, s. 18]. I Figur 3 under er utviklingen av overdekning illustrert.



Figur 3: Utvikling av krav til betongoverdekning

Det har siden 1990 og 2000-tallet vært et større fokus på manglende betongoverdekning som medvirkende årsak til korrosjonsskader. Kravet til betongoverdekning har økt, og Statens Vegvesen har i dag egne krav til bruer. For spennarmering skal i tillegg $C_{min,dur}$ økes med 10 mm. Kravet for overdekning, C_{nom} , for kabelrør med uinjisert spennarmering er 65 mm [10, pkt. 7.7.4]. Fremgangsmåten for å beregne betongoverdekning er vist under [10, kap. 7.4].

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} \quad (2.1)$$

Krav til minste overdekning, C_{min} :

$$C_{min} = \max[C_{min,dur}; C_{min,b}; 10 \text{ mm}] \quad (2.2)$$

Krav til minste overdekning av hensyn til heft, $C_{min,b}$:

$$C_{min,b} = \max[\phi_L; 10 \text{ mm}] \quad (2.3)$$

Overdekningstoleranse:

$$\Delta C_{dev} = \pm 15 \text{ mm ved } c_{min} < 70 \text{ mm} \quad (2.4)$$

$$\Delta C_{dev} = \pm 20 \text{ mm ved } c_{min} \geq 70 \text{ mm} \quad (2.5)$$

Krav til overdekning av hensyn til bestandighet i marint miljø er vist i Tabell 2:

Tabell 2: Krav til overdekning av hensyn til bestandighet i Håndbok N400 [10, s. 86-87]

Element	$c_{\min, \text{dur}}$	c_{nom}
Konstruksjonerdelar i marint miljø, opp til en høyde på minst 12 meter over astronomiske tidevann (HAT) i værharde kyststrøk	100 mm	100 ± 20
For spennarmering	+ 10 mm	

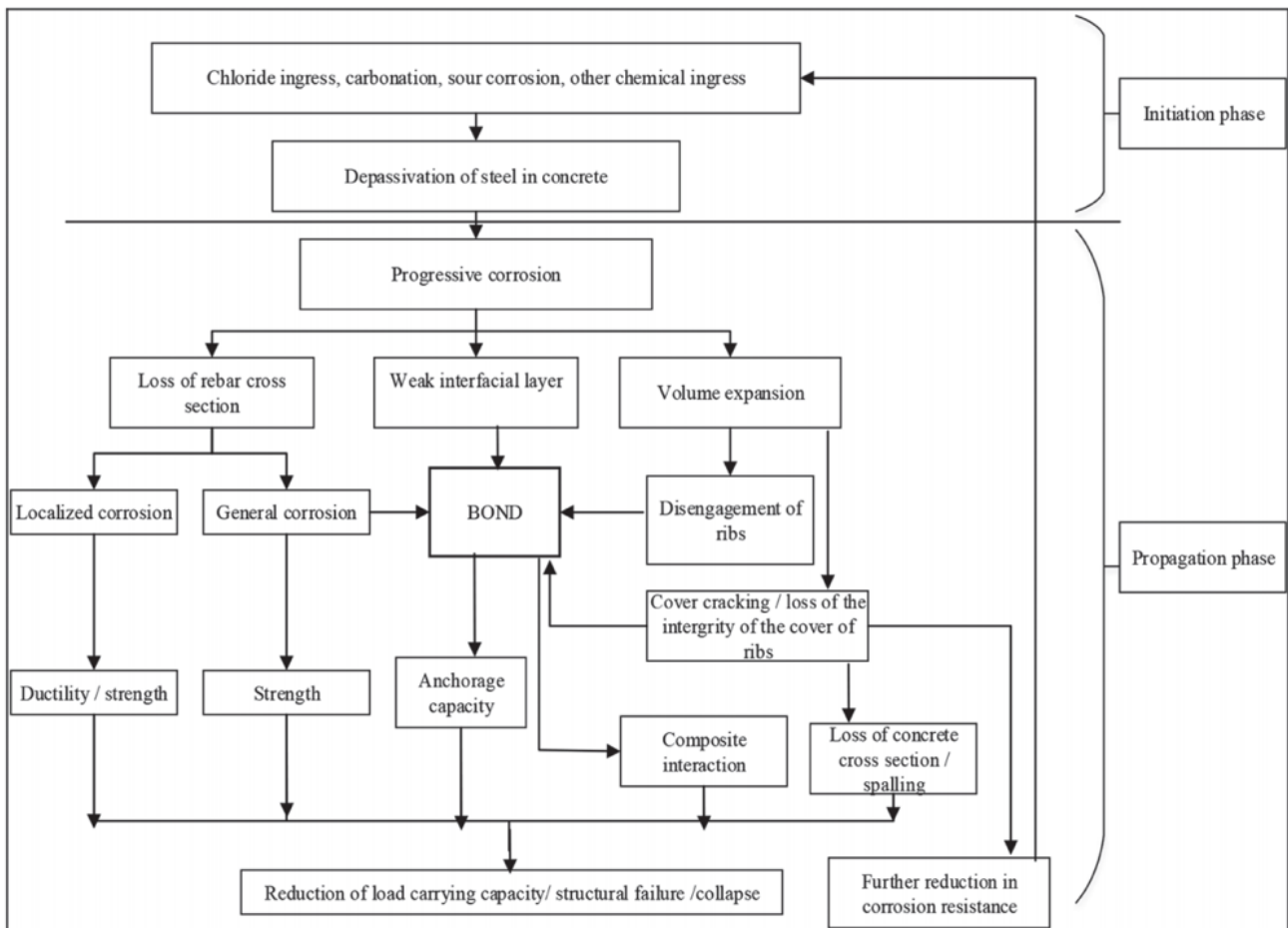
2.3 Korrosjon

Korrosjon fører med seg ulike typer problemer, i hovedsak kan de deles inn i reduksjon av armeringstverrsnitt, riss og avskalling av betong og hydrogensprøing. En oversikt er vist i figuren under [5, kap. 16.1 fig. 16.1]. Vanligvis er armering omsluttet av betong, og dermed godt beskyttet mot korrosjon, men ved ytre påvirkning kan betongens beskyttende egenskaper svekkes [11, s. 41]. Betong er et gjennomtrengelig materiale og dermed kan klorider fra blant annet saltvann og veisalt nå armeringen.



Figur 4: Konsekvenser av korrosjon [5, kap. 16.1 fig. 16.1]

Når armering korroderer vil korrosjonsproduktene føre til en volumøkning, denne volumøkningen innebærer en økning på opptil seks ganger det originale volumet [12, s. 8], dette kan lede til avskalling av betong og tap av heft mellom armeringen og betongen rundt. Riss og avskalling av betong som følge av volumøkningen vil også føre til at korrosjonsprodukter lettere trenger inn i betongen. Selve armeringen vil ha en reduksjon i tverrsnittsdiameter som fører til redusert momentkapasitet [13, s. 409]. En annen effekt av korrosjon er hydrogensprøing, som i verste fall kan føre til sprøbrudd og kollaps. Figur 5 gir en mer detaljert oversikt over korrosjonsprosessen. En kort gjennomgang av ulike typer korrosjon som påvirker armerte betongbruer er beskrevet i kommende kapitler.



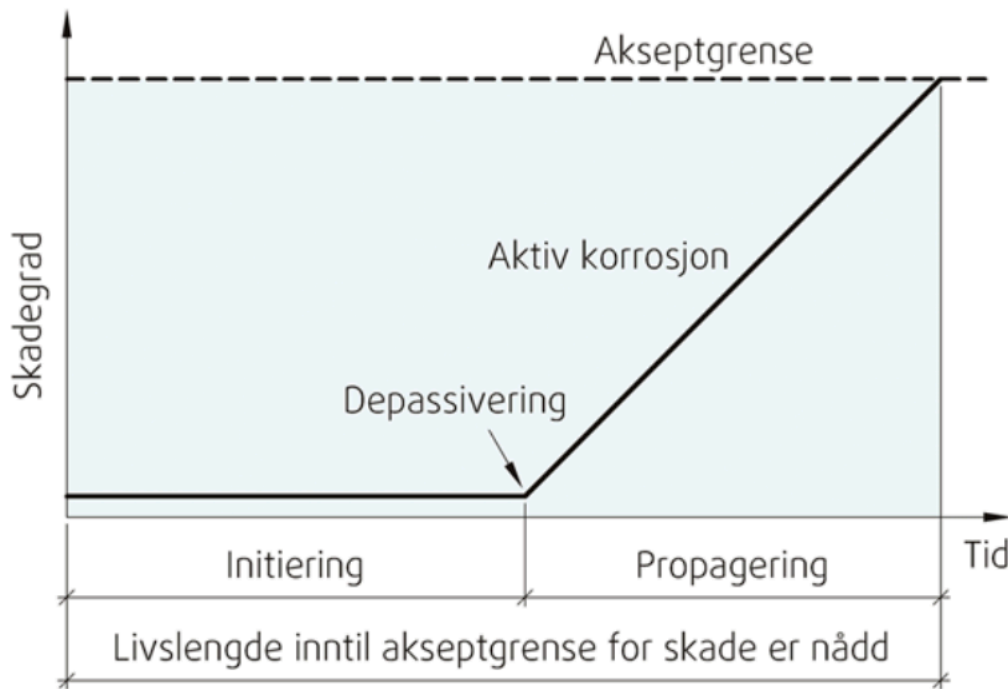
Figur 5: Detaljert oversikt over korrosjonsprosessen [14, fig. 1]

2.3.1 Armeringskorrosjon

Armering i betong er beskyttet mot korrosjon på grunn betongens høye pH-nivå og alkaliske miljø. Det høye pH-nivået skyldes oppløste hydroksylioner, OH⁻-ioner, i porevannet, som følge av innholdet av kalsiumhydroksid fra herdet betong, og forbindelser av alkalier, natrium og kalium fra sement. En kombinasjon av porevann med høyt pH-nivå og oksygen fra luften, skaper et gunstig oksidsjikt på stålet, som fungerer som et ugjennomtrengelig beskyttelseslag mot korrosjon. Dette kalles passivering, og oksidsjiktet kalles ofte passivfilm [15, pkt. 22].

Passiveringen opprettholdes så lenge pH-nivået holdes tilstrekkelig høyt, rundt 10-11, dette kalles initieringsperioden. Passivfilmen er ikke lenger stabil om pH-nivået blir redusert, vanligvis skjer dette av to grunner; karbonatisering eller kloridinntrengning. Dette kalles

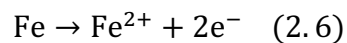
depassivering, og korrosjonshastigheten øker betraktelig i propageringsperioden, som illustrert i figuren under [15, fig. 221].



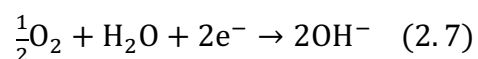
Figur 6: Grafisk fremstilling av initierings- og propageringsfasen [15, fig. 221]

Den elektrokjemiske prosessen som ligger til grunn for korrosjon er en anodereaksjon og en katodereaksjon [15, pkt. 23]:

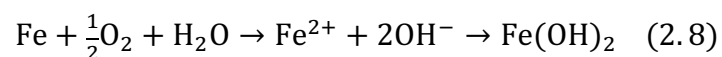
Anodereaksjon:



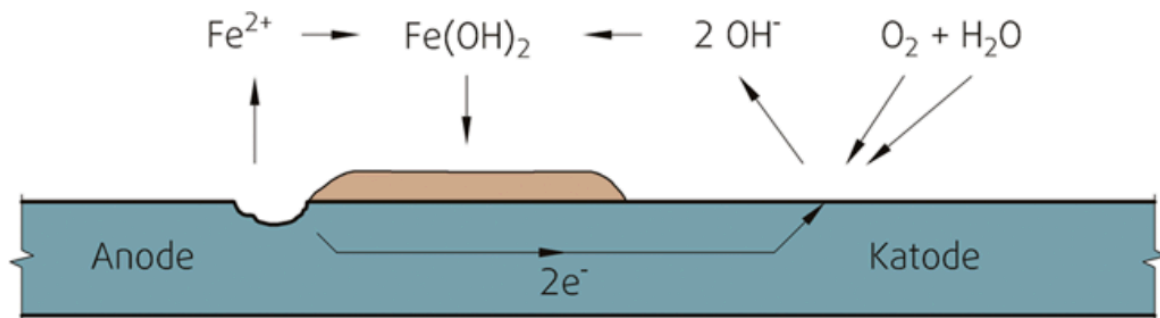
Katodereaksjon:



Den totale korrosjonsreaksjonen blir dermed:



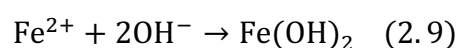
Sluttproduktet er en utfelling av det faste stoffet $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Det er dette stoffet som danner passivfilmen på armeringsstålet. Figuren under illustrerer den elektrokjemiske prosessen [15, fig. 23].



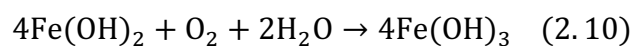
Figur 7: Elektrokjemisk fremstilling av korrosjonsprosessen [15, fig. 23]

Ved aktiv korrosjon vil korrosjonshastigheten øke, og det vil dannes mer korrosjonsprodukt som vil føre til en større volumøkning. I løpet av flere sykluser vil vi etter hvert få det velkjente røde rustproduktet. Fe_2O_3 har omtrent dobbelt så stort volum som det opprinnelige stålet, og når det reagerer med vann vil det utvide seg enda mer og man får avskalling og riss i betongen [12, s. 7-8]:

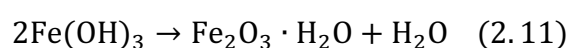
Først dannes jern(II)hydroksid:



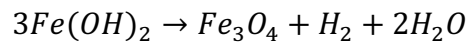
Deretter dannes jern(III)hydroksid:



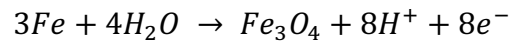
Til slutt får vi rørust:



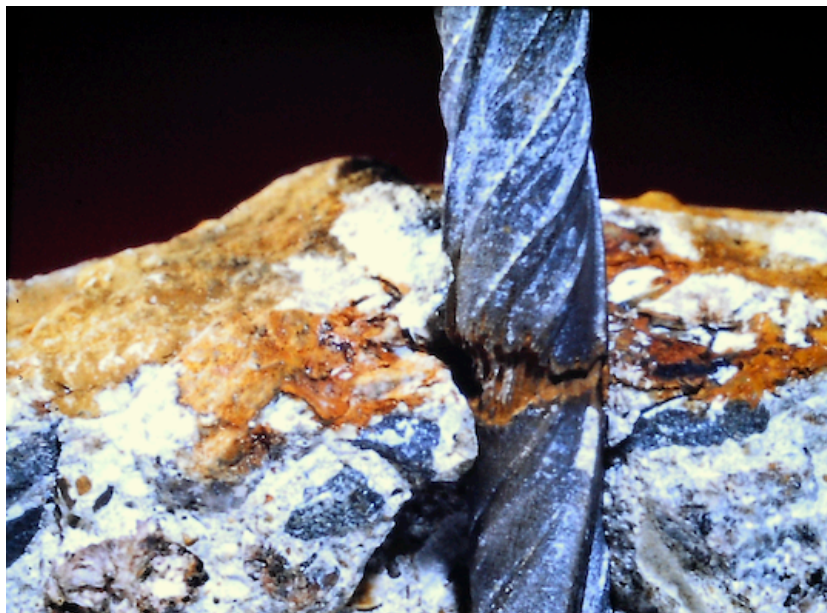
I tilfeller hvor det er god avstand mellom anoden og katoden, og katoden mangler oksygen, kan det i stedet oppstå svartrust, Fe_3O_4 . Denne typen korrosjon dannes enten via jern(II)hydroksid [16]:



eller direkte fra den anodiske reaksjonen:



I motsetning til ved dannelse av rødrust, vil Fe^{2+} forbli i løsningen, og korrosjonsproduktet vil derfor ikke svulme opp i særlig stor grad. På denne måten blir volumøkning liten og det er begrenset avskalling av betong, det kan derfor være vanskeligere å oppdage denne typen korrosjon. Man ser typisk denne typen korrosjon på konstruksjoner under vann, eller på spennarmering i kabelrør [12, s. 9-10]. Figur 8 viser svartrust på en armeringsstang.



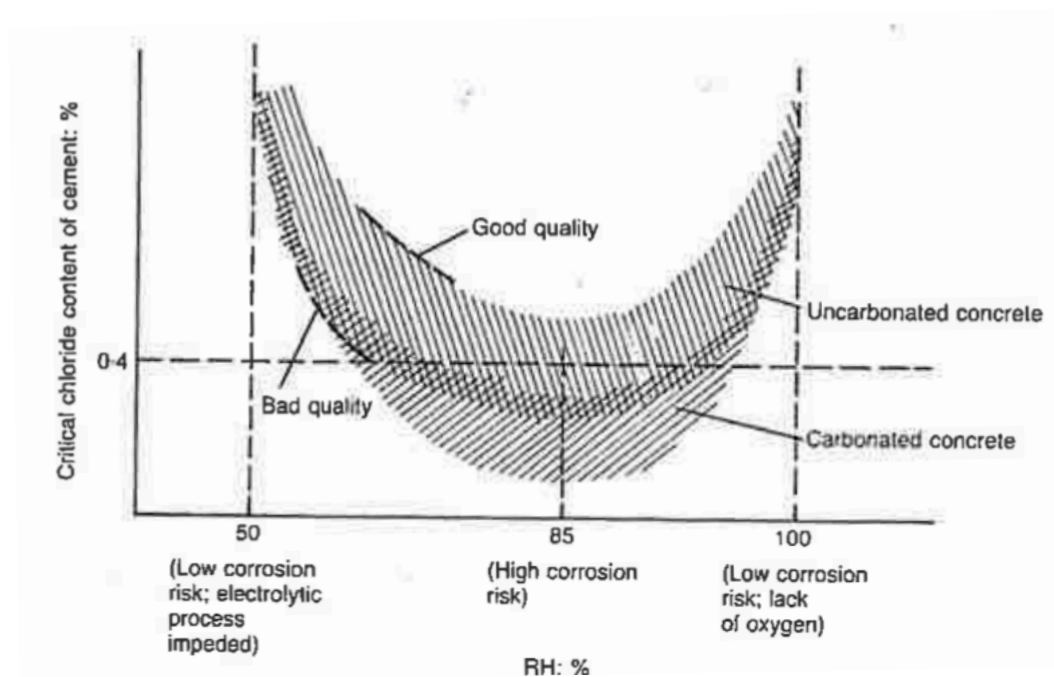
Figur 8: Armeringsstang med svartrust [17]

2.3.2 Kloridinitiert armeringskorrosjon

I dag er det i hovedsak to årsaker til kloridinntrenging i kystnære betongbruer, klorider fra sjøvann, NaCl, og veisalt, vanligvis $CaCl_2$. For eldre bruer er også kloridholdige delmaterialer et problem [15, pkt. 41]. Tidligere kunne tilsetningsstoffer inneholde klorider, i tillegg til at det kunne bli brukt både sand fra strender og sjøvann i betongblandingen [8, s. 7]. I 1986 ble det i

NS3420 spesifisert at det ikke er tillatt å bruke sjøvann om konstruksjonen er armert, og først i 2007 står det i NS-EN 206-1:2000 at sjøvann ikke er tillatt i det hele tatt [8, s. 13-14].

Klorider er lettløselige i vann, og kan trenge inn ved kapillærabsorpsjon eller diffusjon. Når tilstrekkelig mengde klorider har trengt inn til armeringsstålet vil passivfilmen ødelegges og korrosjonshastigheten økes. Mengden klorider som skal til for at korrosjonen skal starte kalles terskelverdien [15, pkt. 4]. Terskelverdien avhenger av betong-sammensetningen, fuktinnholdet og pH-verdien til betongen. Ved lav relativ fuktighet og ved høy relativ fuktighet reduseres terskelverdien, se figur under. Ved lav relativ fuktighet begrenses ledeevnen, og ved høy relativ fuktighet reduseres tilgangen på oksygen [5, kap. 16.3].



Figur 9: Terskelverdi for korrosjonsinitiering [5, kap 16, fig. 16.3]

En type kloridinitiert korrosjon som er problematisk for armeringsjern er groptæring. Det karakteriseres ved at passivfilmen på et punkt på armeringsjernet ødelegges, og det dannes en grop. Kloridene fungerer som en katalysator for korrosjonsprosessen og vannet i gropa kan bli svært surt, dermed kan korrosjonshastigheten bli veldig høy [15, pkt. 4]. Groptæring er et lokalt angrep, og armeringsarealet i tverrsnittet reduseres. Er reduksjonen av diameteren til armeringen omfattende vil dette ha store konsekvenser for kapasiteten til konstruksjonen. Figur 10 er et eksempel på en armeringsstang fra Hafrsfjord bru som er utsatt for groptæring



Figur 10: Groptæring på armeringsstang fra Hafrsfjord Bru [18, 10/7 2001]

2.3.3 Hydrogenindusert nedbrytning

Spenningskorrosjon (Stress corrosion cracking, SCC) oppstår når armert betong er utsatt for strekk og befinner seg i et miljø spesielt utsatt for korrosjon. Spenningskorrosjon karakteriseres av små sprekker som dannes og så utvikler seg videre [19, s. 156]. Hydrogensprøing (Hydrogen embrittlement, HE) vil si at hydrogenatomer trenger inn i krystallstrukturen til armeringsstålet, noe som gjør materialet mindre duktilt, og øker sjansen for sprøbrudd. Felles for både spenningskorrosjon og hydrogeninntrengning er at begge mekanismene kan føre til sprøbrudd, hvor det vanligvis er lite forvarsel i form av korrosjonsprodukt eller tøyning. [20, s. 6-7]. Ofte opptrer spenningskorrosjon og hydrogensprøing samtidig [21, s- 218]. Hydrogenindusert spenningskorrosjon (Hydrogen-induced stress corrosion cracking, HISCC) kan oppstå både under oppføringen av en konstruksjon eller senere i løpet av konstruksjonens levetid [22, s. 597].

For at hydrogenindusert spenningskorrosjon (HISCC) skal forekomme må tre betingelser oppfylles [22]:

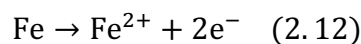
- Et sensitivt materiale eller tilstand
- Tilstrekkelig strekklast
- Minimum et begynnende korrosjonsangrep

Hydrogen skapes som resultat av katodisk beskyttelse og gjennom en korrosjonsprosess under spesifikke forhold. Sistnevnte skjer når to hydrogen-atomer bindes sammen dannes molekylært hydrogen, dihydrogen (H_2), dette trenger ikke inn i stålet og er ikke skadelig for konstruksjonen. Det er bare atomært hydrogen (H^+) som kan adsorberes av armeringen og forårsake HISSC [23, s. 3][24]. I tilfeller hvor pH-nivået reduseres og depassivering er i gang, kan hydrogen skilles ut som H^+ i katodereaksjonen. Videre illustreres prosessen som kan lede til hydrogen-indusert spenningskorrosjon.

Anodereaksjonen er lik som vist i kapittel 2.3.1. Katodereaksjonen er tilsvarende som i kapittel 2.3.10 når pH-verdien > 7 . Er derimot pH-verdien < 7 vil hydrogen felles ut, alternativt hvis potensialet er lavt og vann spaltes. Atomært hydrogen bindes fort sammen igjen til molekylært hydrogen, så bare en liten del hydrogenet trenger inn i armeringen før videre adsorpsjon hindres. Tilførsel av oksygen vil også hemme utviklingen av atomært hydrogen.

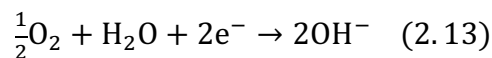
Under følger den elektrokjemiske utviklingen [22, s. 598]:

Anodereaksjon:

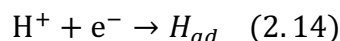


Katodereaksjon:

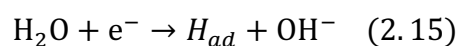
pH > 7 :



pH < 7 oppløselig hydrogen skilles ut (engelsk: hydrogen discharge):

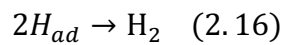


Lavt potensial (spalting av vann):

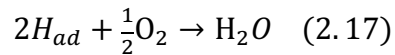


Reaksjoner som hindrer dannelse av atomært hydrogen:

Atomært hydrogen bindes sammen til molekylært hydrogen:



Oksygen er tilstede:



Ofte vil HISCC starte i en grop som har oppstått på grunn av groptæring. I denne gropen ligger forholdene til rette for å oppfylle nødvendige kriterier for dannelse av HISCC. Groper vil ha et surt miljø og på denne måten kan atomært H^+ dannes, som videre kan tas opp av stålet [19, s. 158].

2.4 Tap av heft

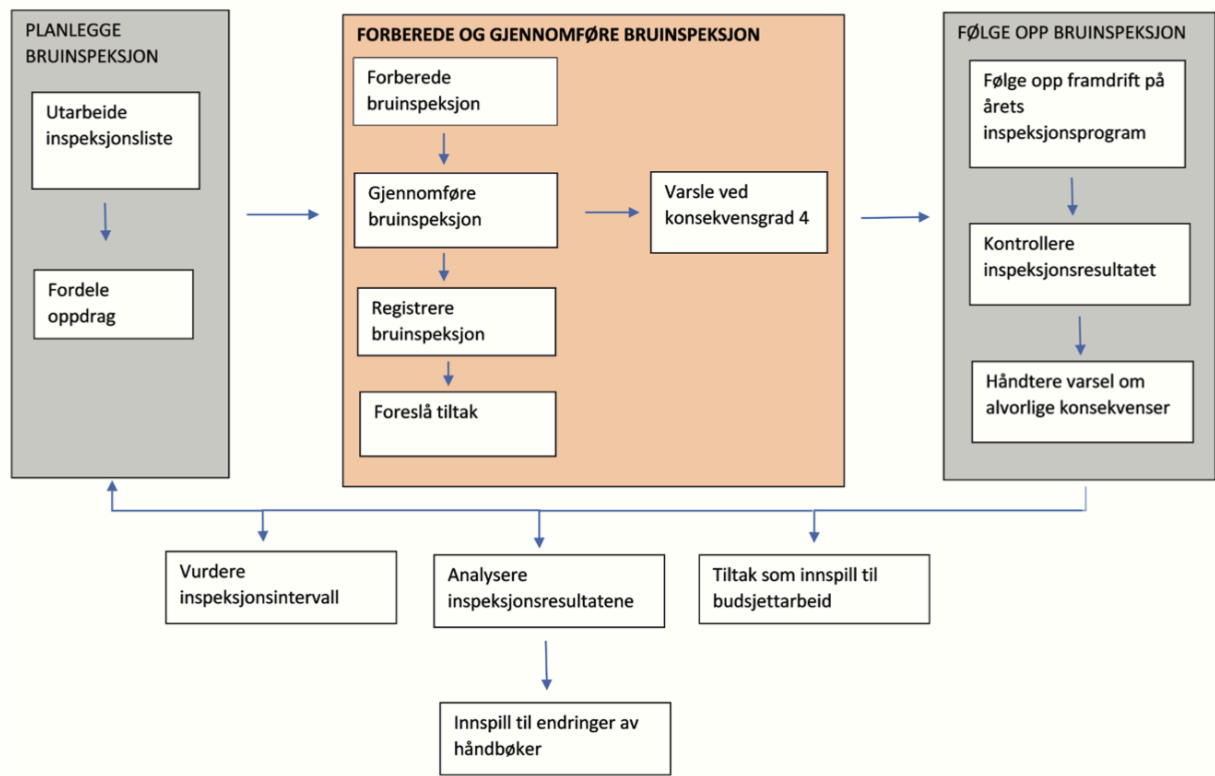
Når en betongkonstruksjon prosjekteres antas det god heft mellom armering og betongen. Heft sikrer kraftoverføring mellom armeringen og betongen, ettersom betong tar opp trykkrefter og armeringen tar opp strekkrefter. Den vanligste typen armering i Norge er kamstål, altså armeringsjern med «kammer» på overflaten. Disse kammene er med på å sikre god heft [25, s. 19].

Korrosjon på armeringsjern fører til en volumøkning på grunn av korrosjonsprodukter som dannes. Dette vil på grunn av spenninger fra volumøkningen føre til riss langs armeringen og til betongoverflaten, som igjen vil øke tilgangen på oksygen, vann og eventuelle klorider og fortsette korrosjonsprosessen ytterligere. Begynnende volumøkning på grunn av korrosjon kan være med på å øke heften, men den vil fort svekkes. Det ser ut til å være en sammenheng mellom når rissdannelse oppstår og tap av heft skjer [26, kap. 2.8][27].

Tap av heft ser, ut ifra forsøk som er gjort, ut til å ha en påvirkning på tap av styrke. Hvor stor andel av reduksjon i kapasitet som kan tilskrives tap av heft, er usikkert [26][27][28][29]. Heft er av denne grunn ikke studert nærmere som grunn for reduksjon av kapasitet i denne oppgaven.

3 Inspeksjon av bruer

Målet med en bruinspeksjon er å kontrollere at bæreevne, trafiksikkerhet, bestandighet og estetisk uttrykk er ivaretatt. Alle bruer i Norge skal følge en inspeksjonsplan, og eventuelle skader skal registreres. Skadene skal klassifiseres etter skadegrad og konsekvens, og utbedres innen fastsatt tid avhengig av alvorlighetsgrad. Dette kapittelet tar for seg hvilke inspeksjoner som utføres, og hvordan tilstandsvurderinger gjennomføres basert på informasjon fra inspeksjoner. Figuren under illustrerer bruinspeksjonsprosessen.



Figur 11: Oppsummering av bruinspeksjonsprosessen [30, fig. 2-1]

3.1 Ulike typer inspeksjon

I Norge finnes det omtrent 18000 bruer [1], og alle disse skal ha en inspeksjonsplan med informasjon om planlagte inspeksjoner, når de skal utføres og hva som skal gjøres [30, s. 10]. Enkelinspeksjoner utføres hvert år, i tillegg til at det hvert femte år gjennomføres en hovedinspeksjon. Om nødvendig gjennomføres en spesialinspeksjon hvis det er spesielle tilfeller som trenger mer omfattende inspeksjon [31, s. 19]. Etter inspeksjon loggføres skadevurderinger med skadegrad og skadekonsekvens i Brutus, i tillegg til beskrivelse og bilder av aktuelle skader, og foreslåtte tiltak om nødvendig [30, s. 11]. Brutus er Statens vegvesens forvaltningssystem av bruer, ferjekaier og andre bærende konstruksjoner. Her blir all relevant informasjon om bruer registrert, i tillegg til rapporter, bilder og annen viktig informasjon fra bruinspeksjoner [32].

Enkelinspeksjon har som formål å avdekke synlige skader som kan påvirke brua på kort sikt, og innen neste inspeksjon. Det er i hovedsak fire ulike kategorier som vektlegges: skader som påvirker bæreevne, trafiksikkerhet, vedlikehold og miljø/estetikk. Enkelinspeksjon utføres i utgangspunktet som enkel visuell kontroll av alle elementer, men uten bruk av tilkomststyr og vanligvis uten oppmålinger eller materialundersøkelser. En hovedinspeksjon gjennomføres ved at det utføres en nær visuell kontroll av alle elementer på brua, i tillegg til at det utføres oppmålinger og materialundersøkelser ved behov. Alle skader som avviker fra originaltilstanden skal dokumenteres og evalueres [30, s. 18].

Spesialinspeksjonen skiller seg fra de andre typene inspeksjon ved at den ikke forekommer ved faste intervaller. En spesialinspeksjon utføres om det er spesielle forhold som trenger grundigere inspeksjon, enten hele brua eller spesifikke deler av brua. Inspeksjonen skal utføres slik at det er mulig å fastslå skadetype, konsekvens, omfang og årsak. Ut i fra dette kan behovet for tiltak vurderes og eventuelt planlegges. Det kan være relevant med en vurdering av kostnader og levetid. Statistiske beregninger for å beregne kapasitet kan også være nødvendig [30, s. 19].

3.2 Skadeklassifisering

Skadene som oppdages skal registreres og vurderes. Det må undersøkes hvilke skadetyper skadene består av, hvorfor eller hvordan skadene har oppstått, omfanget av skadene og om skadene påvirker hele konstruksjonen. Skadene registreres både etter skadegrad og skadekonsekvens. Skadegradene bedømmes fra 1 til 4, hvor 1 er liten skade, 2 gir middels skade, 3 beskriver stor skade og 4 omfatter skader av svært stor grad. Skadekonsekvens vurderes ut ifra konsekvenstype og konsekvensgrad, og gir en vurdering av konsekvensene skaden har for brukonstruksjonen, brukerne av brua og omliggende omgivelser.

Konsekvenstype bestemmes etter om skaden påvirker bæreevne (B), trafikksikkerhet (T), økte vedlikeholdskostnader (V) eller miljø/estetikk (M). Skader som påvirker bæreevnen er skader som reduserer bruas originale kapasitet i uskadd tilstand. Dersom belastningen økes eller bæreevnen er såpass svekket av skader at den ikke lenger tåler tillate trafikklaster regnes brua som overbelastet. Brudd eller påkjørsel av betongbjelker, i tillegg til korrosjon og tverrsnittsreduksjon på stålbjelker, er eksempler på at bæreevnen er overskredet. Trafikksikkerheten er svekket om rekkverk er skadet, nedfall av løs betong eller tverrsnittsreduksjon og deformasjoner. Vedlikeholdskostnader tar utgangspunkt i hvor raskt en skade utvikles og hvordan kostandene vil øke om ikke tiltak blir utført innen rimelig tid. Dette kan blant annet være avskallinger eller armeringskorrosjon på betongkonstruksjoner. Miljø/estetikk omhandler skader som for eksempel graffiti og skader på overflatebehandling.

Konsekvensgradene deles inn i 4 grader. Grad 1 har liten konsekvens og ingen behov for tiltak, grad 2 har middels konsekvens, og det skal vurderes om tiltak skal registreres i Brutus. Grad 3 viser til skader med vesentlige konsekvenser og forslag til tiltak skal registreres i Brutus, i tillegg til at inspeksjonsintervall må vurderes. Konsekvensgrad 4 betyr at skaden har store konsekvenser og det skal varsles om umiddelbart til bruforvalter eller oppdragsgiver. Nødvendige tiltak må iverksettes, dette kan eksempelvis være å sperre brua eller enkelte kjørefelt, reparere midlertidig, fjerne momenter som utgjør en umiddelbar fare og å utføre materialundersøkelser og oppmåling [30, kap. 2.4 og kap. 3]. Tabell 3 gir en oversikt over konsekvenser og tilstandsvurderinger av ulike skadekonsekvenser.

Tabell 3: Oversikt over konsekvenser og tilstand for ulike konsekvenstyper

Konsekvenstype	Skadekonsekvens	Konsekvens	Tilstand
Bæreevne Trafikksikkerhet Vedlikeholds- kostnader Miljø/estetikk	1B/T/V/M	Liten	Liten grad redusert, skaden er stabil
	2B/T/V/M	Middels	Noe redusert, skaden kan utvikle seg
	3B/T/V/M	Vesentlig	Vesentlig redusert, kan utvikle seg raskt. Vedlikeholdskostnader vil øke.
	4B/T/V/M	Stor	Bruforvalter/oppdragsgiver kontaktes umiddelbart. Brua kan være overbelastet Konsekvensreducerende tiltak for å begrense utvikling

Hvor kritisk armeringskorrosjon er, varierer alt etter hva som er angrepet. Korrosjon på spennarmering er svært kritisk for bruas bæreevne, særlig for bærende deler av betongoverbygningen og slanke søyler. Også korrosjon på slakkarmerte deler av brua kan føre til alvorlig reduksjon av bæreevnen. Korrosjon på utvalgte armeringsstenger i bruplater vil ikke nødvendigvis ha noe særlig påvirkning på bæreevnen for brudekket, det vil avhenge av omfang og utnyttelsesgrad. Armeringskorrosjon vil utvikle seg raskt i fuktige eller aggressive miljø, og dermed forringe bæreevnen. Vedlikeholdskostnadene vil øke ettersom omfanget av korrosjon og avskallinger øker. Ut ifra et miljø/estetikk-perspektiv kan synlige rustflekker eller avskallinger føre til at trafikanter i verste fall anser brua som utrygg, i tillegg til at det ikke ser særlig fint ut [30, kap. 6.3.8]. Beskrivelse av ulike skadegrader for armeringskorrosjon er beskrevet i Tabell 4.

Tabell 4: Beskrivelse av ulike skadegrader for armeringskorrosjon

Skadegrad	Beskrivelse
Skadegrad 1	Generelt uten rust på ståloverflaten
Skadegrad 2	Begynnende rust og avskalling på ståloverflaten
Skadegrad 3	Glødeskallet er rustet bort eller kan skrapes av. Tegn til groptæring med noen synlige rustgroper.
Skadegrad 4	Glødeskallet er rustet bort. Tydelig groptæring, med stor utstrekning av synlige rustgroper

3.3 Tilstandsvurdering basert på inspeksjon

Når en inspeksjon utføres er det i hovedsak en visuell inspeksjon, supplert med enkelte målinger som for eksempel overdekningsmåling, måling av rissvidde, kloridinnhold og karbonatiseringsdybde [3, kap. 1.2]. Å inspisere en brukonstruksjon er omfattende arbeid, og det er derfor naturlige begrensninger i form av tid, ressurser og kostander. Av denne grunn er det viktigste å gjøre en god vurdering av hvilke deler av brua som er mest kritisk å se nærmere på, og få et helhetlig inntrykk av konstruksjonen. Sannsynligvis vil man aldri kunne være helt sikker på at alle eventuelle skader og problemer oppdages.

Om man er klar over at man antakeligvis ikke vil oppdage alle skader, må man gjøre en kvalifisert gjetting. Til å begynne med vil man undersøke de delene av brua hvor man antar at det er størst sannsynlighet for å finne skader, men også områder hvor eventuelle skader har størst negativt innvirkning på bæreevne. Det viktigste blir derfor som regel å undersøke i felt, i overganger og på losiden av konstruksjonen [33].

I tilfeller hvor det oppdages avskalling i betongen, og det er antydninger til korrosjon, fjernes løs betong slik at man får mulighet til å gjøre en vurdering av skaden. Som oftest ser man bare undersiden av armeringsstengene, og det kan være vanskelig å vite hvor mye av armeringen som er påvirket av korrosjon. Man kan utføre målinger av kloridinnhold, men til slutt må man gjøre en antakelse av hvor mye armering som er påvirket.

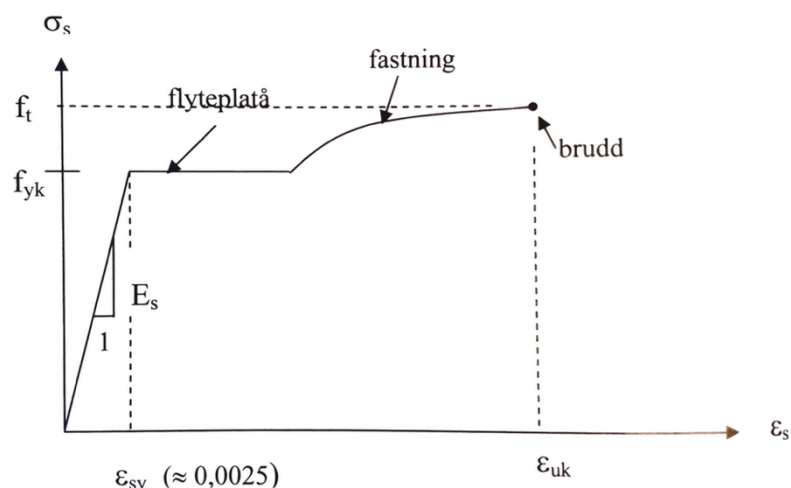
Hvis ei bru har nok skader til at det muligens påvirker bæreevnen til brua må det gjøres en kapasitetsberegning. Det finnes ingen regelverk, standarder eller standardiserte måter å beregne kapasiteten av en skadet konstruksjon på. En måte som blir brukt for å beregne restkapasitet på, er derfor å gjøre et prosentvis anslag på tap av armeringstverrsnitt og så regne ut kapasiteten på ny basert på antatt gjenværende armering [33].

4 Korrosjon av slakkarmering

4.1 Introduksjon

I dette kapitlet blir slakkarmering studert nærmere. Kapitlet tar for seg hvilke korrosjonsproblemer slakkarmering blir utsatt for, i tillegg til å gå gjennom to eksperimentelle forsøk som har undersøkt bjelker med korrodert slakkarmering. Resultatene fra disse forsøkene brukes senere for å gjøre en analyse av hvordan korrosjon påvirker momentkapasiteten til slakkarmerte bjelker.

Slakkarmering støpes direkte inn i betongen, uten å påføres ytre krefter. Betong har god trykkfasthet, men ikke særlig god strekkfasthet. Ved å armere betongen bidrar stålet med god strekkfasthet og duktilitet. Betongen fungerer i utgangspunktet som korrosjonsbeskyttelse for armeringen [34, s. 6-7]. Den vanligste formen for slakkarmering er armeringsstenger med diameter mellom 8 og 32 mm og i lengder på 6 eller 12 m. Vanligvis har armeringsstengene kammer på overflaten, som øker heftegenskapene mellom stålet og betongen. Armeringsstålet som oftest er i bruk i Norge er kamstål av typen B500NC, som har en karakteristisk fasthet på 500 MPa [25, s. 18-19]. Typisk spenning-tøyningskurve for en armeringsstang ved strekkprøving er vist i Figur 12.



Figur 12: Spenning-tøyningskurve for slakkarmering [25, fig. 3.7]

4.2 Degraderingsmekanismer for slakkarmering

En av de vanligste skadeårsakene for slakkarmering er kloridinntrengning. Dette kan føre til at armeringsjernet korroderer. Korrosjon vil ofte føre til en relativt uniform reduksjon av stålet på hele overflaten (generell korrosjon), men kan også føre til lokale angrep i form av groptæring. Som tidligere nevnt, vil korrosjon både redusere tverrsnittet til armeringsjernene, og dermed strekkapasiteten, i tillegg til å påvirke heft mellom armeringsjernene og betongen. Groptæring kan i tillegg redusere tverrsnittet til armeringsjernene lokalt og dermed ytterligere redusere strekkapasiteten.

4.3 Eksperimentelt arbeid

Som en del av to ulike forsøk, utført av Azad et al. [35] og Al-Gohi [36], ble det støpt henholdsvis 56 og 48 bjelker, som så ble utsatt for akselerert korrosjon, for deretter å teste momentkapasiteten. I forsøket utført av Azad et al. [35], videre omtalt som forsøk 1, ble 56 bjelker av størrelsesorden 150x150 mm brukt, i forsøket utført av Al-Gohi [36][13], videre omtalt som forsøk 2, ble 48 bjelker med bredde på 200 mm og høyde på 215 mm, 265 mm og 315 mm, brukt. I begge forsøkene er det blitt brukt armeringsjern av ulik størrelse og ulik overdekning, i tillegg til at de har blitt utsatt for ulik korrosjonsstrømtetthet i ulik varighet. Lengden på bjelkene i begge forsøkene er 1100 mm. All data er oppsummert i tabellene under.

Tabell 5: Forsøk 1

Bjelker		Størrelse (b*h)	Overdekning	Armeringsstenger	Korrosjon	
Gruppe	Bjelke				Korrosjonsstrømtetthet (mA/cm ²)	Tid (dager)
BT1	BT1-2-4	150x150	25 mm	2-10 mm	2	4
	BT1-3-4				3	4
	BT1-2-6				2	6
	BT1-3-6				3	6
	BT1-2-8				2	8
	BT1-3-8				3	8
BT2	BT2-2-4			2-12 mm	2	4
	BT2-3-4				3	4
	BT2-2-6				2	6
	BT2-3-6				3	6
	BT2-2-8				2	8
	BT2-3-8				3	8
BT3	BT3-2-4		40 mm	2-10 mm	2	4
	BT3-3-4				3	4
	BT3-2-6				2	6
	BT3-3-6				3	6
	BT3-2-8				2	8
	BT3-3-8				3	8
BT4	BT4-2-4	2-12 mm		2	4	
	BT4-3-4			3	4	
	BT4-2-6			2	6	
	BT4-3-6			3	6	
	BT4-2-8			2	8	
	BT4-3-8			3	8	

Tabell 6: Forsøk 2

Bjelker		Størrelse (b*h)	Overdekning	Armeringsstenger	Korrosjon	
Gruppe	Bjelke				Korrosjonsstrømtetthet (mA/cm ²)	Tid (dager)
1	B1-1	200x215	40 mm	2-16 mm	1.77	6
	B1-2					10
	B1-3					4
	B1-4					14
	B1-5					10
	B1-6					14
2	B2-1	200x655			1.76	10
	B2-2					8
	B2-3					15
	B2-4					15
	B2-5					20
	B2-6					20
3	B3-1	200x315			1.88	10
	B3-2					15
	B3-3					5
	B3-4					4
	B3-5					20
	B3-6					3
4	B4-1	200x215	2-18 mm	1.74	6	
	B4-2				10	

	B4-3					12
	B4-4					13
	B4-5					20
	B4-6					20
5	B5-1	200x265		1.73		10
	B5-2				10	
	B5-3				15	
	B5-4				10	
	B5-5				20	
	B5-6				20	
6	B6-1	200x315		1.83		6
	B6-2				2	
	B6-3				5	
	B6-4				15	
	B6-5				4	
	B6-6				20	

For hver bjelkegruppe har det også blitt støpt to referansebjelker, i begge forsøkene, disse har ikke blitt utsatt for akselerert korrosjon. I det første forsøket har det blitt støpt to eksemplarer av hver bjelke i tabellen, mens det i det andre forsøket kun er støpt én av hver bjelke.

Oppsummert er variablene følgende:

- Forsøk 1:
 - o Ulik overdekning: 25 mm og 40 mm
 - o Ulik diameter på armeringsstengene: 10 mm og 12 mm
 - o Ulik korrosjonsstrømtetthet, i ulikt antall dager
- Forsøk 2:
 - o Ulik høyde: 215 mm, 265 mm og 315 mm
 - o Ulik diameter på armeringsstengene: 16 mm og 18 mm
 - o Ulik korrosjonsstrømtetthet, i ulikt antall dager

Den akselererte korrosjonen blir utført ved å la bjelkene ligge delvis nedsenket i en 5% NaCl-løsning, og påføre strøm på en slik måte at armeringsstålet blir anoden og en rustfri stålplate blir katoden. Den rustfrie stålplaten blir plassert på en slik måte at den dekker begge sidene av bjelken langs hele lengden, på denne måten sikres en jevn korrosjonsstrøm langs hele bjelken.

4.4 Momentkapasitet til ikke-korroderede bjelker

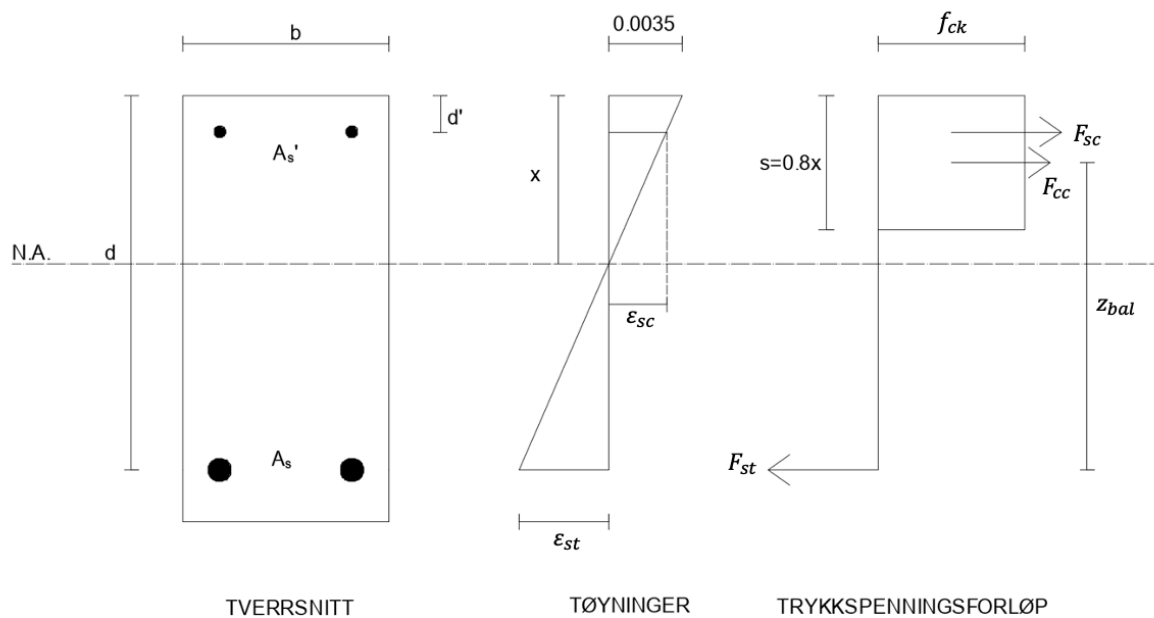
Basert på de tidligere beskrevne forsøkene [35][36][13], er momentkapasiteten til referansebjelkene regnet ut. For å verifisere resultatene fra forsøkene, i tillegg til å fastsette formelen for momentkapasitet, sammenlignes de eksperimentelle verdiene for referansebjelkene med de teoretiske verdiene for bjelkene. Momentkapasiteten til bjelkene regnes ved å bruke formelen under [34, s. 73]:

$$M_{Rd} = F_{cc} * \left(d - \frac{s}{2}\right) + F_{sc} * (d - d') \quad (4.1)$$

$$F_{st} = F_{cc} + F_{sc} \quad (4.2)$$

$$F_{st} = f_{yk} * A_s \quad (4.3) \quad F_{cc} = f_{ck} * b * s \quad (4.4) \quad F_{sc} = f_{sc} * A_s' \quad (4.5)$$

Hvor f_{yk} er stålets karakteristiske fasthet (flytegrense), f_{ck} er betongens fasthet, A_s er arealet av strekkarmeringen, A_s' er arealet av trykkarmeringen, b er bredden av tverrsnittet, og $s=0.8*x$.



Figur 13: Bjelketverrsnitt med trykkarmering

$$f_{sc} = \epsilon_{sc} * E_s \quad (4.6)$$

$$\frac{0.0035}{x} = \frac{\varepsilon_{sc}}{x - d'} \quad (4.7) \quad \varepsilon_{sc} = 0.0035 * \frac{x - d'}{x} \quad (4.8)$$

Likevektslikningen blir dermed:

$$f_{yk} * A_s = f_{ck} * b * s + f_{sc} * A_s' \quad (4.9)$$

$$f_{yk} * A_s = f_{ck} * b * 0.8 * x + \varepsilon_{sc} * E_s * A_s' \quad (4.10)$$

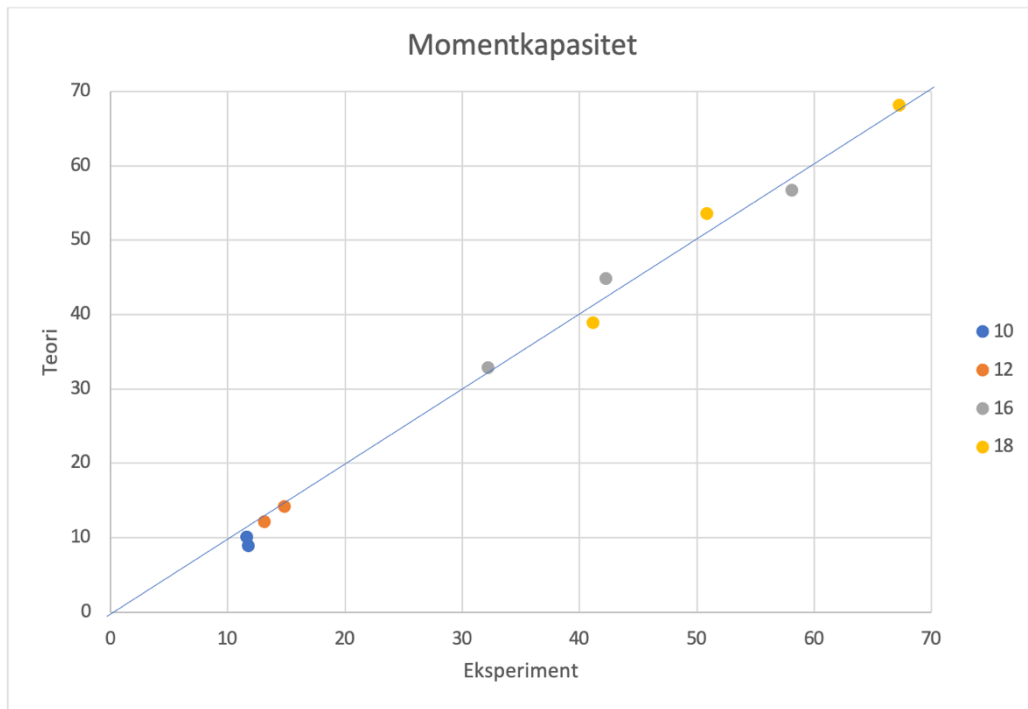
$$f_{yk} * A_s = f_{ck} * b * 0.8 * x + 0.0035 * \frac{x - d'}{x} * E_s * A_s' \quad (4.11)$$

Løser ligningen for x, og setter inn i formelen for momentkapasitet:

$$M_{Rd} = F_{cc} * \left(d - \frac{0.8 * x}{2} \right) + F_{sc} * (d - d') \quad (4.12)$$

Ved å bruke denne fremgangsmåten beregnes den teoretiske momentkapasiteten til referansebjelkene. Hele utregningen er lagt ved i Vedlegg C1 og C2. I figuren under vises en sammenligning mellom de kalkulerte teoretiske verdiene, basert på formelen over, og de målte eksperimentelle verdiene av referansebjelkene som ikke er utsatt for korrosjon. De teoretiske verdiene er vist på y-aksen og de målte eksperimentelle verdiene fra [35][36][13] på x-aksen.

Bias er 0.96 og variasjonskoeffisienten er 0.09. Bias forklarer her sammenhengen mellom de teoretiske verdiene og de eksperimentelle verdiene, hvor 1 viser 100% sammenheng [37]. Variasjonskoeffisienten er matematisk sett standardavvik delt på gjennomsnitt, og gir et bilde på presisjonen; et lavere tall tyder på bedre presisjon [38]. Disse verdiene, i tillegg til grafisk avlesning av grafen, viser at det er god overenstemmelse mellom de teoretiske verdiene og de eksperimentelle verdiene.



Figur 14: Sammenligning av teoretiske og eksperimentelle verdier av momentkapasiteten til ikke-korroderede bjelker

5 Kapasitetsberegning av bjelker med korrodert slakkarmering

Basert på tidligere utførte eksperimentelle forsøk og eksisterende konstruksjoner er det tydelig at armering ikke bare er utsatt for generell korrosjon med jevn reduksjon i armeringstverrsnittet. Korrosjonsprosessen fører til groptæring, med groper fordelt rundt hele armeringsjernet, fordelt utover armeringen i lengderetningen [39, s. 113]. Å kun ta generell korrosjon i betraktning kan føre til at den gjenværende styrken overvurderes, og det må derfor tas hensyn til både generell korrosjon og groptæring [40, s. 539-540].

5.1 Påvirkning av groper

Beregning av momentkapasitet for bjelker som er korroderte regnes ved å bruke samme fremgangsmåte som for de ikke-korroderte bjelkene. For å ta høyde for redusert kapasitet på grunn av korrosjon reduseres diameteren på armeringen. Det blir videre i dette kapitlet foreslått en beregningsmodell for hvordan denne reduksjonen kan utføres.

Beregningsmodellen som foreslås reduserer diameteren på korroderte armeringsjern ved:

- En uniform reduksjon av diameter i henhold til det prosentvise vekttapet på grunn av korrosjon
- En ytterligere reduksjon av diameter på grunn av groptæring

Beregningsmessig reduseres diameteren i to omganger; først reduseres den i henhold til det prosentvise vekttapet mistet på grunn av korrosjon, deretter reduseres den ytterligere for å ta største grop i betraktning. Første del av ligningen ser dermed slik ut:

$$\varnothing_{L_{korr_del1}} = \frac{\varnothing_L * (100 - \%vekttap)}{100} \quad (5.1)$$

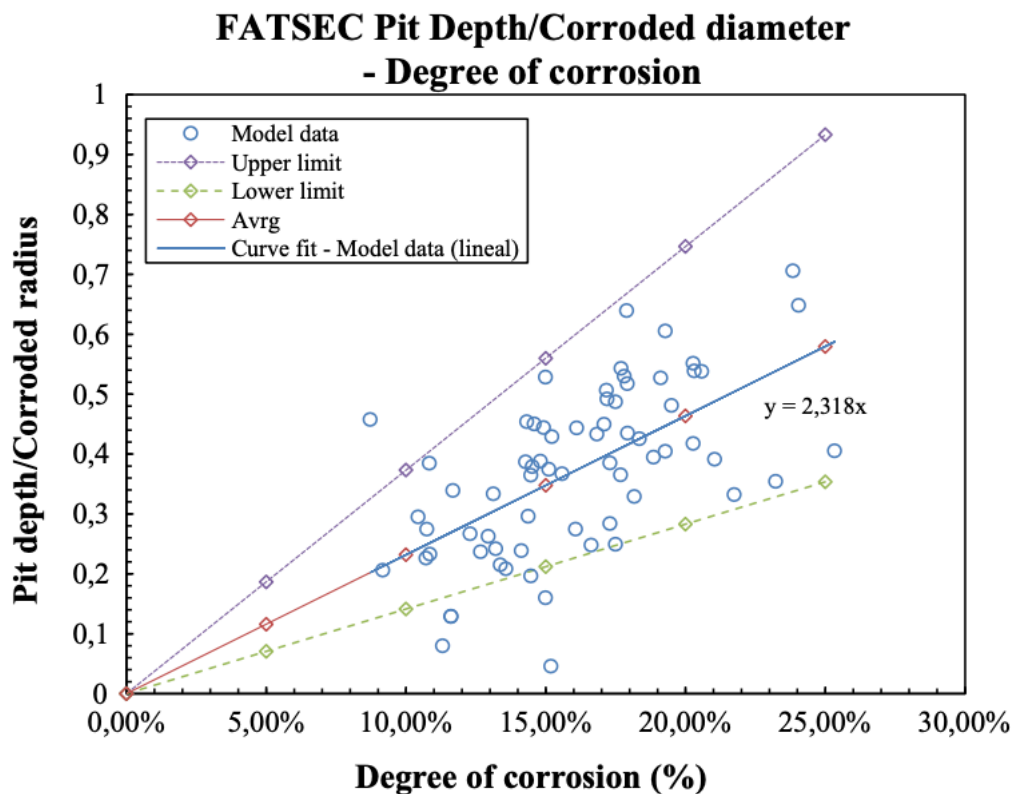
Videre reduseres diameteren ytterligere på grunn av største grop. Reduksjonen som er gjort for å ta største grop i betraktning, er basert på [41] hvor det er sett nærmere på de mekaniske egenskapene til korroderte bjelker. Her er det utledet en ligning, lign. 5.2 under, som beskriver gropen som oppstår ved groptæring, se Figur 15 som illustrasjon:

$$\frac{p}{r_c} = 2.318 * g \quad (5.2)$$



Figur 15: Største grop

Hvor p er gropens dybde, r_c er gropens radius og g er graden av korrosjon på armeringsjernet. På figuren under [41, fig. 11, s. 328+329] vises denne sammenhengen, i tillegg til øvre grense («upper limit») og nedre grense («lower limit») som viser til 0.95 og 0.05 persentil. Øvre grense oppnås ved å multiplisere den gjennomsnittlige gropdybden med 1.62, og nedre grense oppnås ved å multiplisere den gjennomsnittlige gropdybden med 0.61.



Figur 16: Sammenheng mellom graden av korrosjon og gropens dybde/radius [41, fig. 11]

Ligningen for største grop blir dermed:

$$\frac{p}{r_c} = 2.318 * g \quad (5.3)$$

$$p = 2.318 * g * r_c \quad (5.4)$$

Når 0.95 persentilen brukes blir ligningen:

$$p = 2.318 * g * r_c * 1.62 \quad (5.5)$$

$$p = 3.755 * g * r_c \quad (5.6)$$

Den foreslåtte beregningsmodellen for redusert diameter blir dermed:

$$\emptyset_{L_{korr}} = \frac{\emptyset_L * (100 - \%vektttap)}{100} - 0.0376 * \%vektttap * \frac{1}{2} * \frac{\emptyset_L * (100 - \%vektttap)}{100} \quad (5.7)$$

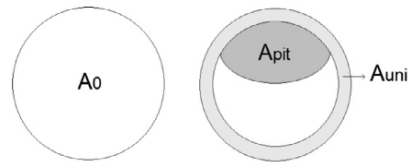
I beregningsmodellen som er satt opp blir det ikke korrigert for det faktiske totale vekttapet ved å også inkludere groper i tillegg til uniform korrosjon. Ved enkle beregninger ser det likevel ut til at det ekstra vekttapet på grunn av groper er neglisjerbart sammenlignet med det prosentvise vekttapet på grunn av korrosjon.

5.2 Frekvens av groper og samspillet mellom flere armeringsjern

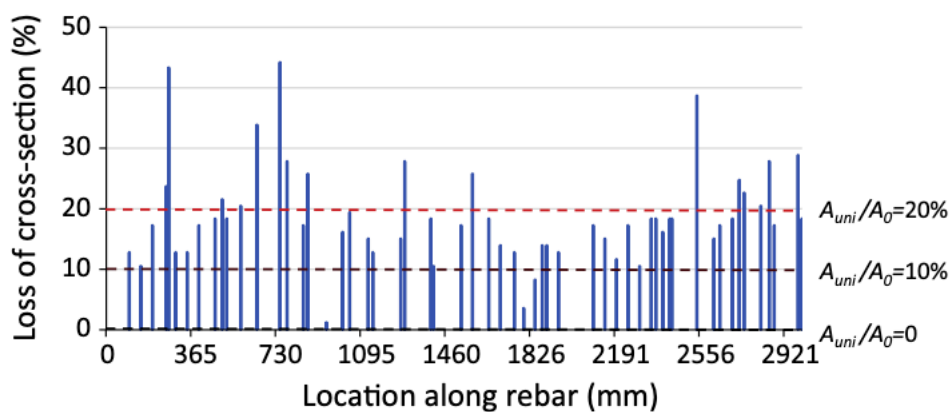
Gropene vil fordele seg utover armeringen i lengderetningen, og antall groper har sammenheng med korrosjonsnivået [39]. Ved lavt korrosjonsnivå vil frekvensen av groper være lav, og de vil være av begrenset størrelse. Ved høyere korrosjonsnivå vil hyppigheten av groper øke og distansen mellom dem dermed være mindre, i tillegg til at gropene vil bli større.

Ved inspeksjon kan det være vanskelig å skille på hva som er generell, uniform korrosjon rundt hele armeringsjernet (A_{uni}) og hva som er groptæring (A_{pit}). Se Figur 17 for forklaring av originalt tverrsnitt (A_0), uniform reduksjon av tverrsnittet grunnet generell korrosjon (A_{uni}) og reduksjon av tverrsnitt på grunn av groptærng (A_{pit}). Antallet groper vil avhenge av hvordan man tolker resultatet. Om den uniforme reduksjonen av tverrsnittet baseres på tverrsnittet med

minst korrosjon vil det registreres flere groper, enn om A_{uni} settes til en høyere verdi. Dette er illustrert i Figur 18.

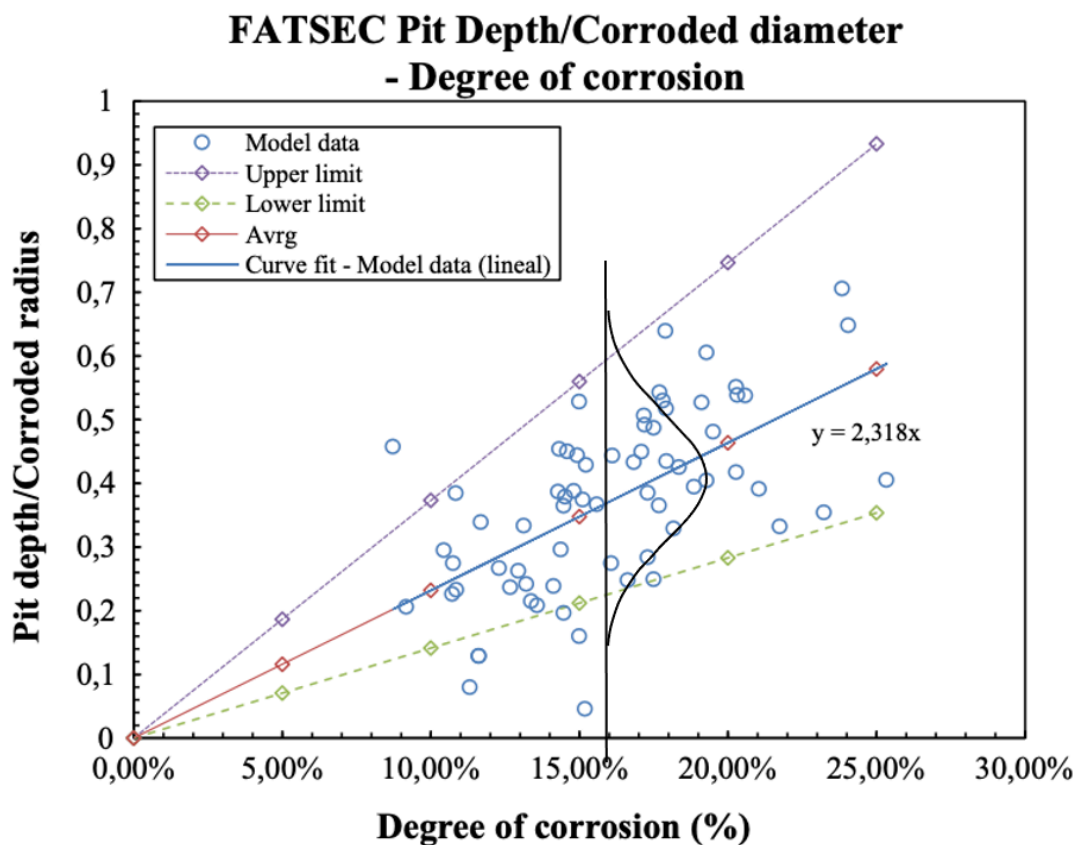


Figur 17: Illustrasjon av A_0 , A_{pit} og A_{uni} [39, fig. 2.1]



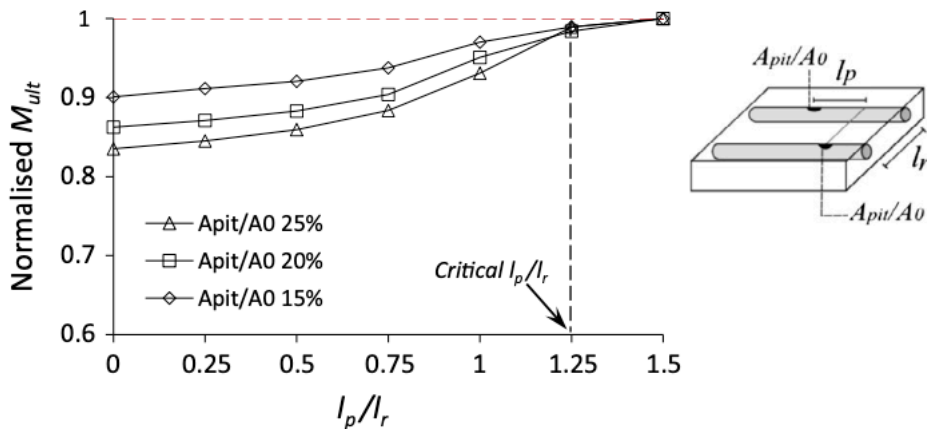
Figur 18: Frekvens av groper ved ulike tilnæringer for et armeringsjern med 10% vekttao [39, fig. 2.1]

Fordeling av gropstørrelse som funksjon av korrosjon er vist i i Figur 19, hvor øvre grense (95% persentil) er brukt i beregningene i denne oppgaven. De kan muligens antas at gropene er normalfordelte som vist i Figur 19. Ved å ta utgangspunkt i denne normalfordelingen er det mulig å gjøre en beregning av fordelingen av gropstørrelser og ved bruk av Figur 18 si noe om hvor mange groper som opptrer over en viss lengde. Denne beregningen vil være relevant for å gjøre en vurdering av frekvens og samtidighet av groper, men er ikke sett nærmere på i denne oppgave. Se [39] for en modell for denne problemstillingen.



Figur 19: Gropstørrelser som funksjon av gjennomsnittlig armeringskorrosjon [41, fig. 11]

En annen faktor som også påvirker kapasiteten, i tillegg til frekvensen av groper, er om lokasjonen på groper sammenfaller for nærliggende armeringsjern. I [39] illustreres dette ved å sette opp maksimal momentkapasitet mot forholdet mellom distansen mellom groper på to nærliggende armeringsjern (l_p) og distansen mellom disse to armeringsjernene (l_r), se Figur 20. De tre kurvene tar for seg ulike forhold mellom reduksjon av tverrsnitt på grunn av groptæring (A_{pit}) og originalt tverrsnitt (A_0). I alle tilfeller ble det antatt 14 % gjennomsnittlig korrosjon, sett bort ifra gropene.



Figur 20: Kapasitet ved ulike distanser mellom groper for nærliggende armeringsjern [39, fig. 2.4]

Det er tydelig at groper i nærheten av hverandre, altså lavere verdier av l_p/l_r , har betydning for kapasiteten. Jo mindre avstand mellom groper på nærliggende armeringsjern, jo mer reduserer kapasiteten. Når forholdet mellom l_p/l_r er 1.25 har det liten betydning for kapasiteten. Utviklingen er omtrent lik for alle de tre kurvene for A_{pit}/A_0 [39, s. 115]. Følgelig tyder det på at $l_p/l_r < 1.25$, altså må forholdet mellom distansen mellom groper på to nærliggende armeringsjern og avstanden mellom de to armeringsjernene være mindre enn 1.25, for at kapasiteten skal påvirkes av groper på nærliggende armeringsjern.

5.3 Kapasitetsberegning av korrodert slakkarmering

Momentkapasiteten til et tverrsnitt med korrodert slakkarmering regnes ved å anta at største grop opptrer ved største moment, for å se på det verst mulige utfallet. Den reduserte diameteren blir videre brukt til å regne et nytt, redusert areal av armeringen:

$$A_{s_korr} = \pi * \left(\frac{\varnothing_{Lkorr}}{2} \right)^2 \quad (5.8)$$

I kalkulasjonen regnes all strekkarmeringen som et samlet areal. På grunn av dette antas det derfor at alle armeringsjern har største grop ved største moment. Også skjærarmeringen vil være utsatt med korrosjon, men dette er sett bort ifra i kalkulasjonen da denne armeringsmengden er neglisjerbar. Momentkapasiteten til de korroderte bjelkene regnes ved å bruke den samme

formelen som ble brukt for å beregne momentkapasiteten til bjelkene uten korrosjon i kapittel 4.4 [34, s. 73]:

$$M_{Rd} = F_{cc} * \left(d - \frac{s}{2}\right) + F_{sc} * (d - d') \quad (5.9)$$

$$F_{st} = F_{cc} + F_{sc} \quad (5.10)$$

$$F_{st} = f_{yk} * A_{s_{korr}} \quad (5.11) \quad F_{cc} = f_{ck} * b * s \quad (5.12) \quad F_{sc} = f_{sc} * A_s' \quad (5.13)$$

Fremdeles er f_{yk} stålets karakteristiske fasthet (flytegrense), f_{ck} er betongens fasthet, A_s' er arealet av trykkarmeringen, b er bredden av tverrsnittet, og $s=0.8*x$. Men nå er A_s byttet ut med $A_{s_{korr}}$, som er det reduserte arealet av strekkarmeringen.

Likevektsligningen blir dermed:

$$f_{yk} * A_{s_{korr}} = f_{ck} * b * s + f_{sc} * A_s' \quad (5.14)$$

$$f_{yk} * A_{s_{korr}} = f_{ck} * b * 0.8 * x + \varepsilon_{sc} * E_s * A_s' \quad (5.15)$$

$$f_{yk} * A_{s_{korr}} = f_{ck} * b * 0.8 * x + 0.0035 * \frac{x - d'}{x} * E_s * A_s' \quad (5.16)$$

Løser ligningen for x , og setter inn i formelen for momentkapasitet:

$$M_{Rd_{korr}} = F_{cc} * \left(d - \frac{0.8 * x}{2}\right) + F_{sc} * (d - d') \quad (5.17)$$

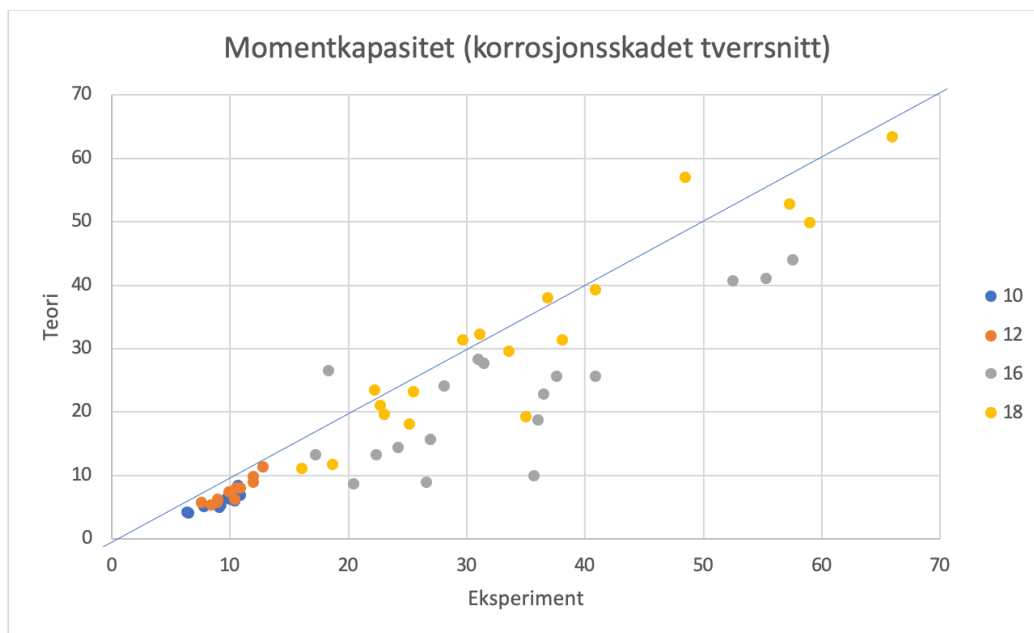
Denne fremgangsmåten brukes for å teoretisk beregne momentkapasiteten til de korroderte bjelkene. Hele utregningen er lagt ved i Vedlegg C1 og C2.

5.4 Beregnet momentkapasitet av bjelker sammenlignet med forsøk

Den foreslåtte formelen for redusert diameter for armering utsatt for korrosjon er som definert i kapittel 5.1:

$$\varnothing_{L_{korrr}} = \frac{\varnothing_L * (100 - \%vektttap)}{100} - 0.0376 * \%vektttap * \frac{1}{2} * \frac{\varnothing_L * (100 - \%vektttap)}{100} \quad (5.18)$$

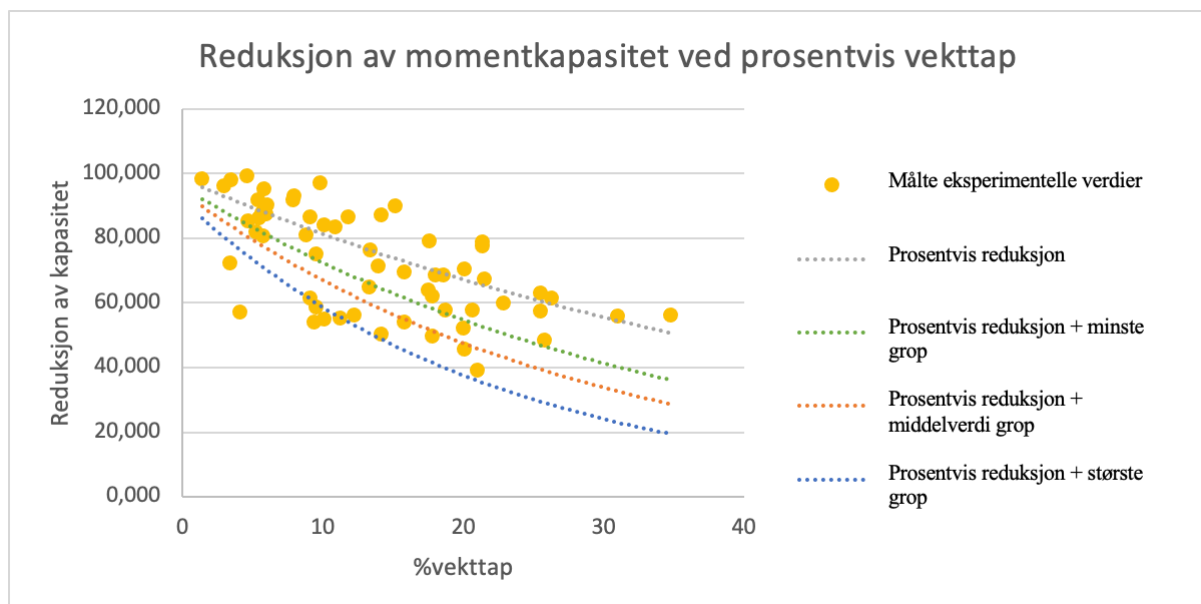
I figuren under vises en sammenligning mellom de målte eksperimentelle verdiene av bjelkene som ble utsatt for akselerert korrosjon [13][35] og de teoretisk kalkulererte verdiene for korrosjonsskadet tverrsnitt, hvor diameteren er bestemt etter formelen over, etter fremgangsmåte vist i kapittel 5.3. De ulike fargene beskriver ulik diameter på armeringsstengene. Eksperimentelle verdier er vist på x-aksen og teoretiske verdier er vist på y-aksen.



Figur 21: Sammenligning av teoretiske og eksperimentelle verdier av momentkapasiteten til korroderte bjelker

Figuren viser at de eksperimentelle og teoretiske verdiene stemmer relativt godt overens, som regel er de eksperimentelle verdiene litt høyere enn de teoretiske, som også er det ønskede resultatet. Dette sikrer at den faktiske kapasiteten er litt høyere enn det som er prosjektert. Resultatene gir en bias på 0.74 og variasjonskoeffisienten på 0.27.

Figur 22 viser de samme målte eksperimentelle verdiene, i tillegg til ulike måter å reduseres armeringstverrsnittet for å redusere kapasiteten. Prosentvis reduksjon er vist ved den grå linja i Figur 22. For å gjøre en vurdering av den foreslåtte formelen $\varnothing_{L_korr} = \frac{\varnothing_L * (100 - \%vektttap)}{100} - 0.0376 * \%vektttap * \frac{1}{2} * \frac{\varnothing_L * (100 - \%vektttap)}{100}$ (5.7, hvor største grop blir tatt i betraktning, er også middelverdien og minste grop basert på Figur 16 tatt med i figuren under. Ved å kun ta høyde for prosentvis korrosjon (grå) er det tydelig at kapasiteten overvurderes. Å regne med nedre grense, altså minste grop (grønn), eller middelverdien (oransje) gir også for høy kapasitet. Først når største grop (blå) tas i betraktning blir det gitt et estimat på sikker side, som vil si at formel 5.7 gir et sikkert estimat av korroderte betongbjelkers kapasitet.



Figur 22: Sammenligning av ulike måter å redusere kapasiteten

5.5 Sammenheng mellom målt korrosjonspotensial og vektttap

I forsøkene som er lagt til grunn for dette arbeidet, se kapittel 4.3, er både korrosjonspotensialet under hele korrosjonsperioden og vektttap som følge av korrosjon målt. Dette gir oss en mulighet for å se på hvor nøyaktig en kan estimere vektttapet som funksjon av korrosjonspotensialet. Generelt kan sammenhengen mellom metalltap basert på korrosjonspotensial og prosentvis vektttap beskrives av følgende formel [35, formel 5]:

$$P_r = \frac{W}{F * \gamma_{st}} * I_{corr} = \frac{J_r}{\gamma_{st}} \quad (5.19)$$

Hvor w er vekt, F er Faradays konstant, I_{corr} er korrosjonsstrømtettheten og γ_{st} er massetettheten til stål.

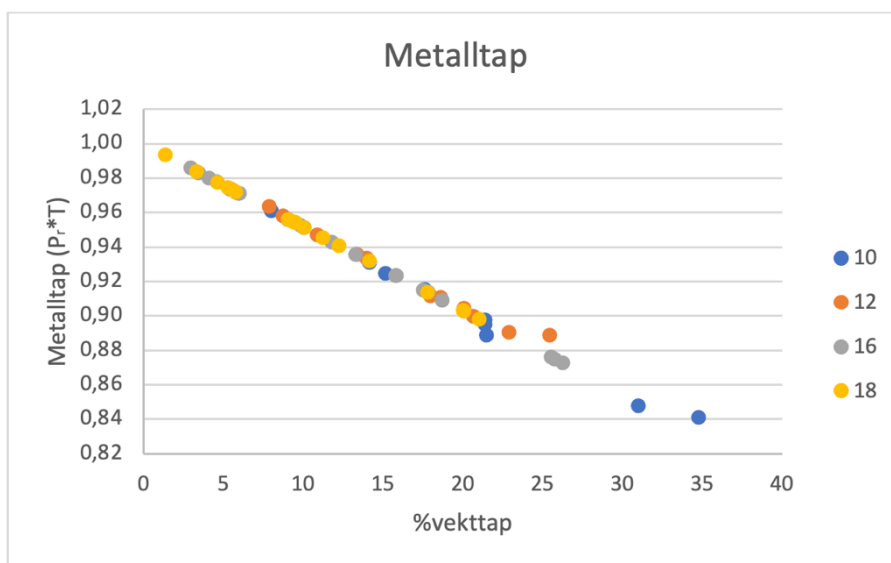
Det totale metalltapet, som funksjon av korrosjonspotensial, utledes dermed ved å multiplisere metalltapet over tid, P_r , med tiden utsatt for korrosjonsstrøm, T . Den reduserte diameteren kan da beskrives i henhold til følgende formel [35, formel 6]:

$$\varnothing_{L_korr} = \varnothing_L * \left(1 - \frac{2 * P_r * T}{\varnothing_L}\right) \quad (5.20)$$

For å sammenligne tapet uavhengig av original armeringsdiameter, korrigeres formelen som vist i formel 5.21:

$$\frac{\varnothing_{L_korr}}{\varnothing_L} = \frac{\varnothing_L * \left(1 - \frac{2 * P_r * T}{\varnothing_L}\right)}{\varnothing_L} \quad (5.21)$$

Formel 5.21 er illustrert i figuren under, for de eksperimentelle verdiene fra forsøkene i kapittel 4.3.



Figur 23: Metalltap sammenlignet med prosentvis vekt tap, uavhengig av original diameter

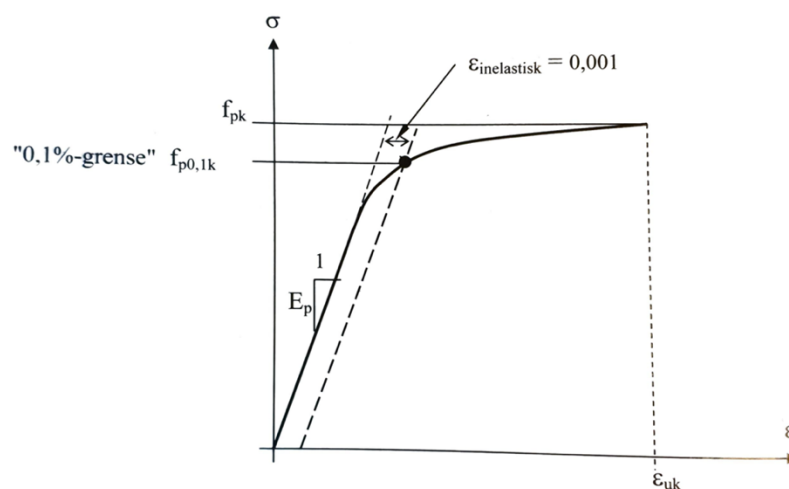
Ut fra figuren over kan man se at det er en klar sammenheng mellom metalltapet som funksjon av korrosjonspotensial og det målte prosentvise vekttapet. Det understrekes at disse målingene er utført i et laboratorium, og at det ikke nødvendigvis ville vært like klar sammenheng for en reell konstruksjon utsatt for naturlig korrosjon. Likevel indikerer dette at det burde være mulig å gjøre et estimat av hvor stort vekttapet på grunn av korrosjon er på grunnlag av målinger av korrosjonspotensial.

6 Korrosjon av spennarmering

6.1 Introduksjon

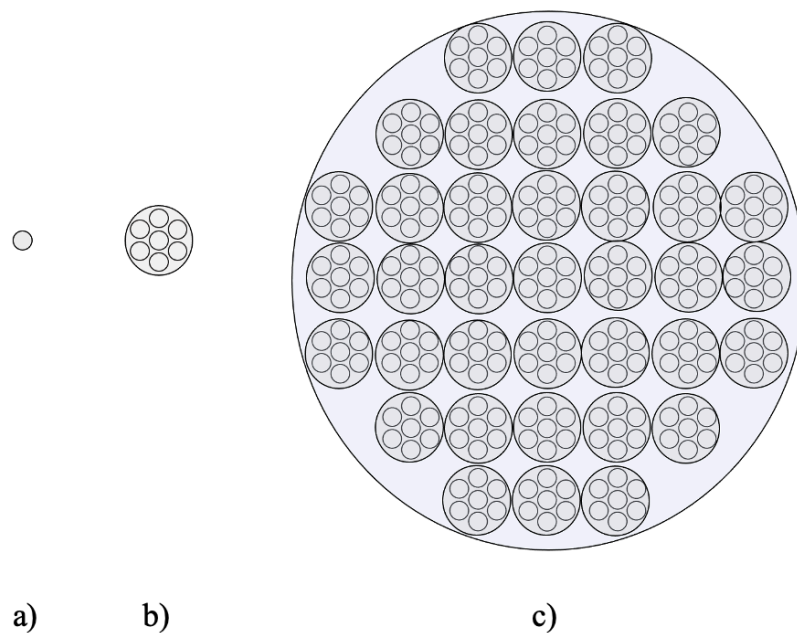
Spennarmering vil i dette kapitlet bli undersøkt nærmere. Det vil bli sett på hvilke problemer som er typiske for spennarmering, og hvordan dette påvirker kapasitet og duktilitet. Korrosjon på spennarmerte betongkonstruksjoner har vist seg å være svært utfordrende og har medført kollaps av bruer og bygninger. Noen av disse hendelsene beskrives i dette kapitlet. Videre er det, som for slakkarmering, viktig å bruke laboratorieforsøk av betongbjelker med korrodert spennarmering som grunnlag for å utarbeide forslag til måter å bestemme kapasiteten av betongkonstruksjoner med korrodert spennarmering. I litteraturen er det færre forsøk som inkluderer spennarmering, men totalt blir syv forsøk studert og gjennomgått. Disse forsøkene danner grunnlaget for å analysere hvordan momentkapasiteten og duktiliteten påvirkes av korrosjon på spennarmerte konstruksjoner.

Spennarmering har som oftest høyere fasthet enn slakkarmering. Økningen i fasthet oppnås stort sett ved en kombinasjon av legering og kaldbearbeiding. Flytegrensen er av denne grunn vanligvis ikke så utpreget, i motsetning til for varmvalset armeringsstål. Den karakteristiske fastheten defineres derfor som «0.1 %-grensen», $f_{p0.1k}$, som beskriver spenningen som er oppnådd ved 0.1 % inelastisk tøyning. Spennstålet har som regel 0.1 %-grense $f_{p0.1k}$ mellom 1500 og 1800 MPa [25 s. 207-209]. Figur 24 viser spenning-tøyningskurven for kaldbearbeidet høyfast stål.



Figur 24: Spenning-tøyningskurve for spennarmering [25, fig. 3.1a]

Den vanlige oppbygningen av spennarmering består av spenstråder med diameter på 4-5 mm som vikles sammen til et spenntau. Tråder kan også brukes enkeltvis som strengbetong, men brukes vanligvis som et spenntau. Et spenntau består som regel av et antall tråder, eksempelvis seks tråder, spiralslått rundt en rett sentertråd. Deretter kan spennkabler, som er en større enhet, bygges opp av spenstråder eller spenntau [25, s. 209]. Oppbygningen er illustrert i figuren under.

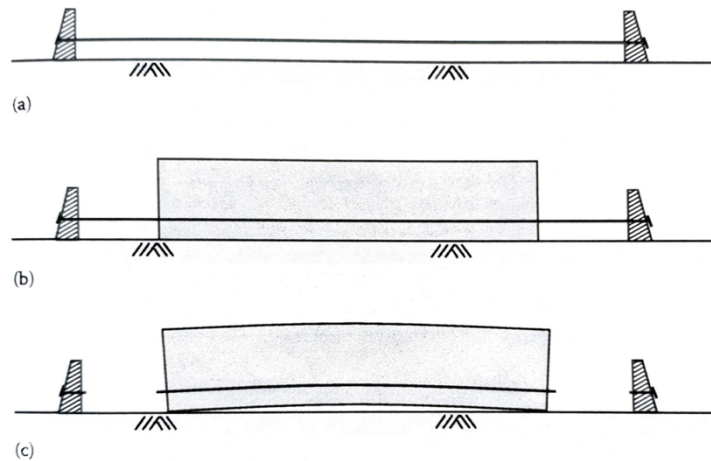


Figur 25: Illustrasjon av oppbygningen av spenntau.

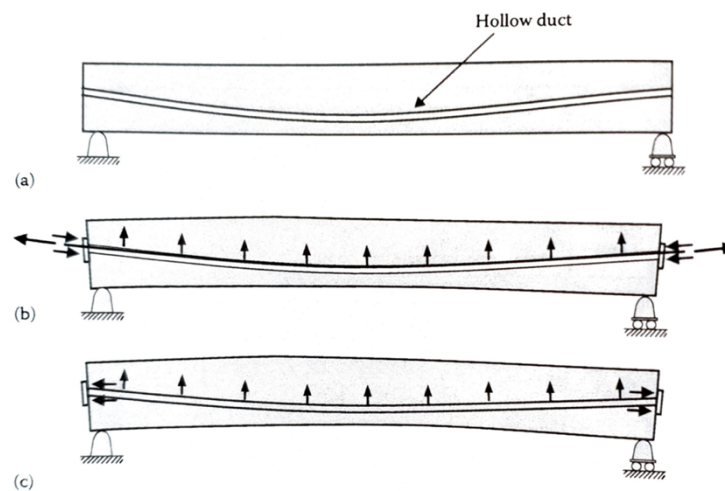
a) Spenstråd b) Spenntau c) Spennkabel

Spennarmering kan utføres på to ulike måter avhengig om armeringen påføres strekk før eller etter betongen er støpt; før oppspenning og etter oppspenning, se Figur 26 og Figur 27 [Design PS EC2, fig. 1.3 og 1.4]. Før oppspenning utføres ved at armeringen blir spent opp før betongen støpes rundt armeringen. Etter at betongen har herdet til ønsket fasthet, kappes spennarmeringen. Kraften fra spennarmeringen overføres deretter som trykkrefter ved heftspenninger mellom armering og betong i hver ende, i såkalte forankringssoner. Ved denne typen oppspenning har betongen og armeringen direkte kontakt, og det skapes god heft mellom materialene. Etter oppspenning av armering vil si at armeringen spennes opp etter at betongen er støpt og herdet til ønsket styrke. Denne typen armering ligger som regel i kabelrør, og kan utføres på to ulike måter. Det første alternativet er å injisere kabelrørene med sementbasert

mørtel etter at armeringen er oppspent, noe som skaper heft mellom spennarmeringen og betongen rundt. Alternativt kan det utføres uten injisering, og dermed uten heftforbindelse. Da brukes det vanligvis plastrør som fylles med en fettmasse, noe som beskytter mot korrosjon i tillegg til å gi lavere friksjon ved oppspenning [25, s. 203-206] [20, s. 2].



Figur 26: Fremgangsmåte for førøppspent bjelke [42, fig. 1.3].



Figur 27: Fremgangsmåte for etterøppspent bjelke [42, fig. 1.4].

Som nevnt ligger etterøppspent armering vanligvis i kabelrør, mens førøppspent armering normalt ligger i direkte kontakt med betongen. Dette vil si at for etterspent armering som ligger i uninjiserte kabelrør er det kun reduksjon i armeringsstengenes diameter som påvirker kapasiteten. Siden forspent armering og etterøppspent armering i injisert kabelkanaler har

direkte kontakt med betongen, vil de, i likhet med slakkarmering, også oppleve tap av kapasitet på grunn av tap av heft [43, s. 2].

En tredje, mindre brukt form for spennarmering, er ekstern oppspenning, enten i form av spenntau eller spennkabler. Denne typen oppspenning ligger ikke inni betongen, men blir plassert utenpå konstruksjonen eller inni om det er en form for platebærer. Denne typen spennarmering kan også brukes for å reparere eller styrke ei eksisterende bru [42, s. 60-62].

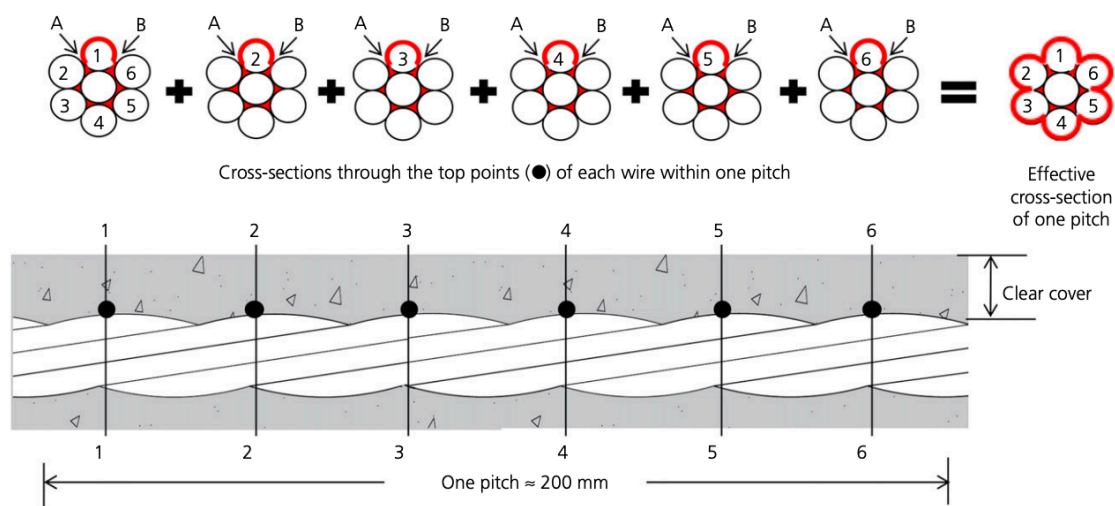
6.2 Degraderingsmekanismer for spennarmering

I likhet med slakkarmering, er kloridinntrengning en vanlig årsaker til korrosjonsskader også for spennarmering. Groptæring og reduksjon av tverrsnitt for tråder og spennkabler er resultater av dette. Siden spennarmering som regel har høyere fasthet enn slakkarmering [25, s. 209], gjør dette at spennarmering har andre utfordringer. De to største problemene knyttet til høyere fasthet er at høyfast stål har større mottakelighet for hydrogensprøing og at samme reduksjon i tverrsnitt på slakkarmering og spennarmering, vil ha større konsekvenser for spennarmering da det leder til en høyere kapasitetsreduksjon. Spenningskorrosjon og hydrogensprøing som følge av hydrogeninntrengning kan føre til store skader hos spennarmering, blant annet sprøbrudd. Sprøbrudd er en utfordring siden det er lite forvarsel før konstruksjonen kollapser, mens for et mer duktilt brudd vil man kunne se store nedbøyninger eller deformasjoner før en eventuell kollaps [20, s. 5]. For etteroppspent armering som ligger i kabelrør kan også hulrom og korrosjon som følge av oppsmuldet injiseringsmørtel være årsak til nedbrytning.

6.2.1 Tverrsnittsreduksjon

På grunn av spennarmerings høyere fasthet [25, s. 209], vil lik korrosjonshastighet føre til at spennarmeringen har en større reduksjon i kapasitet. I tillegg til høyere fasthet, er spennarmering ofte sammensatt av et antall mindre tråder, og det totale arealet av spennarmering reduseres av denne grunn raskere enn for en uniform armeringsstang av større diameter, på tross av å bli utsatt for samme korrosjonshastighet [20, s. 5].

Grunnet spenntauets oppbygning, eksempelvis en rett sentertråd med seks tråder spiralslått rundt, vil alle trådene i løpet av en viss lengde være vinklet mot betongens overflate, se figur under [44, fig 12, s. 10-12]. Dermed kan alle trådene korrodere samtidig, i motsetning til en uniform armeringsstang hvor det hovedsakelig kun er den ene siden som blir utsatt for korrosjon. Ulempen for spenntauet er at det har et større overflateareal enn en uniform armeringsstang. I tillegg vil hulrommet mellom trådene også være med på å akselerere korrosjonen, siden dette tillater eventuell fuktighet og klorider å samle seg opp og utvikle seg [45 I undersøkelser gjort i [44, s. 10] var de fleste korrosjonsgrøpene lokalisert i eller i nærheten av sprekke mellom trådene, områdene som er markert med piler A og B på figuren under. På grunn av hulrommet mellom trådene har korrosjonsproduktene mulighet til å bevege seg i lengderetning, som også vil gjøre at korrosjonspåvirkningen er større enn for en uniform armeringsstang hvor dette ikke er mulig.



Figur 28: Korrosjonsutvikling på spenntau [44, fig 12]

Når korrosjonsproduktet dannes vil det, i et spenntau bestående av flere tråder, bygge seg opp korrosjonsprodukt i hulrommene mellom trådene og på denne måten også kunne transporteres i lengderetningen [44, s. 10]. I en uniform armeringsstang vil ikke korrosjonsproduktet kunne forflytte seg i lengderetningen like enkelt. Med tanke på at korrosjonsproduktet har et volum på seks ganger stålets opprinnelige volum vil det i spenntauet kunne spre seg ganske langt i lengderetningen.

Reduksjonen i diameter av en uniform armeringsstang eller spenntau som kreves før det fører til synlige riss eller rustflekker, er ulik. For en armeringsstang er dette omtrent 15 μm , om det antas at korrosjonen skjer på øvre del av armeringen vil det utgjøre ca 0.1 % av overflatearealet

av en 16 mm armeringsstang. For spenntau er den kritiske reduksjonen antatt å være summen av korrosjonsprodukt på de ytre trådene i tillegg til hulrommet mellom trådene, resulterende i en reduksjon på omtrent 135 μm , nærmere 6 % av overflatearealet, for spenntau med diameter på 15.2mm. Om overdekningen er lik, gir dette at den kritiske diameterreduksjonen er 9 ganger høyere for spenntau enn for en vanlig armeringsstang. Dette vil altså si at det er ingen synlige tegn på korrosjon før spenntauet er redusert med opptil 6 %, som kan medføre alvorlige sikkerhetsproblemer [44, fig 12, s. 11-12].

I følge [45, s. 108] kan man anta at om en tredjedel av høyden på spenntauet er utsatt for korrosjon, er 85 % av kapasiteten mistet. En tredjedel av høyden tilsvarer omtrent 30 % reduksjon i armeringens tverrsnittsareal. Hvis to tredjedeler er korrosjonsskadet er antakeligvis 100 % av kapasiteten tapt.

6.2.2 utfordringer knyttet til kabelrør

Kabelrørene med etteroppspent armering fylles ofte med sementbasert mørtel for å beskytte spennsystemet mot korrosjon og overføre kraft fra spennkablene til betongen [46, s. 7]. Manglende mørtel eller ufullstendig injisering er en av grunnene til korrosjonsskader på etteroppspent armering. I en studie [47, s. 5-6] utført for å se på påvirkning av blant annet manglende mørtel, ble spennkabler fra to ulike etteroppspente betongelementbruer med kassetverrsnitt hentet ut. Her viste det seg tydelig at de fleste av de korroderte trådene var lokalisert i hulrom med manglende mørtel, mens tråder i områder med tilfredsstillende mørtel var i god stand. Også ved undersøkelse av 12 britiske bruer med etteroppspent armering oppført mellom 1958 og 1977, ble det funnet hulrom i kabelrørene hos ti av de undersøkte bruene. Likevel ble det feilaktig konkludert med at risikoen for uventet kollaps, var liten [48, s. 3]. Etersom det ikke finnes noen kjente ikke-destruktive metoder å undersøke om det er korrosjonsskader inni kabelrør, er den eneste måten å finne korrosjon å lokalisere hulrom i kabelrør.

Historisk har det vært flere utfordringer knyttet til injiserte kabelrør. Dårlig blandestyr førte til høy vannutskillelse grunnet dårlig kvalitet på injiseringsmassen, det var ikke uvanlig at bare deler av kabelkanalene ble tilstrekkelig injisert på grunn av propp, eller at bare deler av kabeltverrsnittet ble tilstrekkelig injisert på grunn av separasjon og vannutskillelse.

Proppdannelse oppstår av flere grunner, blant annet klump i sement, uegnede blandekar og trange kanaler. Det var heller ikke uvanlig at det ble støpt inn komponenter med korrosjon [49, s. 9-10].

Generelt er det knyttet mye usikkerhet til hvordan korrosjon og nedbrytning foregår i kabelrør, men normalt er det antatt at det henger sammen med kloridinntrengning [49]. I Statens Vegvesens prosjekt Bedre Bruvedlikehold [50] er det oppdaget alvorlig korrosjon på spennarmering, uten at det er funnet klorider i kabelrørene hvor korrosjon er oppdaget. Den oppsmuldrede injiseringsmørtelen som ble påvist i kabelrør på disse bruene er vist i Figur 29. Beskrivelsen av mørtelen er at den er kitt-aktig og oppsmuldret, og korrosjon av denne typen blir beskrevet som soft grout corrosion på engelsk.

Det antas at dette oppstår i delvis fylte kabelrør. Denne oppsmuldrede mørtelen beskytter ikke armeringen mot korrosjon, men skaper et fuktig miljø [49].



Figur 29: Eksempel på kabelrør med korrosjon i forbindelse med oppsmuldring av mørtel [49]

I Florida, USA, har spennkabler som har kollapset på grunn av korrosjon blitt undersøkt [51]. Her ble det funnet forhøyet nivå av sulfationer, høy pH i porevannet, lavt innhold av kloridioner og økt vanninnhold i injiseringsmørtelen. Også denne mørtelen ble beskrevet som oppsmuldret og fuktig. Den kjemiske sammensetningen som ble registrert ved analyse av injiseringsmørtelen er oppsummert i Tabell 7.

Tabell 7: Kjemisk sammensetning i injiseringsmørtel [51, tabell 1]

Kjemisk elementer	Konsentrasjon (ppm)		
	Min	Max	Gjennomsnittlig
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	730	9707	5165
Klorid (Cl ⁻)	2	430	68
Kalsium (Ca ²⁺)	38	164 356	8987
Natrium (Na ⁺)	764	6751	3018
Kalium (K ⁺)	1412	23 877	10 943
Nitrat (NO ₃ ⁻)	2	791	126
Nitritt (NO ₂ ⁻)	5	498	44
pH	11	13.5	12.6

Statens Vegvesen er ikke sikre på hva som er årsaken til korrosjon i forbindelse med oppsmuldret mørtel, heller ikke i [51] har de en tydelig forklaring. Som følge av brudd i en spennkabel, under 2 år etter bygging, ble det utført [52] laboratorieundersøkelser for å prøve å forstå mekanismene bak korrosjon i forbindelse med oppsmuldret mørtel. Også her var injiseringsmørtelen oppsmuldret og med høyt vanninnhold. Studien ga ikke et entydig svar, men pekte i retning av begynnende korrosjon i områdene mellom spenntrådene hvor oksygentilgangen er lav. Dermed oppstår korrosjonen lokalt, ofte i form av groper, i små områder hvor passivfilmen rundt armeringen er ødelagt. Armering med korrosjon som følge av oppsmuldret mørtel er vist i Figur 30.

De vanligste korrosjonsformene som ikke inkluderer klorider er CO₂-korrosjon og mikrobiologisk induert korrosjon. Mikrobiologisk induert korrosjon er ofte et resultat av sulfatreducerende bakterier som produserer H₂S [53, s. 74]. Om forholdene ligger til rette for noen av disse typene korrosjon i overnevnte tilfeller i forbindelse med soft grout corrosion vil kreve kjemiske analyser miljøet i kabelrørene. Slike kjemiske analyser har ikke vært tilgjengelig i dette arbeidet, men tabellen over viser at det har vært tilstedeværelse av sulfater i injiseringsmørtelen på brua i Florida.

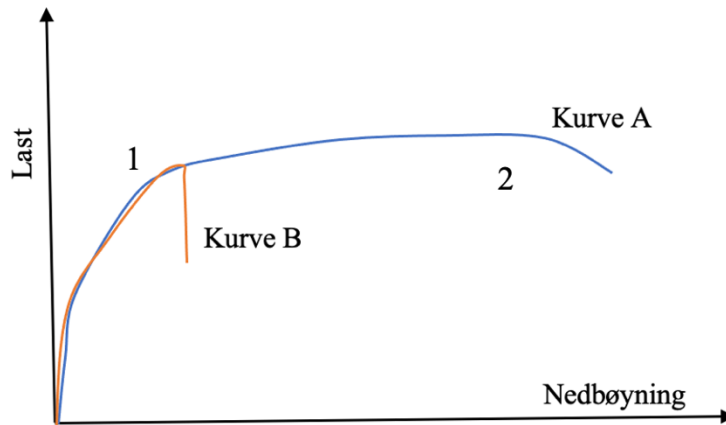


Figur 30: Korrosjon i forbindelse med oppsmuldret mørtel [49]

6.2.3 Hydrogensprøing og tap av duktilitet

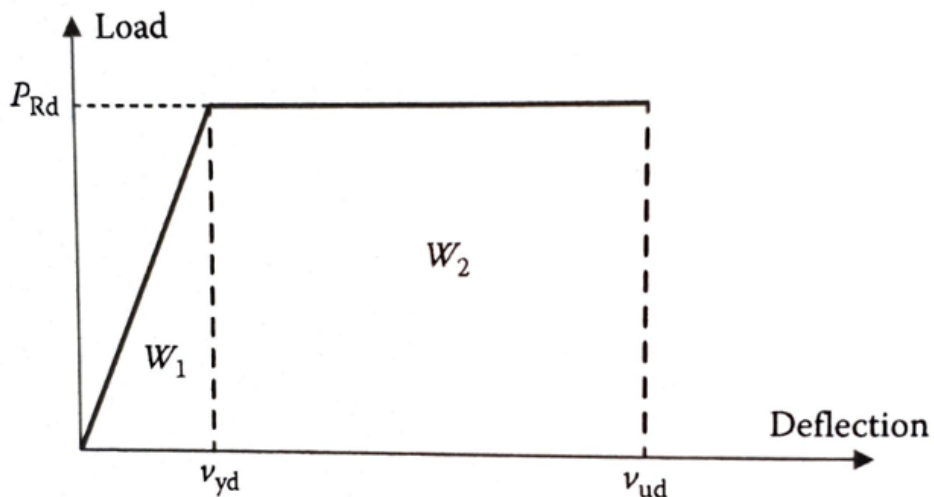
Hydrogeninntrengning kan, som tidligere nevnt, føre til ulike skademekanismer i spennarmering. Blant disse finner man hydrogensprøing (HE), spenningskorrosjon (SCC) og hydrogenindusert spenningskorrosjon (HISCC). Det kan være utfordrende å fastslå hva som er årsaken til en kollaps, blant annet fordi ulike skadetyper ofte opptrer samtidig. Eksempelvis vil man ofte også finne groptæring i tillegg til hydrogenindusert spenningskorrosjon [20, s. 8]. En av følgene av hydrogeninntrengning er at et materiale mister sine duktile egenskaper, og fører til et mulig sprøbrudd. [20, s. 8]

Duktilitet kan beskrives som en konstruksjons eller et elements evne til tåle stor plastisk deformasjon uten at det påvirker kapasiteten eller fører til brudd. Det motsatte av duktilitet er sprøhet. Et sprøtt materiale vil ved å gjennomgå store plastiske deformasjoner miste kapasiteten og gå til brudd [54]. I Figur 31 viser kurve A duktil oppførsel, mens kurve B viser mindre duktil, og mer sprø oppførsel. Området frem til 1 markerer den elastiske energien og området mellom 1 og 2 vises den plastiske energien. Kurve A stabiliserer seg når maksimal last er oppnådd, og blir liggende på et «plastisk platå» (mellom 1 og 2), her vil konstruksjonen gjennomgå deformasjoner, men innehar fremdeles full kapasitet, før den går til brudd. Til forskjell oppnår kurve B maksimal last, men går så fort til brudd, uten å gjennomgå store deformasjoner først.



Figur 31: Duktil og sprø last-nedbøyningskurve

Figur 32 viser en idealisert last-nedbøyningskurve. Området under grafen markert « W_1 » representerer den elastiske energien, mens området under grafen markert « W_2 » viser den plastiske energien. En tilnærming til å si noe om et materiale er sprøtt eller duktilt, kan gjøres ved å ta utgangspunkt i forholdet mellom W_1 og W_2 . Om forholdet tilfredsstiller $\frac{W_2}{W_1} \geq 3.0$, kan man si at det er duktilt [42, s. 256-257].

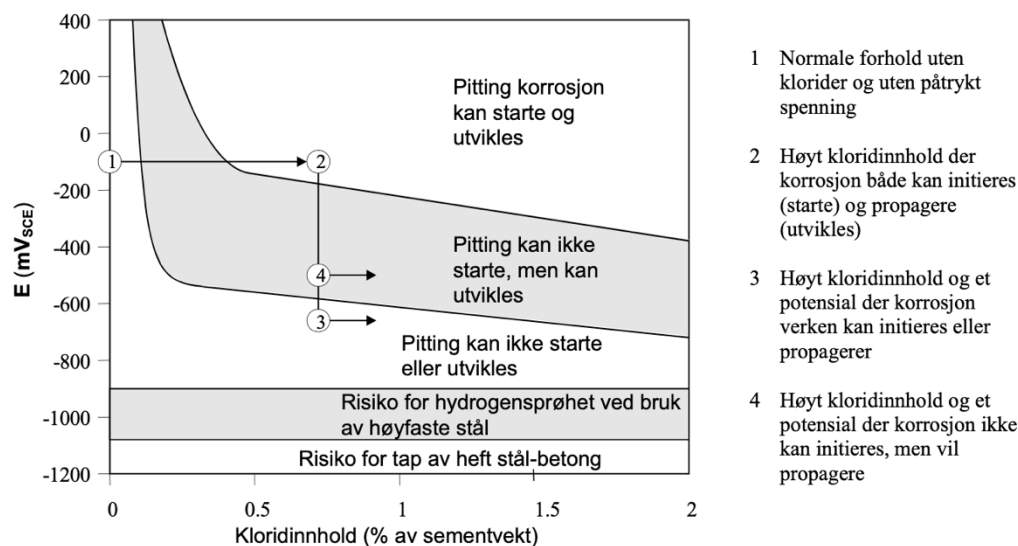


Figur 32: Idealisert last-nedbøyningskurve [42, fig. 6.22].

Katodisk beskyttelse er en reparasjonsmetode som er mye brukt av Statens Vegvesen. Det er i hovedsak brukt på slakkarmerte konstruksjoner, da det kan føre til hydrogenindusert nedbrytning hos høyfaststål. Det er i kapittel 2.3.3 beskrevet hvordan hydrogen trenger inn i

betongen ved $\text{pH} < 7$, men også ved lavt potensiale, som oppnås ved å bruke katodisk beskyttelse, kan dette bli et problem. Katodisk beskyttelse er et økonomisk alternativ til reparere eller bremse korrosjonsskader, og kan ofte være eneste alternativ til å rive en eksisterende konstruksjon eller konstruksjonsdel og bygge ny. Katodisk beskyttelse baserer seg på å, ved hjelp av en ekstern strømkilde, endre potensialet i stålet til et nivå hvor det ikke vil korrodere videre [55, s. 146] [56, pkt. 43]. På grunn av faren for hydrogensprøing, er det risikofylt å bruke katodisk beskyttelse på spennarmerte konstruksjoner.

I Figur 33, er det tydelig at det ved lavt potensiale er risiko for hydrogensprøing, og senere også sprøbrudd. I figuren angir område 4 katodisk beskyttelse, mens område 3 angir katodisk forebygging. Steg 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 gir katodisk forebygging, og steg 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 gir katodisk beskyttelse [55, s. 149].



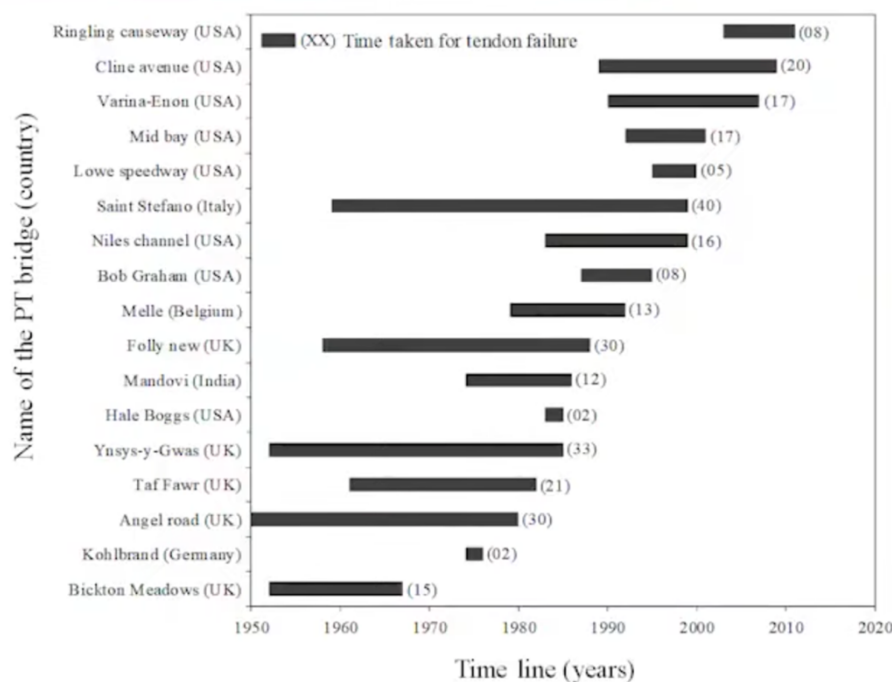
Figur 33: Katodisk beskyttelse [55, s. 210]

6.3 Tidligere kollapser av spennarmerte konstruksjoner

Armeringskorrosjon er et kjent problem for betongbruer, og det har vært flere ulykker knyttet til dette. Grunnet flere ulykker og tvil rundt sikkerheten til etteroppspente betongbruer, ble det i Storbritannia lagt ned et midlertid forbud mot bygging av enkelte typer etteroppspente betongkonstruksjoner, i 1992. Britiske transport myndigheter anså usikkerheten rundt manglende korrosjonsbeskyttelse i spennkabler som så stor at etteroppspente betongbruer med

injisererte kabelrør ble forbudt. I 1996 ble forbudet delvis opphevet da plassbygde konstruksjoner av denne typen igjen ble tillatt, men prefabrikkerte etteroppspente betongelementbruer med injisererte kablerør er fremdeles forbudt [57, s. 144]. I Norge har det aldri vært et slikt forbud, men på grunn av det britiske forbudet ble det internasjonalt utviklet flere regelverk. [46, s. 12-13] [48, s. 4].

Blant bruene som har kollapset på grunn av korrosjonsskader finner man blant annet Bickton Meadows fotgjengerbru i England, Melle bru i Belgia og Ynys-y-Gwas i Wales. Ingen av disse konstruksjonene var særlig gamle, som viser at dette også er relevant for relativt «unge» bruer, oppsummert i figuren under. I senere tid er Morandi brua i Italia er eksempel på en bru som har kollapset på grunn av korrosjon. Av andre spennarmerte konstruksjoner som har kollapset finner vi også Haus de Kulturen der Welt (House of the World's cultures, tidligere Kongresshalle, Berlin Congress Hall) i Tyskland.



Figur 34: Kollapsede bruer som følge av korrosjon [58, 21:00]

Bickton Meadows fotgjengerbru, en etteroppspent betongelementbru bru, i England, kollapset i 1967. Det var ingen forvarsler på hva som kom til å skje. Grunnen til kollaps var omfattende korrosjon på de øverste spennkablene [48, s. 3]. Melle Bru ble bygget over elva Schelde, i Belgia, i 1956. Brua kollapset i 1992, angivelig grunnet korrosjon på etteroppspente tråder som

lå i kabelrør. Kun to år før kollapsen skjedde hadde brua blitt inspisert, utsatt for belastningsprøve og diverse vedlikeholdsarbeid [59], og blitt godkjent for videre drift.

Ynys-y-Gwas var en ett-spenns, etteroppspent betongelementbru i Wales. Brua ble bygget i 1953, og kollapset i desember 1985. Forut for kollapsen hadde det ikke vært noen tegn til problemer på tross av jevnlig inspeksjoner, i ettertid viste det seg at spennkablene var sterkt påvirket av korrosjon. Brua viste verken tegn til rustflekker, sprekker eller nedbøyning under tidligere inspeksjoner. Hele dekket, altså ni interne bjelker, kollapset, uten at det var trafikk på brua. Både rekkverket og kantbjelkene sto igjen [60]. Se figur under.



Figur 35: Ynys-y-Gwas etter kollaps [60, s. 40]

Da brua ble inspisert i ettertid tydet det meste på at det var korrosjon, forårsaket av klorider, som var årsaken til kollapsen. Det antas at kloridene stammer fra veisalt, men brua ligger

kystnært til, i tillegg til at det kan ha vært salt i sanden som ble brukt ved støping av betong. I det diameteren på armeringen var redusert i den grad at den ikke lenger kunne holde nyttelastene, kollapset konstruksjonen. Betongen og stålet som ble brukt var av god kvalitet, og på delene av brua som hadde tilstrekkelig beskyttelse mot korrosjon ble det ikke funnet noen tegn til korrosjon.

Morandi brua i Genova i Italia ble bygget i 1967, og kollapset delvis i 2018. 43 mennesker døde i ulykken. Det er bekreftet at korrosjon var årsaken til kollapsen, og det ble funnet korrosjonsskader på spennkabler. Deler av brua hadde blitt vedlikeholdt, blant annet ble spennkabler i et av bruas tre tårn byttet ut i 1992, men andre deler av brua bar preg av mangel på vedlikehold. Det var et av tårna som ikke ble vedlikeholdt skikkelig som kollapset i 2018 og initierte videre kollaps. Figur 36 viser deler av de korrosjonsskadede spennkablene som ledet til kollapsen [61].



Figur 36: Groptæring på førøppspente spennkabler [61, fig. 2]

Haus de Kulturen der Welt ble bygget i Berlin i 1957. Den spennarmerte betongkonstruksjonen kollapset delvis i 1980, da deler av taket falt ned. Heller ikke her var det noen forvarsel i form av tydelig nedbøyning før deler av taket kollapset. Taket var konstruert som et tynt skallelement med etterøppspent armering, hvorav åtte spennkabler hadde kollapset totalt og to spennkabler delvis hadde kollapset. Den etterøppspente armeringen lå i mørtel i kabelrør, og deler av problemene oppsto antakeligvis som følge av dette. Mørtelen var av dårlig kvalitet, og den

etteroppspente armeringen ble utsatt for korrosjon. Den delen av taket som kollapset var i tillegg i nærheten av fontener inni bygget, som førte til et fuktig miljø. Armeringsstålet som ble brukt har også vært av en type som er spesielt sårbart for spenningskorrosjon. Summen av flere årsaker førte til slutt til en delvis kollaps [62].

6.4 Eksperimentelt arbeid

Kioumarsis et al. [43] presenterer en gjennomgang av ulike eksperimentelle forsøk som er gjort på spennarmering. Forsøkene tar for seg bjelker av ulike dimensjoner, fastheter og armeringsstørrelser og -mengder, det er derfor ikke mulig å gjøre en direkte sammenligning av de ulike forsøkene. Forsøkene som blir studert videre oppgir, i tillegg til informasjon om geometri og armeringsmengde, nødvendig informasjon om massetap grunnet korrosjon og inkluderer referansebjelker som muliggjør sammenligning av korroderte og ikke-korroderte bjelker. Totalt blir syv forsøk studert videre, hvorav samtlige tester før oppspente bjelker. Blant forsøkene baserer to seg på bjelker som er naturlig korrodert, mens resten baserer seg på bjelker utsatt for akselerert korrosjon. Bjelkene blir utsatt for firepunkts bøyetest eller syklisk last. Relevant informasjon fra de ulike forsøkene er satt opp i tabellen under. Tabellen fortsetter på de neste to sidene.

Tabell 8: Relevant informasjon fra forsøk

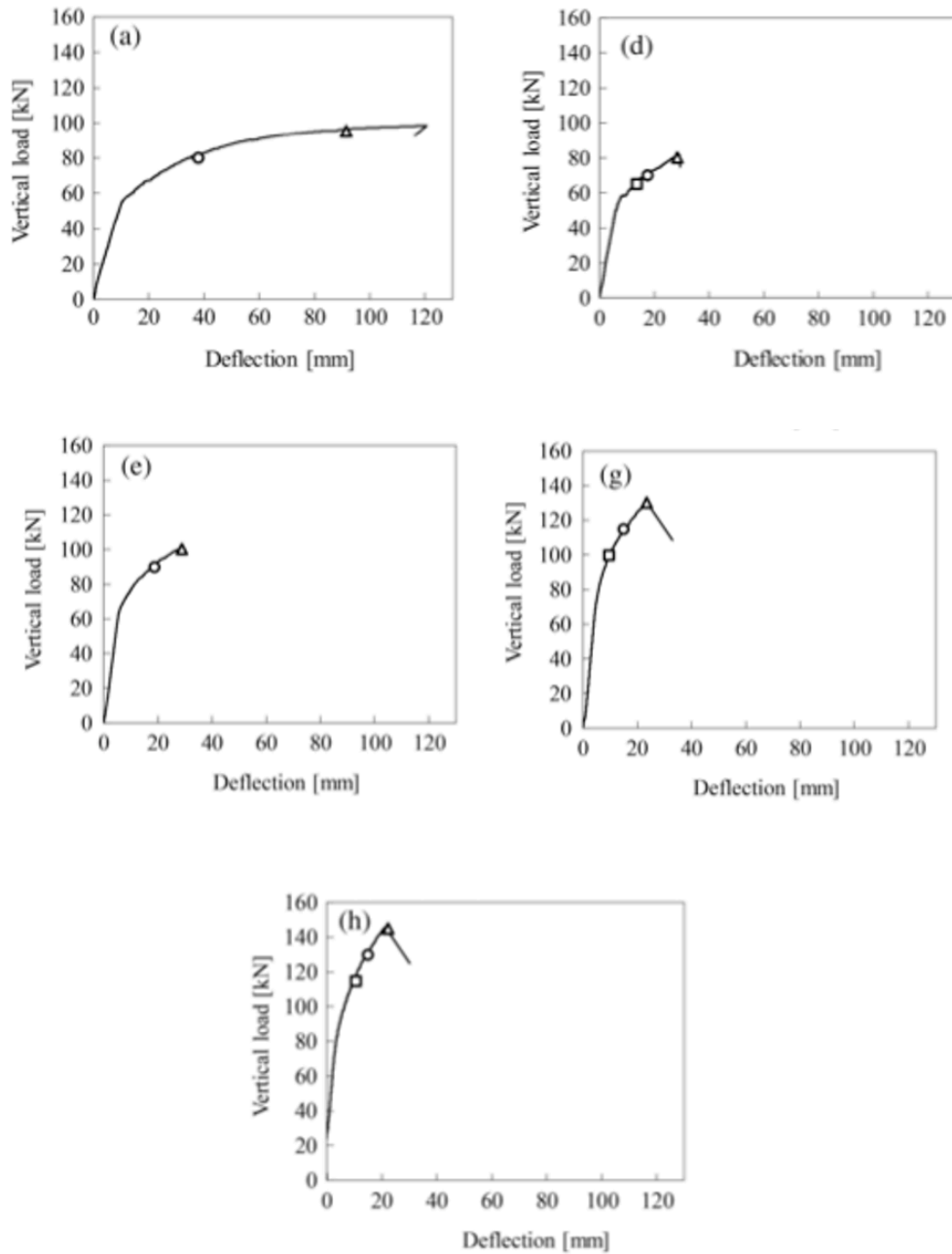
Forsøk	Bjelke	Korrosjonsnivå (massetap)	Maksimalt bøyemoment	Duktilitet
Forsøk 1 [63]	PBN4P2	Referansebjelke	82.71	-
	PB4P7	15.12 %	55.86	Tydelig reduisert
	PB4P8	8.92 %	65.04	
	PB4P13	8.30 %	68.19	
	PB4P14	6.03 %	75.62	

Forsøk	Bjelke		Korrosjonsnivå (massetap)	Maksimalt bøyemoment	Duktilitet
Forsøk 2 [43, s. 8]	1		Referansebjelke	Ikke oppgitt	-
	2		5.7 %	Redusert med 17.39 %	Redusert med 77.35%
	3		9.3 %	-	-
Forsøk 3 [64]	Serie I Betongfasthet 34 MPa	1 (B7)	Referansebjelke	-	-
		2 (B9)	20 %	Redusert 28 %	Reduksjon
		3 (B8)	20 %	Redusert 41 %	Reduksjon
	Serie II Betongfasthet 41.5 Mpa	4 (B2)	Referansebjelke	-	-
		5 (B3)	14 %	Redusert 55 %	Ingen forskjell
		6 (B1)	20 %	Redusert 65 %	Ingen forskjell
	Serie III Betongfasthet 47.4 Mpa	7 (B4)	Referansebjelke	-	-
		8 (B6)	7 %	Redusert 4.8 %	Reduksjon
		9 (B5)	20 %	Redusert 67 %	Reduksjon
Forsøk 4 [65]	1		Referansebjelke	-	-
	2		2.5 %	Redusert 6.6 %	Reduksjon
	3		5 %	Redusert 9.9 %	Reduksjon
	4		10 %	Redusert 26 %	Reduksjon
Forsøk 5 [66]	Sett 1: Betongfasthet 29 MPa	1 (U1)	Referansebjelke	-	-
		2 (C5-0.8)	4.9 %	Redusert 13 %	
	Sett 2 Betongfasthet 40.7 MPa	3 (U2)	Referansebjelke	-	-
		4 (U3)	Referansebjelke	-	-
		5 (C1-0.4)	6.3 %	Redusert 11 %	
		6 (C2-0.4)	10.2 %	Redusert 12 %	
		7 (C3-0.4)	12.8 %	Redusert 33 %	
		8 (C4-0.4)	12.8 %	Redusert 21 %	

Forsøk	Bjelke	Korrosjonsnivå (massetap)	Maksimalt bøyemoment	Duktilitet
Forsøk 6 [43]	1	Referansebjelke	-	-
	2	5.06 %	Redusert 2.4 %	Reduksjon
Forsøk 7 [43]	1 (B9)	Referansebjelke	-	-
	2 (B7)	2.2 %	Redusert 1.1 %	Reduksjon
	3 (B3)	4.3 %	Redusert 3.8 %	Reduksjon
	4 (B2)	7.1 %	Redusert 9.2 %	Reduksjon
	5 (B5)	10.2 %	Redusert 17.3 %	Reduksjon

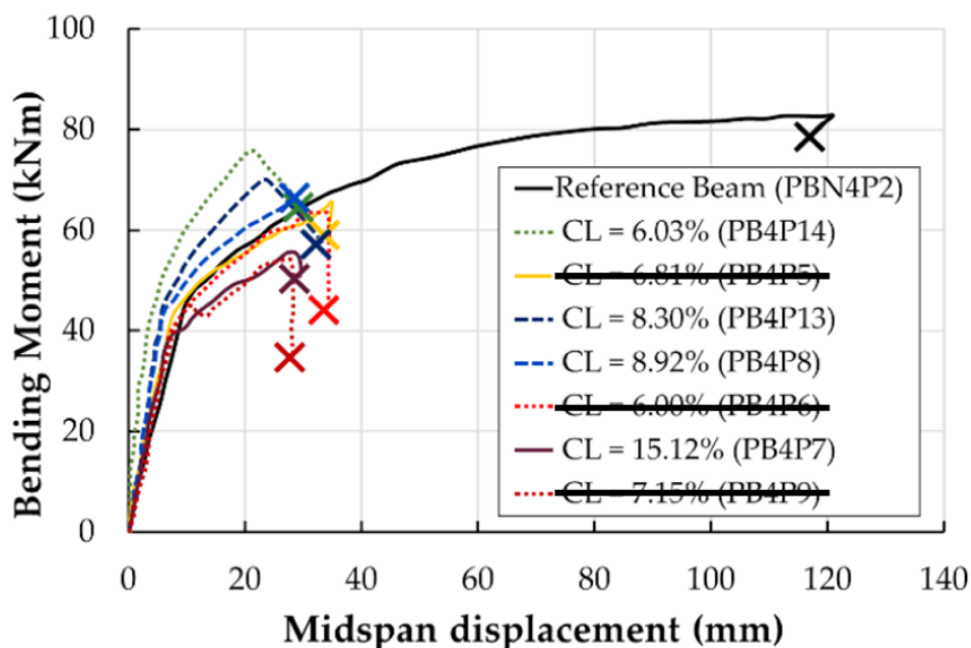
De to første forsøkene baserer seg på naturlig korroderte bjelker, og bruker bjelker som ble hentet ut fra et kjøletårn i et varmekraftverk. Her har de vært i bruk i 10 år, og blitt utsatt for gjentatt fukting med sjøvann [43, s. 7-8]. I det første av disse to forsøkene, utført av Belletti et al. [63], blir syv bjelker testet. Av disse er én bjelke uten korrosjon, og blir derfor brukt som referansebjelke, PBN4P2. Av de resterende syv bjelkene er det fire stykker, PB4P7, PB4P8, PB4P13 og PB4P14, som blir tatt i betraktning. De tre siste bjelkene har bruddmekanismer eller egenskaper som gjør at de ikke egner seg for sammenligning. I forsøk 2, utført av Vecchi et al. [43, s. 8], blir det sett nærmere på tre bjelker, hvorav én av bjelkene regnes som referansebjelke og de to andre er utsatt for henholdsvis 5.7 % og 9.3 % korrosjon. Det er begrenset med informasjon som er oppgitt og det blir av denne grunn kun sett videre på referansebjelken og bjelken med 5.7 % korrosjon.

I Figur 37 vises last-nedbøyning forholdet for de ulike bjelkene i forsøk 1 [63, fig. 13]. De ulike bjelkene har ulik spennlengde, og det vil påvirke resultatet for last-nedbøyningsskurvene. Man kan dermed ikke gjøre en direkte sammenligning av de numeriske verdiene. Graf (a) viser til PBN4P2, referansebjelken, som har en tilnærmet lineær styrkeutvikling, deretter duktil utvikling før det går til brudd. De neste grafene viser til de korroderte bjelkene: (d) PB4P7, (e) PB4P8, (g) PB4P13 og (h) PB4P14. Felles for alle disse er at styrkeutviklingen er tilnærmet lik som for referansebjelken, men bruddet er mye mindre duktilt, og åpenbart mer sprøtt.



Figur 37: Last-nedbøyningskurver for spennarmerte bjelker [63, fig. 13]

For å lettere kunne sammenligne resultatene av last-nedbøyningskurvene, er de omgjort til bøyemoment-nedbøyningskurver i [43, fig. 2b], som vist under. Heller ikke her er nedbøyningen direkte sammenlignbar, på grunn av ulike spennlengder. Bjelkene som ikke blir tatt i betraktning er strøket over. Man kan likevel se at det er klart større duktilitet i referansebjelken uten korrosjon.

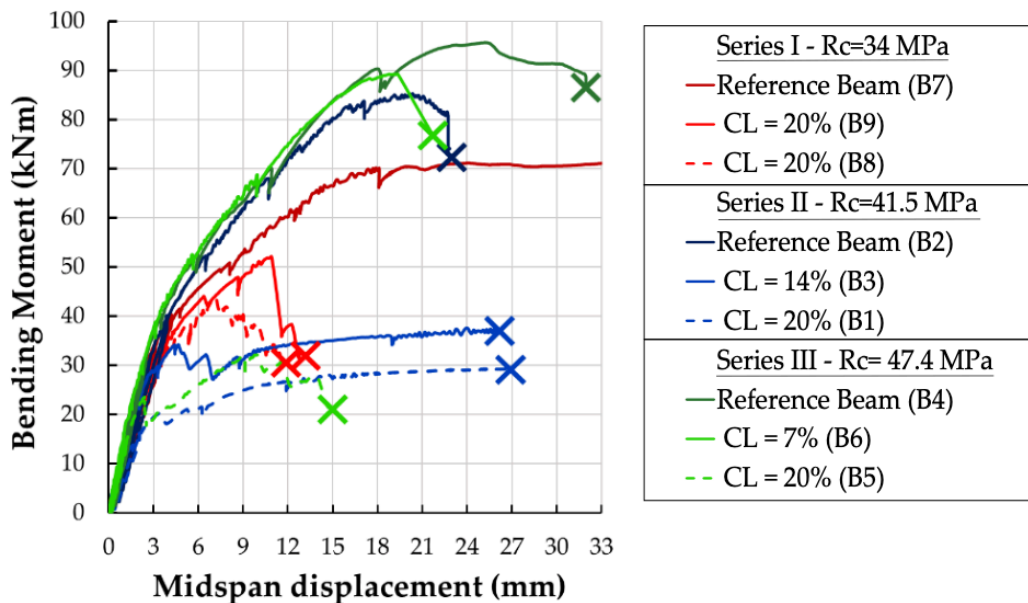


Figur 38: Bøymoment-nedbøyningskurve for forsøk 1 [43, fig. 2b].

De seks resterende forsøkene tester bjelker som har blitt utsatt for akselerert korrosjon, her har også alle bjelkene innad i hvert forsøk lik spennlengde, og dermed kan resultatene for bjelkene i hver enkel graf sammenlignes. Forsøk 3 og forsøk 6 er utført med bjelker med samme dimensjoner og armering, og disse kan dermed sammenlignes direkte. I grafene som følger ser man også tydelig at det er to variabler; kapasitetsutvikling og duktilitet.

I forsøk 3, av Rinaldi et al. [64], blir ni spennarmerte bjelker testet. Bjelkene har ulike betongfastheter, henholdsvis 34 MPa, 41.5 MPa og 47.4 MPa, med én referansebjelke og to korroderte bjelker for hver. Massetapet på grunn av korrosjon varierer mellom 7 %, 14 % og 20 %. Bjelkene ble testet med firepunkts bøyning. Også her ser man at det er kapasiteten og duktiliteten som påvirkes, se Figur 39 under. I den første serien, markert med rødt, har begge de korroderte bjelkene et massetap på 20 %. Referansebjelken kollapset som følge av betongknusing og en interaksjon mellom bøyemoment og skjærpåvirkning, de korroderte bjelkene kollapset begge på grunn av brudd i trådene i spennetauet [64, s. 2272]. På tross av samme massetap har bjelke B9 en kapasitetsreduksjon på 28 %, mens bjelke B8 har en kapasitetsreduksjon på 41 %, sammenlignet med referansebjelken. Dette kan tyde på at bjelkene har vært utsatt for groptæring, men at plasseringen av den mest kritiske gropen har vært mer ugunstig for bjelke B8. Også reduksjonen i duktilitet er tydelig, sett i lys av bruddmekanismen

og korrosjonsnivået er det sannsynlig at det høye korrosjonsnivået fører til at trådene ryker relativt hurtig.



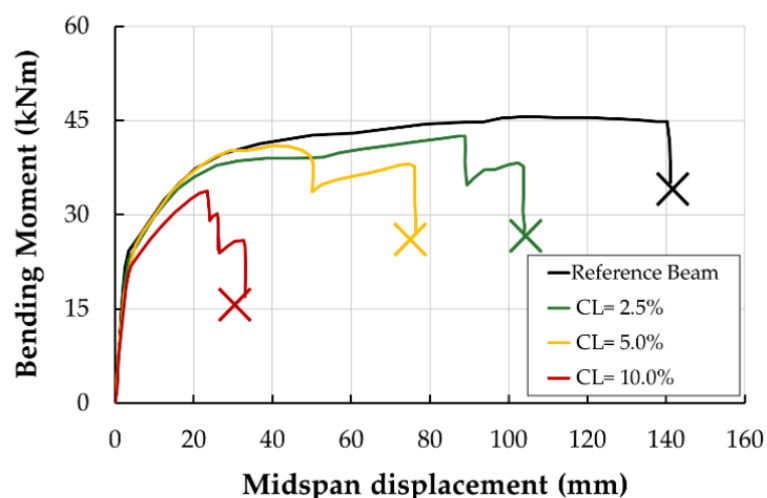
Figur 39: Bøyemoment-nedbøyningskurve for forsøk 3 [43, fig. 3a].

I serie 2, markert med blått, har de korroderte bjelkene tydelig lavere kapasitet en referansebjelken, B2. Bjelke B3 har et massetap på 14 % på grunn av korrosjon, og bjelke B1 har et massetap på 20 %. Bruddmekanismene er like som i serie 1, hvor referansebjelken kollapser på grunn av betongknusing og en samhandling mellom bøyemoment og skjærpåvirkning, og de korroderte bjelkene på grunn av brudd i trådene i spenntauet [64, s. 2273]. Kapasiteten er redusert henholdsvis 55 % for bjelke B3 med 14 % massetap og 65 % for bjelke B4 med 20 % massetap. Sammenlignet med serie 1 er reduksjonen i kapasitet større, men serie 2 er mer duktil. Ettersom de to seriene har ulike betongfastheter kan dette være noe av forklaringen.

I den siste serien [64, s. 2276], markert med grønt, er det ganske stor forskjell på både korrosjonsnivået og kapasiteten. Bjelke B6 har kun 7 % massetap på grunn av korrosjon, mens bjelke B5 har 20 % massetap. Referansebjelken har samme bruddmekanisme som referansebjelkene i serie 1 og 2. Bjelke B5 gjennomgår samme type kollaps som de svært korroderte bjelkene i serie 1 og 2, nemlig brudd i trådene i spenntauet, og en reduksjon i kapasitet på 67 %. Bjelke B6 derimot, har kun et massetap på 7 % og kollapser som følge av både betongknusing og brudd i trådene i spenntauet. Denne bjelken følger omtrent samme

kapasitetsutvikling som referansebjelken og har en kapasitetsreduksjon på kun 5 %. Det er likevel verdt å legge merke til at etter å ha nådd maksimal belastning går bjelken plutselig til brudd. En av grunnene til at reduksjonen i kapasitet for de svært korroderte bjelkene i serie 2 og 3 er høyere enn i serie 1, kan være den høyere betongfastheten.

Videre i forsøk 4, tester Menoufy og Soudki [65] spennarmerte betongbjelker som blir utsatt for korrosjon, hvorav noen deretter blir reparert med CFRP. Det er her kun sett på bjelkene som ikke blir reparert. Bjelkene består av én referansebjelke, i tillegg til tre bjelker utsatt for korrosjon, med et massetapet på 2.5 %, 5 % og 10 %. Forsøket utføres med firepunkts bøyetest og Figur 40 **Feil! Fant ikke referansebildet.** viser bøyemoment-nedbøyningskurven for forsøk 4 [43, fig. 5b]. Ved massetap på 2.5 % og 5 % er kapasitetsreduksjonen henholdsvis 7 % og 10 %, sammenlignet med bjelke B6 med 7 % massetap i forsøk 3, som hadde en kapasitetsreduksjon på 5 %. Det må tas i betraktning at forsøk 4 har en betongfasthet på 26 MPa, mens bjelke B6 hadde en betongfasthet på 47.4 MPa, denne forskjellen kan være med på å forklare hvorfor lavere massetap førte til en høyere kapasitetsreduksjon. I motsetning til de andre omtalte forsøkene baserer forsøk 4 seg på kun et spenntau, når trådene ryker vil det dermed muligens gå fort fra maksimal belastning til brudd. Det er tydelig å se at lavere korrosjonsnivå gjør en høyere kapasitet og høyere duktilitet, mens det ved 10 % massetap gir en kapasitetsreduksjon på 34 % og betraktelig lavere duktilitet.



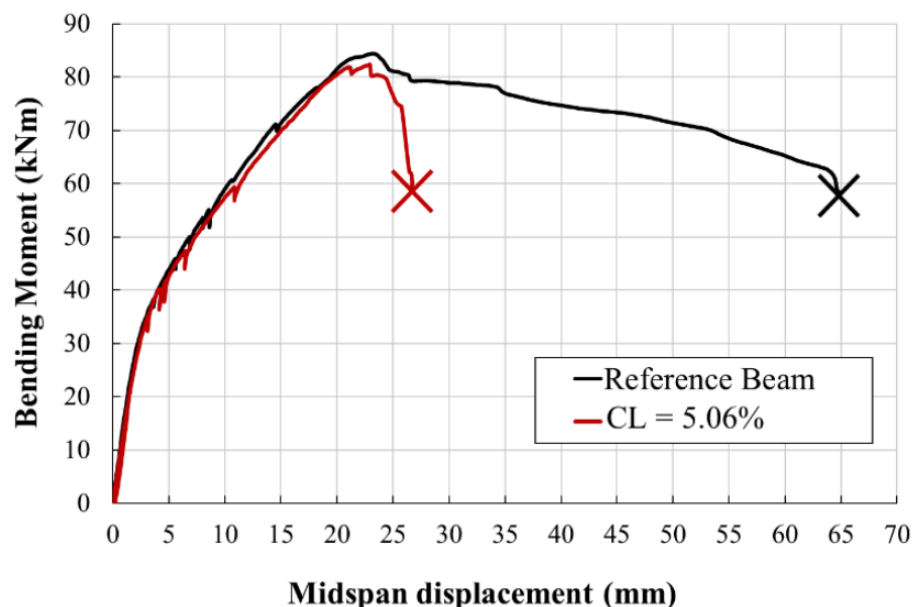
Figur 40: Bøyemoment-nedbøyningskurve for forsøk 4 [43, fig. 5b].

Forsøk 5, utført av ElBatanouny et al. [66], tester åtte bjelker under syklisk last. Testene ble utført på to ulike sett av spennarmerte bjelker. Sett 1 består av to bjelker med en betongfasthet på 29 MPa hvor armeringen var blitt utsatt for korrosjon opp til 4 % massetap på forhånd. Den

ene bjelken brukes deretter som referansebjelke. Den andre bjelken er korrodert på forhånd og blir forlastet opp til 80 % av nominell kapasitet for å danne riss, og deretter korrodert til et totalt massetap på 4.9 %. Sett 2 består av seks bjelker med en betongfasthet på 40.7 MPa, to av bjelkene brukes som referansebjelker, mens de fire siste blir forlastet opp til 60 % av nominell kapasitet og korrodert til et oppnådd massetap på mellom 6.3 % og 12.8 %. Bjelkene i det første settet ble forlastet til de hadde riss på 0.8 mm, i forhold til 0.4 mm for sett 2. Dette øker sannsynligheten for mer omfattende groptæring i sett 1, og er antakeligvis grunnen til bjelken i sett 1 hadde større reduksjon i kapasitet på tross av lavere korrosjonsnivå.

Det sjette forsøket, av Benenato et al. [43, s. 13], tar for seg to spennarmerte bjelker, hvorav den ene brukes som referansebjelke, mens den andre utsettes for akselerert korrosjon til et massetap på 5.06 % er oppnådd. Disse bjelkene har samme dimensjoner, armering og forspenningskraft som bjelkene i forsøk 3, og dermed kan disse sammenlignes direkte. Bøyemoment-nedbøyningskurven for forsøk 6, Figur 41, viser at den korroderte bjelken oppnår samme kapasitet som referansebjelken, men ikke innehar den samme duktiliteten. I likhet med flere av de andre forsøkene ser det ut til at referansebjelken gjennomgår et duktilt brudd, mens den korroderte bjelkens brudd kan klassifiseres som et sprøbrudd.

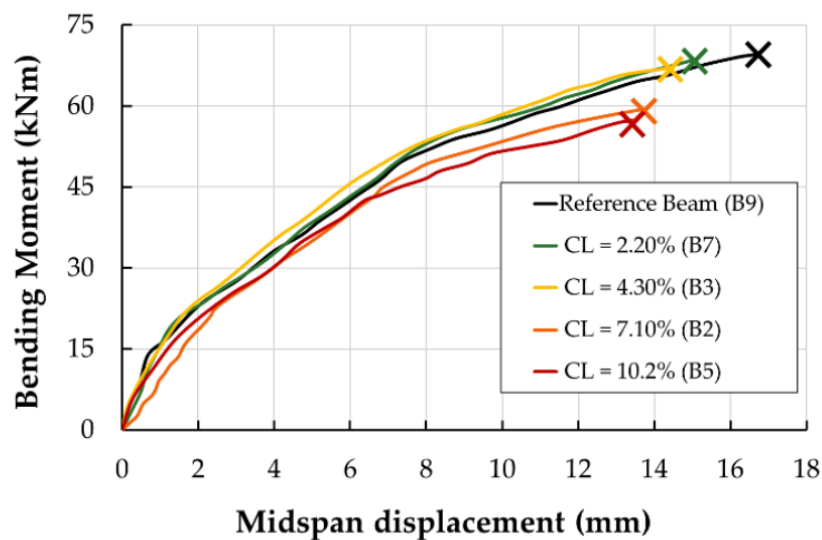
Forsøk 7, utført av Liu et al. [43, s. 15], testes fem spennarmerte bjelker. En av disse bjelkene



Figur 41: Bøyemoment-nedbøyningskurve for forsøk 6 [43, fig. 7a].

brukes som referansebjelke, og de gjenværende fem utsettes for korrosjon til et massetap på henholdsvis 2.2 %, 4.3 %, 7.1 % og 10.2 %. Også disse to forsøkene blir testet ved hjelp av firepunkts bøyetest. Se Figur 42 for bøyemoment-nedbøyningskurver for forsøk 7. I denne

grafen er det ikke et like tydelig forløp med lasting til kapasitet før et eventuelt plastisk platå og til slutt brudd, som for tidligere forsøk, eksempelvis forsøk 6, Figur 41. Det er heller ikke tilfelle for referansebjelkene. Kapasitetsmessig er det likevel forskjell på referansebjelken og de to bjelkene med høyest kapasitet, henholdsvis 7.10 % og 10.2 %. Disse bjelkene når ikke samme kapasitet, før de går til brudd. De har også en reduksjon i nedbøyning. Til sammenligning oppnår bjelkene med kun 2.2 % og 4.3 % korrosjon omtrent samme kapasitet som referansebjelken, men også her er det litt reduksjon i nedbøyning.



Figur 42: Bøymoment-nedbøyingskurve for forsøk 7 [43, fig. 9a].

7 Kapasitetsberegning av bjelker med korrodert spennarmering

Basert på forsøkene [43][63][64][65][66] beskrevet i kapittel 6.4 er det mulig å se at det er to variabler som gir to ulike hendelsesforløp for de korrosjonsutsatte bjelkene. Den første variabelen er kapasitetsutviklingen, her ser man tydelig at noen korrosjonsutsatte bjelker har tilnærmet samme kapasitet som referansebjelkene, mens andre har klart lavere kapasitet. Den andre variabelen er duktilitet, hvor duktiliteten til korrosjonsutsatte bjelker samsvarer med referansebjelkenes duktilitet, mens andre har vesentlig lavere duktilitet.

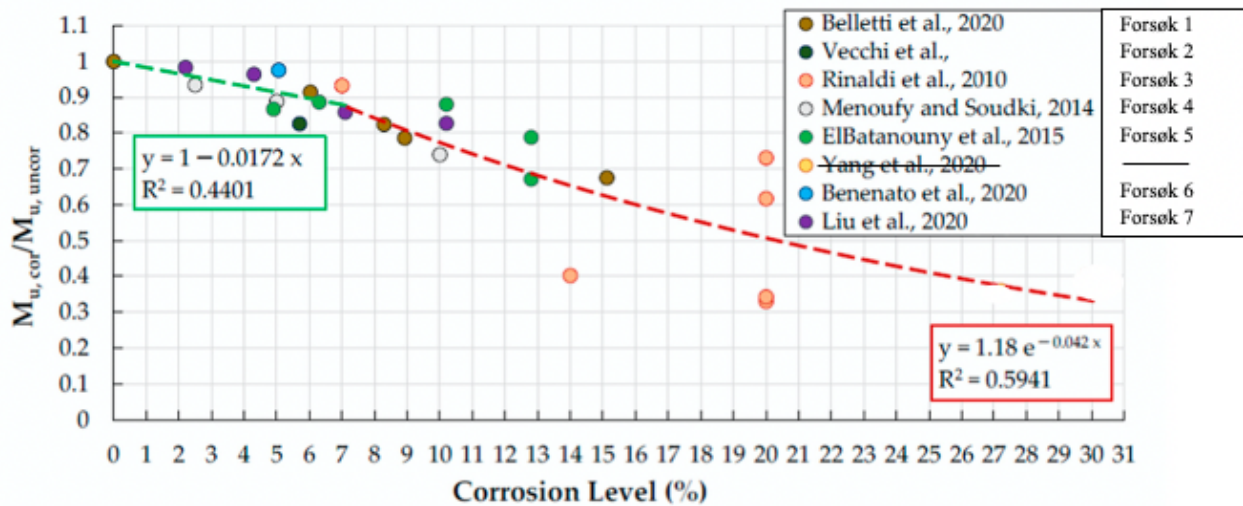
Det er i forsøkene i kapittel 6.4 kun registrert gjennomsnittlig korrosjon, og ikke forekomsten eller dybden på eventuelle groper. Det er derfor ikke mulig å si nøyaktig hvor mye groptæring påvirker momentkapasiteten og bruddmekanismene. For å gjøre en beregning av kapasiteten til spennarmerte bjelker ved økende korrosjon er det derfor videre i dette kapitlet foreslått en beregningsmodell som baserer seg på stegvis reduksjon av armeringstverrsnittet.

7.1 Tidligere arbeid

Figur 43 viser reduksjonen i momentkapasitet ved økende korrosjonsnivå for alle forsøkene, samlet i en graf. I [43] er det satt opp en ligning som kun er en kurvetilpasning for reduksjonen i momentkapasitet ved økende korrosjonsnivå. Kurvetilpasningen for massetap på grunn av korrosjon for 0-7 % er vist i formel $y = 1 - 0.0172 * x$ (7.1, og kurvetilpasningen for massetap på grunn av korrosjon for 7-30 % er vist i formel 7.2:

$$y = 1 - 0.0172 * x \quad (7.1)$$

$$y = 1.18 * e^{-0.042*x} \quad (7.2)$$

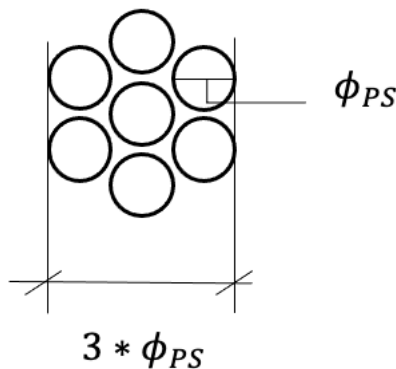


Figur 43: Tap av momentkapasitet ved økende korrosjonsnivå [43, fig. 11]

Denne ligningen er kun basert på en matematisk tilnærming av punktene uten å ta de fysiske egenskapene i betraktning. For å sikrere kunne si noe om hva som fysisk skjer ved korrosjon av spennarmering er det videre sett på en fysisk tilnærming til korroderende spennarmering.

7.2 Foreslått beregningsmodell for bjelker med korrodert spennarmering

Spennetau som er oppbygd av spiralslåtte tråder vil, som tidligere nevnt, korrodere på en annen måte enn en uniform armeringsstang. En tilnærming til prosessen er gjort ved hjelp av en stegvis reduksjon av armeringstverrsnittet. Det er tatt utgangspunkt i formel $\phi_{L, korrr} = \frac{\phi_L * (100 - \%vektttap)}{100} - 0.0376 * \%vektttap * \frac{1}{2} * \frac{\phi_L * (100 - \%vektttap)}{100}$ (5.7), definert i kapittel 5.1. Antar et spennetau bygd opp av seks tråder spiralslått rundt en syvende tråd, se Figur 44.

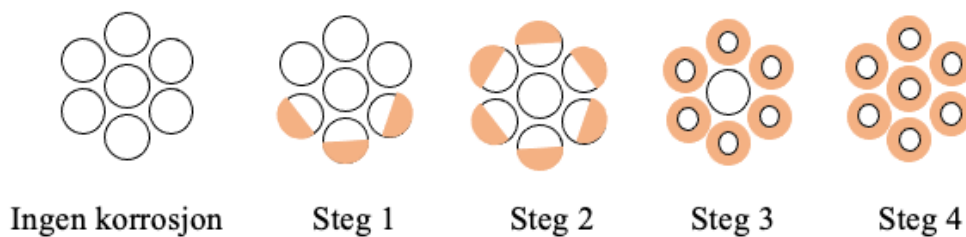


Figur 44: Tverrsnitt av spennetau

Ettersom spenntauet er bygd opp av flere tråder, reduseres diameteren av de individuelle spenetråder stegvis ettersom de blir mer korroderte. Reduksjon av diameteren til tverrsnittet av spenetråden kan dermed beskrives tilsvarende formel $\phi_{L_{korr}} = \frac{\phi_L * (100 - \%vektttap)}{100} - 0.0376 * \%vektttap * \frac{1}{2} * \frac{\phi_L * (100 - \%vektttap)}{100}$ (5.7), definert i kapittel 5.1:

$$\phi_{PS_{korr}} = \frac{\phi_{PS} * (100 - \%vektttap)}{100} - 0.0376 * \%vektttap * \frac{1}{2} * \frac{\phi_{PS} * (100 - \%vektttap)}{100} \quad (7.3)$$

Den stegvise tilnærmingen går i steg 1 ut ifra at trådene som ligger nærmest betongens overflate vil være de første til å bli utsatt for generell korrosjon og groptæring. I steg 2 vil alle de ytterste trådene være utsatt for korrosjon. Videre vil det i steg 3 både være korrosjon på innsiden og utsiden av de ytterste trådene, i tillegg til området mellom trådene. I siste steg, steg 4, er alle 7 tråder påvirket av korrosjon. Figur 45 viser den stegvis utviklingen.



Figur 45: Stegvis reduksjon av tverrsnitt på spenntau

Arealet av spenntauet blir dermed satt opp på denne måten, hvor ϕ_{PS} beskriver den originale diameteren av spenetråden og $\phi_{PS_{korr}}$ er den reduserte diameteren som følge av korrosjon:

Opprinnelig tverrsnitt:

$$A_p = \pi * \left(\frac{3 * \phi_{PS}}{2} \right)^2 \quad (7.4)$$



Steg 1:

$$A_{p_korr_1} = \pi * \left(\frac{\phi_{PS} + \phi_{PS} + \frac{\phi_{PS}}{2} + \frac{\phi_{PSkorr}}{2}}{2} \right)^2 \quad (7.5)$$



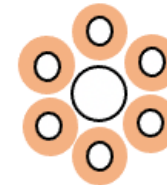
Steg 2:

$$A_{p_korr_2} = \pi * \left(\frac{\phi_{PS} + \frac{2 * \phi_{PS}}{2} + \frac{2 * \phi_{PSkorr}}{2}}{2} \right)^2 \quad (7.6)$$



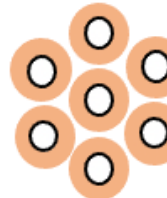
Steg 3:

$$A_{p_korr_3} = \pi * \left(\frac{\phi_{PS} + 2 * \phi_{PSkorr}}{2} \right)^2 \quad (7.7)$$



Steg 4:

$$A_{p_korr_4} = \pi * \left(\frac{3 * \phi_{PSkorr}}{2} \right)^2 \quad (7.8)$$

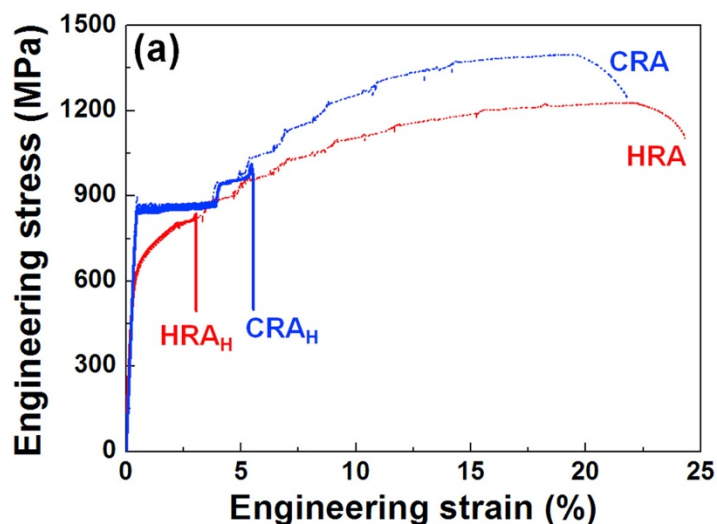


7.3 Duktilitet av spennarmering

Ved prosjektering er duktilitet en ønsket egenskap hos konstruksjoner, og det skal prosjekters for å hindre sprøbrudd [67, pkt. 5.10.1(5)P og (6)]. For spennarmerte konstruksjoner er det flere skademekanismer som kan føre til at duktiliteten reduseres. Om duktiliteten reduseres totalt vil man få sprøbrudd, noe som medfører er at det ikke er noen forvarsel før eventuell kollaps. Som nevnt er det to variabler som er fremtredende i forsøkene omtalt i kapittel 6.4: kapasitet og duktilitet. Årsakene til reduksjon i duktilitet for spennarmert betong er i hovedsak hydrogensprøing og groptæring, og ofte opptrer disse i sammenheng [22, s. 598].

I American Concrete Institute (ACI) komité 222s rapport «Corrosion of Prestressing Steels» fra 2001 [20, s. 7-8] blir det å skille mellom ulike skadeårsaker, hovedsakelig groptæring og HISCC, ansett som et lite utbredt problem. Videre konkluderes det med at HISCC er i mindretall, sammenlignet med groptæring, når det gjelder kollapsårsaker. Derimot tilskriver The International Federation for Structural Concrete (*fib*) [68, s. 3] HISCC som hovedårsaken til brudd på spennarmering i konstruksjoner, i den tekniske rapporten «Influence of material and processing of stress corrosion cracking of prestressing steel – case studies» fra 2003. Det kan være flere forklaringer for at de kommer frem til delvis ulike konklusjoner, men både ACI og *fib* anser både groptæring og HISCC som problematiske for spennarmerte konstruksjoner.

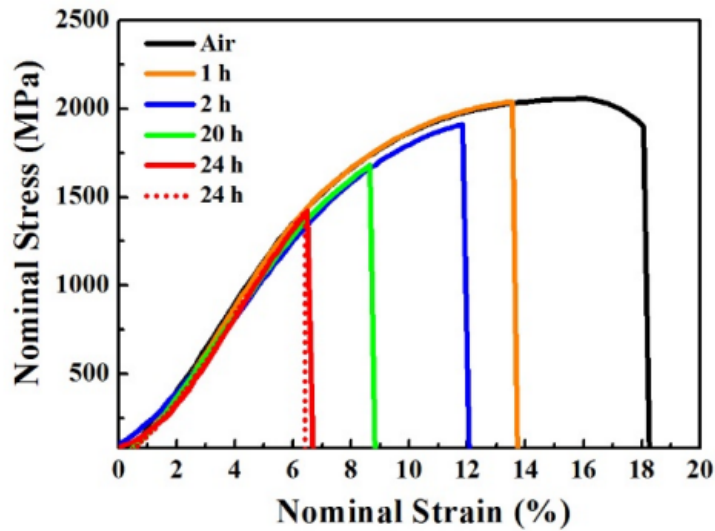
Stål ladet med hydrogen (engelsk: charged with hydrogen) har blitt testet i ulike forsøk for å undersøke duktilitet og styrke. I Figur 46 [69], vises spenning-tøyningskurven for referansestål og stål ladet med hydrogen. De blå kurvene viser kaldvalset herdet stål og de røde kurvene viser varmvalset herdet stål. Referanseprøvene er merket CRA (kaldvalset herdet stål) og HRA (varmvalset herdet stål), de hydrogenladede prøvene er merket CRA_H og HRA_H. Grafen viser at det er en klar reduksjon i duktilitet når hydrogen introduseres. Stålet ladet med hydrogen oppnår omtrent 70-80 % av kapasiteten til referansestålet, mens duktiliteten er tilnærmet borte, særlig for varmvalset stål.



Figur 46: Spenning-tøyningskurver for ladet og uladet stål [69]

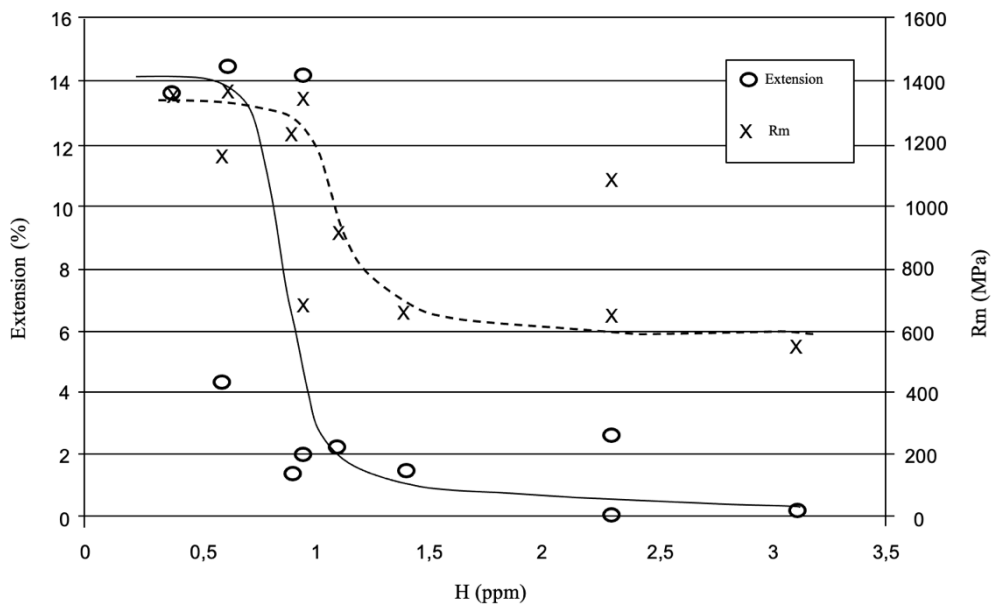
Videre har Jia et al [70], testet stål ladet hydrogen ved økende tid og dermed økende mengde hydrogen. Figur 47 viser den nominelle spenning-tøyningskurven for referansestål og stålet ladet med hydrogen. Stålet som brukes er kalt «hot-stamped steel», en type høyfast stål. Stålet

som ikke er ladet med hydrogen, og som fungerer som en referanseprøve, er markert i svart. De resterende kurvene viser stålet som er ladet med hydrogen over ulike mengde tid. Ut ifra grafen kan man tydelig se at stålet som har vært eksponert for hydrogen over lengst tid har hatt størst reduksjon i både kapasitet og duktilitet. Over 30 % av kapasiteten er tapt, og bruddet oppstår plutselig, noe som kan tyde på at det er et sprøbrudd.



Figur 47: Nominell spenning-tøyningskurve for stål ladet med hydrogen [70]

Figur 48 [71] oppsummerer disse effektene og viser tydelig at ved økende hydrogeninnhold reduseres duktiliteten. Fra 0.6-0.7 ppm hydrogen til 1 ppm hydrogen er det en kraftig reduksjon i duktiliteten. Ved 1 ppm hydrogen er materialet blitt helt sprøtt. Også styrken reduseres plutselig, men ikke like kraftig som duktiliteten, da det fremdeles er litt kapasitet igjen.



Figur 48: Styrke og duktilitet ved ulike mengder hydrogen [71]

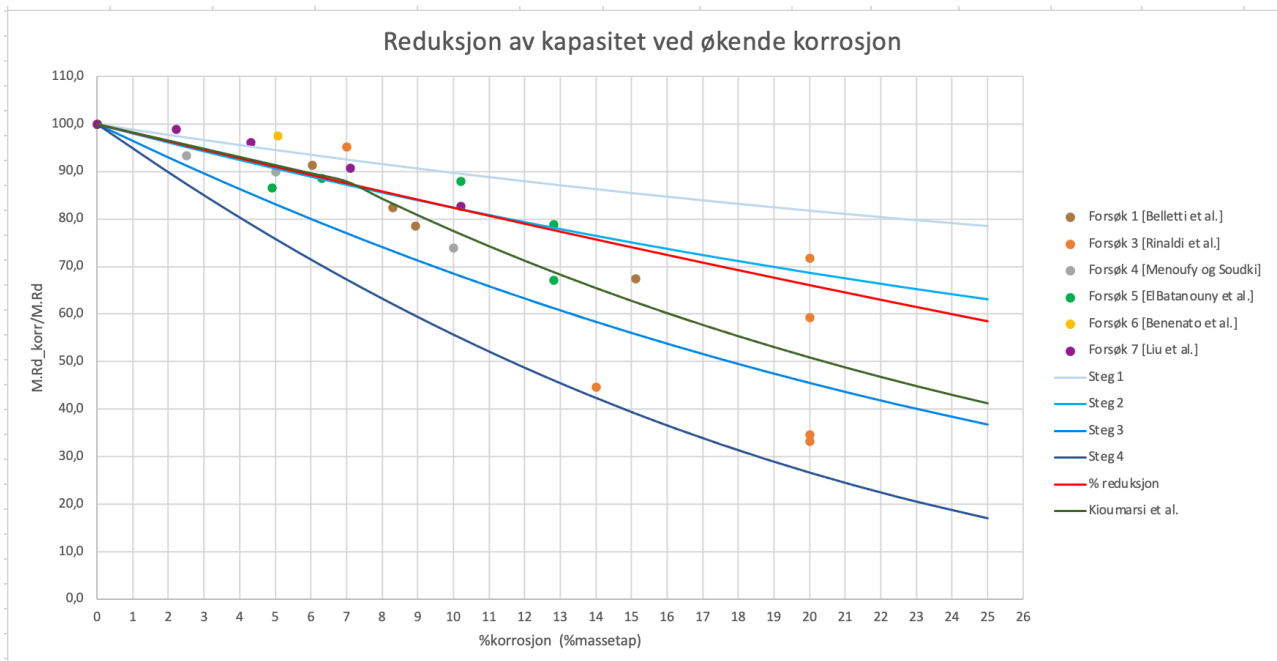
Ved å analysere resultatene fra disse grafene, og se de i sammenheng med grafene fra forsøkene beskrevet i kapittel 6.4, er det klart at hydrogen fører til en kraftig reduksjon i duktilitet. Dette kan føre til at konstruksjonen kollapse ved sprøbrudd, uten noen form for forvarsel før bruddet plutselig inntreffer.

Spennetau som er bygd opp av flere tråder kan også oppleve sprøbrudd på grunn av groptæring [72, s. 27]. Groptæring bidrar til at trådene mister kapasiteten og ryker, og siden spenntråder har såpass mye mindre diameter sammenlignet med vanlig armeringsjern kan groptæring gjøre at trådene kan oppleve brudd relativt fort. På grunn av oppspenningen er trådene konstant påført last, og om noen av trådene opplever brudd vil den gjenværende kapasiteten overstiges [22, s. 595].

7.4 Beregningsmodell for korrodert spennarmering

I Figur 49 er data fra de forsøkene utført på spennarmerte bjelker, som beskrevet i kapittel 6.4, satt inn. Den grønne linja representerer formel $y = 1 - 0.0172 * x$ (7.1) og $y = 1.18 * e^{-0.042 * x}$ (7.2) på samme måte som i Figur 43, fra [43], og den røde linja representerer prosentvis reduksjon av armering, uten å ta høyde for groptæring. De fire ulike stegene basert

på beregningsmodellen i kapittel 7.2 representeres av de blå linjene. Se vedlegg D1 og D2 for hele utregningen.



Figur 49: Reduksjon av kapasitet ved økende korrosjon, med ulike tilnæringer

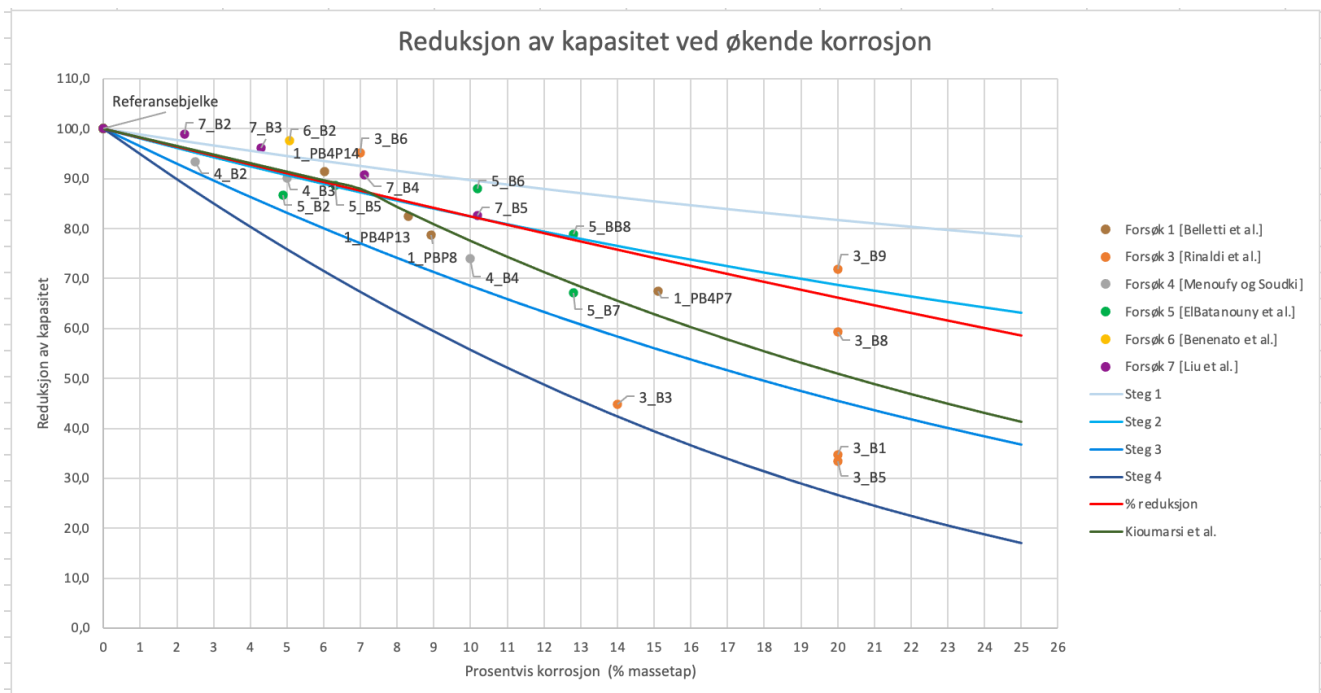
Momentkapasitet basert kun på prosentvis reduksjonen av armeringsjern (rød) gir en kapasitet som er altfor høy ved økende massetap, sammenlignet med testresultater. Spesielt ved massetap over 8 % er det tydelig at estimatet er for høyt. Den grønne kurven, som baserer seg på kurvetilpasningen fra Kioumarsji et al. [43], korrigeres ved 7 % og gir dermed et bedre estimat, men også her blir kapasiteten overvurdert, i forhold til de laveste testresultatene.

Den stegvise tilnærmingen til reduksjon av kapasitet ved økende massetap gir fire ulike kurver (blå), som vist på figuren. Hensikten med tilnærmingen er å estimere kapasiteten ved økende reduksjon av armeringstverrsnittet. Det første steget, som tar hensyn til korrosjon på yttersiden av halvparten av de ytre trådene gir fort et for høyt estimat. Dette steget kan dermed bare antas å være gjeldende frem til 4 % korrosjon. Steg 2 baserer seg på at de fleste av de ytre trådene har fått korrosjonsskader, og gir en rimelig kapasitet til rundt 8 %. For å beregne kapasiteten fra korrosjonsnivå på over 8 %, er steg 3 den beste tilnærmingen. Dette steget antar at alle de ytre trådene har store korrosjonsskader, i tillegg til at korrosjonsprodukter finnes i området mellom trådene.

I hvilke situasjoner steg 4 er den beste tilnærmingen er mer usikkert. Etter hvert som korrosjonsnivået øker kan det for samme korrosjonsnivå være svært ulik gjenværende

kapasiteten. Ved 14 % korrosjon er det eksempelvis en bjelke som har mistet over halvparten av kapasiteten, mens det ved 15 % korrosjon er en annen bjelke som fremdeles innehar nesten 70 % av kapasiteten. Det samme fenomenet kan sees for fire bjelker med 20 % korrosjon: én bjelke har 70 % resterende kapasitet, en annen har 60 % kapasitet, mens de to siste begge kun har 35 % gjenværende kapasitet.

Steg 4 tar utgangspunkt i at alle 7 tråder er sterkt påvirket av korrosjon. Dette vil være gjeldene for en del av bjelkene, eksempelvis bjelke 3_B3, 3_B1 og 3_B5, som har sterkt redusert kapasitet ved høye korrosjonsnivåer. Se Figur 50 for nummerering av bjelker. Bjelke 1_PB4P7, 3_B9 og 3_B8 har derimot like høye korrosjonsnivåer, men ikke på langt nær like redusert kapasitet. Bakgrunnen for denne variasjonen har sannsynligvis en sammenheng med groptæring. For bjelkene 1_PB4P7, 3_B9 og 3_B8 kan man antas at korrosjonen er jevnere, uten store forekomster av groper. Dermed er spenntrådene intakt, og resultatene liggere nærmere opp mot kurven som beskriver prosentvis korrosjon. For bjelkene 3_B3, 3_B1 og 3_B5 vil nok forekomsten av groper være høyere. Disse ligger helt klart tettere opp mot den mørkeblå linja, som beskriver steg 4. Dette tyder på at alle trådene er utsatt for korrosjon og groptæring. Uten ytterligere informasjon om mengde og størrelse av groper, kan steg 4 anses som en nedre grense for bjelkenes kapasitet.



Figur 50: Reduksjon av kapasitet ved økende korrosjon, inkludert nummererte bjelker

Et annet interessant aspekt ved resultatene for forsøkene er variasjonen i duktilitet. I de fleste forsøkene kan man se at det er en reduksjon i duktilitet etter hvert som korrosjonsnivåene øker, dette kan komme av at spenntråder ryker ved høyt korrosjonsnivå på grunn av groptæring. Om en tråd ryker vil kapasiteten reduseres hurtig, og dette vil føre til at duktiliteten reduseres. Ved lavere korrosjonsnivåer er det også observert redusert duktilitet, forsøk 6 er et godt eksempel på dette, se Figur 41. Her er korrosjonsnivået på 5.06 %, men duktiliteten er drastisk redusert sammenlignet med referansebjelken. En mulig forklaring på dette fenomenet kan være hydrogenindusert spenningskorrosjon (HISCC), som forklart i kapittel 7.3. Kapasitetsutviklingen for referansebjelken og den korroderte bjelken er relativt lik, men så gjennomgår referansebjelken et seigt brudd mens den korroderte bjelken har et sprøtt brudd. Som tidligere nevnt kan hydrogen trenge inn i stålet allerede ved begynnende korrosjon, og resultere i sprøbrudd.

8 Hafrsfjord Bru

Hafrsfjord bru er bygget i 1967 og har i dag en restlevetid på 46 år. Likevel skal brua uavhengig av tilstand erstattes av ei ny bru for å oppfylle krav til ny transportkorridor med 4-felts vei. I 2000 ble det gjort omfattende tiltak for at Hafrsfjord bru skulle tilfredsstillere kravene til bruksklasse BK10/50. Bruas bæreevne ble blant annet forsterket ved hjelp av ekstern oppspenning, noe som skulle sikre brua en restlevetid på 20-30 år. Årsaken til at denne forsterkningen var nødvendig var synlige korrosjonsskader på spennarmering. Den eksterne forspenningen har en kapasitet som tilsvarer det nederste armeringslaget med spenntau, som var totalskadd av korrosjon [9, s. 3].

Kapasitetsberegningene som er gjort videre i oppgaven, er i all hovedsak basert på tilstanden før den eksterne forspenningen som ble satt opp i 2000. Målet med beregningene er å gjøre en vurdering av hvor mye kapasiteten reduseres grunnet korrosjon. Av denne grunn er beregningene som er gjort på brua i original, uskadd stand hentet fra en tidligere masteroppgave [73]. Disse beregningene blir brukt som sammenligningsgrunnlag for videre beregninger på korrosjonsskadet tverrsnitt.



Figur 51: Oversiktsbilde av Hafrsfjord bru [32]

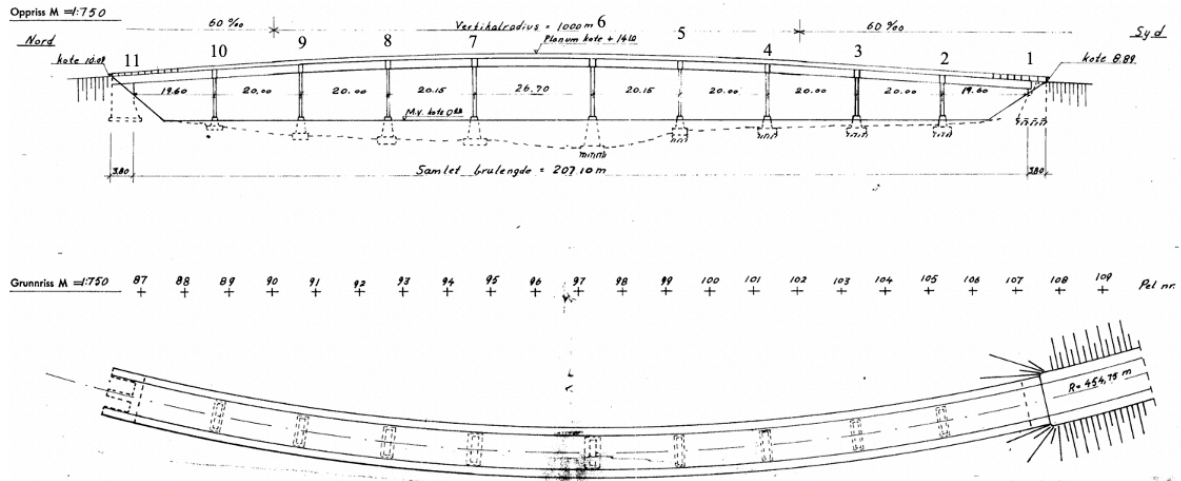
8.1 Tilgjengelig litteratur

Informasjon om Hafrsfjord bru er i stor grad basert på tilgjengelig informasjon fra Brutus. Gjennom Brutus har rapporten skrevet i forbindelse med spesialinspeksjon utført i 2014 vært tilgjengelig. Denne spesialinspeksjonen hadde som hovedmål å kartlegge tilstanden til brua, fortrinnsvis restlevetiden til brua, i forbindelse med utbygging av ny 4-felts vei. Eventuelle rapporter fra tidligere spesialinspeksjoner har ikke vært tilgjengelige utover korte sammendrag som er gitt i rapporten fra 2014. Inspeksjonsrapporten som ligger tilgjengelig i Brutus inneholder informasjon registrert ved tidligere enkelinspeksjoner og hovedinspeksjoner, og består av registrering av ulike skader, i form av bilder, beskrivelser og klassifisering av skadegrad og skadekonsekvens.

Kapasitetsberegningene som er gjort på Hafrsfjord bru er basert på beregninger utført i en tidligere masteroppgave fra NTNU, skrevet i 2018 [73]. Eventuelle antakelser som er gjort her er videreført. Lastene som virker på brua og bruas opprinnelige kapasitet tar utgangspunkt i beregninger fra [73]. Det ble i nevnte oppgaven beregnet original kapasitet, reduksjon i kapasitet om nederste spenntaulag neglisjeres og reduksjon i kapasitet om armeringstverrsnittet til all spennarmering prosentvis reduseres.

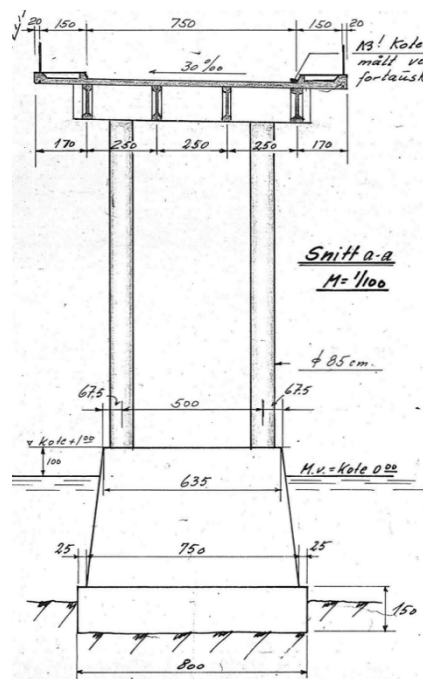
8.2 Beskrivelse av brua

Hafrsfjord bru er ei bjelkebru beliggende på Riksveg 509, mellom Stavanger og Sola kommune. Brua ble bygget i 1967, og krysser innløpet til Hafrsfjord. Brua er bygget opp av prefabrikkerte spennarmerte betongbjelker og plass-støpt brudekke. Lengden på brua er 207 meter og den består av 10 spenn, hvor det midterste spennet er 26.7 meter, og resterende spenn er omtrent 20 meter, se Figur 52. I dag har brua to kjørebane, med føringsbredde på 7.5 meter, og ensidig gangbane på 2.2 meter. Brua er dimensjonert etter lastklasse 1/1958, og klassifisert til BK 10/50. Klimaet brua ligger i regnes som værhardt kyststrøk [32] [9].

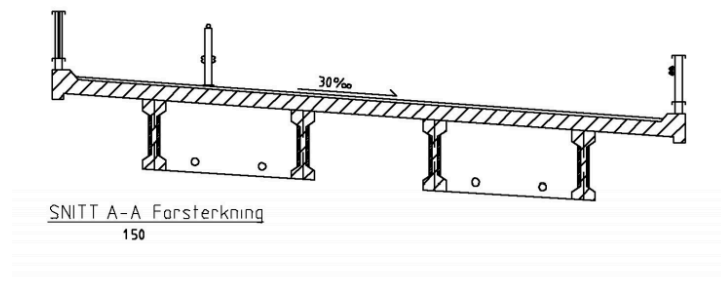


Figur 52: Oversiktsbilde av spenn

Originalt ble brua bygget med to kjørebane og opphøyd fortau på hver side, se Figur 53. Vinteren 1999-2000 ble brua ombygd, og det ble etablert ensidig gangbane, som vist på Figur 54. I 2000 ble brua, som tidligere nevnt, forsterket med ekstern etteroppspanning for å sikre tilstrekkelig bæreevne de kommende 20-30 år, grunnet korrosjonsskader på nederste spennetaulag i bjelkene [9].

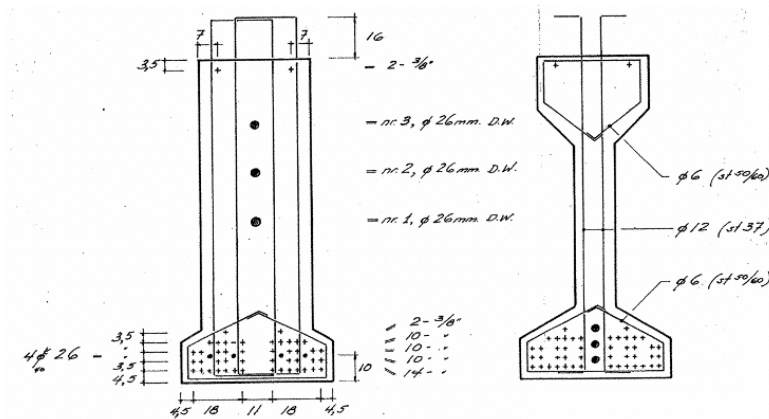


Figur 53: Tverrsnitt av hovedspenn



Figur 54: Dagens tverrsnitt av hovedspenn

Brudekket på 220 mm bæres av fire 1200 mm betongbjelker, tilsvarende NIB-bjelker, med både førroppsant og etterroppsant armering. Betongbjelkene er produsert av A/S Strombull Spennbetong. Avhengig av spennvidde er det brukt tre ulike typer bjelker. Type 1 er benyttet for hovedspennet i akse 6-7, for endespennene i akse 1-2 og 10-11 er type 2 benyttet og for resterende spenn er type 3 benyttet. Se Figur 55 for tverrsnitt og armering av type 1. Bjelkene har både slakkarmering og spennarmering. Type 1 er armert med slakkarmering, 46 forspente spenntau med dimensjon Ø3/8" og 3 etterroppsante kabler med dimensjon Ø26mm.



Figur 55: Tverrsnitt av bjelker i hovedspenn

8.3 Inspeksjon

Det har jevnlig blitt utført inspeksjoner på Hafrsfjord bru. I 2014 utførte Aas-Jakobsen, på vegne av Statens Vegvesen, en spesialinspeksjon for å undersøke bruas tilstand med tanke på restlevetid, i forbindelse med planlegging av ny 4-felts vei. Funnene fra denne inspeksjonen blir gjennomgått, samt tilgjengelig informasjon fra tidligere inspeksjoner. Kloridmålinger fra 2014 blir også vurdert. I hovedsak blir det fokusert på korrosjonsskader, da dette er av størst relevans for videre arbeid med Hafrsfjord bru i oppgaven.

8.3.1 Spesialinspeksjon 2014

Hovedfunnene fra spesialinspeksjonen i 2014 er [9, s. 11]:

- Reparasjoner som ble gjennomført i 2000 har fungert bra
- Det blir registrert flere bområder. Bområdene er størst inn mot landkar, men det registreres bområder av varierende størrelse i alle spenn.
- Korrosjonsavskallinger på nedre flens på vestre bjelke i hovedspenn. Enkelte bøylor er korrodert av, i tillegg til korrosjon på nederste lag av spenntau. Dette var årsaken til at brua ble forsterket med ekstern etteroppspanning i 2000. Den eksterne oppspanningen har fungert bra, og korrosjonsskadene truer dermed ikke bæreevnen.
- 5-10 korrosjonsavskallinger er også registrert på hvert spenn av brua, fordelt på brudekke, tverrbærere og bjelker.
- Det er i tillegg registrert litt korrosjonsavskallinger på søyler i akse 3 og akse 5. Søylen har generelt god betongoverdekning, og dermed mindre skader.
- Asfaltfuger har en del oppsprekking, og har dermed løpende vedlikeholdsbehov.
- Rekkverket har en del skader knyttet til overflatebehandling, i tillegg til noen sikkerhetstiltak som bør monteres eller utbedres.
- Det er utført både klorid- og karboniseringsmålinger. Karboniseringsdybder er neglisjerbare. Kloridmålingene viser at påført overflatebehandling har hatt god kloridbremsende effekt. I overflatesjiktet på nye betongkonstruksjonsdeler er det registrert høyt kloridinnhold. For betong som er ubehandlet, eksempelvis søyler, vil kloridinntrengningen fortsette om ikke tiltak utføres.

Ingen av skadene trenger tiltak umiddelbart. Skadene som ble anbefalt vedlikeholdt og tilhørende skadegrad er oppsummert i Tabell 9.

Tabell 9: Skader med behov for tiltak etter spesialinspeksjon 2014

Vedlikeholdsbehov	Skadegrad	Utbedres innen
Utbedring av betongskader på grunn av armeringskorrosjon (fare for nedfall)	3	3 år
Løpende vedlikehold på asfaltfuger	3	3 år
Utbedring av feil og mangler på rekkverket knyttet til trafiksikkerhet	3	3 år
Utbedring av overflatebehandling på rekkverket	2	10 år

Hovedproblemet for bjelkene er lite betongoverdekning, noe som er vanlig på denne typen prefabrikkerte bjelker [9, s. 13]. Den minimale betongoverdekningen i kombinasjon med eventuelle lokale svakheter i overdekningssonen og værhardt kystklima har ført til kloridinntrengning som har ført til store korrosjonsskader på brubjelkene. Det er likevel hovedsakelig det ytterste laget av armering som er preget av korrosjon, lagene lenger inne som har hatt tilstrekkelig overdekning er fortsatt godt beskyttet mot korrosjon. Den største korrosjonsskaden på brubjelkene er registrert i hovedspennet, se Figur 56.



Figur 56: Korrosjon på nederste spenntaulag på vestre bjelke i hovedspenn [9, s.11]



Figur 57: Korrosjon på nederste spenntaulag i akse 2 [9, s. 11]



Figur 58: Korrosjon på bjelke inn mot landkar, Akse 11 [9, Vedlegg 3 s. 13]

Det ble i forbindelse med inspeksjonen også utført kloridmålinger. 11 kloridprofiler ble tatt ut fra ulike lokasjoner på bjelkene. Se Tabell 10 for lokalisering. Od står for overdekning og Kd står for karbonatiseringsdybde.

Tabell 10: Kloridmålinger på brubjelker i 2014 [9, tabell 3.4]

Nr	Od (mm)	Kd (mm)	Lokalisering	Merknad
CP 12	25	1	A11 Bj 2 fra vest, sidekant nedre flens	Korrosjonsskade
CP 13	60	1	A11 Bj 1 fra øst, utside steg	Sprøytemørtel uten skader
CP 22	20	1	Bj A6-A7 Vest, UK nedre flens	Korrosjonsskade
CP 23	50	1	A8 +3m Bj 2 fra vest, sidekant nedre flens	Ingen skader
CP 24	55	1	A8 +3m Ny tverrbærer, steg	Ingen skader
CP 25			A11 Bj 1 fra øst, innside steg	Sprøytemørtel uten skader
CP 26			A11 Bj 1 fra vest, innside steg	Sprøytemørtel uten skader
CP 27			A11 Bj 1 fra vest, utside steg	Sprøytemørtel uten skader
CP 29			A1 Bj 1 fra vest, utside steg	Sprøytemørtel uten skader
CP 30			A1 Bj 1 fra vest, innside steg	Sprøytemørtel uten skader
CP 31			A1 Bj 1 fra vest, innside sidekant nedre flens	Ingen skader

Kritiske grenser for kloridinnhold er vist i Tabell 11 og målte kloridverdier er vist i Tabell 12 og Tabell 13.

Tabell 11: Kritiske grenser for kloridinnhold [9, s. 8]

Kritisk kloridgrense i % av betongvekt:		
0.07 % - 0.17 %	Cl av betongvekt:	Mulig korrosjon
0.17 % - 0.33 %	Cl av betongvekt:	Sannsynlig korrosjon
0.33 % →	Cl av betongvekt:	Sikker korrosjon

Tabell 12: Målte kloridverdier [9, tabell 3.5 og 3.6]

	Innboret [mm]	Akse 1			Akse 6	Akse 8 + 3m	
Lokasjon		Bj mot vest uts steg**	Bj mot vest inns steg**	Bj mot vest inns flens	Bj vest*	Bj 2 fra vest flens	Ny tverrbærer
Le/Lo/UK		Lo	Le	Le	UK	Le	Le
Prøvenr.		CP 29	CP 30	CP 31	CP 22	CP 23	CP 24
	0-25	0.006	0.003	0.102	0.119	0.129	0.076
	25-50	0.032	0.058	0.070	0.073	0.044	0.004
	50-75	0.010	0.070	0.008	0.002		0.004

* = Korrosjonsskade med avskalling

** = Prøve tatt i sprøytemørtel for oppbygging av overdekning (0.25, 25-50)

Tabell 13: Målte kloridverdier [9, tabell 3.7]

	Innboret [mm]	Akse 11				
Lokasjon		Bj 2 fra vest*	Bj mot øst uts steg**	Bj mot øst inns steg**	Bj mot vest inns steg**	Bj mot vest uts steg
Le/Lo/UK		Le	Lo	Le	Le	Lo
Prøvenr.		CP 12	CP 13	CP 25	CP 26	CP 27
	0-25	0.110	0.003	0.010	0.132	0.036
	25-50	0.082	0.002	0.007	0.125	0.010
	50-75	0.021	0.022	0.040	0.031	0.001

* = Korrosjonsskade med avskalling

** = Prøve tatt i sprøytemørtel for oppbygging av overdekning (0.25, 25-50). Prøven er tatt nær bjelkeendene og sprøytemørtelens tykkelse kan her være meget tynn i og med at den fases ut mot «null»

Målingene av størst interesse er kloridmålingene som er gjort på akse 6 (hovedspennet). I Tabell 14 viser måling av kloridinnhold i både 1995 og 2014. Begge målingen er gjort i nærheten av korrosjonsskaden, men prøven fra 1995 er kun tatt i ytterste sjikt. Målingen fra 1995 viser 0.092 %, sammenlignet med 0.199 % fra 2014. Såpass like verdier kan også skyldes årsaker som for eksempel variasjon i betongkvalitet [9, s. 13]. Overdekningen ble målt til 22 mm og karboniseringsdybden til 1 mm. Karboniseringsdybden er såpass liten at den neglisjeres.

Tabell 14: Kloridmålinger i hovedspenn i 2014 og 1995 [9, Vedlegg 4, Kloridprofil CP 22]

Innboret [mm]	Akse 11			
	Dybde [mm]	Avlest mV	% Cl 2014 Bet.vekt	% Cl 1995 Bet.vekt
0-25	12.50	30.3	0.119	0.092
25-50	37.5	42.3	0.073	
50-75	62.5	107	0.002	

Det er også utført målinger i sidekanten på nedre flens på NIB-bjelker i opprinnelig betong. Altså hvor det er påført overflatebehandling, men ikke registrert skader eller utført omfattende reparasjoner, henholdsvis kloridmålinger CP 12, CP 23 og CP 31. Disse målingene viser at det er kloridinnhold av moderat størrelse i ytterste sjikt, men at det avtar raskt innover. Samme tendens ble sett i 1995. Det interessant er derimot at det kloridinnholdet i overflatesjiktet (0-25 mm) er litt lavere i 2014, samt at kloridinnholdet i neste sjikt (25-50 mm) er litt høyere, sammenlignet med målinger utført i 1995. Dette tyder på at overflatebehandlingen har bremsset effekten av kloridinntrengningen, og at kloridene jevner seg ut i betongen.

8.3.2 Tidligere inspeksjoner

Brua har blitt inspisert i jevne intervaller, og i Brutus er det dokumentasjon i form av bilder og korte beskrivelser tilbake til 1993. Utfyllende informasjon om tidligere inspeksjoner er hentet fra rapporten fra spesialinspeksjonen i 2014 [9, s. 3]. Av interesse er spesielt inspeksjonene utført rundt år 2000, for å se på utviklingen av korrosjonsskadene.

Det ble i 1995 utført en spesialinspeksjon på brua. Da var hovedfunnene at det begynte å bli omfattende korrosjonsskader på brubjelkene. Synlige skader i form av korroderende armering, rustutslag og avskalling ble registrert, hovedsakelig i forbindelse med skjærbøyler med liten overdekning og spennarmering i lokale områder med dårlig betong. Det var også tegn til le/lo-effekt, hvor det på le-siden registreres 2-3 ganger høyere kloridinnhold. Likevel avtar kloridinnholdet raskt innover, og inne ved armeringen er det under kritisk grense. Det ble anbefalt å utføre mekaniske reparasjoner og overflate behandling, samt utføre reparasjoner fremover for å sikre bruas bæreevne i minimum de neste 20-30 år.

Ved ny inspeksjon i 1998 var inntrykket at omfanget av korrosjon hadde økt, både i form av korroderende armering, men også rustutsalg og avskallinger på bjelker. Det ble funnet korroderende armering og avskallinger enkelte steder i underkant av brudekke og omfattende korroderende armering og avskallinger på en søyle. Denne søylen ble i 2000 byttet ut. Det ble også utført kloridmålinger som viste at kloridinnholdet var 2-3 ganger over kritisk grense i ytterste sjikt, og relativt høyt også i neste sjikt.

I 2000 ble det utført flere reparasjoner på Hafrsfjord bru, hvor målet var å sikre bruas bæreevne i ytterligere 20-30 år. Bakgrunnen for dette var i stor grad korroderende spennarmering på brubjelkene, hvor omtrent halvparten av det nederste spenntaulaget var korrodert bort, se Figur 59. I Figur 60 kan man se spenntråder som har røket på grunn av omfattende korrosjon på spenntau. For å sikre bæreevnen ble det etablert ekstern etteroppspanning med tilsvarende kapasitet som nederste spenntaulag.



Figur 59: Korrosjon på nederste spenntaulag og bøylearmering [18, 6/9 2001]



Figur 60: Spenntråder har røket på grunn av korrosjon på spenntau [18, 6/9 2001]

8.4 Dimensjoneringsgrunnlag

Det blir i oppgaven sett nærmere på bruas hovedspenn, da dette anses som det mest kritiske spennet. I likhet med [73] blir det antatt at lastene fordeler seg likt på de fire brubjelkene. Lastene som beregnes er egenlast, omlagringsmoment, trafikklast og temperaturlast. Ettersom det er bruas hovedspenn som beregnes, er det bjelker av type 1 som blir studert nærmere.

8.4.1 Betong

Prosjektet betongkvalitet er B300 for både bjelkene og brudekket. Dette tilsvarer i dag fasthetsklassen C25 [9, s. 10]. Dagens verdi av konstruksjonsfasthet for trykk og materialfaktorer er hentet fra Statens Vegvesens Håndbok R412 [74, tabell 4.2-1 + tabell 4.2-2], resterende verdier er hentet fra NS3473 [75, tabell 5.c]. Se tabellen under for betongens materialelegenskaper.

Tabell 15: Materialegenskaper for betongfasthet B20

Betong B20		
Karakteristisk terningfasthet	f_{ck}	25 MPa
Konstruksjonsfasthet for trykk	f_{cn}	16,8 Mpa
Maksimaltøyning	ϵ_{cu}	0.0035
Elastisitetsmodul for betong	E_{cm}	25 Gpa
Materialfaktor for armert betong i bruddgrensetilstand	γ_m	1.4

Den dimensjonerende trykkfastheten er:

$$f_{cd} = \frac{f_{cn}}{\gamma_m} \quad (8.1)$$

$$f_{cd} = \frac{16.8 \text{ MPa}}{1.4} = 12 \text{ MPa} \quad (8.2)$$

Overdekningen som er brukt for de ulike konstruksjonsdelene varierer. Overdekningen i underkant på brubjelkene varier mellom 20 og 30 mm [9, s. 10]. For brudekket er overdekningen i underkant 25 mm [9, s. 16] og i overkant 40 mm.

8.4.2 Armering

Brubjelkene av type 1 er armert med slakkarmering, 46 førroppsente tau (Ø3/8") og etterroppsente kabler (Ø26 mm). Brudekket er slakkarmert i over- og underkant, med armeringsjern med diameter 12 mm og senteravstand 200mm. I tillegg til dette er brudekket ytterligere forsterket i overkant over støtte, med et lag armeringsjern med diameter 16 mm og senteravstand 200 mm.

Brutegninger med detaljert armering i tverrbærer fra hovedspenn har ikke vært tilgjengelig. Følgelig er tegninger med detaljert armering fra tverrbærer i endespenn blitt brukt, i likhet med [73]. På disse tegningene er det oppgitt bruk av både kamstål, Ks 40, og glattstål, St. 00. Se Vedlegg B. Fastheten til armering av armeringskvalitet St. 00 er ikke oppgitt i Håndbok R412 [74, tabell 4.2-3], men det står opplyst at om brua er bygd etter 1958 og har ukjent armeringskvalitet skal Ks 40 benyttes. Av denne grunn regnes det at all slakkarmering har armeringskvalitet Ks 40. Ks 40 har karakteristisk fasthet $f_{sk}=400$ MPa.

Det har ikke vært mulig å oppdrive hvilken stålqualität spennarmeringen har. Av denne grunn benyttes samme antakelse som i [73, s. 45], altså $f_{pd} = 1650$ MPa. I videre beregninger brukes $f_{p0.1k} = 1500$ MPa. Tabell 16 oppsummerer materialegenskapene for armeringen.

Tabell 16: Materialegenskaper for armering

Armering		
Slakkarmering Ks 40		
Karakteristisk strekkfasthet	f_{sk}	400 MPa
Elastisitetsmodul for slakkarmering	E_s	200 GPa
Materialfaktor for slakkarmering i bruddgrensetilstand	γ_m	1.25
Spennarmering		
Karakteristisk strekkfasthet	f_{pk}	1650 MPa
Karakteristisk strekkfasthet 0.1 % grense	$f_{p0.1k}$	1500 MPa
Elastisitetsmodul for spenntau	E_p	195 GPa
Materialfaktor for armert betong i bruddgrensetilstand	γ_m	1.15

Dimensjonerende strekkfasthet for slakkarmeringsstålet er:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_m} \quad (8.3)$$

$$f_{sd} = \frac{400 \text{ MPa}}{1.25} = 320 \text{ MPa} \quad (8.4)$$

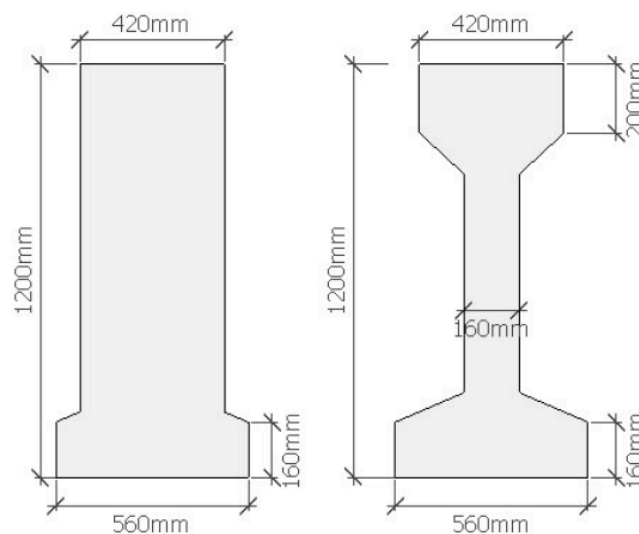
Dimensjonerende strekkfasthet for spennstålet er:

$$f_{pd} = \frac{f_{p0.1k}}{\gamma_m} \quad (8.5)$$

$$f_{pd} = \frac{1500 \text{ MPa}}{1.15} = 1304 \text{ MPa} \quad (8.6)$$

8.4.3 Tverrsnittsparemetere for brubjelker og brudekke

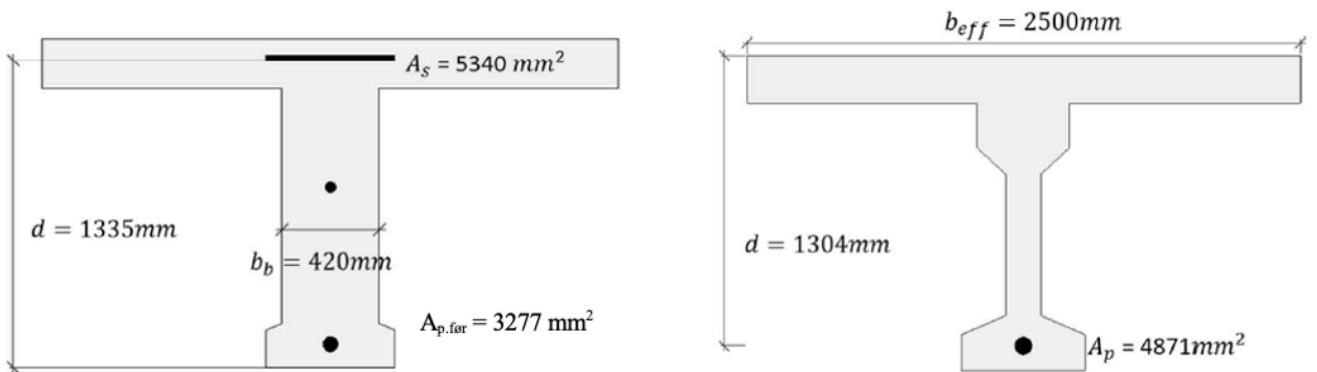
Bjelkenes tverrsnitt ved støtte og i felt er illustrert i Figur 61, brubjelkene og brudekkets dimensjoner er oppsummert i Tabell 17. Figur 62 **Feil! Fant ikke referanseilden.** viser samvirke mellom brubjelken og brudekket ved støtte og i felt.



Figur 61: Tverrsnitt av brubjelker ved støtte og i felt [73, fig. 7.1]

Tabell 17: Tverrsnittsparemetere for brubjelker og brudekke

Brubjelker	
Ved støtte	I felt
$b_{\text{topp}} = 420 \text{ mm}$	$b_{\text{topp}} = 420 \text{ mm}$
$b_{\text{bunn}} = 560 \text{ mm}$	$b_{\text{bunn}} = 560 \text{ mm}$
	$b_{\text{midt}} = 160 \text{ mm}$
$h = 1200 \text{ mm}$	$h = 1200 \text{ mm}$
$h_1 = 160 \text{ mm}$	$h_1 = 160 \text{ mm}$
	$h_2 = 200 \text{ mm}$
Brudekket	
$b_{\text{eff}} = 2500 \text{ mm}$	
$h = 220 \text{ mm}$	



Figur 62: Tverrsnitt av brubjelker og brudekke ved støtte og i felt [73, fig. 12.1]

8.5 Laster og kapasitet av originalt tverrsnitt

I [73] er egenlast, omlagringsmoment, trafikklast og temperaturlast lastene som har blitt beregnet. Disse lastene er videre brukt for å se hvordan korrosjon påvirker den nødvendige kapasiteten. Lastene som i bruddgrensetilstanden virker på brua er vist i Tabell 18 og Tabell 19 [73, tabell 11.4 og 11.5].

Tabell 18: Dimensjonerende feltmoment på Hafrsfjord bru

Lasttilfeller	Lastfaktor	Feltmoment
Egenlast	1.0	2225 kNm
Omlagringsmoment	1.1	1278 kNm
Trafikklast	1.2	948 kNm
Temperaturlast	0.8	595 kNm
Totalt		5147 kNm

Tabell 19: Dimensjonerende støttemoment på Hafrsfjord bru

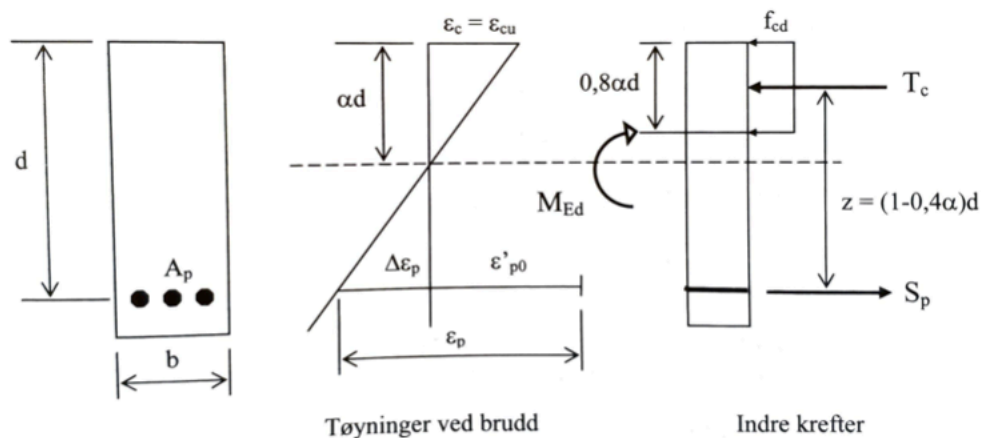
Lasttilfeller	Lastfaktor	Støttemoment	
		Etter 50 år	Etter kort tid
Egenlast	1.0	- 480 kNm	- 489 kNm
Omlagringsmoment	0.9	1046 kNm	-
Trafikklast	1.2	-730 kNm	-730 kNm
Temperaturlast	0.8	-371 kNm	-371 kNm
Totalt		-535 kNm	- 1581 kNm

Ut ifra Figur 55 kan man se hvordan armeringen fordeler seg i brubjelkene. Brubjelkene har 46 førøppspente tau fordelt på 5 lag, fra underkant er fordelingen henholdsvis 14, 10, 10, 10 og 2 tau. Bjelkene har også to spenntau i overkant, men denne armeringsmengden blir neglisjerbar sammenlignet med resten av armeringen, og blir derfor sett bort fra. Det antas at de etterøppspente kablene er plassert som en parabel, i bjelkens underkant ved støtte, og plassert omtrent midt i steget i midtspennet. Som en forenkling beregnes armeringsmengden og

tyngdepunktet som et spenntau for den førøppspente armeringen og som en spennkabel for den etterøppspente armeringen, se Figur 62. Også slakkarmeringen forenkles til ett lag.

Kapasiteten av tverrsnittet i felt regnes med hensyn på spennarmering. Ettersom trykksonen er liten, og $0.8\alpha d$ blir liggende i brudekket, kan tverrsnittet regnes som et rektangulært tverrsnitt [42, s. 250]. For å beregne kapasiteten av trykksonen brukes følgende formel [25, s. 279], illustrert i Figur 63 under:

$$M_{Rd} = T_c * z \quad (8.7)$$



Figur 63: Tøyninger og indre krefter ved brudd [25, fig. 7.6]

Fra figuren defineres følgende variabler:

- $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ = Maksimal tøyning i betongen
- ε_p = total tøyning i spennarmeringen ved brudd
- $\varepsilon'_{p0} = \varepsilon_{p0} - \Delta\varepsilon_{tap}$ = effektivt tøyningdifferanse eller forhåndstøyning
- $\Delta\varepsilon_{tap}$ = reduksjon av tøyningdifferanse grunnet friksjon, låsetap, kryp, svinn og relaksjon

T_c er betongtrykkresultanten for fasthetsklasser $\leq B50$:

$$T_c = 0.8 * \alpha * b * d * f_{cd} \quad (8.8)$$

Og z er indre momentarm:

$$z = (1 - 0.4\alpha) * d \quad (8.9)$$

Dermed blir formelen for trykksonens momentkapasitet, som representerer tverrsnittets momentkapasitet, følgende:

$$M_{Rd} = T_c * z = 0.8 * (1 - 0.4\alpha) * \alpha * b * d^2 * f_{cd} \quad (8.10)$$

Ved hjelp av aksiell likevekt bestemmes trykksonehøyden, $\alpha * d$:

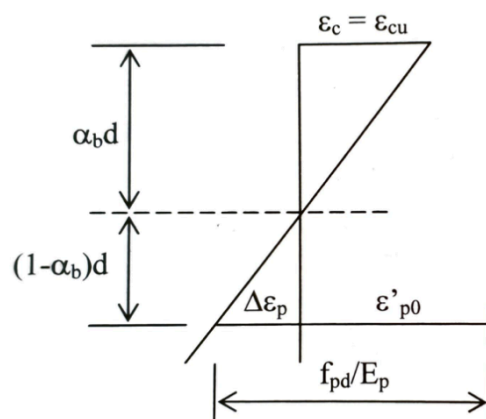
$$T_c = S_p \quad (8.11)$$

S_p er kraften i spennarmeringen, og avhenger av om spennarmeringen er i flytning eller elastisk.

Den er plastisk om følgende betingelse er oppfylt:

$$\varepsilon_p \geq \frac{f_{pd}}{E_p} \quad (8.12)$$

For å bestemme om spennarmeringen er plastisk (flytning) eller elastisk, antas et balansert tverrsnitt når spenstålet når flytning samtidig som betongen når trykkbruddtøyningen. Dette er illustrert i Figur 64.



Figur 64: Tøyninger ved brudd for et balansert spennarmeringstverrsnitt [25, fig. 7.5]

Fra denne figuren defineres α_b på følgende måte:

$$\alpha_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\Delta\varepsilon_p + \varepsilon_{cu}} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\frac{f_{pd}}{E_p} - \varepsilon'_{p0} + \varepsilon_{cu}} \quad (8.13)$$

Likevektsligningen blir da:

$$T_c = S_p \quad (8.14)$$

$$0.8 * \alpha_b * b * d * f_{cd} = f_{pd} * A_{pb} \quad (8.15)$$

Det balanserte spennarmeringstverrsnittet med den aktuelle effektive tøyningen gir videre:

$$A_{pb} = 0.8 * \frac{f_{cd}}{f_{pd}} * \alpha_b * b * d \quad (8.16)$$

Dersom $A_p \leq A_{pb}$ regnes tverrsnittet som underarmert og gir følgende α :

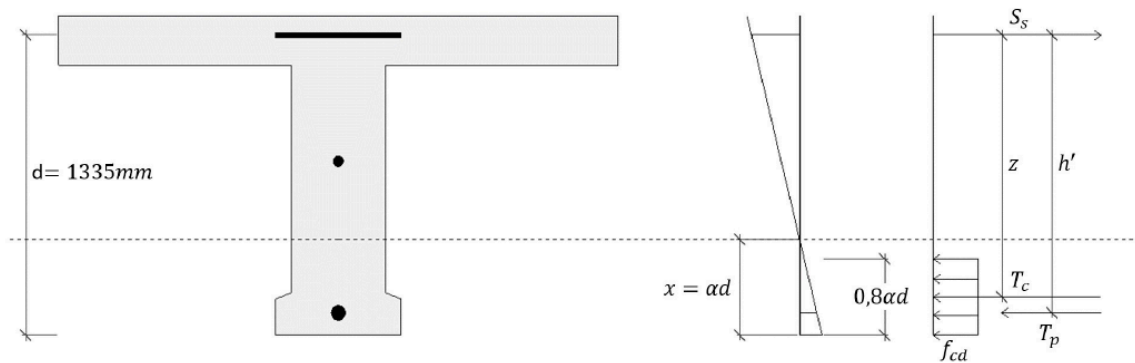
$$\alpha = \frac{f_{pd} * A_p}{0.8 * b * d * f_{cd}} \quad (8.17)$$

Hafrsfjord bru tilfredsstillers $A_p \leq A_{pb}$, og regnes dermed som et underarmert tverrsnitt. Underarmerte tverrsnitt er ønskelig da dette i utgangspunktet fører til duktil oppførsel ved brudd, ettersom spennstålet flyter før det endelige trykkbruddet i betongen [25, s. 283].

Når α er definert kan de ulike variablene settes inn i den opprinnelige formelen og momentkapasiteten i felt kan beregnes:

$$M_{Rd} = T_c * z = 0.8 * (1 - 0.4\alpha) * \alpha * b * d^2 * f_{cd} \quad (8.18)$$

Kapasiteten av tverrsnittet ved støtte regnes med hensyn på slakkarmering, og trykksonen blir bestemt ut ifra flyt i armeringen i brudekket. Spennarmeringen i underkant regnes som trykkarmering, ettersom den har lav forspenning grunnet innføringslengden. Arealet av flens i underkant blir sett bort fra. Figur 65 viser virkelig trykksone og tøyningene over tverrsnittet.



Figur 65: Tøyninger og indre krefter ved brudd ved støtte [73 fig. 12.4]

Formelen for trykksonens momentkapasitet, som representerer tverrsnittets momentkapasitet, blir følgende ved støtte:

$$M_{Rd} = T_c * z + T_p = 0.8 * (1 - 0.4\alpha) * \alpha * b_{eff} * d^2 * f_{cd} + A_{p.før} * \epsilon_p * E_p * h' \quad (8.19)$$

Hvor ϵ_p bestemmes ut ifra formlike trekanten og ϵ_{cu} som er kjent:

$$\epsilon_p = \frac{x - y_{p.før}}{x} * \epsilon_{cu} \quad (8.20)$$

For balansert tverrsnitt ved støtte beregnes α_b slik:

$$\alpha_b = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_s + \epsilon_{cu}} \quad (8.21)$$

Tverrsnittet er underarmert og gir:

$$\alpha = \frac{f_{sd} * A_s}{0.8 * b_b * d_s * f_{cd}} \quad (8.22)$$

Hvor b_b og d_s er som definert i Figur 62. Avstanden d_s er avstanden fra underkant av brubjelke til slakkarmeringens tyngdepunkt.

$$x = \alpha * d_s \quad (8.23)$$

$$h' = d_s - y_{p.før} \quad (8.24)$$

Momentkapasiteten ved støtte blir dermed:

$$M_{Rd} = T_c * z + T_p = 0.8 * (1 - 0.4\alpha) * \alpha * b_{eff} * d^2 * f_{cd} + A_{p,f\ddot{o}r} * \epsilon_p * E_p * h' \quad (8.25)$$

Den dimensjonerende momentkapasiteten til Hafrsfjord brua er 7685 kNm i felt og 4169 kNm ved støtte. Se Vedlegg E for hele beregningen av kapasitet. Dimensjonerende laster og dimensjonerende kapasitet av originalt tverrsnitt er oppsummert i Tabell 20.

Tabell 20: Dimensjonerende laster og original momentkapasitet for Hafrsfjord bru

	Maksimale laster	Momentkapasitet	Utnyttelsesgrad
I felt	5147 kNm	7685 kNm	67 %
Ved støtte	- 1581 kNm	- 4169 kNm	38 %

8.6 Kapasitetsberegning av korrodert tverrsnitt

Hafrsfjord bru har omfattende korrosjonsskader, hovedsakelig i nederste spenntaulag på flere bjelker, som forklart i kapittel 8.3. I dette kapitlet blir det sett nærmere på ulike måter å beregne bruas momentkapasitet ved korrosjonsskadet tverrsnitt. Første alternativ baserer seg på å se helt bort fra nederste spenntaulag, og beregne kapasiteten med hensyn på gjenværende armering, i likhet med [73]. Andre alternativ baserer seg på en prosentvis reduksjon i kapasitet på grunn av korrosjon på nederste spenntaulag, som ser ut til å være nåværende praksis, som forklart i kapittel 3.3. Tredje alternativ ser på reduksjon av armeringstverrsnittet i dette laget ved å bruke metodene etablert i denne oppgaven til å redusere armeringstverrsnittet, se formel

$$\emptyset_{PS_{korr}} = \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} \quad (7.3).$$

Fjerde og femte alternativ baserer seg på at også det andre spenntaulaget er utsatt for korrosjon. Fjerde alternativ baserer seg på en prosentvis reduksjon på grunn av korrosjon, mens femte alternativet går ut ifra reduksjon av armeringstverrsnittet ved å bruke metodene etablert i denne oppgaven, i likhet med alternativ tre. Sjette og syvende alternativ tar utgangspunkt i at alle spenntaulag korroderer, i tillegg til spennkablene. Sjette alternativ undersøker prosentvis reduksjon av armeringstverrsnittet og syvende alternativ reduserer armeringstverrsnittet på all

spennarmering med utgangspunkt i formel $\emptyset_{PS_{korr}} = \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100}$ (7.3). De ulike alternativene er oppsummert i Tabell 21.

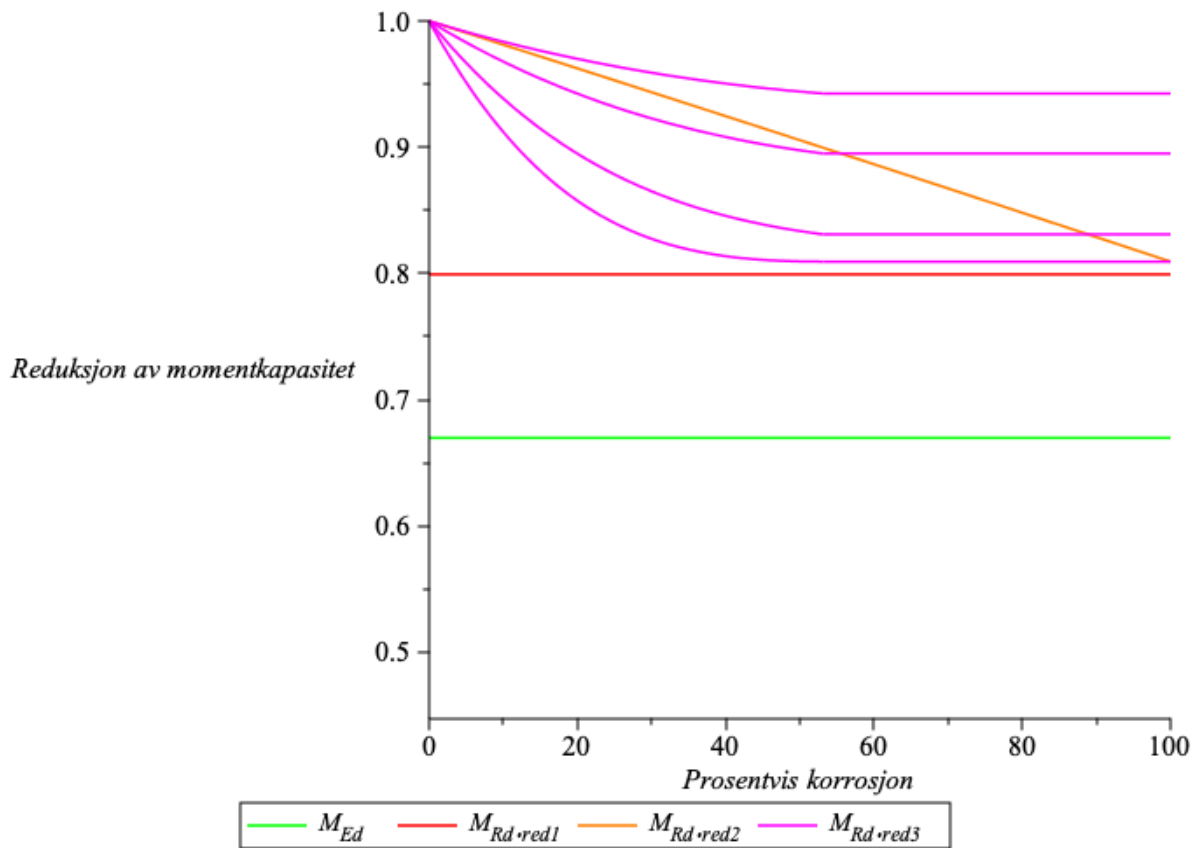
Tabell 21: Oversikt over ulike alternativer

Forklaring av alternativer		Alternativ	Formel
Laster			M_{Ed}
Original kapasitet			$M_{Rd.felt}$
Korrosjon på nederste spenntaulag	Neglisjerer nederste spenntaulag	Alt. 1	$M_{Rd.red1}$
	Prosentvis reduksjon	Alt. 2	$M_{Rd.red2}$
	Reduksjon basert på formel $\emptyset_{PS_{korr}} = \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} \quad (7.3)$	Alt. 3	$M_{Rd.red3}$
Korrosjon på to nederste spenntaulag	Prosentvis reduksjon	Alt. 4	$M_{Rd.red4}$
	Reduksjon basert på formel $\emptyset_{PS_{korr}} = \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} \quad (7.3)$	Alt. 5	$M_{Rd.red5}$
Korrosjon på alle spenntaulag og spennkabler	Prosentvis reduksjon	Alt. 6	$M_{Rd.red6}$
	Reduksjon basert på formel $\emptyset_{PS_{korr}} = \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\emptyset_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} \quad (7.3)$	Alt. 7	$M_{Rd.red7}$

Alternativ 1, 2 og 3: Korrosjon på nederste spenntaulag

Reduksjon av momentkapasitet grunnet korrosjon på nederste spenntaulag er vist i Figur 66. Den grønne kurven viser hvor mye kapasitet som kreves på grunn av lastene. Alternativ 1 er representert av rød kurve, alternativ 2 av oransje kurve og de rosa linjene viser alternativ 3.

Ettersom alternativ 3 viser reduksjon i nederste spenntaulag basert på formel $\emptyset_{PS_{korr}} = \frac{\emptyset_{PS} \cdot (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 \cdot \%vekttap \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\emptyset_{PS} \cdot (100 - \%vekttap)}{100}$ (7.3), er alle de fire stegene vist.

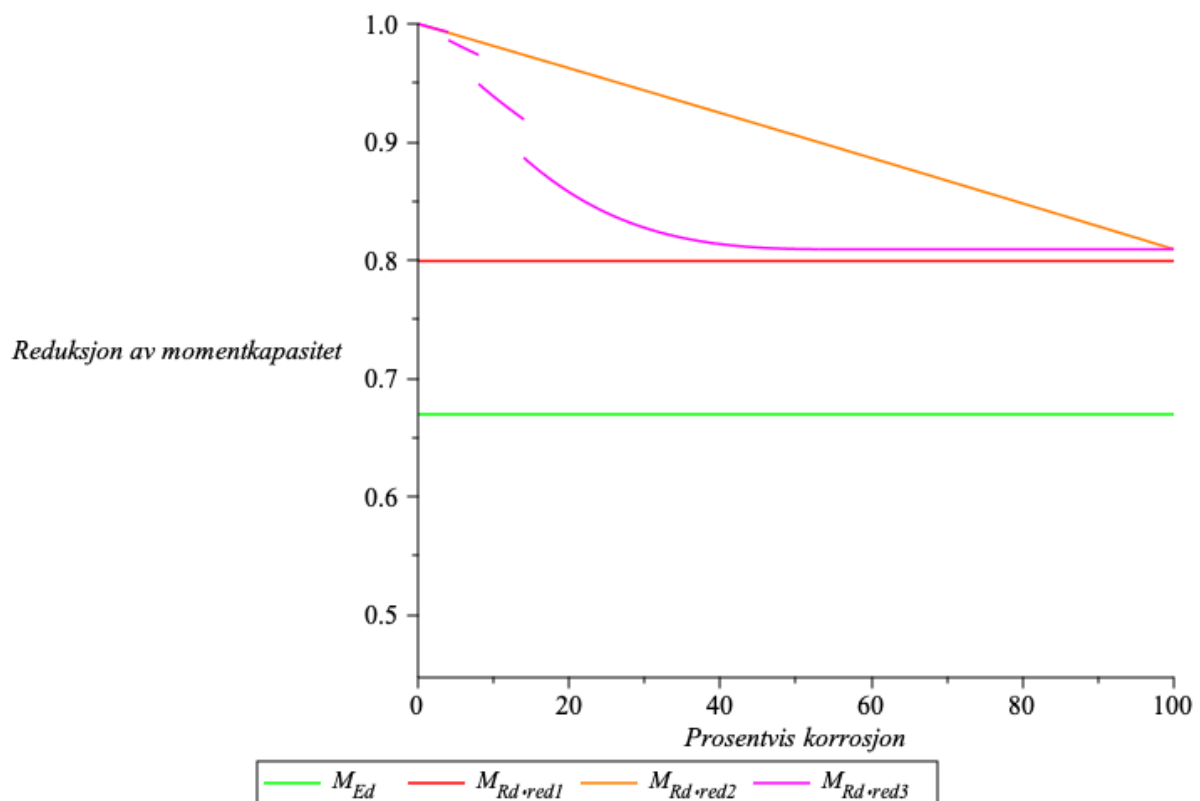


Figur 66: Reduksjon av momentkapasitet på grunn av korrosjon på nederste spenntaulag

Grunnen til at kurvene for alternativ 2 og alternativ 3 ikke reduseres nøyaktig like mye som alternativ 1, på tross av 100 % korrosjon, er på grunn av antakelser rundt armeringens tyngdepunkt i kalkulasjonene. For alternativ 1 er armeringens tyngdepunkt endret som følge av at ett spenntaulag er fjernet. I kalkulasjonene for alternativ 2 og alternativ 3 er ikke tyngdepunktet for armeringen endret.

Om det antas at det ikke er noe restkapasitet i det nederste spenntaulaget, og derav neglisjerer hele spenntaulaget (rød), er gjenværende kapasitet for hele tverrsnittet 6143 kNm. Dette gir en utnyttelsesgrad på 84 %, sammenlignet med 67 % originalt. Som vist i figuren, fører ikke korrosjon på det nederste spenntaulaget til at bæreevnen overskrides. Alternativ 2 og alternativ 3 vil følgelig heller ikke overskride bærekapasiteten. En sammenligning av sistnevnte alternativer er likevel interessant.

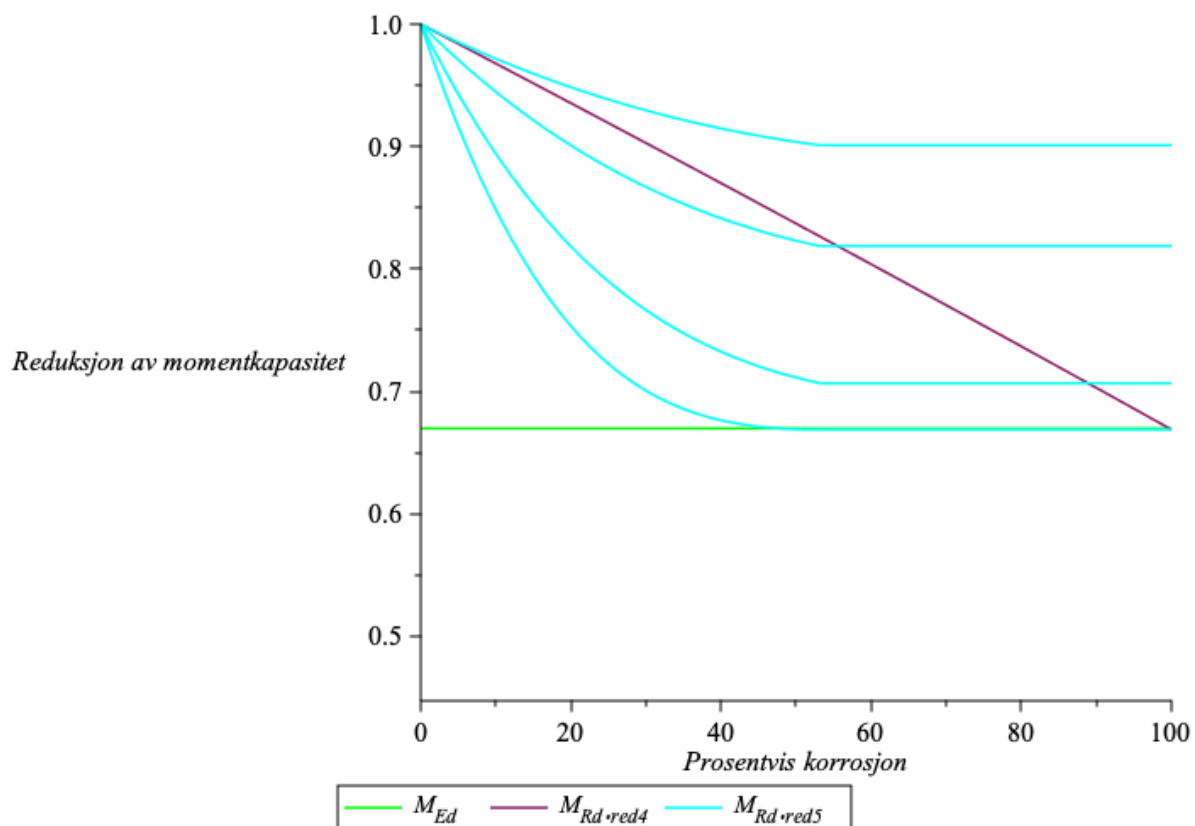
Ved å bruke gyldighetsområdene definert i kapittel 7.4: Steg 1: 0-4 %, Steg 2: 4-8 %, Steg 3: 8-14 % og Steg 4: fra 14 %, kan reduksjon i momentkapasitet settes opp som i Figur 67. For steg 1 i alternativ 3, er reduksjonen i kapasitet ganske lik som for alternativ 2. For for steg 2, 3 og 4 gir derimot alternativ 3 en betraktelig lavere kapasitet enn den prosentvise reduksjonen i alternativ 2, ved samme korrosjonsnivåer. I følge alternativ 2 er spenntaulagets kapasitet overskredet ved 45 % korrosjon, mens det for alternativ 3 ikke er overskredet før 100% av arealet er korrodert.



Figur 67: Stegvis reduksjon av momentkapasitet ved korrosjon på nederste spenntaulag

Alternativ 4 og 5: Korrosjon på to nederste spenntaulag

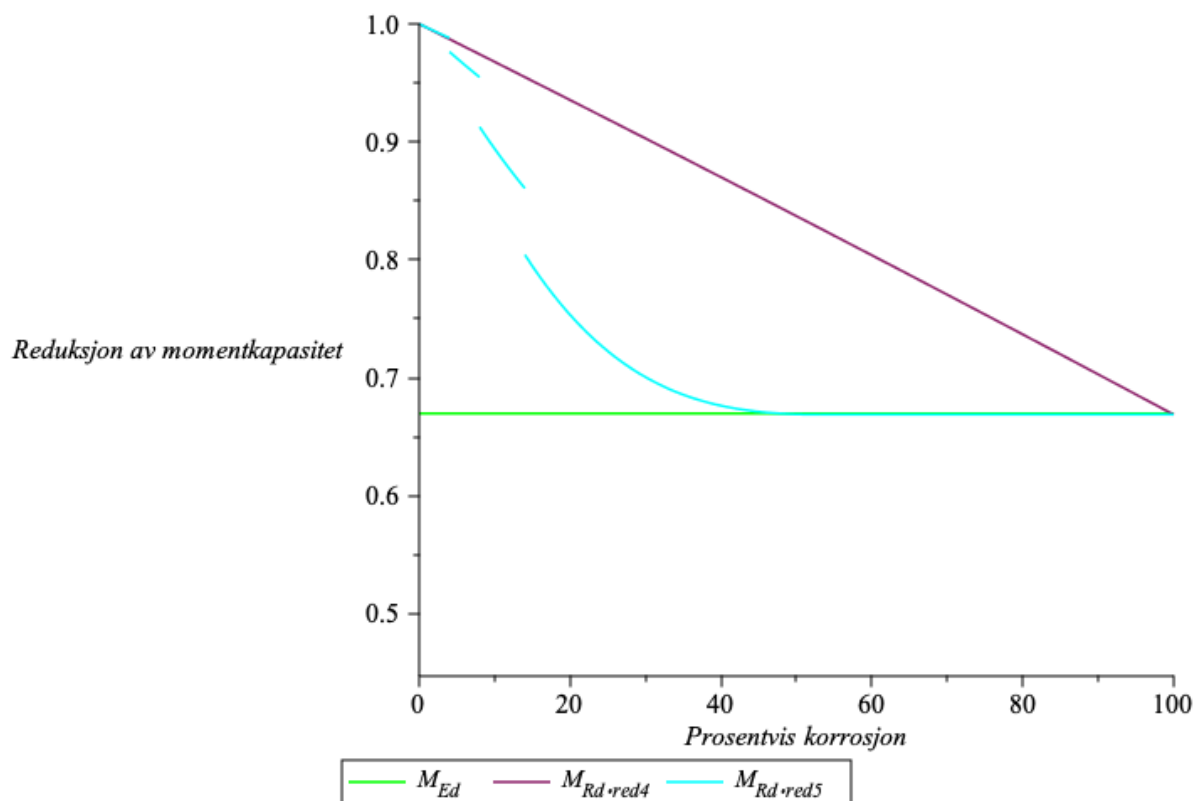
Reduksjon av momentkapasitet grunnet korrosjon på de to nederste spenntaulagene er vist i Figur 68. Som tidligere viser den grønne kurven hvor mye kapasitet som kreves på grunn av lastene. Alternativ 4 er representert av lilla kurve og alternativ 5 av turkise kurver. Alternativ 5 består også av fire steg, i likhet med alternativ 3.



Figur 68: Reduksjon av momentkapasitet på grunn av korrosjon på de to nederste spenntaulagene

Korrosjon på det nederste spenntaulaget fører ikke til at bæreevnen overskrides, av denne grunn er det undersøkt hvordan bærekapasiteten påvirkes om også det neste spenntaulaget korroderer. Alternativ 4 og alternativ 5 baserer seg på at både det nederste laget med 14 spenntau og det neste laget med 10 spenntau korroderer. Alternativ 4, som går ut ifra prosentvis reduksjon av armeringstverrsnittet ved økende korrosjon, viser at om begge spenntauene er 100% korrodert er bærekapasiteten truet.

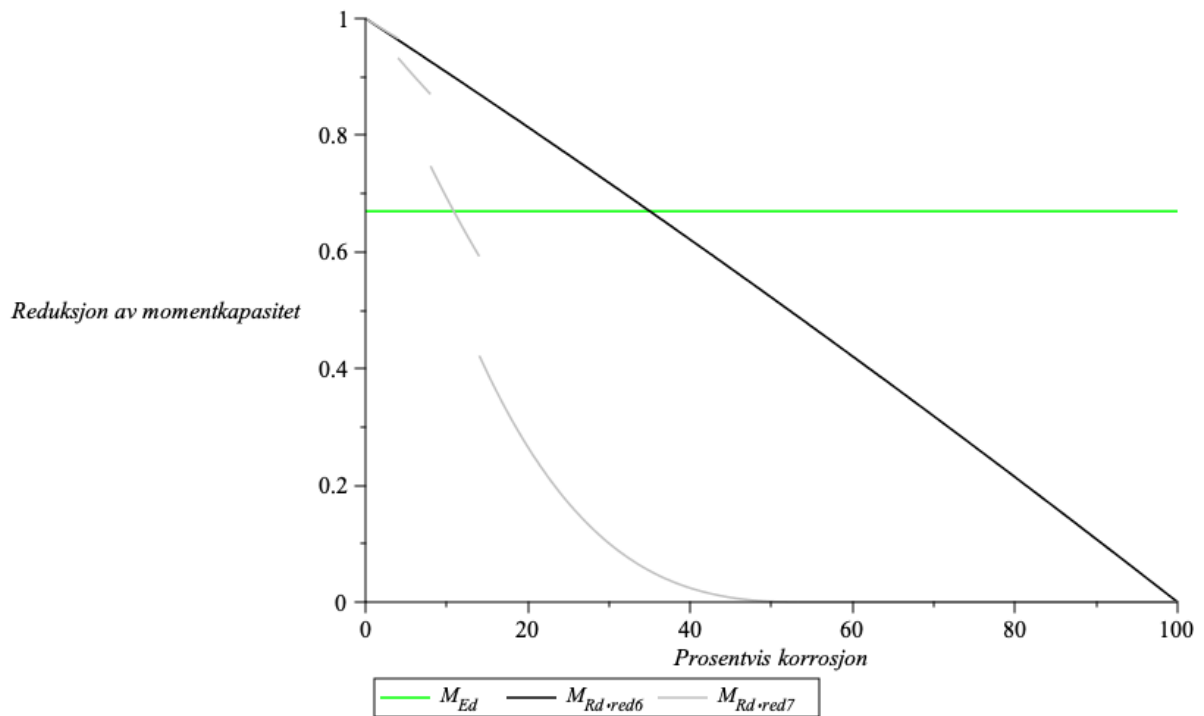
Alternativ 5 og de ulike gyldighetsområdene definert i kapittel 7.4: Steg 1: 0-4 %, Steg 2: 4-8 %, Steg 3: 8-14 % og Steg 4: fra 14 %, er illustrert i Figur 69. I følge dette alternativet er bærekapasiteten i ferd med å overskrides ved omtrent 50 % korrosjon. Denne grafen viser tydelig hvor mye groper påvirker kapasitetsreduksjonen og hvordan en reduksjon kun basert på prosentvis reduksjon muligens overvurderer kapasiteten.



Figur 69: Stegvis reduksjon av momentkapasitet på grunn av korrosjon på de to nederste spenntaulagene

Alternativ 6 og 7: Korrosjon på alle spenntaulag og spennkabler

Reduksjon av momentkapasitet som følge av korrosjon på all spennarmering er vist i Figur 70. Også her viser den grønne kurven hvor mye kapasitet som kreves på grunn av lastene. Alternativ 6 er representert av svart kurve og alternativ 7 av grå kurve. I grafen vises de fire ulike stegene i alternativ 7 for de ulike gyldighetsområdene. Hvis det blir antatt at alle spenntaulag og spennkabler er utsatt for korrosjon vil bæreevnen overskrides om for stor andel av armeringen korroderer.



Figur 70: Reduksjon av momentkapasitet på grunn av korrosjon på all spennarmering

Nødvendig kapasitet for at ikke bæreevnen skal overskrides er 67 %, det vil si at bæreevnen overskrides ved en reduksjon i momentkapasitet på 33 %. I følge alternativ 6 vil bæreevnen overskrides ved 35 % korrosjon. Ser man derimot på alternativ 7 vil bæreevnen overskrides allerede ved 10 % korrosjon.

Ettersom det her er gjort en forenkling hvor all spennarmering i flere lag er forenklet til et lag vil ikke den stegvise tilnærmingen være like relevant. Det er likevel interessant å studere hvordan korrosjon påvirker kapasiteten og hvor lite korrosjon som skal til for at bærekapasiteten overskrides. Også sammenligningen mellom alternativ 6 og alternativ 7 blir spesielt tydelig når det totale armeringsarealet øker. Det er tydelig en drastisk forskjell, og ved å basere reduksjon i momentkapasitet kun på prosentvis korrosjon overvurderes kapasiteten.

9 Diskusjon og konklusjon

9.1 Diskusjon og konklusjon

Oppgaven har tatt for seg hvordan korrosjon påvirker momentkapasiteten til slakkarmerte og spennarmerte bjelker, og foreslår en enkel beregningsmetode. Resultatet av dette har deretter blitt brukt for å gjøre en vurdering av hvordan korrosjonsskadene på Hafrsfjord bru påvirker bruas momentkapasitet. Utgangspunktet for reduksjon av momentkapasitet har vært reduksjon i armeringstverrsnittet, både for slakkarmering og spennarmering. I oppgaven har det blitt sett på ulike måter å redusere armeringstverrsnittet og hvilken påvirkningen dette har hatt på kapasiteten.

Det finnes ingen standardisert måte å beregne kapasiteten for en eldre, korrosjonsskadet betongkonstruksjon. En metode som ofte blir brukt er å gjøre en vurdering av hvor stor prosentandel av armeringen som er skadet av korrosjon, på bakgrunn av inspeksjoner, for så å bruke dette til å beregne gjenværende kapasitet. I løpet av oppgaven har denne metoden å estimere reduksjon av kapasitet på blitt studert nærmere og vurdert opp mot laboratorie-forsøk.

Reduksjon i kapasitet på grunn av korrosjon for både slakkarmering og spennarmering har blitt studert. For begge typer armering er det tydelig at kapasiteten overvurderes om kun prosentvis reduksjon av armeringstverrsnitt på bakgrunn av gjennomsnittlig korrosjon tas i betraktning. Basert på målinger av gropstørrelser som funksjon av gjennomsnittlig armeringskorrosjon, blir det i denne oppgaven forslått en beregningsmodell som tar hensyn til både gjennomsnittlig korrosjon og groptæring. Ved å bruke 95 % fraktil, som gir den største sannsynlige verdien av groper, blir en nedre grense av kapasiteten etablert. Denne metoden later til å gi et godt estimat av kapasitet på sikker side.

Beregningsmodellen for reduksjon av armeringstverrsnitt for slakkarmering er vist ved formel

$$\emptyset_{L_{korr}} = \frac{\emptyset_L * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\emptyset_L * (100 - \%vekttap)}{100} \quad (9.1):$$

$$\emptyset_{L_{korr}} = \frac{\emptyset_L * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\emptyset_L * (100 - \%vekttap)}{100} \quad (9.1)$$

Det har blitt gjort en sammenligning av resultater fra faktiske laboratorie-forsøk med teoretiske kalkulasjoner, med utgangspunkt i denne reduseringen av armeringstverrsnitt, og teoretiske kalkulasjoner med prosentvis reduksjon av armeringstverrsnitt. Momentkapasitet basert på formel $\varnothing_{L_{korr}} = \frac{\varnothing_L * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\varnothing_L * (100 - \%vekttap)}{100}$ (9.1) gir et riktigere bilde av resterende momentkapasitet, mens prosentvis reduksjon av armeringstverrsnitt gir et for høyt estimat av kapasitet.

Det er relevant med en diskusjon om hvorvidt den største gropen vil opptre på flere armeringsjern i samme område, slik at alle armeringsjern må reduseres tilsvarende. Forsøkene som var tilgjengelige for denne oppgaven var kun av bjelker med to armeringsjern i strekksonen. Dette gir dette lite grunnlag for å bekrefte eller avkrefte at slike effekter vil inntreffe. Mengden armering er følgelig også relevant med tanke på å anvende beregningsmodellen på tverrsnitt med mer armering, da det ikke er gitt at slike tverrsnitt vil ha samme oppførsel. Dette gjør seg også gjeldene på grunn av forenklingen som er gjort ved å se all armering som ett armeringstverrsnitt.

Spennarmering har en fasthet på to-tre ganger styrken til slakkarmering, og tap av tverrsnitt på spennarmering vil i de fleste tilfeller være mer alvorlig. Beregningsmodellen for reduksjon av armeringstverrsnitt for spennarmering er vist ved formel $\varnothing_{PS_{korr}} = \frac{\varnothing_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\varnothing_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100}$ (9.2):

$$\varnothing_{PS_{korr}} = \frac{\varnothing_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} - 0.0376 * \%vekttap * \frac{1}{2} * \frac{\varnothing_{PS} * (100 - \%vekttap)}{100} \quad (9.2)$$

Formelen tar utgangspunkt i at hver enkel tråd i spenntauet korroderer. For å ta høyde for at ikke alle spenntråder korroderer på likt er en stegvis tilnærming introdusert. Ved å anta at økende antall spenntråder vil korrodere ved økende mengde korrosjon er det satt opp forslag til gyldighetsområder for de ulike stegene. Sammenligning av denne foreslåtte beregningsmodellen med laboratorie-forsøk viser at metoden gir en nedre grense for kapasitet. Også for spennarmering er det tydelig at en eventuell reduksjon på bakgrunn av prosentvis reduksjon gir et for høyt estimat av gjenværende kapasitet.

På grunn av spennarmeringens høye fasthet er spennarmering også utsatt for andre nedbrytningsmekanismer som hydrogensprøing (HE) og hydrogenindusert spenningskorrosjon (HISCC). Om miljøet blir tilstrekkelig surt og pH-en synker under 7, vil atomært hydrogen kunne dannes som en del av korrosjonsprosessen og trenge inn i stålet. Et tilstrekkelig surt miljø kan oppstå i forbindelse med groper, med påfølgende HISCC problemer. Som tidligere beskrevet kan HISCC føre til en kraftig reduksjon i duktilitet. Tap av duktilitet kan videre føre til sprøbrudd, som betegnes som plutselige brudd uten forvarsel i form av stor nedbøyning.

Ved kapasitetsberegninger av Hafrsfjord bru har det blitt fokusert på hovedspennet, da dette antas å være det mest kritiske spennet. Hovedproblemet for Hafrsfjord bru er omfattende korrosjonsskader på armeringen på grunn av mangelfull overdekning, primært på det nederste spennet, hvor omtrent halvparten av spennetauene er korrodert bort. For å undersøke kapasiteten til Hafrsfjord bru og beregningsmodellen som er foreslått, er det gjort forskjellige beregninger hvor det anslås at ulikt antall spennetau er utsatt for korrosjon.

Belastningen på Hafrsfjord bru er slik at kapasiteten kan reduseres med 33 % uten at bærekapasiteten overskrides. Beregningene viser at om det nederste spennet antas så korrodert at det ikke har gjenværende kapasitet, reduseres kapasiteten med 20 %. Dette er da ikke tilstrekkelig for å overskride bæreevnen.

Om det derimot antas at også det neste spennet er utsatt for korrosjon, vil bæreevnen stå i fare for å overskrides. Avhengig av hvilken metode som brukes for å redusere kapasiteten på bakgrunn av korrosjon, er det store forskjeller i kritisk grense for korrosjon. Reduksjon av kapasitet på grunn av prosentvis reduksjon av armeringstverrsnitt fører til at bæreevnen først overskrides om begge spennet er 100% korroderte. Brukes derimot beregningsmodellen foreslått i denne oppgaven vil bæreevnen overskrides allerede om spennet er utsatt for 50 % korrosjon.

Beregningene som er utført både på bjelker og Hafrsfjord bru, i denne oppgaven, viser tydelig at den tradisjonelle metoden ved å kun redusere armeringstverrsnittet som funksjon av prosentvis korrosjon kan overvurdere kapasiteten.

9.2 Videre arbeid

Det finnes en stor andel kystnære betongbruer i Norge som er bygget på 1960 og 1970-tallet. Flere av disse har ulike korrosjonsskader, og undersøkelser av hvordan korrosjon oppstår, utvikler seg og påvirker konstruksjonen er viktige tema. Noen av disse er studert i denne oppgaven, og basert på dette er følgende emner foreslått for videre arbeid:

- Tap av heft som følge av korrosjon, og hvordan dette påvirker kapasiteten og duktiliteten til betongbruer.
- Posisjon av groper i lengderetningen på ulike armeringsjern, samt frekvensen av groper i lengderetning, og hvilken effekt disse har på kapasiteten.
- Kapasitets- og duktilitetstap som følge av hydrogeninntrengning på spennarmering, og hvordan dette påvirker sikkerheten til betongbruer. Dette bør dekke både hydrogeninntrengning, hydrogensprøing og HISSC.
- Kapasitets- og duktilitetstap som følge av groptæring på spennarmering.
- Undersøkelser av årsaksforholdene til korrosjon som følge av oppsmuldret mørtel (soft grout corrosion) i kabelrør.
- Skjærkapasiteten for slakkarmerte og spennarmerte betongbruer utsatt for korrosjon.

10 Referanser

[1] H. T. Øderud og R. S. Nordahl, «bro», i *Store norske leksikon*, feb. 2020. [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/bro> Lastet ned: 1/6 2021.

[2] A. Wethal, «Fra kjerre- til motorvei», i SSB, jan. 2001. [Online]. Hentet fra: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/artikler-og-publikasjoner/fra-kjerre-til-motorvei>
Lastet ned: 1/6 2021.

[3] Statens vegvesen Vegdirektoratet, *Håndbok V441 Bruinspeksjon, Vedlegg V2 – Metoder oppmålinger/materialundersøkelser*. 2019. [Online]. Hentet fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/2884253/binary/1356254?fast_title=Vedlegg+V2+%E2%80%93+Metoder+oppm%C3%A5linger%2Fmaterialunders%C3%B8kelser.pdf
Lastet ned: 28/3 2021.

[4] M. Langeteig, personlig kommunikasjon: epost, 10. juni 2021.

[5] M. Geiker, «Chapter 16 – Reinforcement corrosion», i *Concrete Technology*, 2016 utgave. S. Jacobsen, red. Trondheim: NTNU, 2016, s. 16-1 – 16-7.

[6] M. J. Osmolska, K. Hornbostel, T. Kanstad, M. A. N. Hendriks og G. Markeset, «Inspection and Assessment of Corrosion in Pretensioned Concrete Bridge Girders Exposed to Coastal Climate», i *Infrastructures*, vol. 5, nr. 9: 76, sept. 2020. [Online]. Hentet fra: doi: 10.3390/infrastructures5090076

[7] R. Kompen, «Nye regler for sikring av overdekning», Statens Vegvesen Vegdirektoratet, Oslo, Norge. *Publikasjon nr. 78*, mai 1995. [Online] Hentet fra: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/191516/Publikasjon%2078.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
Lastet ned: 30/3 2021.

- [8] R. Kompen, «Betongregelverk relatert til bestandighet. Betongbruer i et historisk perspektiv». Statens Vegvesen Fagdag 2014. [Online]. Hentet fra: <https://docplayer.me/17541753-Etatsprogrammet-varige-konstruksjoner-2012-2015-fagdag-2014-betongregelverk-relatert-til-bestandighet-betongbruer-i-et-historisk-perspektiv.html>
Lastet ned: 30/3 202.
- [9] K. H. Barmen og T. Østmoen, «Rapport fra spesialinspeksjon 2014», Aas-Jakobsen for Statens Vegvesen, Oslo, Norge, 11387-10-1, 27/8 2014.
- [10] Statens vegvesen Vegdirektoratet, *N400 Bruprosjektering*. 2015. [Online]. ISBN: 978-82-7207-680-0
- [11] M. Maage, Red. *Betong – Regelverk, teknologi og utførelse*. Byggenæringsens forl. 2015.
- [12] J. P Broomfield, *Corrosion of steel in concrete*, 2. utgave. New York, NY, USA og Oxon, England: Taylor & Francis, 2007.
- [13] A. K. Azad, S. Ahmad og B. H. A. Al-Gohi, «Flexural strength of corroded reinforced concrete beams», i *Magazine of Concrete Research*, vol. 62, nr. 6, s. 404-414, juni 2010. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1680/macr.2010.62.6.405.
- [14] N. D. Adasooriya, S. Samarakoon og O. T. Gudemestad, «Corrosion propagation phase and bond strength degradation of reinforced concrete structures: State of the art», i *Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas*, vol. 6, nr. 3, s. 499-514, 2018. [Online]. Hentet fra: doi: 10.2495/CMEM-V6-N3-499-514
- [15] R. Myrdal, *Byggforsk 520.061 Armeringskorrosjon*, SINTEF Byggforsk, 2009. [Online]. Hentet fra: <https://www.byggforsk.no/dokument/298/armeringskorrosjon#i4>. Lastet ned: 24/3 2021.
- [16] Wikipedia. «Anaerobic corrosion», wikipedia.org. Hentet fra: https://en.wikipedia.org/wiki/Anaerobic_corrosion Lastet ned: 18/5 2021
- [17] J. Sharp, personlig kommunikasjon: e-post, 4. juni 2021.

- [18] M. Langeteig, personlig kommunikasjon: minnepenn med bilder av Hafrsfjord bru. Feb. 2021.
- [19] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli og R. B. Polder, *Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair*, 2. utgave. Weinheim, Tyskland: Wiley-VCH, 2013. ISBN: 978-3-527-33146-8
- [20] ACI Committee 222, «Corrosion of Prestressing Steels», ACI, USA, ACI 222.2R-01, feb. 2001. [Online]. Hentet fra:
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/10256>
Lastet ned: 12/2 2021.
- [21] K. Trethewey og J. Chamberlain, *Corrosion for Science and Engineering*, 2. utgave. Essex, England: Pearson, 1995.
- [22] U. Nürnberger, «Corrosion inducing failure mechanisms of prestressing steel», i *Materials and Corrosion*, vol. 53, nr.8, s. 591-601, aug. 2002. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1002/1521-4176(200208)53:8<591::AID-MACO591>3.0.CO;2-X
- [23] M. Siegwart, «Risk analysis of hydrogen induced stress corrosion cracking of prestressed concrete: Identification of critical parameters prepared for the institute of corrosion», Universitetet i Ulster, 2009. Hentet fra: <https://www.semanticscholar.org/paper/RISK-ANALYSIS-OF-HYDROGEN-INDUCED-STRESS-CORROSION-Siegwart/0e76ecc32ba33b7e43e7d314252ff8ecd6568e8a> Lastet ned: 26/3 2021.
- [24] J. Sharp, personlig kommunikasjon: Teams-møte, 28/5 2021.
- [25] S. I. Sørensen, *Betongkonstruksjoner*. Trondheim: Tapir akademisk forl, 2010.
- [26] E. H. Hristova, «Residual strength of corroded reinforced concrete beams», Doktorgradsavhandling, Sheffield Hallam University, Sheffield, England, 2006. [Online] Hentet fra: <http://shura.shu.ac.uk/id/eprint/19838> Lastet ned: 12/1 2021.

- [27] C. Apostolopoulos og K. Koulouris, «Corrosion Effect on Bond Loss between Steel and Concrete», i *Structural Integrity and Failure*, IntechOpen, nov. 2020. [Online]. Hentet fra: doi: 10.5772/intechopen.94166
- [28] A. Castel, R. François og G. Arliguie, «Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams – Part 2: Bond and notch effects», i *Mat. Struct.*, vol. 33, s. 554-551, nov. 2000. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1007/BF02480534
- [29] L. Dai, L. Wang, H. Bian, J. Zhang, X. Zhang og Y. Ma, «Flexural Capacity Prediction of Corroded Prestressed Concrete Beams Incorporating Bond Degradation», i *J. Aerosp. Eng.*, vol. 32, nr. 4, mars 2019. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001022
- [30] Statens vegvesen Vegdirektoratet, *Håndbok V441 Bruinspeksjon*, 2019. [Online]. ISBN: 978-82-7207-752-4
- [31] Statens vegvesen Vegdirektoratet, *Håndbok R610 Standard for drift og vedlikehold av riksveger*, 2014. [Online]. ISBN: 978-82-7207-655-8
- [32] Statens vegvesen, «Forvaltning», vegvesen.no. Hentet fra: <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/bruer/forvaltning> Lastet ned: 11/2
- [33] M. Langeteig, personlig kommunikasjon: Teams-møte, 20. april 2021.
- [34] B. Mosley, J. Bungey, og R. Hulse, *Reinforced Concrete Design to Eurocode 2*, 7. utg. Basingstoke: Palgrave MacMillan, 2012.
- [35] A. K. Azad, S. Ahmad og S. A. Azher, «Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams», i *ACI Materials Journal*, vol. 104, nr. 1, s. 40-47, jan. 2007. [Online]. Hentet fra: doi: 10.14359/18493
- [36] B. H. A. Al-Gohi, «Time-dependent modeling of loss of flexural strength of corroding RC beams», Masteroppgave, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Saudi Arabi, 2008. Hentet fra: doi: 10.13140/RG.2.2.14070.45122

- [37] NTNU, «Bias for vurdering av riktighet», ntnu.no. Hentet fra: <https://www.ntnu.no/wiki/pages/viewpage.action?pageId=121670242> Lastet ned: 18/3 2021.
- [38] Wikipedia, «Coefficient of variation», Wikipedia.org. Hentet fra: https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_variation Lastet ned: 18/3 2021
- [39] M. M. Kioumars, M. A. N. Hendriks, J. Köhler og M. R. Geiker, «The effect of interference of corrosion pits on the failure probability of a reinforced concrete beam», i *Engineering Structures*, vol. 114, s. 113-121, mai 2016. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.engstruct.2016.01.058
- [40] K. Z. Hanjari, P. Kettil og K. Lundgren, «Analysis of Mechanical Behavior of Corroded Reinforced Concrete Structures», i *ACI Structural Journal*, vol. 108, nr. 5, s. 532-541, sept. 2011. [Online]. Hentet fra: doi: 10.14359/51683210.
- [41] I. Fernandez, J. M. Bairán og A. R. Marí, «Mechanical model to evaluate steel reinforcement corrosion effects on σ - ϵ and fatigue curves. Experimental calibration and validation», i *Engineering Structures*, vol. 118, s. 320-333, juli 2016. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.engstruct.2016.03.055
- [42] R. I. Gilbert, N. C. Mickleborough og G. Ranzi, *Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2*. 2. utgave. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [43] M. Kioumars, A. Benenato, B. Ferracuti og S. Imperatore, «Residual Flexural Capacity of Corroded Prestressed Reinforced Concrete Beams», i *Metals*, vol. 11, nr. 3, 442, mars 2021. [Online]. Hentet fra: doi: 10.3390/met11030442
- [44] S. Rengaraju, A. Godara, P. Alapati og R. G. Pillai, «Macrocell corrosion mechanisms of prestressing strands in various concretes», i *Magazine of Concrete Research*, vol. 72, nr. 4, s. 1-32, okt. 2018. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1680/jmacr.18.00284
- [45] R. A. Rogers, L. Wotherspoon, A. Scott og J. M Ingham, «Residual strength assessment and destructive testing of decommissioned concrete bridge beams with corroded pretensioned

reinforcement», i *PCI Journal*, vol. 57, nr. 3, s. 100-118, 2012. [Online]. Hentet fra: doi: 10.15554/pcij.06012012.100.118.

[46] L. Bathen og K. Hornbostel, «Hvordan kan vi avdekke korrosjon på spennarmering», presentert på Statens Vegvesens Teknologidagene 2017, Trondheim, Norge, 23. okt. 2017. [Online]. Hentet fra: <https://docplayer.me/69203282-Hvordan-kan-vi-avdekke-korrosjon-pa-spennarmering.html>. Lastet ned: 27/1 2021.

[47] C.-H. Jeon, C. D. Nguyen og C.-S. Shim, «Assessment of Mechanical Properties of Corroded Prestressing Strands», i *Appl. Sci.*, vol. 10, nr. 12, art. nr. 4055, juni 2020. [Online]. Hentet fra: doi: 10.3390/app10124055

[48] G. M. Clark et al., «Durable post-tensioned concrete bridges», Concrete Society, Crowthorne, England. *Technical Report No. 47*, 2. utgave. 2002.

[49] L. Bathen, «Spennkabler og korrosjon», Norsk betongforening: Betoncast nr 14. 21/4 2021 [Online]. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=JcF56ePT6nU>

[50] Statens vegvesen, «Bedre bruvedlikehold», vegvesen.no. Hentet fra: <https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/forskning-innovasjon-og-utvikling/pagaende-programmer-og-prosjekter/bedre-bruvedlikehold>. Lastet ned: 21/4 2021.

[51] S. Perme, K. K. K. Vigneshwaran, M. Echeverría, K. Lau og I. Lasa, «Corrosion of Post-Tensioned Tendons with Deficient Grout, Part 2: Segregated Grout with Elevated Sulfate Content», i *CORROSION*, vol. 74, nr. 4, s. 457-467, april 2017. [Online]. Hentet fra: doi: 10.5006/2568

[52] L. Bertolini og M. Carsana, «High pH corrosion of Prestressing Steel in Segregated Grout», i *Modelling of Corroding Concrete Structures*, C. Andrade og G. Mancini, red. Springer, RILEM Bookseries, 2011, s. 147-158. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1007/978-94-007-0677-4

[53] G. Ersdal, J. V. Sharp og A. Stacey, *Ageing and life extension of offshore structures: the challenge of managing structural integrity*, 1. utgave. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019.

- [54] O. Lohne, «duktilitet», i *Store norske leksikon*, juni 2020. [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/duktilitet>. Lastet ned: 27/4 2021.
- [55] Ø. Bjøntegaard og S. A. Myren, «Drift og vedlikehold av betongkonstruksjoner, Teknologidagene 2007», Statens Vegvesen, Oslo, Teknologirapport nr. 2497, 17/10 2007 [Online]. Hentet fra: <https://core.ac.uk/download/pdf/52082988.pdf> Lastet ned: 24/5 2021.
- [56] G. Kjeldsen og S. Jacobsen, *Byggforsk 720.232 Armeringskorrosjon i betongkonstruksjoner. Utbedring av skader*, SINTEF Byggforsk, 1997. [Online]. Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/661/armeringskorrosjon_i_betongkonstruksjoner_utbedring_av_skader Lastet ned: 24/3 2021.
- [57] D. Trejo, R. G. Pillai, M. B. D. Hueste, K. F. Reinschmidt og P. Gardoni, «Parameters Influencing Corrosion and Tension Capacity of Post-Tensioning Strands», i *ACI Materials Journal*, vol. 106, nr. 2, s. 144-153, mars 2009. [Online]. Hentet fra: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/56461> Lastet ned: 12/2 2021.
- [58] NPTEL-NOC IITM, «Corrosion in prestressed concrete», *Youtube.com*, lastet opp 8/2 2020. [Video]. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=NDsVixk6mQY>
- [59] E. Proverbio og L. M. Bonaccorsi, «Failure of prestressing steel induced by crevice corrosion in prestressed concrete structures», presentert ved 9th International Conference on Durability of Materials and Components, Rotterdam, Nederland, 2002. [Online]. Hentet fra: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB9869.pdf> . Lastet ned: 12/2 2021.
- [60] R. J. Woodward, «Collapse of a Segmental Post-Tensioned Concrete Bridge», i *Transportation Research Record*, nr. 1211, s. 38-59, mai 1990. [Online]. Hentet fra: <https://trid.trb.org/view/308412> Lastet ned: 24/2 2021
- [61] M. Morgese, G. Ansari, M. Domaneschi og G. P. Cimellaro, «Post-collapse analysis of Morandi's Polcevera viaduct in Genoa Italy», i *J. Civil Struct Health Monit*, vol. 10, s. 69-85, des. 2019. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1007/s13349-019-00370-7

- [62] R. Helmerich og A. Zunkel, «Partial collapse of the Berlin Congress Hall on May 21st, 1980», i *Engineering Failure Analysis*, vol. 43, s. 107-119, des. 2013. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.11.013
- [63] B. Belletti, J. Rodríguez, C. Andrade, L. Franceschini, J. S. Montero og F. Vecchi, «Experimental tests on shear capacity of naturally corroded prestressed beams», i *Structural Concrete*, vol. 21, nr. 5, s. 1777-1793, aug. 2020. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1002/suco.202000205
- [64] Z. Rinaldi, S. Imperatore og C. Valente, «Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams», i *Construction and Building Materials*, vol. 24, nr. 11, s. 2267-2278, april 2010. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.029
- [65] A. E. Menoufy og K. Soudki, «Flexural behavior of corroded pretensioned girders repaired with CFRP sheets», i *PCI Journal*, vol. 59, nr. 2, s. 129-143, 2014. [Online]. Hentet fra: doi: 10.15554/pcij.03012014.129.143
- [66] M. K. ElBatanouny, A. Nanni, P. H. Ziehl og F. Matta, «Condition Assessment of Prestressed Concrete Beams Using Cyclic and Monotonic Load Tests», i *ACI Structural Journal*, vol. 112, nr. 1, s. 81-90, jan. 2015. [Online]. Hentet fra: doi: 10.14359/51687181
- [67] *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger.*, NS-EN 1992-1-1:2004+A1:2014+NA:2018. 2018.
- [68] M. Elices et al., «Influence of material and processing on stress corrosion cracking of prestressing steel – case studies», International Federation for Structural Concrete (*fib*), Lausanne, Sveits. *Fib bulletin* 26, okt. 2003.
- [69] J. Han, J. H. Nam, Y. K. Lee, «The mechanism of hydrogen embrittlement in intercritically annealed medium Mn TRIP steel», i *Acta Materialia*, vol. 113, s. 1-10, juli 2016. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.actamat.2016.04.038

[70] H. Jia X. Zhang, J. Xu, Y. Sun og J. Li, «Effect of Hydrogen Content and Strain Rate on Hydrogen-induced Delay Cracking for Hot-Stamped Steel», i *Metals*, vol. 9, nr. 7, 798, juli 2019. [Online]. Hentet fra: doi:10.3390/met9070798

[71] F. Golkar, «Study on the effect of hydrogen content on the mechanical properties in press-hardened boron steel», Masteroppgave, Luleå tekniske universitet, Sverige, 2008. [Online]. Hentet fra: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-51260> Lastet ned: 31/5 2021.

[72] J. L. Smith og Y. P. Virmani, «Materials and Methods for Corrosion Control of Reinforced and Prestressed Concrete Structures in New Construction», Federal Highway Administration, Atlanta, Georgia; McLean, Virginia, USA, FHWA-RD-00-081 ,aug. 2000. [Online]. Hentet fra: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/00081.pdf> Lastet ned: 19/4 2021.

[73] U. F. Indgaard, «Analyse og kapasitetskontroll av betongelementbru med omfattende korrosjonsskader», Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Norge, 2018. Hentet fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2565571> Lastet ned: 14/1 2021.

[74] Statens vegvesen Vegdirektoratet, *Håndbok R412 Bruklassifisering*, 2014. [Online]. ISBN: 82-7207-537-7

[75] *Prosjektering av betongkonstruksjoner, Beregnings- og konstruksjonsregler*, NS3473. 2003

Vedlegg:

Vedlegg A:	SMARTere vedlikehold
Vedlegg B:	Tegninger av Hafrsfjord bru
Vedlegg C1:	Kapasitetsberegning av korrodert slakkarmering (Maple)
Vedlegg C2	Kapasitetsberegning av korrodert slakkarmering (Excel)
Vedlegg D1:	Kapasitetsberegning av korrodert spennarmering (Maple)
Vedlegg D2:	Kapasitetsberegning av korrodert spennarmering (Excel)
Vedlegg E:	Kapasitetsberegninger av Hafrsfjord bru

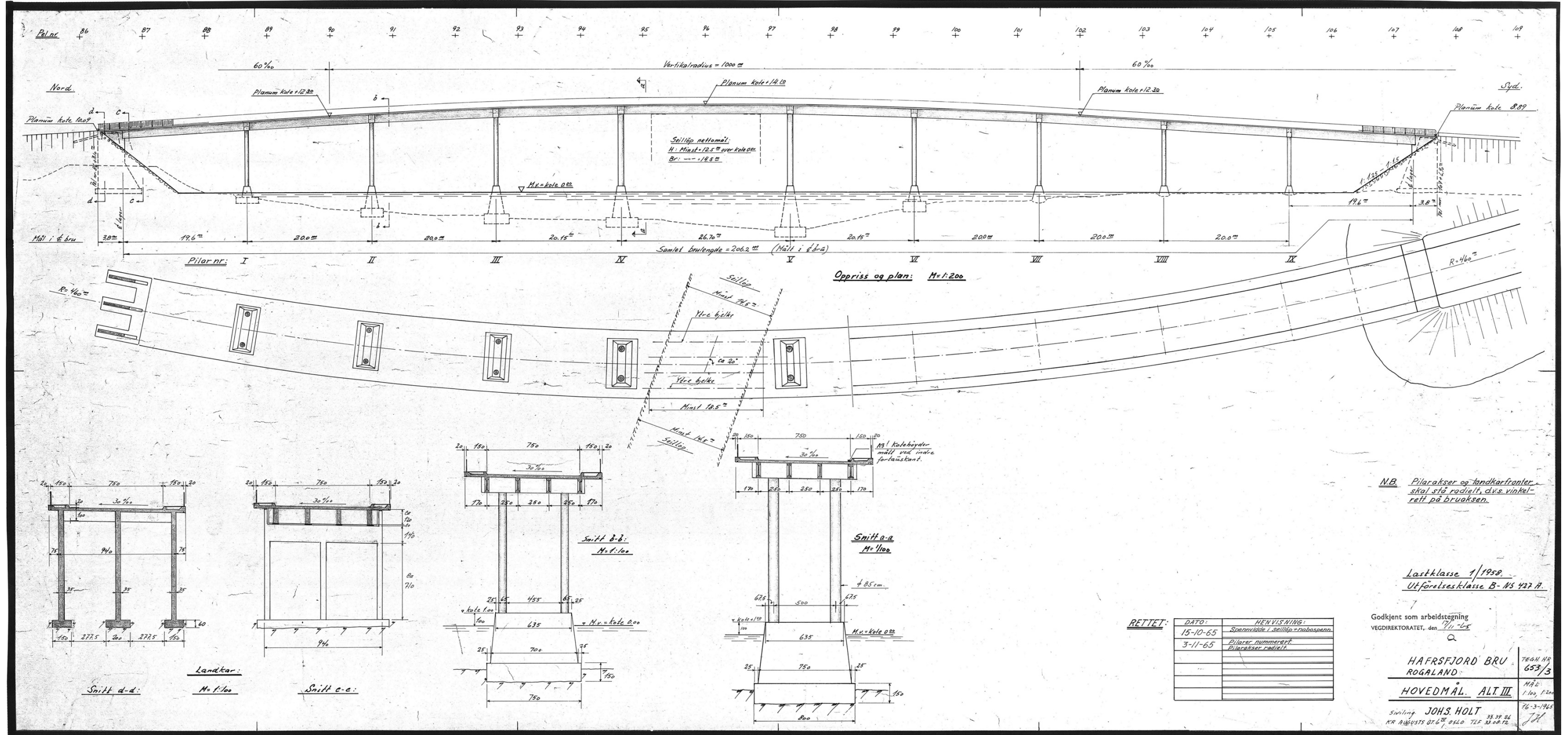
Vedlegg A – SMARTere vedlikehold, seminar 9. april

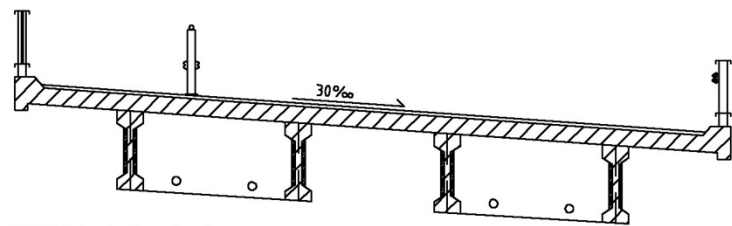
Statens Vegvesen har i samarbeid med NTNU startet opp forsknings- og utviklingsprosjektet SMARTere vedlikehold. Prosjektet startet opp i 2020 og avsluttes i 2026. I forbindelse med prosjektet er det høsten 2020 lyst ut 7 PhD-stillinger, innen ulike fagområder. I løpet av våren 2021 er det planlagt fire seminarer, hvorav dette er det andre i rekken. Temaet for dette seminaret var bruvedlikehold. Som en del av seminaret ble det først holdt foredrag med ulike innfallsvinkler: forskning, byggherre og rådgiverbransjen, før det til slutt ble gjennomført et gruppearbeid med diskusjon. Denne oppgaven ble presentert på seminaret som vist under.

8:50–9:00	Arrival and technical check		
9:00–9:10	Welcome remarks, Alex Klein-Paste		
9:10–9:55	BL	Jochen Köhler NTNU	Bridges and Structural Safety
09:55–10:00	Discussion		
10:00–10:20	IP	Diego L. Allaix TNO, The Netherlands	Assessment of the design value of traffic load effects for bridge reassessment
10:20–10:40	IP	Ronald Schneider BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung, Germany	Towards predictive maintenance of bridges: some recent research activities at BAM
10:40–11:00	IP	G. Ersdal, M. Sigvaldsen University in Stavanger	Ageing and Life Extension of Existing Structures
11:00–11:30	Discussion		
11:30–12:00	Lunch		
12:00–12:20	IP	Per Ove Ravatsås Nordland Fylkeskommune	Bridge management in a county municipality
12:20–12:40	Discussion		
12:40–12:50	Coffee		
12:50–13:10	IP	Hannes Ludescher Dr.techn.Olav Olsen AS	Experiences with bridge maintenance in Norway
13:10–13:30	IP	Gunnar Egset Johs Holt AS	Rehabilitation of Lepsøysund bru
13:30–14:00	Discussion		
14:00–14:10	Coffee		
14:10–15:30	GW	Frida Liljefors NTNU	A clear case?
15:30–15:45	Workshop Conclusions, Jochen Köhler		

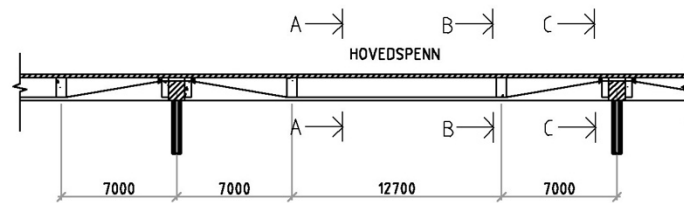
IP: Invited Presentation, BL: Background Lecture, GW: Groupwork.

Vedlegg B Tegninger av Hafrsfjord bru

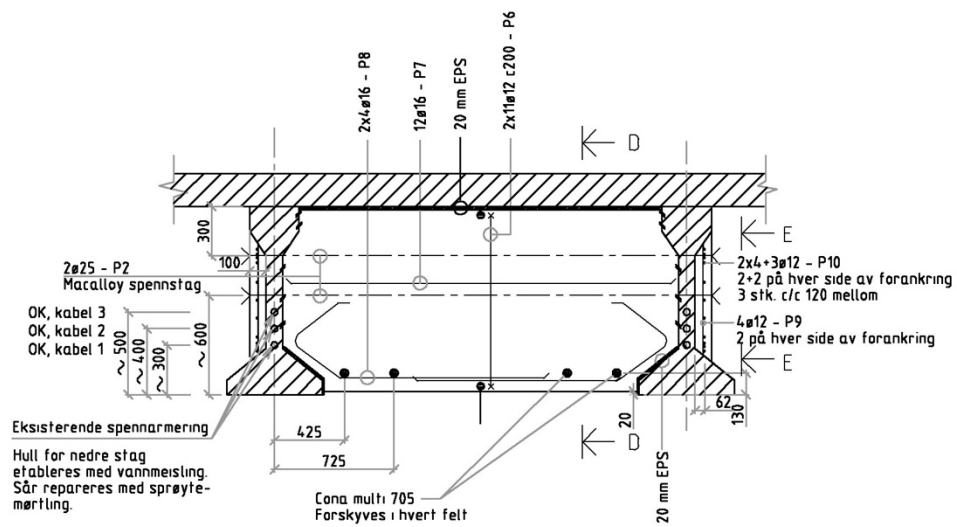




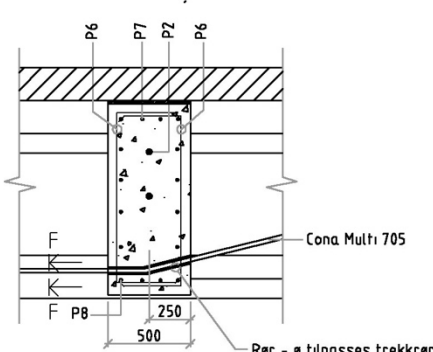
SNITT A-A Forsterkning
150



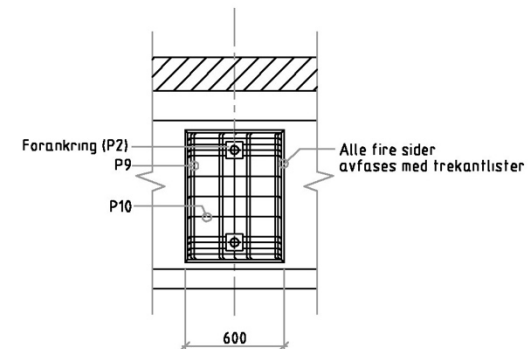
LENGDESNITT - Forsterkning
1200



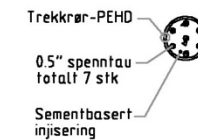
SNITT B-B: Omlenkning, felt
120



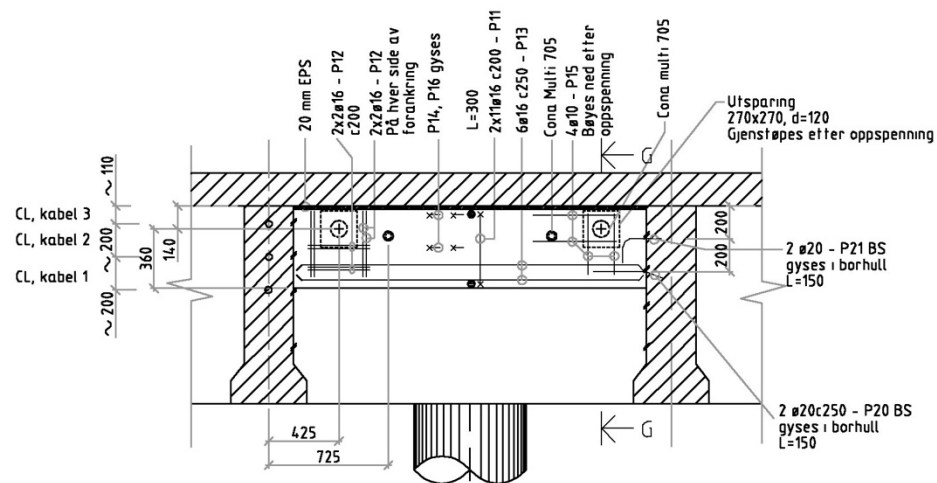
SNITT D-D
120



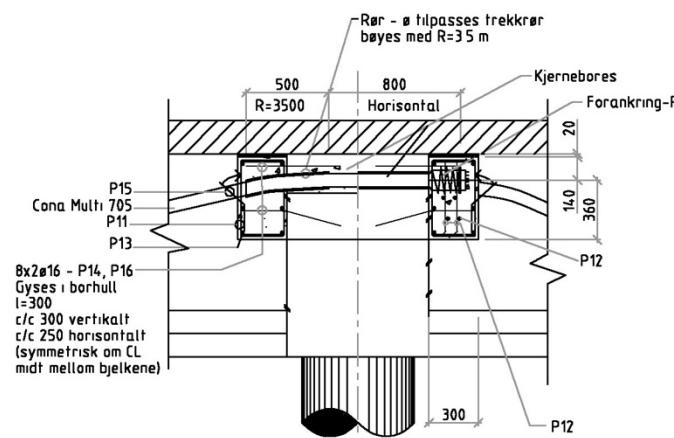
SNITT E-E
120



SNITT F-F



SNITT C-C Forankring/omlenkning, støtte
120



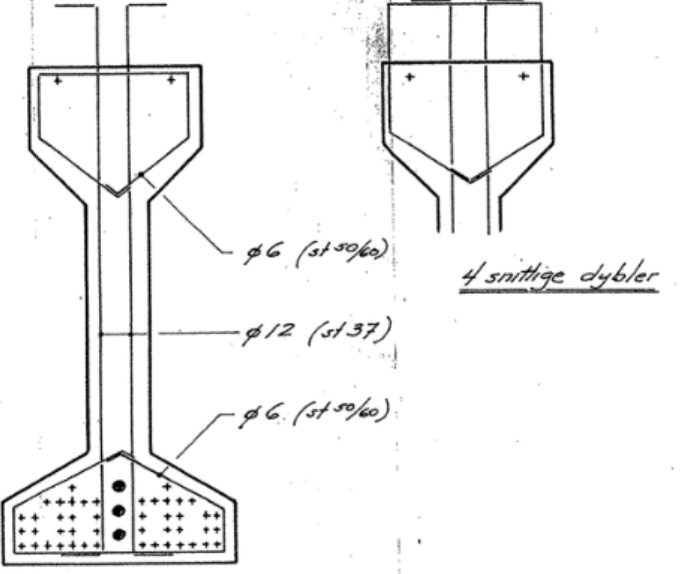
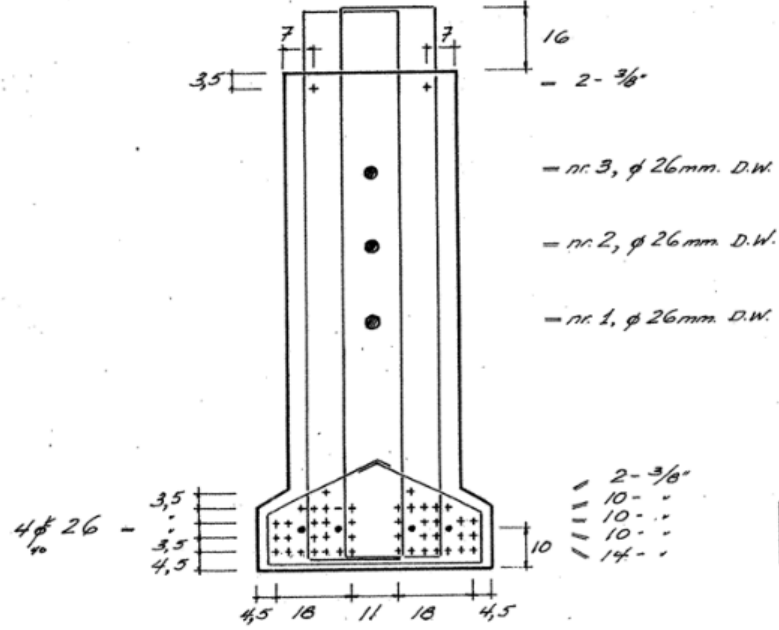
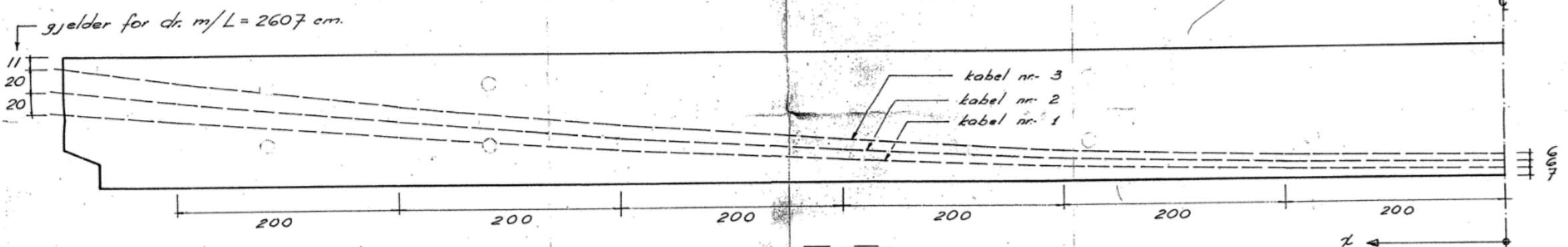
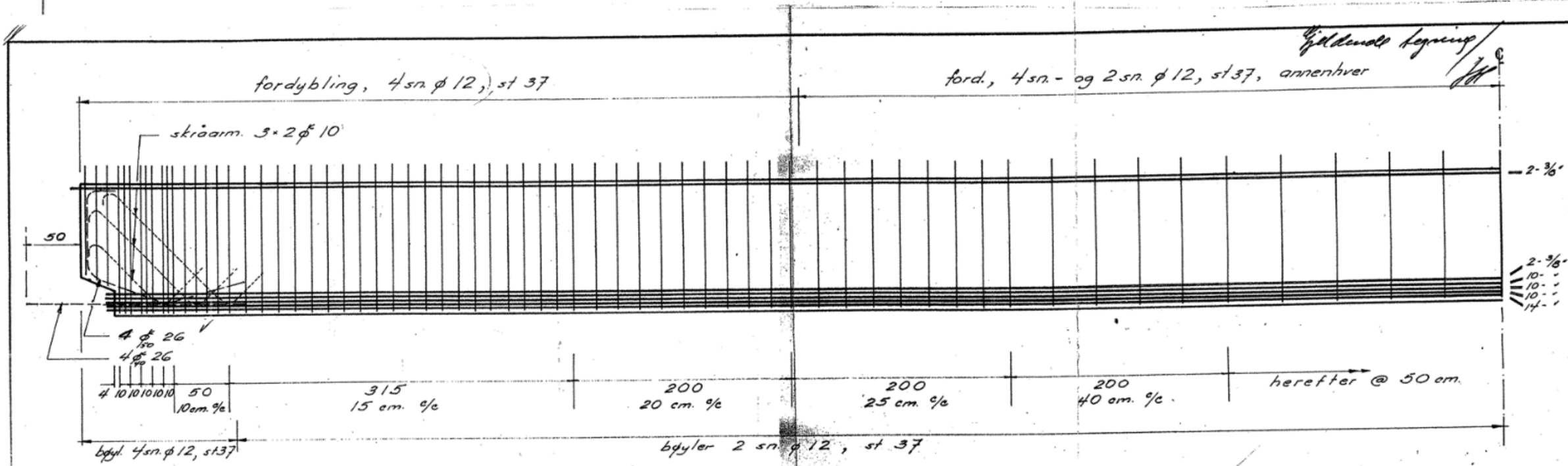
SNITT G-G
120

K105

MERKNADER

- ARMERING** Slakkarmering B500 C
Spennstag Macalloy Stainless - 25 mm
Spennkabler Cona Multi 705
Horisontale og oppadvendt dybiler gyses med Hilti Hit 100 eller liknende
- BETONG** C55 SV-40
- OVERDEKNING** 55 +/- 15 mm til bærende armering
- FORBEHANDLING** Betong dekk skal støpes mot skal sandblåses på forhånd og forvannes evt
- TVERRSTAG** Alt stål inklusive plater og forankringer i stainless kvalitet.
- MACALLOY** Hull gjennom bjelker gyses etter oppspenning
Forankring skal være kon mot ankerplate for å unngå vinkel endringer
- CONA MULTI** Spennes til 850 kN pr kabel
Oppspenning i to etapper
1: Begge kabler til 400 kN
2: Begge kabler til 850 kN (kompensert for alle tap)
Korrosjonsbeskyttelse av PEHD-trekktrær injisert med sementbasert mørtel.
Forankringer gjenstøpes.
Toleranse, boring av hull i tverrbærere +/- 25 mm

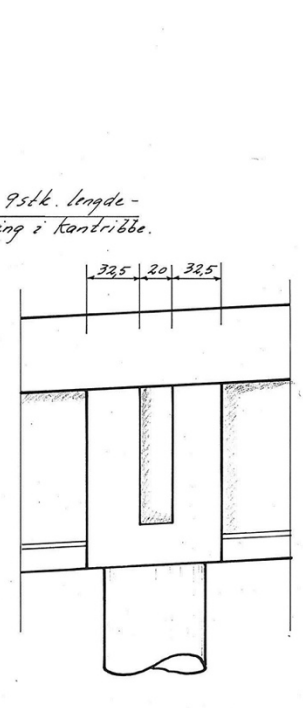
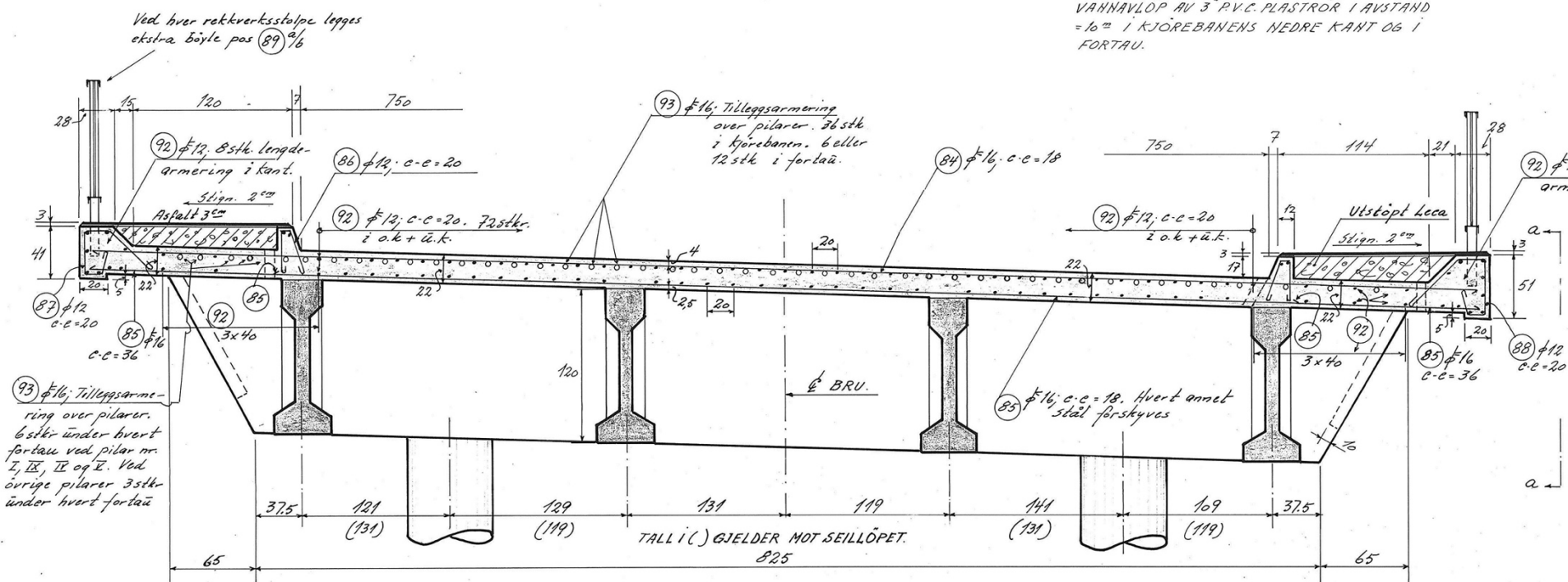
A Arbeids tegning		KNG	HP	KNG	20 07 00
Rev	Beregnet godkjent	Utlært	Kontroll	Prosjekt	Dato
		Statens vegvesen Vegdirektoratet Bruværdelingen			
Dato	07 00	Saksbehandler	KNG		
D.K.	IMJ	Kontroll	HP		
HAFRSFJORD BRU Vedlikehold betong Forsterkning hovedspenn		Prosjekt ansvarlig: KNG			
Prosjekt ansvarlig: KNG		Målestokk: 1:20, 1:50, 1:200		Høi: mm	
Prosjekt ansvarlig: KNG		Filnavn: Bruværd/hafrsfjord/bruK105		Tegnet av: 11-0676-K105	
Prosjekt ansvarlig: KNG		Rev: A		Godkjent som arbeidstegning av Statens vegvesen Vegdirektoratet, Bruværdelingen i brev av 20.07.00	
Dato: 20 07 00		Kvalitetssjef: Knut Næss (sign)			



ord. & fra u.k. drager	2	2m.	4	6	8	10	12
kabel nr. 1		8,46	12,83	20,13	30,33	43,46	59,50
kabel nr. 2		14,79	20,15	29,09	41,60	57,69	77,35
kabel nr. 3		21,12	27,47	38,05	52,87	71,93	95,22

MOTTAT: 27. AUG. 1966

HAFRSFJORD-BRO		Plietokk	Tegn. I.L. 10/6-66
SPENN MED L=27 m.			Trac.
4 stk. IBB 41-56/120		Erstatning for:	ESKE 5-P
G =			
9/8 STORBULL-SPENNBETONG		Erstatning nr.:	

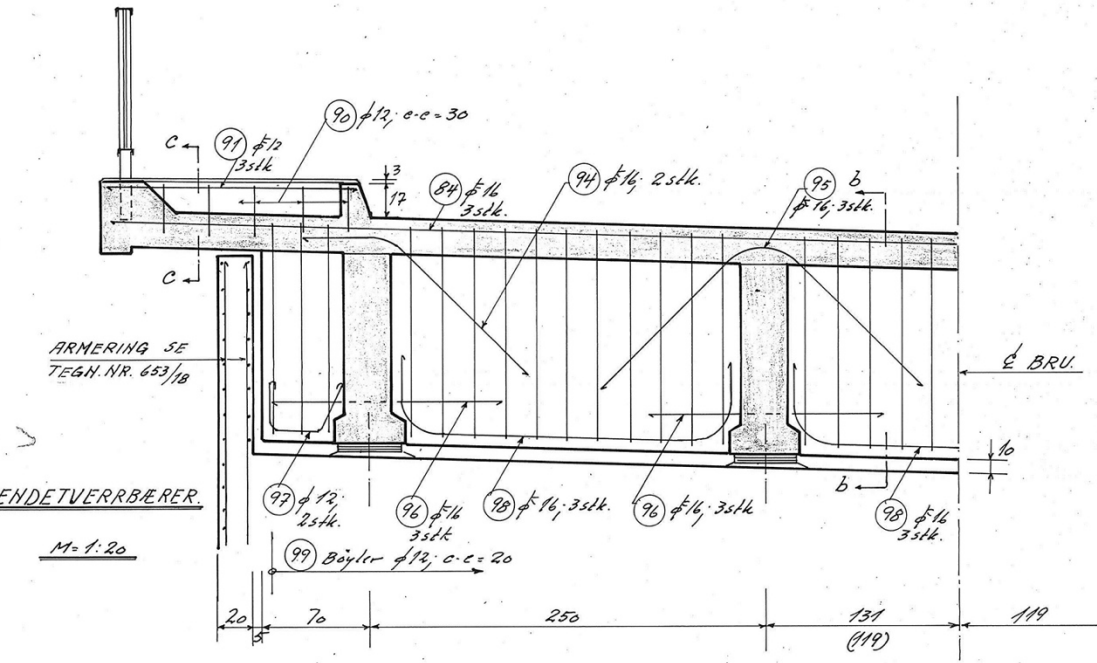


ARMERING I KJØREBANE

TVERRBÆRER - a-a.

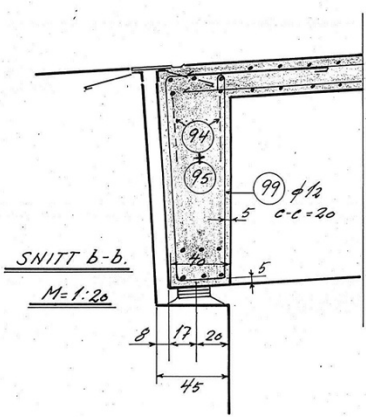
M=1:20

BETONG B-300
KAMSTÅL Ks. 40
GLATT STÅL ST. 00.



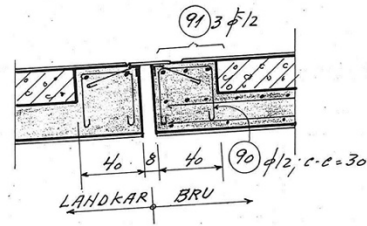
ENDETVERRBÆRER

M=1:20



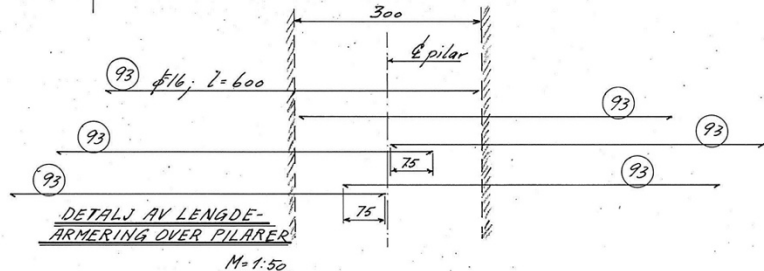
SNITT b-b.

M=1:20



SNITT c-c.

M=1:20

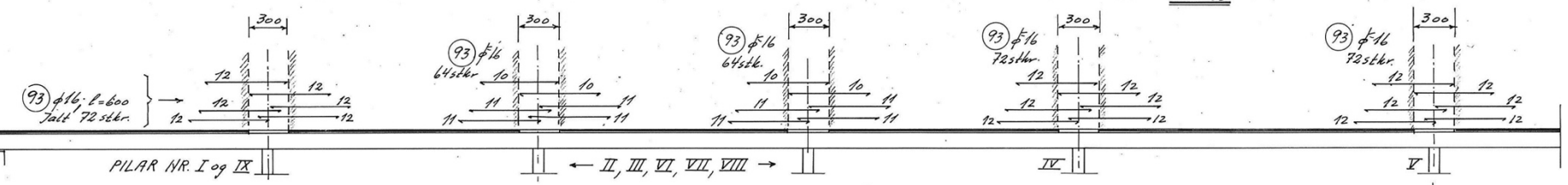


DETALJ AV LENGDE-ARMERING OVER PILARER

M=1:50

TILLEGGSARMERING OVER PILARER:

M=1:200



PILAR NR. I og IX

HAFRSFJORD BRU
ROGALAND

ARMERING I KJØREBANEH.
ENDETVERRBÆRER.

SIVILING. JOHS. HOLT
KR. AUGUSTS GT. 6^{TE} OSLO. TLF. 33 39 26

TEGN. NR.
653/21

MÅL:
1:20

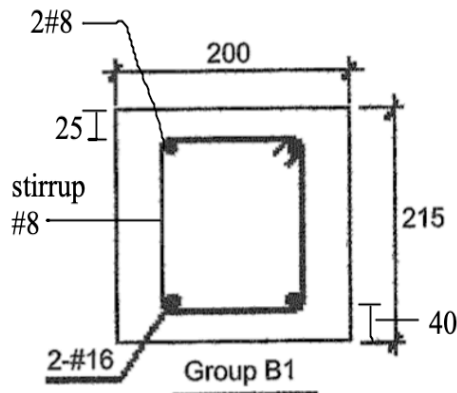
28. 2. 1966
J.H.

TVERRARMERING I KJØREBANEN LEGGES RADIET OG MED SAMME SENTERAVSTAND OVER HELE BRUA. SENTERAVSTAND MÅLES VED BRUAS SENTERLINJE. OVER HVER PILAR SETTES IÅJEN ET ÅPENT, 30^{TE} BREDT FELT HVOR ALL LENGDEARMERING SKJØTES. TILLEGGS-ARMERING LEGGES OG SKJØTES SOM VIST PÅ NEDENSTÅENDE DETALJER. ORDINER LENGDEARMERING SKJØTES MED OMFØRING ≈ 0,50^{TE} PÅ TILFELDIGE STEDER INNEN SAMME FELT. UNDER LAG AV ORDINER LENGDEARMERING BYTTES HELT OVER Æ TVERRBÆRERE. SE TEGN. 653/20

Vedlegg C1

Kapasitetsberegning av korrodert slakkarmering

Bjelke B1-1 i gruppe 2, fra forsøk 2 blir her beregnet. Beregning av resterende bjelker følger i Excel.



Momentkapasitet til ikke-korrodert tverrsnitt:

> restart;

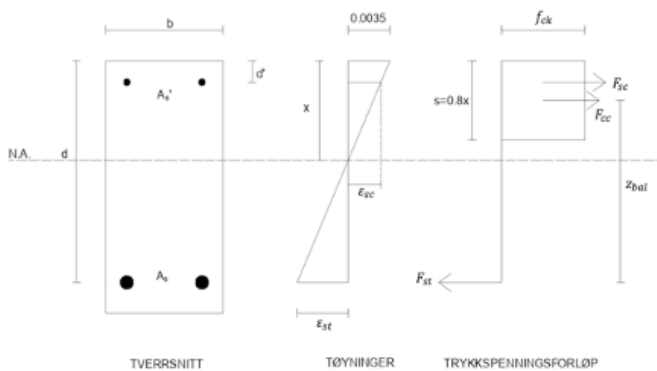
> $F_{st} := F_{cc} + F_{sc};$

$$F_{st} := F_{cc} + F_{sc} \quad (1)$$

> $F_{st} := f_{yk} \cdot A_s; \quad F_{cc} := f_{ck} \cdot b \cdot s; \quad F_{sc} := f_{sc} \cdot A_{s'};$

> $M := F_{cc} \cdot \left(d - \frac{s}{2} \right) + F_{sc} \cdot (d - d_i);$

$$M := f_{ck} b s \left(d - \frac{s}{2} \right) + f_{sc} A_{s'} (d - d_i) \quad (2)$$



> $\epsilon_{sc} := \text{simplify} \left(\text{solve} \left(\frac{0.0035}{x} = \frac{\epsilon_{sc}}{x - d_i}, \epsilon_{sc} \right) \right);$

> $f_{sc} := \epsilon_{sc} \cdot E_s;$

$$\begin{aligned}
 &> s := 0.8 \cdot x : \\
 &> F_{st} = F_{cc} + F_{sc}; \\
 & \quad f_{yk} A_s = 0.8 f_{ck} b x + \frac{(0.0035 x - 0.0035 d_s) E_s A_{s'}}{x} \tag{3}
 \end{aligned}$$

$$> f_{ck} := 28 : f_{yk} := 593 : E_s := 200 \cdot 10^3 :$$

$$> \phi_L := 16 : \phi_{L'} := 8 : \phi_S := 8 :$$

$$> c_{nom} := 40 : c_{nom'} := 25 :$$

$$> A_s := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_L}{2} \right)^2 : A_{s'} := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_{L'}}{2} \right)^2 :$$

$$> b := 200 : h := 215 : d := h - c_{nom} - \phi_S - \frac{\phi_L}{2} : d_s := c_{nom'} + \phi_S + \frac{\phi_{L'}}{2} :$$

$$> F_{st} = F_{cc} + F_{sc} :$$

$$> x := \text{solve}(F_{st} = F_{cc} + F_{sc}, x, \text{useassumptions}) \text{ assuming } x :: \text{positive} :$$

$$\begin{aligned}
 &> M_{Rd} := \text{evalf} \left(\left(F_{cc} \cdot \left(d - \frac{s}{2} \right) + F_{sc} \cdot (d - d_s) \right) \cdot 10^{-6} \right); \\
 & \quad M_{Rd} := 32.90850733 \tag{4}
 \end{aligned}$$

Momentkapasitet til korrodert tverrsnitt:

> restart,

$$> F_{st} := F_{cc} + F_{sc};$$

$$F_{st} := F_{cc} + F_{sc} \tag{5}$$

$$> F_{st} := f_{yk} \cdot A_s : F_{cc} := f_{ck} \cdot b \cdot s : F_{sc} := f_{sc} \cdot A_{s'} :$$

$$> M := F_{cc} \cdot \left(d - \frac{s}{2} \right) + F_{sc} \cdot (d - d_s);$$

$$M := f_{ck} b s \left(d - \frac{s}{2} \right) + f_{sc} A_{s'} (d - d_s) \tag{6}$$

$$> \epsilon_{sc} := \text{simplify} \left(\text{solve} \left(\frac{0.0035}{x} = \frac{\epsilon_{sc}}{x - d_s}, \epsilon_{sc} \right) \right);$$

$$> f_{sc} := \epsilon_{sc} \cdot E_s :$$

$$> s := 0.8 \cdot x :$$

$$> F_{st} = F_{cc} + F_{sc} :$$

$$> f_{ck} := 28 : f_{yk} := 593 : E_s := 200 \cdot 10^3 :$$

>

$$> \phi_L := 16 : \phi_{L'} := 8 : \phi_S := 8 :$$

> $c_{nom} := 40$: $c_{nom'} := 25$:

> $b := 200$: $h := 215$: $d := h - c_{nom} - \phi_S - \frac{\phi_L}{2}$: $d' := c_{nom'} + \phi_S + \frac{\phi_{L'}}{2}$:

> $A_s := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_L}{2}\right)^2$: $A_{s'} := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_{L'}}{2}\right)^2$:

vekttapet er på 3.5%

> $vt := 3.5$:

> $\phi_{L_korr} := \frac{\phi_L \cdot (100 - vt)}{100} - \frac{2.318 \cdot 1.62}{100} \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_L \cdot (100 - vt)}{100}$;

$\phi_{L_korr} := 14.42535577$ (7)

> $A_{s_korr} := \pi \cdot \left(\frac{\phi_{L_korr}}{2}\right)^2 \cdot 2$

$A_{s_korr} := 326.8684042$ (8)

> $\phi_L := \phi_{L_korr}$:

> $A_s := A_{s_korr}$:

> $x := solve(F_{st} = F_{cc} + F_{sc}, x, useassumptions)$ assuming $x :: positive$:

> $M_{Rd_corr} := evalf\left(\left(F_{cc} \cdot \left(d - \frac{s}{2}\right) + F_{sc} \cdot (d - d')\right) \cdot 10^{-6}\right)$;

$M_{Rd_corr} := 27.44118791$ (9)

>

Vedlegg C2

Kapasitetsberegning av korrodert slakkarmering

Forsøk	Bjelker Gruppe	Størrelse b h	Armering c _{nom}	Korrosjon								L				
				Korrosjonsstrømtetthet	Tid (dager)	I _{corr}	% vekt tapp	J _r	I _{corr} *T	P _r	P _r *T		D'	D'/ØL	As	As'
1	BT1	10	25	BT1-2-4	2	4	1,03	5,4	9,37	4,12	1,1936	0,0131	9,74	0,97	157,1	148,97
				BT1-3-4	3	4	1,72	14,2	24,8	10,88	3,1631	0,0347	9,31	0,93	157,1	136,05
				BT1-2-6	2	6	2,97	15,2	18	11,82	2,2879	0,0376	9,25	0,92	157,1	134,34
	BT1-3-6	3	6	2,74	21,4	25	16,44	3,1847	0,0524	8,95	0,90	157,1	125,91			
	BT1-2-8	2	8	2,18	21,5	19,9	17,44	2,5401	0,0557	8,89	0,89	157,1	124,05			
	BT1-3-8	3	8	2,99	31	27,3	23,92	3,4815	0,0763	8,47	0,85	157,1	112,79			
	BT2-2-4	2	4	1,25	5,5	11,4	5	1,4522	0,0159	11,68	0,97	226,2	214,35			
	BT2-3-4	3	4	1,96	8,8	17,9	7,84	2,2828	0,0250	11,50	0,96	226,2	207,73			
	BT2-2-6	2	6	2,99	20,1	27,4	17,94	3,4841	0,0573	10,85	0,90	226,2	185,07			
	BT2-3-6	3	6	2,09	14	19,1	12,54	2,4293	0,0399	11,20	0,93	226,2	197,09			
	BT2-2-8	2	8	2,58	22,9	23,5	20,64	2,9975	0,0657	10,69	0,89	226,2	179,37			
BT2-3-8	3	8	2,62	25,5	23,9	20,96	3,0420	0,0667	10,67	0,89	226,2	178,72				
BT3-2-4	2	4	1,52	8	13,9	6,08	1,7682	0,0194	9,61	0,96	157,1	145,14				
BT3-3-4	3	4	1,73	9,1	15,8	6,92	2,0064	0,0220	9,56	0,96	157,1	143,57				
BT3-2-6	2	6	1,28	10,1	11,7	7,68	1,4930	0,0245	9,51	0,95	157,1	142,04				
BT3-3-6	3	6	2,21	17,6	20,2	13,26	2,5707	0,0423	9,15	0,92	157,1	131,65				
BT3-2-8	2	8	2,02	21,4	18,4	16,16	2,3452	0,0514	8,97	0,90	157,1	126,44				
BT3-3-8	3	8	3,13	34,8	28,5	25,04	3,6357	0,0797	8,41	0,84	157,1	111,00				
BT4-2-4	2	4	1,74	7,9	15,8	6,96	2,0140	0,0221	11,56	0,96	226,2	209,86				
BT4-3-4	3	4	2,49	10,9	22,7	9,96	2,8904	0,0317	11,37	0,95	226,2	202,94				
BT4-2-6	2	6	2,03	13,4	18,5	12,18	2,3592	0,0388	11,22	0,94	226,2	197,90				
BT4-3-6	3	6	2,8	18,6	25,6	16,8	3,2611	0,0536	10,93	0,91	226,2	187,58				
BT4-2-8	2	8	2,08	18	19	16,64	2,4217	0,0531	10,94	0,91	226,2	187,95				
BT4-3-8	3	8	2,37	20,7	21,6	18,96	2,7516	0,0603	10,79	0,90	226,2	183,01				

f _c	f _c mean	f _y	Es	ØL	ØL'	Øs	c _{nom}	c _{nom} '	As	As'	d	d'	x(a)	x(b)	x(c)
38,91	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
36,89	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
45,77	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
46,45	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
46,45	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
39,94	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
35,68	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
44,45	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
44,21	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
44,69	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
37,66	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
40,18	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
35,68	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
44,21	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
36,89	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
46,49	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
46,49	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
40,94	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
40,94	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
37,66	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097

Forsøk	Bjelker Gruppe	Størrelse b h	Armering c _{nom}	Korrosjon										L			
				Korrosjonsstrømtetthet	Tid (dager)	I _{corr}	% vekt tapp	avg vt	J _r	I _{corr} *T	P _r	P _r *T	D'		D'/ØL	As	As'
1	B1	215	1,77	B1-1	6	0,71	3,5	83,38	6,49	4,27	0,827	0,014	15,728	0,98	402,1	388,58	155,32
				B1-2	10	0,73	6	143,88	6,68	7,32	0,851	0,023	15,534	0,97	402,1	379,03	156,41
				B1-3	4	1,26	4,13	98,04	11,5	5,04	1,465	0,016	15,679	0,98	402,1	386,15	154,75
	B1-4	14	1,38	15,85	379,60	12,6	19,32	1,604	0,062	14,770	0,92	402,1	342,66	156,3			
	B1-5	10	0,36	2,95	70,85	3,29	3,60	0,419	0,011	15,770	0,99	402,1	390,66	156,46			
	B1-6	14	1,38	15,83	379,13	12,6	19,30	1,603	0,061	14,771	0,92	402,1	342,70	156,25			
	B2-1	10	1,44	11,82	342,47	13,2	14,41	1,675	0,046	15,082	0,94	402,1	357,31	189,08			
	B2-2	8	1,5	9,86	287,21	13,7	12,02	1,746	0,038	15,234	0,95	402,1	364,56	190,12			
	B2-3	15	1,52	18,74	541,95	13,9	22,85	1,771	0,073	14,545	0,91	402,1	332,30	188,7			
	B2-4	15	1,42	17,53	511,95	13	21,37	1,656	0,068	14,639	0,91	402,1	336,62	190,54			
	B2-5	20	1,56	25,53	742,32	14,2	31,13	1,809	0,099	14,018	0,88	402,1	308,65	189,69			
B2-6	20	1,57	25,81	750,97	14,4	31,47	1,829	0,100	13,995	0,87	402,1	307,67	189,85				
B3-1	10	1,63	13,34	388,27	14,8	16,27	1,890	0,052	14,964	0,94	402,1	351,74	189,85				
B3-2	15	1,45	17,85	518,88	13,2	21,76	1,687	0,069	14,614	0,91	402,1	335,46	189,7				
B3-3	5	1,47	6,02	169,65	13,4	7,34	1,706	0,023	15,533	0,97	402,1	378,98	183,93				
B3-4	4	1,78	5,84	166,03	16,3	7,12	2,070	0,023	15,546	0,97	402,1	379,64	185,41				
B3-5	20	1,6	26,29	759,32	14,6	32,05	1,862	0,102	13,959	0,87	402,1	306,08	188,45				
B3-6	3	1,88	4,63	130,94	17,2	5,65	2,189	0,018	15,640	0,98	402,1	384,24	184,36				
B4-1	6	1,2	5,28	161,27	11	7,22	1,397	0,023	17,541	0,97	508,9	483,29	158,02				
B4-2	10	1,29	9,4	287,58	11,7	12,86	1,494	0,041	17,181	0,95	508,9	463,69	158,15				
B4-3	12	1,28	11,27	345,45	11,7	15,41	1,493	0,049	17,018	0,95	508,9	454,94	158,5				
B4-4	13	1,29	12,26	447,42	11,8	16,77	1,499	0,053	16,932	0,94	508,9	450,33	188,65				
B4-5	20	1,37	20,09	736,88	12,5	27,48	1,597	0,088	16,249	0,90	508,9	414,76	189,62				
B4-6	20	1,44	21,06	774,77	13,1	28,80	1,674	0,092	16,166	0,90	508,9	410,49	190,25				
B5-1	10	1,24	9,1	333,53	11,4	12,44	1,446	0,040	17,208	0,96	508,9	465,12	189,54				
B5-2	10	1,3	9,53	348,11	11,9	13,03	1,515	0,041	17,170	0,95	508,9	463,09	188,97				
B5-3	15	0,87	9,53	339,60	7,93	13,03	1,010	0,042	17,170	0,95	508,9	463,07	184,29				
B5-4	10	0,79	5,76	205,79	7,19	7,88	0,916	0,025	17,498	0,97	508,9	480,95	184,77				
B5-5	20	0,97	14,18	504,44	8,85	19,39	1,127	0,062	16,765	0,93	508,9	441,47	183,93				
B5-6	20	1,22	17,8	637,60	11,1	24,35	1,415	0,078	16,449	0,91	508,9	425,01	185,2				
B6-1	6	1,29	5,67	201,39	11,8	7,76	1,503	0,025	17,506	0,97	508,9	483,38	183,55				
B6-2	2	0,95	1,39	49,29	8,66	1,90	1,103	0,006	17,879	0,99	508,9	502,12	183,55				
B6-3	5	1,28	4,69	166,76	11,7	6,41	1,490	0,020	17,592	0,98	508,9	486,11	183,9				
B6-4	15	0,92	10,08	365,15	8,38	13,78	1,068	0,044	17,123	0,95	508,9	460,53	187,4				
B6-5	4	1,15	3,37	119,63	10,5	4,60	1,338	0,015	17,707	0,98	508,9	492,49	183,8				
B6-6	20	1,37	20,02	733,16	12,5	27,38	1,591	0,087	16,256	0,90	508,9	415,11	189,35				

Videre kalkulasjoner er basert på Mrd.corr (%vt+ største grup)

Kalkulasjoner basert på foreslått beregningsmodell

Ekperimentelle verdier fra
Azad et al (2007) og Al-Gohi (2008)

Teoretiske verdier fra
Azad et al (2007) og Al-Gohi (2008)

Mrd	Mrd.corr	R (Mrd.corr/Mrd)
10,15	8,32	82,0
	6,18	60,9
	5,99	59,1
	5,04	49,7
	5,03	49,5
14,18	4,15	40,9
	11,20	78,9
	9,72	68,5
	6,20	43,7
	7,84	55,2
8,92	5,63	39,7
	5,19	36,6
	6,84	76,7
	6,61	74,1
	6,41	71,9
12,18	5,21	58,4
	4,77	53,5
	3,88	43,4
	8,87	72,8
	7,89	64,8
11,64	7,19	59,0
	5,99	49,2
	6,11	50,2
	5,60	46,0

M.exu (contr	M.exc	R (M.exc/M.exu)
11,64	10,68	91,8
	10,15	87,2
	10,46	89,9
	9,15	78,6
	7,82	67,2
14,8	6,48	55,7
	12,76	86,2
	11,97	80,9
	10,43	70,5
	10,55	71,3
11,76	8,88	60,0
	8,49	57,4
	10,92	92,9
	10,19	86,6
	9,88	84,0
13,13	9,28	78,9
	9,12	77,6
	6,6	56,1
	12,03	91,6
	10,93	83,2
10,48	10,02	76,3
	8,98	68,4
	9	68,5
	7,57	57,7

M.thu (theor	M.thc	R (M.thc/M.thu)
10,48	9,69	92,5
	8,95	85,4
	9,38	89,5
	9	85,9
	8,17	78,0
14,02	8,35	79,7
	13,65	97,4
	13,04	93,0
	12,4	88,4
	13,02	92,9
10,15	12,13	86,5
	11,69	83,4
	9,32	91,8
	8,83	87,0
	8,54	84,1
13,04	8,96	88,3
	8,04	79,2
	7,55	74,4
	11,92	91,4
	12,54	96,2
10,48	12,33	94,6
	11,46	87,9
	11,48	88,0
	10,98	84,2

MRd.corr-M.exc
-3,32
-5,46
-5,65
-6,60
-6,61
-7,49
-3,60
-5,08
-8,60
-6,96
-9,17
-9,61
-4,26
-5,15
-5,35
-6,55
-6,99
-7,88
-4,26
-5,24
-5,94
-7,14
-7,02
-7,53

R (MRd/M.exu)	R (MRd/M.thu)	R (M.exu/M.thu)	R (Mrd.corr/M.exc)	R (Mrd.corr/M.thc)	R (M.exc/M.thc)
87,19	96,84	111,07	77,93	85,89	110,22
			60,90	69,06	113,41
			57,30	63,90	111,51
			55,10	56,02	101,67
			64,31	61,55	95,72
95,84	101,18	105,56	63,99	49,66	77,60
			87,74	82,02	93,48
			81,22	74,56	91,79
			59,47	50,02	84,11
			74,27	60,18	81,03
75,89	87,92	115,86	63,41	46,42	73,21
			61,08	44,36	72,63
			62,66	73,41	117,17
			64,88	74,88	115,40
			64,91	75,09	115,69
92,79	93,43	100,69	56,15	58,16	103,57
			52,31	59,33	113,43
			58,73	51,34	87,42
			73,73	74,41	100,92
			72,23	62,95	87,16
106,08	102,24	96,37	71,73	58,29	81,27
			66,71	52,27	78,36
			67,90	53,23	78,40
			73,99	51,01	68,94

calculations doubly reinf

experiment

theoretical

Mrd	Mrd.corr	R (Mrd.corr/Mrd)
32,91	27,44	83,4
	23,92	72,7
	26,52	80,6
	13,23	40,2
	28,26	85,9
44,83	13,25	40,3
	22,62	50,5
	25,57	57,0
	14,29	31,9
	15,53	34,6
56,75	8,82	19,7
	8,64	19,3
	25,55	45,0
	18,75	33,0
	40,46	71,3
38,93	40,90	72,1
	10,00	17,6
	43,89	77,3
	29,61	76,1
	23,38	60,0
53,56	20,87	53,6
	19,63	50,4
	11,74	30,2
	10,99	28,2
	32,11	59,9
68,20	31,27	58,4
	31,27	58,4
	39,17	73,1
	23,19	43,3
	18,09	33,8
19,09	49,77	73,0
	63,34	92,9
	52,69	77,3
	37,99	55,7
	56,80	83,3
34,31	24,36	72,12
	15,9937064	

M.exu (contr	M.exc	R (M.exc/M.exu)
32,2	31,5	97,8
	28,18	87,5
	18,38	57,1
	22,4	69,6
	30,98	96,2
42,26	17,33	53,8
	36,58	86,6
	40,95	96,9
	24,33	57,6
	26,95	63,8
58,1	26,6	62,9
	20,48	48,5
	37,63	64,8
	36,05	62,0
	52,5	90,4
41,12	40,90	95,2
	35,7	61,4
	57,58	99,1
	33,6	81,7
	22,23	54,1
50,84	22,75	55,3
	23,1	56,2
	18,73	45,5
	16,1	39,2
	31,15	61,3
67,21	38,15	75,0
	29,75	58,5
	40,95	80,5
	25,55	50,3
	25,2	49,6
19,09	58,98	87,8
	65,98	98,2
	57,4	85,4
	36,93	54,9
	48,48	72,1
33,49	30,32	89,52
	18,4586165	5,84264921

M.thu (theor	M.thc	R (M.thc/M.thu)
31,93	31,09	97,4
	30,49	95,5
	30,94	96,9
	28,1	88,0
	31,23	97,8
43,85	28,1	88,0
	39,67	90,5
	40,36	92,0
	37,25	84,9
	37,67	85,9
55,78	34,92	79,6
	34,82	79,4
	49,57	88,9
	47,51	85,2
	52,96	94,9
37,24	53,04	95,1
	43,74	78,4
	53,61	96,1
	35,88	96,3
	34,79	93,4
51,88	34,29	92,1
	34,03	91,4
	31,94	85,8
	31,68	85,1
	48,25	93,0
66,53	48,08	92,7
	48,08	92,7
	49,59	95,6
	46,22	89,1
	44,78	86,3
19,09	63,48	95,4
	65,8	98,9
	64,01	96,2
	61,11	91,9
	64,73	97,3
33,49	55,85	83,9

MRd.corr-M.exc
-4,06
-4,26
8,14
-9,17
-2,72
-4,08
-13,96
-15,38
-10,04
-11,42
-17,78
-11,84
-12,08
-17,30
-12,04
-14,40
-25,70
-13,69
-3,99
1,15
-1,88
-3,47
-6,99
-5,11
0,96
-6,88
1,52
-1,78
-2,36
-7,11
-9,21
-2,64
-4,71
1,06
8,32
-15,91

(MRd/M.exu)	(MRd/M.thu)	(M.exu/M.thu)	(Mrd.corr/M.exc)	(Mrd.corr/M.thc)	(M.exc/M.thc)
102,20	103,06	100,85	87,11	88,26	101,32
			84,89	78,45	92,42
			144,30	85,72	59,41
			59,07	47,09	79,72
			91,22	90,49	99,20
106,08	102,24	96,37	76,45	47,15	61,67
			61,84	57,02	92,21
			62,44	63,36	101,46
			58,75	38,37	65,32
			57,63	41,23	71,54
97,68	101,75	104,16	33,15	25,25	76,17
			42,18	24,81	58,82
			67,90	51,55	75,91
			52,02	39,47	75,88
			77,07	76,40	99,13
94,68	104,55	110,42	73,95	77,10	104,26
			28,02	22,87	81,62
			76,23	81,87	107,41
			88,13	82,53	93,65
			105,15	67,19	63,90
105,36	103,25	98,00	91,75	60,87	66,35
			84,98	57,69	67,88
			62,70	36,77	58,64
			68,24	34,68	50,82
			103,08	66,55	64,56
101,47	102,51	101,02	81,96	65,03	79,35
			105,10	65,03	61,88
			95,66	78,99	82,58
			90,75	50,17	55,28
			71,80	40,41	56,28
8,687173995	5,042484749	5,972705493	84,38	78,40	92,91
			96,00	96,26	100,27
			91,80	82,32	89,67
			102,88	62,17	60,43
			117,16	87,75	74,90
0,090568036	0,090568036	0,090568036	54,55	34,18	62,67

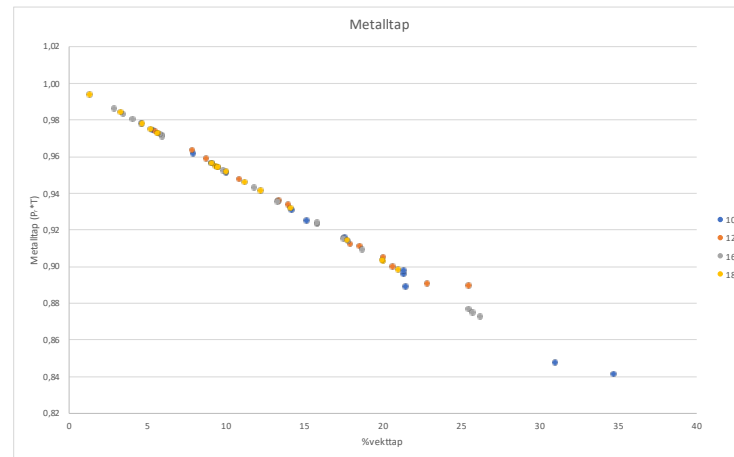
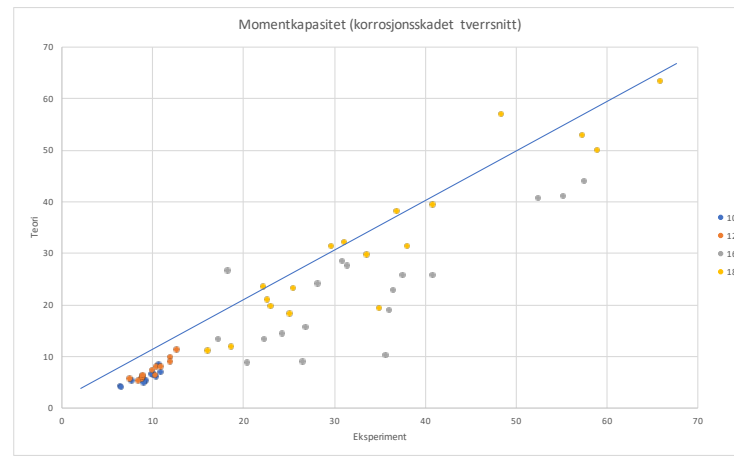
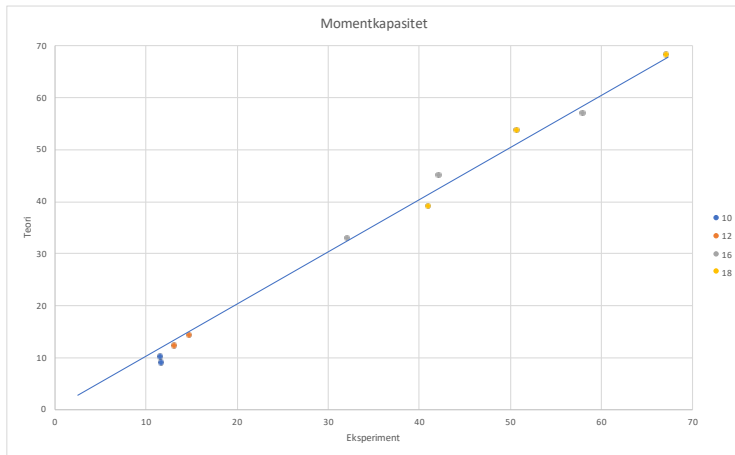
Gjennom: 34,06 18,91 55,87
Standard 20,6858429 14,7771222 18,5076203
CoV

34,31 24,36 72,12
19,7162609 15,6980304 15,9937064

33,49 30,32 89,52
19,8040466 18,4586165 5,84264921

-6,71
5,69704423
CoV

95,92 99,67 104,40 73,72 61,19 83,99
8,687173995 5,042484749 5,972705493 19,75346271 17,64475194 18,04488056
0,090568036 0,090568036 0,090568036



%vekttap + middelvei grop

Forsøk	Bjelker Gruppe	tørrelse (bxh)		Immersjonsstøtverdekn	Korrosjon													
		Spesifikas	b		h	Korrosjonsstrømtetthet	Tid (dager)	corr	% wt loss	Jr	I corr*T	P r	P r * T	D'	D'/ØL	As	As'	
BT1	BT1	10	25	150	BT1-2-4	10	2	4	1,03	5,4	9,37	4,12	1,1936	0,0131	9,74	0,97	157,1	148,97
					BT1-3-4	10	3	4	2,72	14,2	24,8	10,88	3,1631	0,0347	9,31	0,93	157,1	136,05
					BT1-2-6	10	2	6	1,97	15,2	18	11,82	2,2879	0,0376	9,25	0,92	157,1	134,34
					BT1-3-6	10	3	6	2,74	21,4	25	16,44	3,1847	0,0524	8,95	0,90	157,1	125,91
					BT1-2-8	10	2	8	2,18	21,5	19,9	17,44	2,5401	0,0557	8,89	0,89	157,1	124,05
	BT1-3-8	10	3	8	2,99	31	27,3	23,92	3,4815	0,0763	8,47	0,85	157,1	112,79				
	BT2	12	40	BT2-2-4	12	2	4	1,25	5,5	11,4	5	1,4522	0,0159	11,68	0,97	226,2	214,35	
				BT2-3-4	12	3	4	1,96	8,8	17,9	7,84	2,2828	0,0250	11,50	0,96	226,2	207,73	
				BT2-2-6	12	2	6	2,99	20,1	27,4	17,94	3,4841	0,0573	10,85	0,90	226,2	185,07	
				BT2-3-6	12	3	6	2,09	14	19,1	12,54	2,4293	0,0399	11,20	0,93	226,2	197,09	
BT2-2-8				12	2	8	2,58	22,9	23,5	20,64	2,9975	0,0657	10,69	0,89	226,2	179,37		
BT2-3-8	12	3	8	2,62	25,5	23,9	20,96	3,0420	0,0667	10,67	0,89	226,2	178,72					
BT3	10	40	BT3-2-4	10	2	4	1,52	8	13,9	6,08	1,7682	0,0194	9,61	0,96	157,1	145,14		
			BT3-3-4	10	3	4	1,73	9,1	15,8	6,92	2,0064	0,0220	9,56	0,96	157,1	143,57		
			BT3-2-6	10	2	6	1,28	10,1	11,7	7,68	1,4930	0,0245	9,51	0,95	157,1	142,04		
			BT3-3-6	10	3	6	2,21	17,6	20,2	13,26	2,5707	0,0423	9,15	0,92	157,1	131,65		
			BT3-2-8	10	2	8	2,02	21,4	18,4	16,16	2,3452	0,0514	8,97	0,90	157,1	126,44		
BT3-3-8	10	3	8	3,13	34,8	28,5	25,04	3,6357	0,0797	8,41	0,84	157,1	111,00					
BT4	12	40	BT4-2-4	12	2	4	1,74	7,9	15,8	6,96	2,0140	0,0221	11,56	0,96	226,2	209,86		
			BT4-3-4	12	3	4	2,49	10,9	22,7	9,96	2,8904	0,0317	11,37	0,95	226,2	202,94		
			BT4-2-6	12	2	6	2,03	13,4	18,5	12,18	2,3592	0,0388	11,22	0,94	226,2	197,90		
			BT4-3-6	12	3	6	2,8	18,6	25,6	16,8	3,2611	0,0536	10,93	0,91	226,2	187,58		
			BT4-2-8	12	2	8	2,08	18	19	16,64	2,4217	0,0531	10,94	0,91	226,2	187,95		
BT4-3-8	12	3	8	2,37	20,7	21,6	18,96	2,7516	0,0603	10,79	0,90	226,2	183,01					

NB!The stirrups will be subjected to corrosion!																			
f	c	f	c	mean	f	y	Es	ØL	ØL'	Øs	cnom	cnom'	As	As'	d	d'	x (a)	x (b)	x (c)
38,91	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097				
36,89	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097				
45,77	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097				
46,45	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097				
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097				
46,45	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097				
39,94	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097				
35,68	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097				
44,45	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097				
44,21	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097				
44,69	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097				
37,66	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097				
40,18	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097				
35,68	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097				
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097				
44,21	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097				
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097				
37,66	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097				
36,89	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097				
46,49	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097				
46,49	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097				
40,94	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097				
40,94	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097				
37,66	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097				

Forsøk	Bjelker Gruppe	tørrelse (bxh)		Immersjonsstøtverdekn	Korrosjon														
		Spesifikas	b		h	Korrosjonsstrømtetthet	Tid (dager)	corr	% wt loss	avg wt loss Jr	I corr*T	P r	P r * T	D'	D'/ØL	As	As'	L	
B1	B1	16	215	40	B1-1	16	6	0,71	3,5	83,38	6,49	4,27	0,827	0,014	15,728	0,98	402,1	388,58	155,32
					B1-2	16	10	0,73	6	143,88	6,68	7,32	0,851	0,023	15,534	0,97	402,1	379,03	156,41
					B1-3	16	4	1,26	4,13	98,04	11,5	5,04	1,465	0,016	15,679	0,98	402,1	386,15	154,75
					B1-4	16	14	1,38	15,85	379,60	12,6	19,32	1,604	0,062	14,770	0,92	402,1	342,66	156,3
					B1-5	16	10	0,36	2,95	70,85	3,29	3,60	0,419	0,011	15,770	0,99	402,1	390,66	156,46
	B1-6	16	14	1,38	15,83	379,13	12,6	19,30	1,603	0,061	14,771	0,92	402,1	342,70	156,25				
	B2	16	265	B2-1	16	10	1,44	11,82	342,47	13,2	14,41	1,675	0,046	15,082	0,94	402,1	357,31	189,08	
				B2-2	16	8	1,5	9,86	287,21	13,7	12,02	1,746	0,038	15,234	0,95	402,1	336,56	190,12	
				B2-3	16	15	1,52	18,74	541,95	13,9	22,85	1,771	0,073	14,545	0,91	402,1	332,30	188,7	
				B2-4	16	15	1,42	17,53	511,95	13	21,37	1,656	0,068	14,639	0,91	402,1	336,62	190,54	
B2-5				16	20	1,56	25,53	742,32	14,2	31,13	1,809	0,099	14,018	0,88	402,1	308,65	189,69		
B2-6	16	20	1,57	25,81	750,97	14,4	31,47	1,829	0,100	13,995	0,87	402,1	307,67	189,85					
B3	16	315	B3-1	16	10	1,63	13,34	388,27	14,8	16,27	1,890	0,052	14,964	0,94	402,1	351,74	189,85		
			B3-2	16	15	1,45	17,85	518,88	13,2	21,76	1,687	0,069	14,614	0,91	402,1	335,46	189,7		
			B3-3	16	5	1,47	6,02	169,65	13,4	7,34	1,706	0,023	15,533	0,97	402,1	378,98	183,93		
			B3-4	16	4	1,78	5,84	166,03	16,3	7,12	2,070	0,023	15,546	0,97	402,1	379,64	185,41		
			B3-5	16	20	1,6	26,29	759,32	14,6	32,05	1,862	0,102	13,959	0,87	402,1	306,08	188,45		
B3-6	16	3	1,88	4,63	130,94	17,2	5,65	2,189	0,018	15,640	0,98	402,1	384,24	184,36					
B4	18	200	40	B4-1	18	6	1,2	5,28	161,27	11	7,22	1,397	0,023	17,541	0,97	508,9	483,29	158,02	
				B4-2	18	10	1,29	9,4	287,58	11,7	12,86	1,494	0,041	17,181	0,95	508,9	463,69	158,15	
				B4-3	18	12	1,28	11,27	345,45	11,7	15,41	1,493	0,049	17,018	0,95	508,9	454,94	158,5	
				B4-4	18	13	1,29	12,26	447,42	11,8	16,77	1,499	0,053	16,932	0,94	508,9	450,33	188,65	
				B4-5	18	20	1,37	20,09	736,88	12,5	27,48	1,597	0,088	16,249	0,90	508,9	414,76	189,62	
	B4-6	18	20	1,44	21,06	774,77	13,1	28,80	1,674	0,092	16,166	0,90	508,9	410,49	190,25				
	B5	18	265	B5-1	18	10	1,24	9,1	333,53	11,4	12,44	1,446	0,040	17,208	0,96	508,9	465,12	189,54	
				B5-2	18	10	1,3	9,53	348,11	11,9	13,03	1,515	0,041	17,170	0,95	508,9	463,09	188,97	
				B5-3	18	15	0,87	9,53	339,60	7,93	13,03	1,010	0,042	17,170	0,95	508,9	463,07	184,29	
				B5-4	18	10	0,79	5,76	205,79	7,19	7,88	0,916	0,025	17,498	0,97	508,9	480,95	184,77	
B5-5				18	20	0,97	14,18	504,44	8,85	19,39	1,127	0,062	16,765	0,93	508,9	441,47	183,93		
B5-6	18	20	1,22	17,8	637,60	11,1	24,35	1,415	0,078	16,449	0,91	508,9	425,01	185,2					
B6	18	315	B6-1	18	6	1,29	5,67	201,39	11,8	7,76	1,503	0,025	17,506	0,97	508,9	481,38	183,55		
			B6-2	18	2	0,95	1,39	49,29											

middelverdi grop
0,0232

(% vt + middelverdi grop)																	
x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd	ØL.corr	As.corr	d	x (a)	x (b)	x (c)	x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd.corr (% wl + middelverdi grop)		
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	8,87	123,53	114,00	4820,90	6137,17	-3237097,07	25,3	64234,50	121891,96	-57657,45			8,74
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	7,17	80,71	114,00	4820,90	28404,51	-3237097,07	23,1	41967,16	111525,33	-69558,16			6,95
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	6,99	76,66	114,00	4820,90	30506,63	-3237097,07	22,9	39865,04	110597,33	-70732,29			6,78
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	5,91	54,87	114,00	4820,90	41836,93	-3237097,07	21,9	28534,74	105743,70	-77208,95			5,88
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	5,89	54,57	114,00	4820,90	41997,16	-3237097,07	21,9	28374,51	105676,84	-77302,32			5,86
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	4,42	30,70	114,00	4820,90	54407,58	-3237097,07	20,9	15964,10	100546,78	-84682,68			4,87
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	10,62	177,07	113,00	4820,90	-34097,05	-3237097,07	29,7	104468,73	143129,35	-38660,62			11,88
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	9,83	151,72	113,00	4820,90	-19140,99	-3237097,07	28,0	89512,66	134859,42	-45346,76			10,69
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	7,35	84,96	113,00	4820,90	20245,44	-3237097,07	23,9	50126,24	115209,60	-65083,37			7,56
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	8,65	117,41	113,00	4820,90	1100,94	-3237097,07	25,8	69270,73	124373,60	-55102,87			9,08
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	6,80	72,56	113,00	4820,90	27562,98	-3237097,07	23,2	42808,69	111899,26	-69090,56			6,98
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	6,30	62,30	113,00	4820,90	33613,54	-3237097,07	22,7	36758,13	109241,59	-72483,46			6,50
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	8,35	109,44	99,00	4820,90	13462,60	-3237097,07	24,6	56909,08	118372,78	-61463,71			7,30
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	8,13	103,86	99,00	4820,90	16365,70	-3237097,07	24,3	54005,97	117007,72	-63001,75			7,11
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	7,94	98,97	99,00	4820,90	18907,39	-3237097,07	24,0	51464,29	115826,37	-64362,08			6,94
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	6,56	67,58	99,00	4820,90	35230,10	-3237097,07	22,5	35141,58	108543,63	-79402,05			5,88
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	5,91	54,87	99,00	4820,90	41836,93	-3237097,07	21,9	28534,74	105743,70	-77208,95			5,45
27,1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	3,89	23,77	99,00	4820,90	58009,81	-3237097,07	20,6	12361,86	99240,97	-86879,11			4,40
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	10,04	158,34	98,00	4820,90	-23049,47	-3237097,07	28,4	93421,14	136978,08	-43556,93			9,60
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	9,34	137,07	98,00	4820,90	-10497,62	-3237097,07	27,0	80869,29	130281,89	-49412,60			8,79
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	8,78	121,04	98,00	4820,90	-1039,96	-3237097,07	26,0	71411,64	125443,92	-54032,29			8,18
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	7,66	92,22	98,00	4820,90	15960,62	-3237097,07	24,3	54411,06	117197,19	-62786,13			7,08
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	7,79	95,25	98,00	4820,90	14172,20	-3237097,07	24,5	56199,47	118037,57	-61838,10			7,20
33,3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	7,23	82,18	98,00	4820,90	21886,68	-3237097,07	23,7	48485,00	114457,93	-65972,93			6,70

(%vt + middelverdi grop)																	
x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd	ØL.corr	As.corr	d	x (a)	x (b)	x (c)	x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd.corr (% wl + middelverdi grop)		
49,3	238459,45	220894,84	17564,61	32,91	14,81	344,70	159,00	4480	-134037,45	-2603751,99	43,3	204409,12	194126,23	10282,89			28,76
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	13,99	307,62	159,00	4480	-112045,47	-2603751,99	39,7	182417,15	177691,78	4725,37			26,01
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	14,60	335,06	159,00	4480	-128318,09	-2603751,99	42,4	198689,77	189782,26	8907,51			28,05
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	10,99	189,74	159,00	4480	-42146,01	-2603751,99	29,3	112517,68	131113,36	-18595,68			17,04
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	15,00	353,29	159,00	4480	-139130,51	-2603751,99	44,2	209502,19	198033,67	11468,52			29,38
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	11,00	189,94	159,00	4480	-42263,44	-2603751,99	29,3	112635,11	131183,34	-18548,22			17,06
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	12,18	232,88	209,00	4480	-67724,79	-2603751,99	32,8	138096,46	147050,16	-8953,70			27,26
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	12,77	256,32	209,00	4480	-81628,85	-2603751,99	34,9	152000,53	156272,76	-4272,23			29,75
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	10,18	162,71	209,00	4480	-26116,39	-2603751,99	27,2	96488,06	121848,47	-25360,41			19,78
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	10,51	173,65	209,00	4480	-32604,07	-2603751,99	28,0	102975,74	125529,16	-22553,42			20,95
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	8,39	110,56	209,00	4480	4809,26	-2603751,99	23,6	65562,41	105625,88	-40063,47			14,19
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	8,32	108,72	209,00	4480	5899,78	-2603751,99	23,5	64471,89	105094,13	-40622,24			13,99
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	11,72	215,83	259,00	4480	-57615,22	-2603751,99	31,4	127986,89	140587,25	-12600,35			31,85
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	10,42	170,71	259,00	4480	-30857,53	-2603751,99	27,8	101229,21	124528,97	-23299,77			25,70
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	13,99	307,33	259,00	4480	-111877,02	-2603751,99	39,6	182248,69	177568,79	4679,90			44,21
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	14,05	309,90	259,00	4480	-113397,31	-2603751,99	39,9	183768,99	178680,40	5088,58			44,56
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	8,20	105,62	259,00	4480	7737,63	-2603751,99	23,3	62634,04	104204,20	-41570,16			16,79
49,3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	14,44	327,55	259,00	4480	-123864,87	-2603751,99	41,6	194236,54	186433,18	7803,36			46,92
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	16,01	402,44	158,00	4480	-161030,11	-2603751,99	48,0	231401,79	215227,65	16174,14			31,83
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	14,53	331,69	158,00	4480	-120348,74	-2603751,99	41,0	190720,41	183809,98	6910,44			26,86
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	13,89	302,85	158,00	4480	-103766,38	-2603751,99	38,3	174138,05	171702,53	2435,52			24,79
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	13,55	288,36	158,00	4480	-95437,29	-2603751,99	37,0	165808,97	165794,38	14,59			23,74
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	11,03	191,27	158,00	4480	-39605,71	-2603751,99	28,9	109977,38	129607,05	-19629,67			16,60
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	10,74	181,22	158,00	4480	-33829,46	-2603751,99	28,2	104201,13	126234,98	-22033,85			15,86
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	14,64	336,50	208,00	4480	-123115,10	-2603751,99	41,5	193486,78	185872,24	7614,54			36,88
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	14,49	329,62	208,00	4480	-119159,22	-2603751,99	40,8	189530,89	182926,84	6604,06			36,19
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	14,49	329,62	208,00	4480	-119159,22	-2603751,99	40,8	189530,89	182926,84	6604,06			36,19
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	15,83	393,66	208,00	4480	-155984,04	-2603751,99	47,1	226355,72	211212,00	15143,71			42,54
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	12,91	261,75	208,00	4480	-80137,35	-2603751,99	34,7	150509,02	155265,49	-4756,47			29,33
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	11,74	216,63	208,00	4480	-54190,72	-2603751,99	30,9	124562,39	138446,01	-13883,62			24,71
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	15,86	395,30	258,00	4480	-156923,84	-2603751,99	47,3	227295,52	211957,55	15337,97			54,06
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	17,46	479,07	258,00	4480	-205094,10	-2603751,99	56,1	275465,78	251478,94	23966,84			64,54
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	16,22	413,42	258,00	4480	-167347,38	-2603751,99	49,2	237719,06	220297,61	17421,45			56,35
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	14,29	320,97	258,00	4480	-114187,95	-2603751,99	40,0	184559,62	179259,97	5299,65			44,55
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	16,71	438,82	258,00	4480	-181947,80	-2603751,99	51,8	252319,47	232186,71	20132,76			59,54
59,4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	11,06												

%vt + minste grup

Forsøk	Bjelker Gruppe	Spesifikas b	tørrelse (bxt) h	meringsst�verdekn	Korrosjon														
					Korrosjonsstr�mthet	Tid (dager)	corr	% wt loss	Jr	l corr* T	P r	P r * T	D'	D'/ØL	As	As'			
1	BT1			25	BT1-2-4	10		2	4	1,03	5,4	9,37	4,12	1,1936	0,0131	9,74	0,97	157,1	148,97
					BT1-3-4	10		3	4	2,72	14,2	24,8	10,88	3,1631	0,0347	9,31	0,93	157,1	136,05
					BT1-2-6	10		2	6	1,97	15,2	18	11,82	2,2879	0,0376	9,25	0,92	157,1	134,34
					BT1-1-6	10		3	6	2,74	21,4	25	16,44	3,1847	0,0524	8,95	0,90	157,1	125,91
	BT1-2-8	10		2	8	2,18	21,5	19,9	17,44	2,5401	0,0557	8,89	0,89	157,1	124,05				
	BT1-3-8	10		3	8	2,99	31	27,3	23,92	3,4815	0,0763	8,47	0,85	157,1	112,79				
	BT2	12		2	4	1,25	5,5	11,4	5	1,4522	0,0159	11,68	0,97	226,2	214,35				
	BT2-2-6	12		3	4	1,96	8,8	17,9	7,84	2,2828	0,0250	11,50	0,96	226,2	207,73				
BT2-3-6	12		2	6	2,99	20,1	27,4	17,94	3,4841	0,0573	10,85	0,90	226,2	185,07					
BT2-2-8	12		3	6	2,09	14	19,1	12,54	2,4293	0,0399	11,20	0,93	226,2	197,09					
BT2-3-8	12		2	8	2,58	22,9	23,5	20,64	2,9975	0,0657	10,69	0,89	226,2	179,37					
BT2-3-8	12		3	8	2,62	25,5	23,9	20,96	3,0420	0,0667	10,67	0,89	226,2	178,72					
1	BT3	150	150		BT3-2-4	10		2	4	1,52	8	13,9	6,08	1,7682	0,0194	9,61	0,96	157,1	145,14
					BT3-3-4	10		3	4	1,73	9,1	15,8	6,92	2,0064	0,0220	9,56	0,96	157,1	143,57
					BT3-2-6	10		2	6	1,28	10,1	11,7	7,68	1,4930	0,0245	9,51	0,95	157,1	142,04
					BT3-3-6	10		3	6	2,21	17,6	20,2	13,26	2,5707	0,0423	9,15	0,92	157,1	131,65
	BT3-2-8	10		2	8	2,02	21,4	18,4	16,16	2,3452	0,0514	8,97	0,90	157,1	126,44				
	BT3-3-8	10		3	8	3,13	34,8	28,5	25,04	3,6357	0,0797	8,41	0,84	157,1	111,00				
	BT4	12		2	4	1,74	7,9	15,8	6,96	2,0140	0,0221	11,56	0,96	226,2	209,86				
	BT4-3-4	12		3	4	2,49	10,9	22,7	9,96	2,8904	0,0317	11,37	0,95	226,2	202,94				
BT4-2-6	12		2	6	2,03	13,4	18,5	12,18	2,3592	0,0388	11,22	0,94	226,2	197,90					
BT4-3-6	12		3	6	2,8	18,6	25,6	16,8	3,2611	0,0536	10,93	0,91	226,2	187,58					
BT4-2-8	12		2	8	2,08	18	19	16,64	2,4217	0,0531	10,94	0,91	226,2	187,95					
BT4-3-8	12		3	8	2,37	20,7	21,6	18,96	2,7516	0,0603	10,79	0,90	226,2	183,01					

NB The stirrups will be subjected to corrosion!															
f c	f c mean	f y	Es	ØL	ØL'	Øs	cnom	cnom'	As	As'	d	d'	x (a)	x (b)	x (c)
38,91	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
36,89	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
45,77	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
46,45	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
46,45	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
39,94	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
35,68	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
44,45	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
44,21	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
44,69	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
37,66	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
40,18	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
35,68	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
44,21	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
36,89	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
46,49	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
46,49	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
40,94	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
40,94	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
37,66	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097

Fors�k	Bjelker Gruppe	Spesifikas b	t�rrelse (bxt) h	meringsst�verdekn	Korrosjon															
					Korrosjonsstr�mthet	Tid (dager)	l corr	% wt loss	avg wt loss	Jr	l corr* T	P r	P r * T	D'	D'/ØL	As	As'	L		
1	B1		215	1,77	B1-1	16		6	0,71	3,5	83,38	6,49	4,27	0,827	0,014	15,728	0,98	402,1	388,58	155,32
					B1-2	16		6	0,73	6	143,88	6,68	7,32	0,851	0,023	15,534	0,97	402,1	379,03	156,41
					B1-3	16		4	1,26	4,13	98,04	11,5	5,04	1,465	0,016	15,679	0,98	402,1	386,15	154,75
					B1-4	16		14	1,38	15,85	379,60	12,6	19,32	1,604	0,062	14,770	0,92	402,1	342,66	156,3
					B1-5	16		10	0,36	2,95	70,85	3,29	3,60	0,419	0,011	15,770	0,99	402,1	390,66	156,46
					B1-6	16		14	1,38	15,83	379,13	12,6	19,30	1,603	0,061	14,771	0,92	402,1	342,70	156,25
	B2		265	1,76	B2-1	16		10	1,44	11,82	342,47	13,2	14,41	1,675	0,046	15,082	0,94	402,1	357,31	189,08
					B2-2	16		8	1,5	9,86	287,21	13,7	12,02	1,746	0,038	15,234	0,95	402,1	364,56	190,12
					B2-3	16		15	1,52	18,74	541,95	13,9	22,85	1,771	0,073	14,545	0,91	402,1	332,30	188,7
					B2-4	16		15	1,42	17,53	511,95	13	21,37	1,656	0,068	14,639	0,91	402,1	336,62	190,54
					B2-5	16		20	1,56	25,53	742,32	14,2	31,13	1,809	0,099	14,018	0,88	402,1	308,65	189,69
					B2-6	16		20	1,57	25,81	750,97	14,4	31,47	1,829	0,100	13,995	0,87	402,1	307,67	189,85
B3		315	1,88	B3-1	16		10	1,63	13,34	388,27	14,8	16,27	1,890	0,052	14,964	0,94	402,1	351,74	189,85	
				B3-2	16		15	1,45	17,85	518,88	13,2	21,76	1,687	0,069	14,614	0,91	402,1	335,46	189,7	
				B3-3	16		5	1,47	6,02	169,65	13,4	7,34	1,706	0,023	15,533	0,97	402,1	378,98	183,93	
				B3-4	16		4	1,78	5,84	166,03	16,3	7,12	2,070	0,023	15,546	0,97	402,1	376,64	185,41	
				B3-5	16		20	1,6	26,29	759,32	14,6	32,05	1,862	0,102	13,959	0,87	402,1	306,08	188,45	
				B3-6	16		3	1,88	4,63	130,94	17,2	5,65	2,189	0,018	15,640	0,98	402,1	384,24	184,36	
2	B4		215	1,74	B4-1	18		6	1,2	5,28	161,27	11	7,22	1,397	0,023	17,541	0,97	508,9	483,29	158,02
					B4-2	18		10	1,29	9,4	287,58	11,7	12,86	1,494	0,041	17,181	0,95	508,9	463,69	158,15
					B4-3	18		12	1,28	11,27	345,45	11,7	15,41	1,493	0,049	17,018	0,95	508,9	454,94	158,5
					B4-4	18		13	1,29	12,26	447,42	11,8	16,77	1,499	0,053	16,932	0,94	508,9	450,33	188,65
					B4-5	18		20	1,37	20,09	736,88									

liten grop
0,0141

		(% vt + ingen grop)													
x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd	ØL.corr	As.corr	d	x (a)	x (b)	x (c)	x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd.corr (% wl + ingen grop)
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	9,10	130,04	114,00	4820,90	2748,53	-3237097,07	25,6	67623,15	123556,16	-55933,01	9,02
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	7,72	93,58	114,00	4820,90	21708,12	-3237097,07	23,8	48663,56	114539,45	-65875,89	7,49
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	7,57	89,98	114,00	4820,90	23580,08	-3237097,07	23,6	46791,60	113687,95	-66896,35	7,34
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	6,67	69,90	114,00	4820,90	34023,64	-3237097,07	22,6	36348,04	109064,04	-72716,01	6,50
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	6,66	69,61	114,00	4820,90	34176,45	-3237097,07	22,6	36195,23	108997,97	-72802,74	6,49
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	10,15	5,39	45,60	114,00	4820,90	46661,33	-3237097,07	21,5	23710,34	103752,15	-80041,80	5,49
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	10,90	186,59	113,00	4820,90	-39718,66	-3237097,07	30,4	110090,34	146350,89	-36260,55	12,33
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	10,26	165,45	113,00	4820,90	-27246,46	-3237097,07	28,9	97618,14	139286,72	-41668,59	11,34
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	8,23	106,28	113,00	4820,90	7667,53	-3237097,07	25,1	62704,14	121147,91	-58443,77	8,56
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	9,30	135,82	113,00	4820,90	-9759,50	-3237097,07	26,9	80131,17	129897,88	-49766,71	9,94
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	7,75	94,45	113,00	4820,90	14648,73	-3237097,07	24,4	55722,95	117813,03	-62090,08	8,00
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	14,18	7,33	84,36	113,00	4820,90	20600,79	-3237097,07	23,9	49770,89	115046,40	-65275,51	7,53
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	8,68	118,34	99,00	4820,90	8835,83	-3237097,07	25,0	61535,85	120583,04	-59047,20	7,60
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	8,51	113,63	99,00	4820,90	11284,84	-3237097,07	24,8	59086,84	119407,80	-60320,97	7,44
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	8,35	109,47	99,00	4820,90	13447,81	-3237097,07	24,6	56923,86	118379,78	-61455,92	7,30
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	7,21	81,76	99,00	4820,90	27855,01	-3237097,07	23,2	42516,66	111769,34	-69252,68	6,36
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	6,67	69,90	99,00	4820,90	34023,64	-3237097,07	22,6	36348,04	109064,04	-72716,01	5,96
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24	8,92	4,92	37,96	99,00	4820,90	50632,74	-3237097,07	21,2	19738,93	102145,94	-82407,00	4,88
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	10,43	171,03	98,00	4820,90	-30538,18	-3237097,07	29,3	100909,86	141121,65	-40211,79	10,09
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	9,87	152,96	98,00	4820,90	-19875,77	-3237097,07	28,1	90247,45	135255,41	-45007,97	9,40
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	9,41	139,02	98,00	4820,90	-11648,37	-3237097,07	27,1	82020,05	130882,74	-48862,69	8,86
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	8,48	113,05	98,00	4820,90	3672,16	-3237097,07	25,5	66699,52	123100,27	-56400,76	7,87
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	8,59	115,85	98,00	4820,90	2022,44	-3237097,07	25,7	68349,23	123915,73	-55566,50	7,98
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02	12,18	8,12	103,66	98,00	4820,90	9215,04	-3237097,07	25,0	61156,63	120400,28	-59243,65	7,52

		(% vt + ingen grop)													
x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd	ØL.corr	As.corr	d	x (a)	x (b)	x (c)	x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd.corr (%wl + ingen grop)
49.3	238459,45	220894,84	17564,61	32,91	15,06	356,16	159,00	4480	-140834,13	-2603751,99	44,5	211205,80	199348,72	11857,08	29,59
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	14,40	325,81	159,00	4480	-122834,46	-2603751,99	41,4	193206,14	185662,49	7543,64	27,36
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	14,89	348,33	159,00	4480	-136185,70	-2603751,99	43,7	206557,37	195769,96	10787,41	29,02
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	11,96	224,51	159,00	4480	-62763,27	-2603751,99	32,1	133134,94	143852,14	-10717,20	19,72
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	15,20	363,11	159,00	4480	-144955,36	-2603751,99	45,2	215327,04	202546,21	12780,82	30,10
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	32,91	11,96	224,69	159,00	4480	-62868,98	-2603751,99	32,1	133240,66	143919,76	-10679,10	19,73
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	12,93	262,60	209,00	4480	-85352,81	-2603751,99	35,4	155724,49	158806,01	-3081,52	30,41
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	13,42	282,77	209,00	4480	-97310,57	-2603751,99	37,3	167682,25	167112,64	569,60	32,53
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	11,28	199,83	209,00	4480	-48128,02	-2603751,99	30,1	118499,69	134716,10	-16216,41	23,75
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	11,56	209,91	209,00	4480	-54102,38	-2603751,99	30,9	124474,06	138391,10	-13917,05	24,82
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	9,76	149,77	209,00	4480	-18442,22	-2603751,99	26,3	88813,90	117617,78	-28803,88	18,39
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	44,83	9,70	147,93	209,00	4480	-17350,28	-2603751,99	26,1	87721,95	117026,73	-29304,77	18,20
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	12,56	247,72	259,00	4480	-76523,89	-2603751,99	34,1	146895,57	152842,86	-5947,29	36,18
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	11,49	207,21	259,00	4480	-52501,20	-2603751,99	30,7	122872,88	137398,71	-14525,84	30,68
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	14,40	325,58	259,00	4480	-122695,23	-2603751,99	41,4	193066,90	185558,48	7508,43	46,65
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	14,44	327,69	259,00	4480	-123951,04	-2603751,99	41,6	194322,71	186497,70	7825,01	46,93
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	9,60	144,81	259,00	4480	-15501,47	-2603751,99	25,9	85873,14	116032,23	-30159,09	22,15
49.3	207459,72	220894,84	17564,61	56,75	14,76	342,20	259,00	4480	-132550,86	-2603751,99	43,1	202922,53	192992,60	9929,93	48,86
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	16,41	423,16	158,00	4480	-172944,97	-2603751,99	50,2	243316,65	224828,19	18488,46	33,25
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	15,22	364,07	158,00	4480	-138970,98	-2603751,99	44,2	209342,65	197910,73	11431,93	29,16
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	14,70	339,38	158,00	4480	-124771,57	-2603751,99	41,8	195143,24	187112,66	8030,58	27,41
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	14,42	326,82	158,00	4480	-117549,97	-2603751,99	40,6	187921,65	181735,58	6186,07	26,51
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	12,34	239,23	158,00	4480	-67182,84	-2603751,99	32,7	137554,52	146698,42	-9143,90	20,15
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	38,93	12,09	229,74	158,00	4480	-61726,32	-2603751,99	32,0	132097,99	143190,11	-11092,11	19,45
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	15,31	368,16	208,00	4480	-141318,28	-2603751,99	44,6	211689,96	199723,17	11966,79	40,03
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	15,19	362,32	208,00	4480	-137959,83	-2603751,99	44,0	208331,50	197132,31	11199,19	39,45
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	15,19	362,32	208,00	4480	-137959,83	-2603751,99	44,0	208331,50	197132,31	11199,19	39,45
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	16,27	415,93	208,00	4480	-168790,06	-2603751,99	49,4	239161,73	221461,91	17699,82	44,71
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	13,90	303,45	208,00	4480	-104111,00	-2603751,99	38,4	174482,68	171949,56	2533,12	33,56
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	53,56	12,93	262,78	208,00	4480	-80724,70	-2603751,99	34,7	151096,37	155661,65	-4565,27	29,43
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	16,30	417,28	258,00	4480	-169565,06	-2603751,99	49,6	239936,74	222088,35	17848,39	56,84
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	17,58	485,21	258,00	4480	-208623,48	-2603751,99	56,8	278995,16	254446,16	24531,00	65,29
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	16,59	432,17	258,00	4480	-178125,15	-2603751,99	51,1	248496,82	229051,68	19445,14	58,71
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	15,03	354,95	258,00	4480	-133721,90	-2603751,99	43,3	204093,58	193885,34	10206,24	48,92
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	16,98	452,84	258,00	4480	-190010,68	-2603751,99	53,3	260382,36	238848,39	21533,96	61,29
59.4	254596,24	266103,32	26536,04	68,20	12,36	239,92	258,00	4480	-67582,95	-2603751,99	32,8	137954,63	146958,05	-9003,42	34,00

kun %vekttap

Forsøk	Bjelker	tørrelse (bxh)	meringsstørrelse	Korrosjon													
				Korrosjonsstrømtetthet	Tid (dager)	corr	% wt loss	Jr	I corr*T	P r	P r*T	D'	D'/ØL	As	As'		
1	BT1	10	25	BT1-2-4	10	2	4	1,03	5,4	9,37	4,12	1,1936	0,0131	9,74	0,97	157,1	148,97
				BT1-3-4	10	3	4	2,72	14,2	24,8	10,88	3,1631	0,0347	9,31	0,93	157,1	136,05
				BT1-2-6	10	2	6	1,97	15,2	18	11,82	2,2879	0,0376	9,25	0,92	157,1	134,34
				BT1-3-6	10	3	6	2,74	21,4	25	16,44	3,1847	0,0524	8,95	0,90	157,1	125,91
				BT1-2-8	10	2	8	2,18	21,5	19,9	17,44	2,5401	0,0557	8,89	0,89	157,1	124,05
	BT1-3-8	10	3	8	2,99	31	27,3	23,92	3,4815	0,0763	8,47	0,85	157,1	112,79			
	BT2	BT2-2-4	12	2	4	1,25	5,5	11,4	5	1,4522	0,0159	11,68	0,97	226,2	214,35		
		BT2-3-4	12	3	4	1,96	8,8	17,9	7,84	2,2828	0,0250	11,50	0,96	226,2	207,73		
		BT2-2-6	12	2	6	2,99	20,1	27,4	17,94	3,4841	0,0573	10,85	0,90	226,2	185,07		
		BT2-3-6	12	3	6	2,09	14	19,1	12,54	2,4293	0,0399	11,20	0,93	226,2	197,09		
BT2-2-8		12	2	8	2,58	22,9	23,5	20,64	2,9975	0,0657	10,69	0,89	226,2	179,37			
BT2-3-8	12	3	8	2,62	25,5	23,9	20,96	3,0420	0,0667	10,67	0,89	226,2	178,72				
BT3	BT3-2-4	150	150	10	2	4	1,52	8	13,9	6,08	1,7682	0,0194	9,61	0,96	157,1	145,14	
	BT3-3-4	10	3	4	1,73	9,1	15,8	6,92	2,0064	0,0220	9,56	0,96	157,1	143,57			
	BT3-2-6	10	2	6	1,28	10,1	11,7	7,68	1,4930	0,0245	9,51	0,95	157,1	142,04			
	BT3-3-6	10	3	6	2,21	17,6	20,2	13,26	2,5707	0,0423	9,15	0,92	157,1	131,65			
	BT3-2-8	10	2	8	2,02	21,4	18,4	16,16	2,3452	0,0514	8,97	0,90	157,1	126,44			
BT3-3-8	10	3	8	3,13	34,8	28,5	25,04	3,6357	0,0797	8,41	0,84	157,1	111,00				
BT4	BT4-2-4	12	2	4	1,74	7,9	15,8	6,96	2,0140	0,0221	11,56	0,96	226,2	209,86			
	BT4-3-4	12	3	4	2,49	10,9	22,7	9,96	2,8904	0,0317	11,37	0,95	226,2	202,94			
	BT4-2-6	12	2	6	2,03	13,4	18,5	12,18	2,3592	0,0388	11,22	0,94	226,2	197,90			
	BT4-3-6	12	3	6	2,8	18,6	25,6	16,8	3,2611	0,0536	10,93	0,91	226,2	187,58			
	BT4-2-8	12	2	8	2,08	18	19	16,64	2,4217	0,0531	10,94	0,91	226,2	187,95			
BT4-3-8	12	3	8	2,37	20,7	21,6	18,96	2,7516	0,0603	10,79	0,90	226,2	183,01				

NB!The stirrups will be subjected to corrosion!

f c	f c mean	f y	Es	ØL	ØL'	Øs	cnom	cnom'	As	As'	d	d'	x (a)	x (b)	x (c)
38,91	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
36,89	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
45,77	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
46,45	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
46,45	40,17	520	200000	10	8	6	25	36	157,08	100,53	114	46	4821	-11310	-3237097
39,94	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
35,68	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
44,45	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
44,21	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
44,69	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
37,66	40,17	590	200000	12	8	6	25	36	226,19	100,53	113	46	4821	-63083	-3237097
40,18	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
35,68	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
44,21	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
33,4	40,17	520	200000	10	8	6	40	36	157,08	100,53	99	46	4821	-11310	-3237097
36,89	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
46,49	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
46,49	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
40,94	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
40,94	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097
37,66	40,17	590	200000	12	8	6	40	36	226,19	100,53	98	46	4821	-63083	-3237097

Forsøk	Bjelker	tørrelse (bxh)	meringsstørrelse	Korrosjon														
				Korrosjonsstrømtetthet	Tid (dager)	corr	% wt loss	avg wt loss Jr	I corr*T	P r	P r*T	D'	D'/ØL	As	As'	L		
1	B1	16	215	B1-1	16	6	0,71	3,5	83,38	6,49	4,27	0,827	0,014	15,728	0,98	402,1	388,58	155,32
				B1-2	16	10	0,73	6	143,88	6,68	7,32	0,851	0,023	15,534	0,97	402,1	379,03	156,41
				B1-3	16	4	1,26	4,13	98,04	11,5	5,04	1,465	0,016	15,679	0,98	402,1	386,15	154,75
				B1-4	16	14	1,38	15,85	379,60	12,6	19,32	1,604	0,062	14,770	0,92	402,1	342,66	156,3
				B1-5	16	10	0,36	2,95	70,85	3,29	3,60	0,419	0,011	15,770	0,99	402,1	390,66	156,46
				B1-6	16	14	1,38	15,83	379,13	12,6	19,30	1,603	0,061	14,771	0,92	402,1	342,70	156,25
2	B2	16	265	B2-1	16	10	1,44	11,82	342,47	13,2	14,41	1,675	0,046	15,082	0,94	402,1	357,31	189,08
				B2-2	16	8	1,5	9,86	287,21	13,7	12,02	1,746	0,038	15,234	0,95	402,1	332,30	190,12
				B2-3	16	15	1,52	18,74	541,95	13,9	22,85	1,771	0,073	14,545	0,91	402,1	332,30	188,7
				B2-4	16	15	1,42	17,53	511,95	13	21,37	1,656	0,068	14,639	0,91	402,1	336,62	190,54
				B2-5	16	20	1,56	25,53	742,32	14,2	31,13	1,809	0,099	14,018	0,88	402,1	308,65	189,69
				B2-6	16	20	1,57	25,81	750,97	14,4	31,47	1,829	0,100	13,995	0,87	402,1	307,67	189,85
3	B3	16	315	B3-1	16	10	1,63	13,34	388,27	14,8	16,27	1,890	0,052	14,964	0,94	402,1	351,74	189,85
				B3-2	16	15	1,45	17,85	518,88	13,2	21,76	1,687	0,069	14,614	0,91	402,1	335,46	189,7
				B3-3	16	5	1,47	6,02	169,65	13,4	7,34	1,706	0,023	15,533	0,97	402,1	378,98	183,93
				B3-4	16	4	1,78	5,84	166,03	16,3	7,12	2,070	0,023	15,546	0,97	402,1	379,64	185,41
				B3-5	16	20	1,6	26,29	736,88	14,6	32,05	1,862	0,102	13,959	0,87	402,1	306,08	188,45
				B3-6	16	3	1,88	4,63	130,94	17,2	5,65	2,189	0,018	15,640	0,98	402,1	384,24	184,36
4	B4	18	200	B4-1	18	6	1,2	5,28	161,27	11	7,22	1,397	0,023	17,541	0,97	508,9	483,29	158,02
				B4-2	18	10	1,29	9,4	287,58	11,7	12,86	1,494	0,041	17,181	0,95	508,9	463,69	158,15
				B4-3	18	12	1,28	11,27	345,45	11,7	15,41	1,493	0,049	17,018	0,95	508,9	454,94	158,5
				B4-4	18	13	1,29	12,26	447,42	11,8	16,77	1,499	0,053	16,932	0,94	508,9	450,33	188,65
				B4-5	18	20	1,37	20,09	736,88	12,5	27,48	1,597	0,088	16,249	0,90	508,9	414,76	189,62
				B4-6	18	20	1,44	21,06	774,77	13,1	28,80	1,674	0,092	16,166	0,90	508,9	410,49	190,25
5	B5	18	265	B5-1	18	10	1,24	9,1	333,53	11,4	12,44	1,446	0,040	17,208	0,96	508,9	465,12	189,54
				B5-2	18	10	1,3	9,53	348,11	11,9	13,03	1,515	0,041	17,170	0,95	508,9	463,09	188,97
				B5-3	18	15	0,87	9,53	339,60	7,93	13,03	1,010	0,042	17,170	0,95	508,9	463,07	184,29
				B5-4	18	10	0,79	5,76	205,79	7,19	7,88	0,916	0,025	17,498	0,97	508,9	480,95	184,77
				B5-5	18	20	0,97	14,18	504,44	8,85	19,39	1,127	0,062	16,765	0,93	508,9	441,47	183,93
				B5-6	18	20	1,22	17,8	637,60	11,1	24,35	1,415	0,078	16,449	0,91	508,9	425,01	185,2
6	B6	18	315	B6-1	18	6	1,29	5,67	201,39	11,8	7,76	1,503	0,025	17,506	0,97	508,9	481,38	183,55
				B6-2	18	2	0,95	1,39	49,29	8,66	1,90	1,103	0,006	17,879	0,99	508,9	502,12	183,55
				B6-3	18	5	1,28	4,69										

ingen grop

0

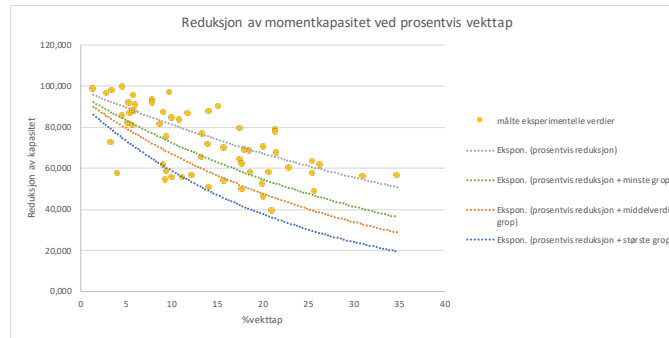
														(% vt + ingen grop)				
x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd	ØL.corr	As.corr	d	x (a)	x (b)	x (c)	x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd.corr (% wl + ingen grop)			
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		10,15	9,46	140,57	114,00	4820,90	-2726,32	-3237097,07	26,2	73098,00	126293,46	-53195,46	9,46		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		10,15	8,58	115,64	114,00	4820,90	10240,76	-3237097,07	24,9	60130,91	119907,37	-59776,46	8,41		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		10,15	8,48	112,96	114,00	4820,90	11634,25	-3237097,07	24,7	58737,43	119241,10	-60503,68	8,30		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		10,15	7,86	97,04	114,00	4820,90	19909,23	-3237097,07	23,9	50462,45	115364,24	-64901,79	7,63		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		10,15	7,85	96,80	114,00	4820,90	20037,55	-3237097,07	23,9	50334,13	115305,19	-64971,07	7,62		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		10,15	6,90	74,79	114,00	4820,90	31483,16	-3237097,07	22,9	38888,52	110169,18	-71280,66	6,71		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		14,18	11,34	202,00	113,00	4820,90	-48806,85	-3237097,07	31,5	119178,52	151687,55	-32509,03	13,05		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		14,18	10,94	188,14	113,00	4820,90	-40628,60	-3237097,07	30,5	111000,28	146878,09	-35877,81	12,40		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		14,18	9,59	144,40	113,00	4820,90	-14826,04	-3237097,07	27,5	85197,71	132555,63	-47357,92	10,35		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		14,18	10,32	167,29	113,00	4820,90	-28331,54	-3237097,07	29,0	98703,21	139889,24	-41186,02	11,42		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		14,18	9,25	134,46	113,00	4820,90	-8959,36	-3237097,07	26,9	79331,04	129482,84	-50151,80	9,88		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		14,18	8,94	125,54	113,00	4820,90	-3699,11	-3237097,07	26,3	74070,78	126786,11	-52715,32	9,46		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		8,92	9,20	132,95	99,00	4820,90	1236,53	-3237097,07	25,8	69135,14	124306,13	-55170,98	8,10		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		8,92	9,09	129,79	99,00	4820,90	2879,88	-3237097,07	25,6	67491,80	123491,22	-55999,42	7,99		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		8,92	8,99	126,95	99,00	4820,90	4356,68	-3237097,07	25,5	66015,00	122763,51	-56748,52	7,90		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		8,92	8,24	106,65	99,00	4820,90	14911,96	-3237097,07	24,4	55459,72	117689,19	-62229,47	7,20		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		8,92	7,86	97,04	99,00	4820,90	19909,23	-3237097,07	23,9	50462,45	115364,24	-64901,79	6,88		
27.1	81681,41	130705,65	-49024,24		8,92	6,52	66,78	99,00	4820,90	35648,58	-3237097,07	22,5	34723,09	108363,77	-73640,68	5,85		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		12,18	11,05	191,87	98,00	4820,90	-42830,21	-3237097,07	30,7	113201,88	148160,23	-34958,35	10,88		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		12,18	10,69	179,57	98,00	4820,90	-35575,60	-3237097,07	29,9	105947,27	143970,71	-38023,44	10,41		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		12,18	10,39	169,64	98,00	4820,90	-29713,59	-3237097,07	29,2	100085,27	140660,00	-40574,73	10,03		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		12,18	9,77	149,88	98,00	4820,90	-18054,98	-3237097,07	27,9	88426,65	134276,11	-45849,46	9,28		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		12,18	9,84	152,09	98,00	4820,90	-19363,37	-3237097,07	28,0	89735,05	134979,16	-45244,11	9,36		
33.3	133454,86	160384,88	-26930,02		12,18	9,52	142,24	98,00	4820,90	-13551,28	-3237097,07	27,4	83922,95	131882,12	-47959,16	8,99		

														(% vt + ingen grop)				
x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd	ØL.corr	As.corr	d	x (a)	x (b)	x (c)	x	Fst	Fcc	Fsc	Mrd.corr (%wl + ingen grop)			
49.3	238459,45	220894,84	17564,61		32,91	15,44	374,47	159,00	4480	-151687,72	-2603751,99	46,4	222059,40	207817,72	14241,68	30,92		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		32,91	15,04	355,32	159,00	4480	-140331,09	-2603751,99	44,4	210702,77	198960,01	11742,76	29,53		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		32,91	15,34	369,59	159,00	4480	-148797,76	-2603751,99	45,9	219169,44	205547,66	13621,78	30,57		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		32,91	13,46	284,75	159,00	4480	-98486,77	-2603751,99	37,5	168858,44	167943,51	914,93	24,30		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		32,91	15,53	378,75	159,00	4480	-154226,19	-2603751,99	46,8	224597,86	209820,43	14777,43	31,23		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		32,91	13,47	284,89	159,00	4480	-98567,04	-2603751,99	37,5	168938,72	168000,30	938,41	24,31		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		44,83	14,11	312,68	209,00	4480	-115047,53	-2603751,99	40,2	185419,21	179891,22	5527,99	35,66		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		44,83	14,42	326,73	209,00	4480	-123381,86	-2603751,99	41,5	193753,54	186071,72	7681,82	37,12		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		44,83	13,00	265,53	209,00	4480	-87087,57	-2603751,99	35,7	157459,25	159994,94	-2535,69	30,72		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		44,83	13,20	273,50	209,00	4480	-91811,77	-2603751,99	36,4	162183,45	163260,73	-1077,28	31,56		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		44,83	11,92	223,01	209,00	4480	-61872,71	-2603751,99	32,0	132244,39	143283,44	-11039,05	26,21		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		44,83	11,87	221,34	209,00	4480	-60880,13	-2603751,99	31,8	131251,80	142651,50	-11399,70	26,04		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		56,75	13,87	301,99	259,00	4480	-108710,31	-2603751,99	39,1	179081,99	175265,42	3816,57	43,50		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		56,75	13,14	271,38	259,00	4480	-90555,60	-2603751,99	36,2	160927,28	162388,38	-1461,10	39,38		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		56,75	15,04	355,17	259,00	4480	-140241,44	-2603751,99	44,4	210613,12	198890,77	11722,35	50,58		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		56,75	15,07	356,53	259,00	4480	-141048,99	-2603751,99	44,5	211420,67	199514,86	11905,81	50,76		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		56,75	11,79	218,48	259,00	4480	-59187,26	-2603751,99	31,6	129558,93	141578,41	-12019,48	32,21		
49.3	207459,72	220894,84	17564,61		56,75	15,26	365,75	259,00	4480	-146517,61	-2603751,99	45,5	216889,29	203764,21	13125,07	51,98		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		38,93	17,05	456,61	158,00	4480	-192180,80	-2603751,99	53,7	262552,47	240652,40	21900,07	35,50		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		38,93	16,31	417,75	158,00	4480	-169837,24	-2603751,99	49,6	240208,92	222308,51	17900,41	32,88		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		38,93	15,97	400,69	158,00	4480	-160023,67	-2603751,99	47,9	230395,34	214424,27	15971,07	31,71		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		38,93	15,79	391,80	158,00	4480	-154911,10	-2603751,99	47,0	225282,78	210362,18	14920,60	31,09		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		38,93	14,38	324,99	158,00	4480	-116496,35	-2603751,99	40,4	186868,02	180957,83	5910,20	26,38		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		38,93	14,21	317,15	158,00	4480	-111987,23	-2603751,99	39,7	182358,91	177649,25	4709,65	25,82		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		53,56	16,36	420,53	208,00	4480	-171430,66	-2603751,99	49,9	241802,34	223599,08	18203,26	45,16		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		53,56	16,28	416,56	208,00	4480	-169148,40	-2603751,99	49,5	239520,07	221751,47	17768,60	44,77		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		53,56	16,28	416,56	208,00	4480	-169148,40	-2603751,99	49,5	239520,07	221751,47	17768,60	44,77		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		53,56	16,96	452,00	208,00	4480	-189526,53	-2603751,99	53,2	259898,21	238446,55	21451,66	48,19		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		53,56	15,45	374,84	208,00	4480	-145159,33	-2603751,99	45,2	215531,00	202705,05	12825,95	40,69		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		53,56	14,80	343,88	208,00	4480	-127360,05	-2603751,99	42,2	197731,73	189059,27	8672,46	37,62		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		68,20	16,98	452,86	258,00	4480	-190023,18	-2603751,99	53,3	260394,86	238858,77	21536,09	61,29		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		68,20	17,75	494,89	258,00	4480	-214188,85	-2603751,99	57,9	284560,52	259153,16	25367,37	66,48		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		68,20	17,16	462,32	258,00	4480	-195461,80	-2603751,99	54,3	265833,48	243388,51	22444,97	62,47		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		68,20	16,19	411,51	258,00	4480	-166244,99	-2603751,99	49,0	236616,66	219409,54	17207,13	56,11		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		68,20	17,39	475,21	258,00	4480	-202876,14	-2603751,99	55,7	273247,81	249608,55	23639,27	64,06		
59.4	254596,24	266103,32	26536,04		68,20	14,40	325,56	258,00	4480	-116823,88	-2603751,99	40,4	187195,55	181199,41	5996,14	45,14		

(% vt + største grup) (%vt + middelverdi grup) (%vt + liten grup) (%vt, ingen grup)

Mrd.corr/Mrd.exu	Mrd.corr/Mrd.exu	Mrd.corr/Mrd.exu	Mrd.corr/Mrd.exu
71,502	75,105	77,451	81,244
53,102	59,725	64,342	72,265
51,490	58,277	63,050	71,302
43,311	50,488	55,856	65,584
43,202	50,378	55,751	65,495
35,624	41,880	47,180	57,604
75,647	80,295	83,318	88,199
65,692	72,242	76,607	83,807
41,911	51,059	57,812	69,918
52,940	61,344	67,190	77,191
38,047	47,139	54,062	66,759
35,038	43,904	50,869	63,927
58,180	62,064	64,641	68,879
56,221	60,448	63,277	67,962
54,530	59,035	62,072	67,138
44,309	49,983	54,067	61,257
40,566	46,333	50,650	58,478
32,963	37,441	41,489	49,751
67,556	73,131	76,820	82,868
60,124	66,945	71,567	79,300
54,737	62,286	67,512	76,414
45,626	53,928	59,967	70,669
46,544	54,806	60,779	71,314
42,659	51,023	57,241	68,450

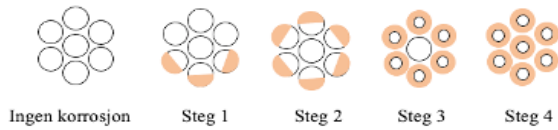
Mrd.corr/Mrd.exu	Mrd.corr/Mrd.exu	Mrd.corr/Mrd.exu	Mrd.corr/Mrd.exu
85,221	89,304	91,909	96,039
74,288	80,777	84,978	91,717
82,370	87,100	90,129	94,943
41,095	52,930	61,234	75,454
87,763	91,258	93,482	96,999
41,147	52,977	61,276	75,486
53,529	64,512	71,956	84,379
60,508	70,387	76,978	87,835
33,825	46,802	56,190	72,686
36,754	49,573	58,732	74,672
20,863	33,575	43,523	62,031
20,442	33,108	43,056	61,610
43,980	54,819	62,272	74,868
32,277	44,227	52,799	67,779
69,644	76,100	80,296	87,062
70,389	76,691	80,782	87,372
17,217	28,900	38,132	55,440
75,544	80,749	84,103	89,469
72,013	77,400	80,853	86,338
56,848	65,325	70,905	79,956
50,761	60,290	66,657	77,107
47,742	57,741	64,479	75,612
28,559	40,377	49,004	64,160
26,719	38,561	47,304	62,793
63,155	72,539	78,732	88,823
61,504	71,185	77,594	88,065
61,504	71,185	77,594	88,065
77,048	83,671	87,946	94,785
45,610	57,690	66,009	80,030
35,592	48,606	57,894	73,989
74,052	80,440	84,570	91,193
94,244	96,022	97,146	98,913
78,398	83,847	87,351	92,941
56,531	66,287	72,790	83,488
84,513	88,588	91,189	95,314
28,405	41,211	50,583	67,167



Vedlegg D1

Kapasitetsberegning av korrodert spennarmering

Momentkapasiteten til tverrsnitt med spennarmering reduseres i 4 steg. Oppsettet for beregningene er vist her, resultatene følger i Excel.



Momentkapasitet til ikke-korrodert tverrsnitt:

> restart,

> $\phi_L := 12 :$ $A_s := 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_L}{2} \right)^2 :$ $A_{s'} := A_s :$

> $\phi_{PS} := 14.07 :$ $A_p := \pi \cdot \left(\frac{\phi_{PS} \cdot 3}{2} \right)^2 :$

> $b := 300 :$ $h := 1100 :$ $h'' := 1000 :$

> $c_{nom_A_s} := 50 :$ $c_{nom_A_{s'}} := 50 :$ $c_{nom_A_p} := 200 :$

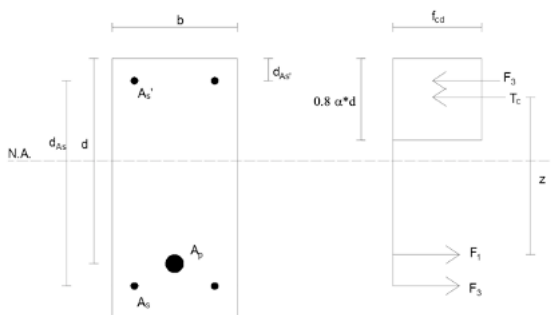
> $d := h - c_{nom_A_p} :$ $d_{A_s} := h - c_{nom_A_s} - c_{nom_A_{s'}} :$

> $f_{yk} := 500 :$ $f_{ck} := 45 :$ $f_{p0.1k} := 1550 :$

> $f_{yd} := f_{yk} :$ $f_{cd} := f_{ck} :$ $f_{pd} := f_{p0.1k} :$

> $E_p := 195 \cdot 10^3 :$

> **if** $f_{ck} \leq 50$ **then** $\epsilon_{cu} := 0.0035$
elif $f_{ck} > 50$ **then** *print(not ok)*
end if:



$$> F_1 + F_3 = F_3 + T_c :$$

$$> F_1 := f_{pd} \cdot A_p : \quad F_3 := f_{yd} \cdot A_s : \quad T_c := 0.8 \cdot \alpha \cdot d \cdot b \cdot f_{cd} :$$

$$> z := (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d :$$

$$> F_1 := T_c :$$

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p}{0.8 \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}} :$$

$$> M_{Rd} := \frac{F_3 \cdot d_{A_s} + T_c \cdot z}{10^6} ;$$

$$M_{Rd} := 1890.927498 \quad (1)$$

Momentkapasitet til korrodert tverrsnitt:

Steg 1:

$$> \phi_{L_korr} := \frac{\phi_L \cdot (100 - vt)}{100} - \frac{2.318 \cdot 1.62}{100} \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_L \cdot (100 - vt)}{100} : \quad A_{s_korr} := \pi$$

$$\cdot \left(\frac{\phi_{L_korr}}{2} \right)^2 \cdot 2 :$$

$$> \phi_{PS_korr} := \frac{\phi_{PS} \cdot (100 - vt)}{100} - \frac{2.318 \cdot 1.62}{100} \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{PS} \cdot (100 - vt)}{100} : \quad A_{p_korr} := \left(\right.$$

$$\left. \cdot \left(\frac{2 \cdot \phi_{PS} + \frac{\phi_{PS}}{2} + \frac{\phi_{PS_korr}}{2}}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_s := A_{s_korr} : \quad A_p := A_{p_korr} :$$

$$> F_1 + F_3 = F_3 + T_c :$$

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p}{0.8 \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}} :$$

$$> F_1 := f_{pd} \cdot A_p : \quad F_3 := f_{yd} \cdot A_s : \quad T_c := 0.8 \cdot \alpha \cdot d \cdot b \cdot f_{cd} :$$

$$> z := (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d :$$

$$> F_1 := T_c :$$

$$> M_{Rd_steg} := \frac{F_3 \cdot d_{A_s} + T_c \cdot z}{10^6} ;$$

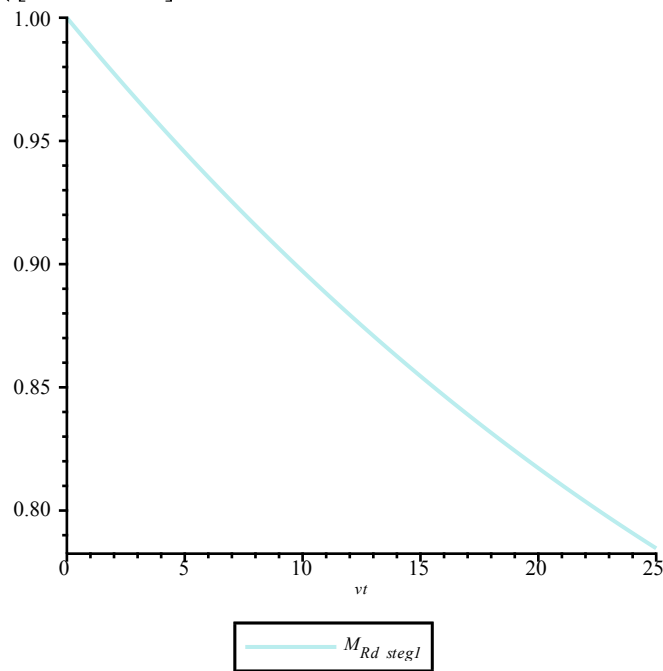
$$M_{Rd_steg} := \pi \left(6 - \frac{3vt}{50} - 0.001126548000 vt (100 - vt) \right)^2 \quad (1.1)$$

$$+ 0.004869468616 (21.10500000 - 0.0351750000 vt$$

$$- 0.0006604387650 vt (100 - vt))^2 (900 - 0.05740740742 \pi (21.10500000$$

$$- 0.03517500000 vt - 0.0006604387650 vt (100 - vt)^2)$$

> $plot_{stegl} := plot\left(\left[\frac{M_{Rd_stegl}}{M_{Rd}}\right], vt = 0..25, legend = [M_{Rd_stegl}], color = turquoise\right);$



Steg 2:

$$\begin{aligned} > \phi_{L_korr} := \frac{\phi_L \cdot (100 - vt)}{100} - \frac{2.318 \cdot 1.62}{100} \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_L \cdot (100 - vt)}{100} : & A_{s_korr} := \pi \\ & \cdot \left(\frac{\phi_{L_korr}}{2}\right)^2 \cdot 2 : \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} > \phi_{PS_korr} := \frac{\phi_{PS} \cdot (100 - vt)}{100} - \frac{2.318 \cdot 1.62}{100} \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{PS} \cdot (100 - vt)}{100} : & A_{p_korr} := \left(\pi \right. \\ & \left. \cdot \left(\frac{\phi_{PS} + 2 \cdot \frac{\phi_{PS}}{2} + \frac{2 \cdot \phi_{PS_korr}}{2}}{2}\right)^2 \right) : \end{aligned}$$

$$> A_s := A_{s_korr} : \quad A_p := A_{p_korr} :$$

$$> F_1 + F_3 = F_3 + T_c :$$

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p}{0.8 \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}} :$$

$$> F_1 := f_{pd} \cdot A_p : \quad F_3 := f_{yd} \cdot A_s : \quad T_c := 0.8 \cdot \alpha \cdot d \cdot b \cdot f_{cd} :$$

$$> z := (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d :$$

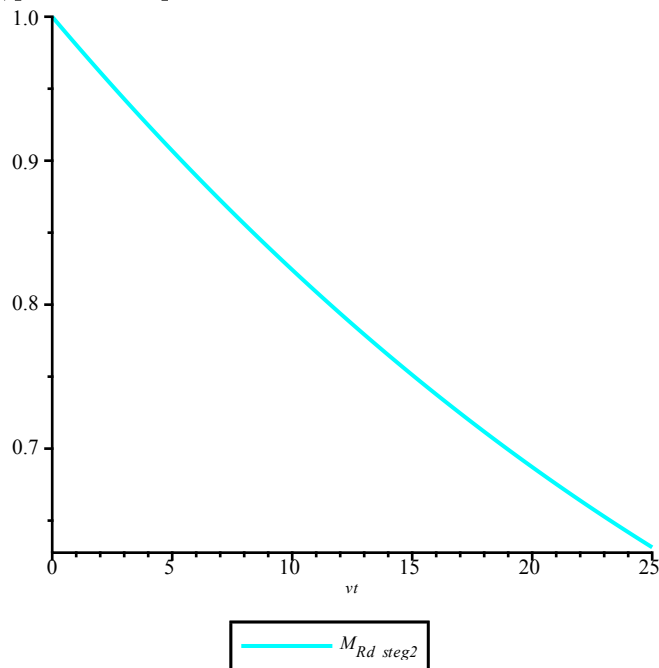
$$> F_1 := T_c :$$

$$> M_{Rd_steg} := \frac{F_3 \cdot d_{A_s} + T_c \cdot z}{10^6};$$

$$M_{Rd_steg} := \pi \left(6 - \frac{3 \cdot vt}{50} - 0.001126548000 \cdot vt (100 - vt) \right)^2 \quad (2.1)$$

$$+ 0.004869468616 (21.10500000 - 0.0703500000 \cdot vt - 0.001320877530 \cdot vt (100 - vt))^2 (900 - 0.05740740742 \pi (21.10500000 - 0.0703500000 \cdot vt - 0.001320877530 \cdot vt (100 - vt))^2)$$

$$> plot_{steg2} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd_steg}}{M_{Rd}} \right], vt = 0 .. 25, legend = [M_{Rd_steg2}], color = cyan \right);$$



Step 3

$$> \phi_{L_korr} := \frac{\phi_L \cdot (100 - vt)}{100} - \frac{2.318 \cdot 1.62}{100} \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_L \cdot (100 - vt)}{100} : \quad A_{s_korr} := \pi$$

$$\cdot \left(\frac{\phi_{L_korr}}{2} \right)^2 \cdot 2 :$$

$$> \phi_{PS_korr} := \frac{\phi_{PS} \cdot (100 - vt)}{100} - \frac{2.318 \cdot 1.62}{100} \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{PS} \cdot (100 - vt)}{100} : \quad A_{p_korr} := \left(\pi$$

$$\cdot \left(\frac{\phi_{PS} + 2 \cdot \phi_{PS_korr}}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_s := A_{s_korr} : \quad A_p := A_{p_korr} :$$

$$> F_1 + F_3 = F_3 + T_c :$$

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p}{0.8 \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}} :$$

$$> F_1 := f_{pd} \cdot A_p : \quad F_3 := f_{yd} \cdot A_s : \quad T_c := 0.8 \cdot \alpha \cdot d \cdot b \cdot f_{cd} :$$

$$> z := (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d :$$

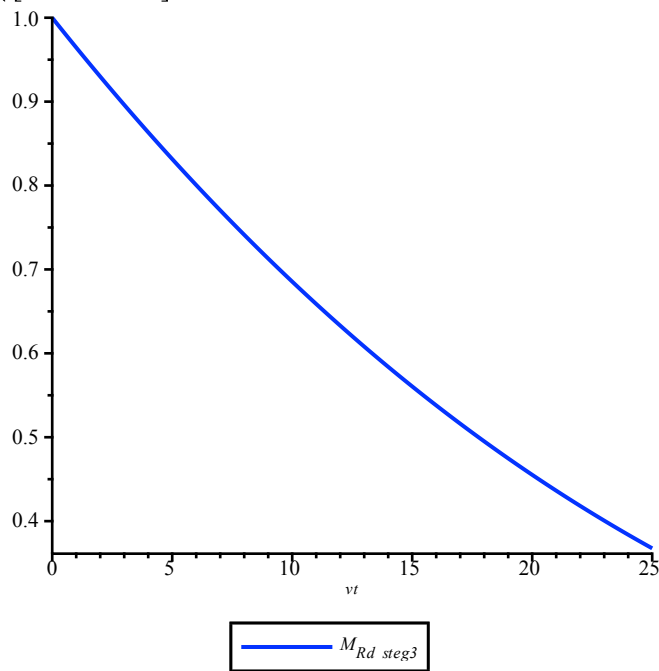
$$> F_1 := T_c :$$

$$> M_{Rd_steg} := \frac{F_3 \cdot d_{A_s} + T_c \cdot z}{10^6} ;$$

$$M_{Rd_steg} := \pi \left(6 - \frac{3 \nu t}{50} - 0.001126548000 \nu t (100 - \nu t) \right)^2 \quad (3.1)$$

$$+ 0.004869468616 (21.10500000 - 0.1407000000 \nu t - 0.002641755060 \nu t (100 - \nu t))^2 (900 - 0.05740740742 \pi (21.10500000 - 0.1407000000 \nu t - 0.002641755060 \nu t (100 - \nu t))^2)$$

$$> plot_{steg3} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd_steg}}{M_{Rd}} \right], \nu t = 0 .. 25, legend = [M_{Rd_steg3}], color = blue \right) ;$$



Step 4

$$> \phi_{L_korr} := \frac{\phi_L \cdot (100 - \nu t)}{100} - \frac{2.318 \cdot 1.62}{100} \cdot \nu t \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_L \cdot (100 - \nu t)}{100} : \quad A_{s_korr} := \pi$$

$$\cdot \left(\frac{\phi_{L_korr}}{2} \right)^2 \cdot 2 :$$

$$\begin{aligned} > \phi_{PS_korr} := \frac{\phi_{PS} \cdot (100 - vt)}{100} - \frac{2.318 \cdot 1.62}{100} \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{PS} \cdot (100 - vt)}{100} : & A_{p_korr} := \pi \\ & \cdot \left(\frac{3 \cdot \phi_{PS_korr}}{2} \right)^2 : \end{aligned}$$

$$> A_s := A_{s_korr} : \quad A_p := A_{p_korr} :$$

$$> F_1 + F_3 = F_3 + T_c :$$

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p}{0.8 \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}} :$$

$$> F_1 := f_{pd} \cdot A_p : \quad F_3 := f_{yd} \cdot A_s : \quad T_c := 0.8 \cdot \alpha \cdot d \cdot b \cdot f_{cd} :$$

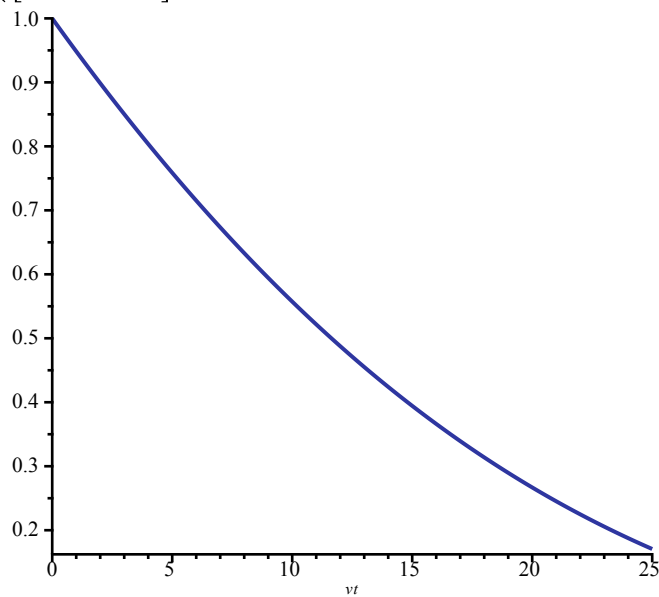
$$> z := (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d :$$

$$> F_1 := T_c :$$

$$> M_{Rd_steg} := \frac{F_3 \cdot d_{A_s} + T_c \cdot z}{10^6} ;$$

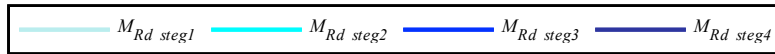
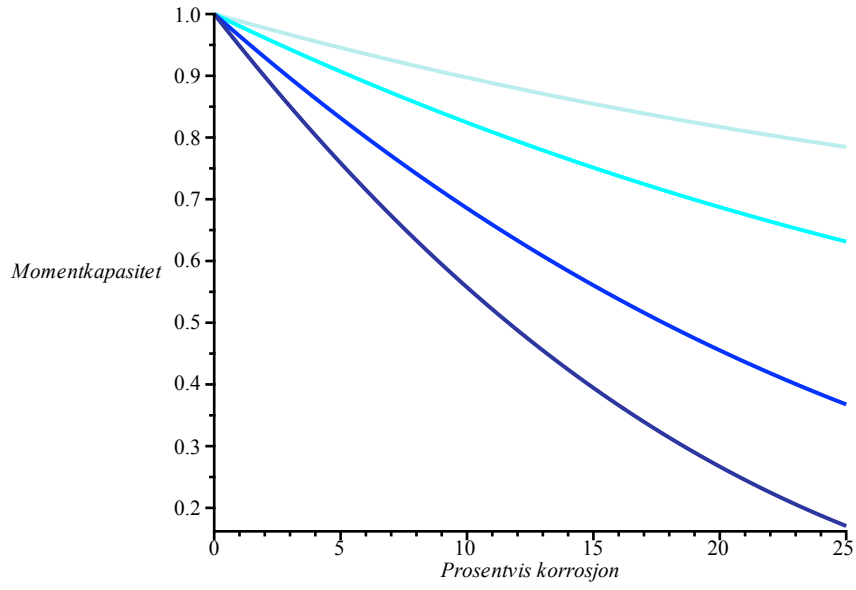
$$\begin{aligned} M_{Rd_steg} := \pi & \left(6 - \frac{3vt}{50} - 0.001126548000 vt (100 - vt) \right)^2 & (4.1) \\ & + 0.004869468616 (21.10500000 - 0.2110500000 vt - 0.003962632590 vt (100 \\ & - vt))^2 (900 - 0.05740740742 \pi (21.10500000 - 0.2110500000 vt \\ & - 0.003962632590 vt (100 - vt))^2) \end{aligned}$$

$$> plot_{steg4} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd_steg}}{M_{Rd}} \right], vt = 0 .. 25, legend = [M_{Rd_steg4}], color = navy \right) ;$$



$$> plot := plots:-display(plot_{steg1}, plot_{steg2}, plot_{steg3}, plot_{steg4}, labels = [Prosentvis korrosjon,$$

Momentkapasitet]);



Vedlegg D2

Kapasitetsberegning av korrodert spennarmering

Informasjon fra forsk (Kioumars et al, 2021)

Forsøk	Referanse	År	Type korrosjon	Bjelke	Størrelse				Spenn	BM=bøymoment			Mucorr/Mcorr	Duktilite % snitt korr.
					b_topp	b_bunn	h	L		Maks last	Maks BM	% red. BM		
1	Belletti et al.	2020	naturlig		150		300	5400						
				1 PBN4P2					5040	98,47	82,71	0,00	100,0	0
				2 PB4P7					4100	81,74	55,86	32,46	67,5	15,12
				3 PB4P8					3900	100,06	65,04	21,36	78,6	8,92
				4 PB4P13					3210	127,45	68,19	17,56	82,4	8,3
				5 PB4P14					3110	145,9	75,62	8,57	91,4	6,03
3	Rinaldi et al.	2010	akselerert		200		300	3000						
				1 B7					2700	160	72	0	100	0
				2 B9					2700	115	51,75	28,1	71,9	20
				3 B8					2700	95	42,75	40,6	59,4	20
				4 B2					2700	190	85,5	0	100	0
				5 B3					2700	85	38,25	55,3	44,7	14
				6 B1					2700	66	29,7	65,3	34,7	20
				7 B4					2700	210	94,5	0,0	100,0	0
				8 B6					2700	200	90	4,8	95,2	7
				9 B5					2700	70	31,5	66,7	33,3	20
4	Menoufy og Soudki	2014	akselerert	T-bjelker	100	400	300	3600						
				1					3400	65,28	45,7	0,0	100,0	0
				2					3400	61	42,7	6,6	93,4	2,5
				3					3400	58,8	41,2	9,9	90,1	5
				4					3400	48,3	33,8	26,0	74,0	10
5	ElBatanouny et al.	2015	akselerert	T-bjelker	152	610	381	4980						
				1 U1					4660	103,7	97,5	0,0	100,0	0
				2 C5-0.8					4660	89,9	84,5	13,3	86,7	4,9
				3 U2					4660	113,9	107,1	0,0	100,0	0
				4 U3					4660	113,9	107,1	0,0	100,0	0
				5 C1-0.4					4660	101	94,9	11,3	88,7	6,3
				6 C2-0.4					4660	100,3	94,3	11,9	88,1	10,2
				7 C3-0.4					4660	76,5	71,9	32,8	67,2	12,8
				8 C4-0.4					4660	89,9	84,5	21,1	78,9	12,8
6	Benenato et al.	2020	akselerert		200		300	3000						
				1						84,5	0,0	100,0	0	
				2						82,5	2,4	97,6	5,06	
7	Liu et al.	2020	akselerert		150		250	2200						
				1 B9						69,4	0,0	100,0	0	
				2 B7						68,6	1,1	98,9	2,2	
				3 B3						66,8	3,8	96,2	4,3	
				4 B2						63,0	9,2	90,8	7,1	
				5 B5						57,4	17,3	82,7	10,2	

Momentkapasitet redusert ved foreslått beregningsmodell (generell korrosjon + groptæring) for spennarmering og slakkarmering. STEG 1: Kun korrosjon på yttersiden av halvparten av ytterste tråder i spennetauet

Loss (%)	Ø_L	Ø_L_corr	A_s	Ø_PS	A_p	Ø_PS_corr	A_p_corr	f_yk	f_ck	f_p0.1k	b	h	c_nom(Ap)	d (Ap)	C_nom (As')	c_nom(As) d_As	f_yd	f_cd	f_pd	α	T_c	F_3	M_Rd	% M_Rd	
0	12	12,00	226,19	14,07	1400,00	14,07	1400	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,22	2170000,00	113097,34	1891,69	100
2,5	12	11,15	195,29	14,07	1400,00	13,08	1367,14341	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,22	2119072,28	97644,41	1838,50	97,187232
5	12	10,33	167,57	14,07	1400,00	12,11	1335,74795	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,21	2070409,33	83783,01	1788,39	94,5390209
7,5	12	9,53	142,81	14,07	1400,00	11,18	1305,77609	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,21	2023952,94	71403,94	1741,24	92,0468078
10	12	8,77	120,80	14,07	1400,00	10,28	1277,19156	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,20	1979646,92	60401,74	1696,94	89,7045757
12,5	12	8,03	101,35	14,07	1400,00	9,42	1249,95939	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,20	1937437,05	50674,72	1655,34	87,50509
15	12	7,32	84,25	14,07	1400,00	8,59	1224,0459	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,20	1897271,15	42124,92	1616,35	85,4445462
17,5	12	6,64	69,32	14,07	1400,00	7,79	1199,41871	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,19	1859098,99	34658,14	1579,84	83,5144755
20	12	5,99	56,37	14,07	1400,00	7,03	1176,04669	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,19	1822872,37	28183,93	1545,70	81,7098505
22,5	12	5,37	45,23	14,07	1400,00	6,29	1153,90005	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,18	1788545,07	22615,56	1513,83	80,0250403
25	12	4,77	35,74	14,07	1400,00	5,59	1132,95024	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,18	1756072,88	17870,09	1484,12	78,4546257

Momentkapasitet redusert ved foreslått beregningsmodell (generell korrosjon + groptæring) for spennarmering og slakkarmering. STEG 2: Kun korrosjon på yttersiden av ytterste tråder i spennetauet

Loss (%)	Ø_L	Ø_L_corr	A_s	Ø_PS	A_p	Ø_PS_corr	A_p_corr	f_yk	f_ck	f_p0.1k	b	h	c_nom(Ap)	d (Ap)	C_nom (As')	c_nom(As) d_As	f_yd	f_cd	f_pd	α	T_c	F_3	M_Rd	% M_Rd	
0	12	12,00	226,19	14,07	1400,00	14,07	1400	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,22	2170000,00	113097,34	1891,69	100
2,5	12	11,15	195,29	14,07	1400,00	13,08	1334,67966	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,21	2068749,29	97644,41	1801,01	95,206246
5	12	10,33	167,57	14,07	1400,00	12,11	1273,00514	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,20	1973157,97	83783,01	1715,43	90,6820705
7,5	12	9,53	142,81	14,07	1400,00	11,18	1214,83436	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,19	1882993,25	71403,94	1634,78	86,4186972
10	12	8,77	120,80	14,07	1400,00	10,28	1160,01957	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,18	1798030,33	60401,74	1558,89	82,4017873
12,5	12	8,03	101,35	14,07	1400,00	9,42	1108,42089	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,18	1718052,39	50674,72	1487,60	78,6385
15	12	7,32	84,25	14,07	1400,00	8,59	1059,90361	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,17	1642850,60	42124,92	1420,73	75,103549
17,5	12	6,64	69,32	14,07	1400,00	7,79	1014,33815	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,16	1572224,14	34658,14	1358,11	71,7932551
20	12	5,99	56,37	14,07	1400,00	7,03	971,6001	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,15	1505980,15	28183,93	1299,57	68,6985951
22,5	12	5,37	45,23	14,07	1400,00	6,29	931,570186	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,15	1443933,79	22615,56	1244,94	65,8106458
25	12	4,77	35,74	14,07	1400,00	5,59	894,134306	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,14	1385908,17	17870,09	1194,05	63,1206264

Momentkapasitet redusert ved foreslått beregningsmodell (generell korrosjon + groptæring) for spennarmering og slakkarmering. STEG 3: Korrosjon på ytterste tråder i spennetauet

Loss (%)	Ø_L	Ø_L_corr	A_s	Ø_PS	A_p	Ø_PS_corr	A_p_corr	f_yk	f_ck	f_p0.1k	b	h	c_nom(Ap)	d (Ap)	C_nom (As')	c_nom(As) d_As	f_yd	f_cd	f_pd	α	T_c	F_3	M_Rd	% M_Rd	
0	12	12,00	226,19	14,07	1400,00	14,07	1400	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,22	2170000,00	113097,34	1891,69	100
2,5	12	11,15	195,29	14,07	1400,00	13,08	1270,91451	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,20	1969917,49	97644,41	1726,85	91,2856677
5	12	10,33	167,57	14,07	1400,00	12,11	1152,04724	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,18	1785673,22	83783,01	1572,79	83,149803
7,5	12	9,53	142,81	14,07	1400,00	11,18	1042,79742	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,17	1616336,01	71403,94	1429,35	75,599388
10	12	8,77	120,80	14,07	1400,00	10,28	942,584932	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,15	1461006,64	60401,74	1296,25	68,5232876
12,5	12	8,03	101,35	14,07	1400,00	9,42	850,850243	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,14	1318817,88	50674,72	1173,19	62,0181296
15	12	7,32	84,25	14,07	1400,00	8,59	767,054456	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,12	1188934,41	42124,92	1059,81	56,0244857
17,5	12	6,64	69,32	14,07	1400,00	7,79	690,679286	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,11	1070552,89	34658,14	955,71	50,5212998
20	12	5,99	56,37	14,07	1400,00	7,03	621,227065	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,10	962901,95	28183,93	860,46	45,4899954
22,5	12	5,37	45,23	14,07	1400,00	6,29	558,220744	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,09	865242,15	22615,56	773,61	40,8948855
25	12	4,77	35,74	14,07	1400,00	5,59	501,203889	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,08	776866,03	17870,09	694,70	36,7235411

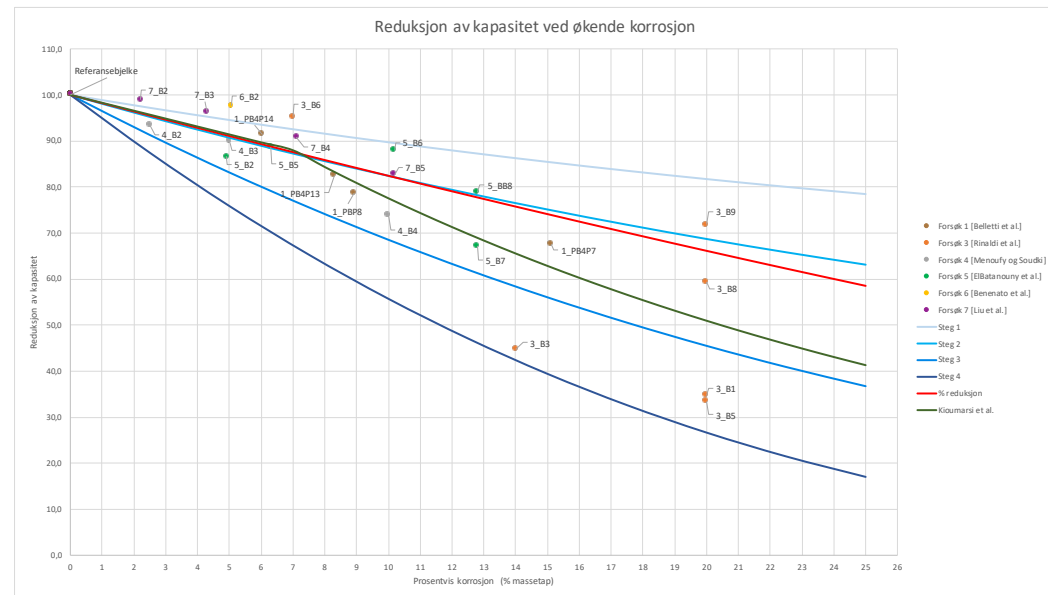
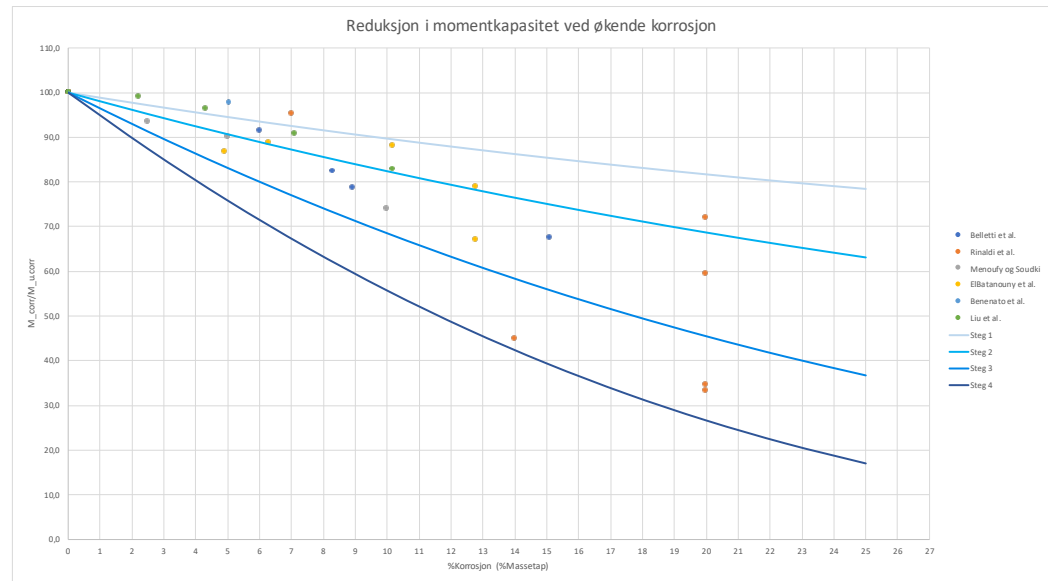
Momentkapasitet redusert ved foreslått beregningsmodell (generell korrosjon + groptæring) for spennarmering og slakkarmering. STEG 4: Korrosjon på alle tråder i spennetauet

Loss (%)	Ø_L	Ø_L_corr	A_s	Ø_PS	A_p	Ø_PS_corr	A_p_corr	f_yk	f_ck	f_p0.1k	b	h	c_nom(Ap)	d (Ap)	C_nom (As')	c_nom(As) d_As	f_yd	f_cd	f_pd	α	T_c	F_3	M_Rd	% M_Rd	
0	12	12,00	226,19	14,07	1400,00	14,07	1400	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,22	2170000,00	113097,34	1891,69	100
2,5	12	11,15	195,29	14,07	1400,00	13,08	1208,71265	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,19	1873504,61	97644,41	1653,80	87,4241904
5	12	10,33	167,57	14,07	1400,00	12,11	1037,12629	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,17	1607545,74	83783,01	1434,86	75,8507046
7,5	12	9,53	142,81	14,07	1400,00	11,18	883,889203	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,14	1370028,26	71403,94	1234,91	65,2807449
10	12	8,77	120,80	14,07	1400,00	10,28	747,696096	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,12	1158928,95	60401,74	1053,69	55,7010252
12,5	12	8,03	101,35	14,07	1400,00	9,42	627,288047	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,10	972296,47	50674,72	890,73	47,0862818
15	12	7,32	84,25	14,07	1400,00	8,59	521,452526	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,08	808251,42	42124,92	745,36	39,4015175
17,5	12	6,64	69,32	14,07	1400,00	7,79	429,023393	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,07	664986,26	34658,14	616,77	32,6039978
20	12	5,99	56,37	14,07	1400,00	7,03	348,880896	500	45	1550	300	1100	200	900	50	50	1000	500,00	45,00	1550,00	0,06	540765,39	28183,9		

Momentkapasitet etter ligning fra Kioumarsi et al. (0-7%: $y=1-0,0172x$, 7-30%: $y=1,18e^{(0,042x)}$)
 Loss (%)

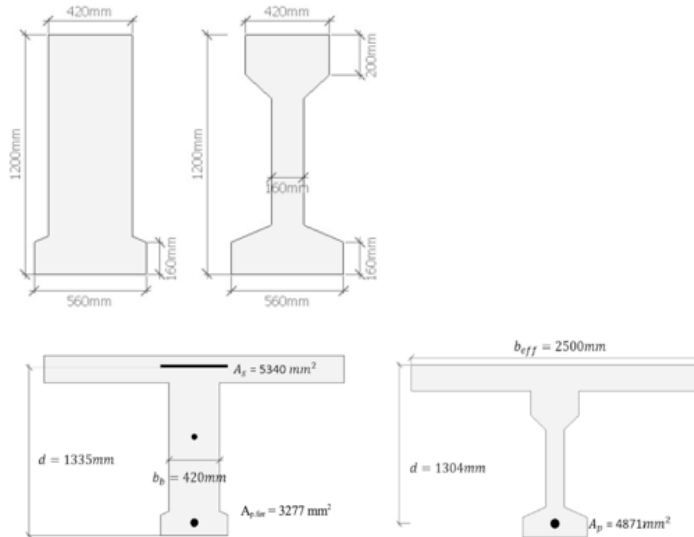
0	100
1	98,28
2	96,56
3	94,84
4	93,12
5	91,4
6	89,68
7	87,96
8	84,325265
9	80,8571991
10	77,5315247
11	74,3426361
12	71,2849072
13	68,3529433
14	65,5415717
15	62,8458325
16	60,2609696
17	57,7824227
18	55,405819
19	53,1269655
20	50,9418418
21	48,8465926
22	46,8375216
23	44,911084
24	43,0638813
25	41,2926544

Relevante figurer:



Vedlegg E

Kapasitetsberegning av Hafrsfjord bru



> restart;

Dimensjonerende feltmoment:

> $M_{Ed} := 5147$;

$$M_{Ed} := 5147$$

(1.1)

> $plot_{last} := plot([M_{Ed}], vt = 0..100, legend = M_{Ed}, color = green)$:

Tverrsnittparametre for brubjelkene:

Tverrsnitt ved støtte:

$$> b_1 := 420 : \quad h_1 := 1200 : \quad A_1 := b_1 \cdot h_1 : \quad y_1 := \frac{h_1}{2} :$$

$$> b_2 := 70 : \quad h_2 := 160 : \quad A_2 := b_2 \cdot h_2 : \quad y_2 := \frac{h_2}{2} :$$

$$> b_3 := 70 : \quad h_3 := 30 : \quad A_3 := \frac{b_3 \cdot h_3}{2} : \quad y_3 := h_2 + \frac{h_3}{3} :$$

Tverrsnittsareal ved støtte:

$$> A_{stotte} := A_1 + 2 \cdot A_2 + 2 \cdot A_3;$$

$$A_{stotte} := 528500$$

(2.1)

Tverrsnittets tyngdepunkt ved støtte:

$$\begin{aligned}
 > y_{st\ddot{o}tte} := evalf\left(\frac{A_1 \cdot y_1 + 2 \cdot A_2 \cdot y_2 + 2 \cdot A_3 \cdot y_3}{A_{st\ddot{o}tte}}\right); \\
 & \qquad \qquad \qquad y_{st\ddot{o}tte} := 576.2516556 \qquad \qquad \qquad (2.2)
 \end{aligned}$$

Tverrsnittets annet arealmoment ved st\ddot{o}tte:

$$\begin{aligned}
 > I_{st\ddot{o}tte} := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} + A_1 \cdot (y_1 - y_{st\ddot{o}tte})^2 + \frac{2 \cdot b_2 \cdot h_2^3}{12} + 2 \cdot A_2 \cdot (y_2 - y_{st\ddot{o}tte})^2 + \frac{2 \cdot b_3 \cdot h_3^3}{12} \\
 & \qquad \qquad \qquad + A_3 \cdot (y_3 - y_{st\ddot{o}tte})^2; \\
 & \qquad \qquad \qquad I_{st\ddot{o}tte} := 6.650199378 \cdot 10^{10} \qquad \qquad \qquad (2.3)
 \end{aligned}$$

Tverrsnitt i felt:

$$\begin{aligned}
 > b_1 := 160 : \quad h_1 := 1200 : \quad A_1 := b_1 \cdot h_1 : \quad y_1 := \frac{h_1}{2} : \\
 > b_2 := 200 : \quad h_2 := 160 : \quad A_2 := b_2 \cdot h_2 : \quad y_2 := \frac{h_2}{2} : \\
 > b_3 := 200 : \quad h_3 := 110 : \quad A_3 := \frac{b_3 \cdot h_3}{2} : \quad y_3 := h_2 + \frac{h_3}{3} : \\
 > b_4 := 130 : \quad h_4 := 200 : \quad A_4 := b_4 \cdot h_4 : \quad y_4 := h_1 - \frac{h_4}{2} : \\
 > b_5 := 130 : \quad h_5 := 120 : \quad A_5 := \frac{b_5 \cdot h_5}{2} : \quad y_5 := h_1 - h_4 - \frac{h_5}{3} :
 \end{aligned}$$

Tverrsnittsareal i felt:

$$\begin{aligned}
 > A_{felt} := A_1 + 2 \cdot A_2 + 2 \cdot A_3 + 2 \cdot A_4 + 2 \cdot A_5; \\
 & \qquad \qquad \qquad A_{felt} := 345600 \qquad \qquad \qquad (2.4)
 \end{aligned}$$

Tverrsnittets tyngdepunkt i felt:

$$\begin{aligned}
 > y_{felt} := evalf\left(\frac{A_1 \cdot y_1 + 2 \cdot A_2 \cdot y_2 + 2 \cdot A_3 \cdot y_3 + 2 \cdot A_4 \cdot y_4 + 2 \cdot A_5 \cdot y_5}{A_{felt}}\right); \\
 & \qquad \qquad \qquad y_{felt} := 569.5100309 \qquad \qquad \qquad (2.5)
 \end{aligned}$$

Tverrsnittets annet arealmoment i felt:

$$\begin{aligned}
 > I_{felt} := \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} + A_1 \cdot (y_1 - y_{felt})^2 + \frac{2 \cdot b_2 \cdot h_2^3}{12} + 2 \cdot A_2 \cdot (y_2 - y_{felt})^2 + \frac{2 \cdot b_3 \cdot h_3^3}{36} + 2 \\
 & \qquad \qquad \cdot A_3 \cdot (y_3 - y_{felt})^2 + \frac{2 \cdot b_4 \cdot h_4^3}{12} + 2 \cdot A_4 \cdot (y_4 - y_{felt})^2 + \frac{2 \cdot b_5 \cdot h_5^3}{36} + 2 \cdot A_5 \cdot (y_5 \\
 & \qquad \qquad - y_{felt})^2; \\
 & \qquad \qquad \qquad I_{felt} := 5.896212370 \cdot 10^{10} \qquad \qquad \qquad (2.6)
 \end{aligned}$$

F\ddot{o}roppspenning:

5 lag, fra bunnen: 14, 10, 10, 10, 2 tau. Forenkles til ett lag.

$$\begin{aligned}
> \phi_{f\ddot{o}r} &:= 9.525 : \\
> A_{p.1} &:= 14 \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r}}{2} \right)^2 \cdot \pi : & y_{p.1} &:= 45 : \\
> A_{p.2} &:= 10 \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r}}{2} \right)^2 \cdot \pi : & y_{p.2} &:= 80 : \\
> A_{p.3} &:= 10 \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r}}{2} \right)^2 \cdot \pi : & y_{p.3} &:= 105 : \\
> A_{p.4} &:= 10 \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r}}{2} \right)^2 \cdot \pi : & y_{p.4} &:= 140 : \\
> A_{p.5} &:= 2 \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r}}{2} \right)^2 \cdot \pi : & y_{p.5} &:= 175 : \\
> A_{p \cdot f\ddot{o}r} &:= A_{p.1} + A_{p.2} + A_{p.3} + A_{p.4} + A_{p.5}; \\
& & A_{p \cdot f\ddot{o}r} &:= 3277.764006 \tag{2.7}
\end{aligned}$$

Spennetaulagets tyngdepunkt og plassering ved st\dd{o}tte og i felt:

$$\begin{aligned}
> y_{p \cdot f\ddot{o}r} &:= \frac{A_{p.1} \cdot y_{p.1} + A_{p.2} \cdot y_{p.2} + A_{p.3} \cdot y_{p.3} + A_{p.4} \cdot y_{p.4} + A_{p.5} \cdot y_{p.5}}{A_{p \cdot f\ddot{o}r}} \\
& & y_{p \cdot f\ddot{o}r} &:= 91.95652172 \tag{2.8}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
> e_{p \cdot f\ddot{o}r \cdot felt} &:= y_{felt} - y_{p \cdot f\ddot{o}r}; & e_{p \cdot f\ddot{o}r \cdot st\dd{o}tte} &:= y_{st\dd{o}tte} - y_{p \cdot f\ddot{o}r}; \\
& & e_{p \cdot f\ddot{o}r \cdot felt} &:= 477.5535092 \\
& & e_{p \cdot f\ddot{o}r \cdot st\dd{o}tte} &:= 484.2951339 \tag{2.9}
\end{aligned}$$

Etteroppspanning:

3 lag, med 1 kabel i hvert lag. Forenkles til \dd{e}n kabel.

$$\begin{aligned}
> \phi_{etter} &:= 26 : \\
> A_{p \cdot etter.1} &:= \left(\frac{\phi_{etter}}{2} \right)^2 \cdot \pi; & A_{p \cdot etter.2} &:= A_{p \cdot etter.1} : & A_{p \cdot etter.3} &:= A_{p \cdot etter.1} : \\
& & A_{p \cdot etter.1} &:= 169 \pi \tag{2.10}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
> A_{p \cdot etter} &:= evalf(3 \cdot A_{p \cdot etter.1}); \\
& & A_{p \cdot etter} &:= 1592.787476 \tag{2.11}
\end{aligned}$$

Spennkabelens tyngdepunkt og plassering ved st\dd{o}tte:

$$\begin{aligned}
> y_{p.1 \cdot st\dd{o}tte} &:= 600 : & y_{p.2 \cdot st\dd{o}tte} &:= 775 : & y_{p.3 \cdot st\dd{o}tte} &:= 950 : \\
> y_{p \cdot etter \cdot st\dd{o}tte} &:= \frac{y_{p.1 \cdot st\dd{o}tte} + y_{p.2 \cdot st\dd{o}tte} + y_{p.3 \cdot st\dd{o}tte}}{3}; \\
& & y_{p \cdot etter \cdot st\dd{o}tte} &:= 775 \tag{2.12}
\end{aligned}$$

$$> e_{p \cdot etter \cdot st\dd{o}tte} := y_{st\dd{o}tte} - y_{p \cdot etter \cdot st\dd{o}tte};$$

$$e_{p \cdot etter \cdot st\ddot{o}tte} := -198.7483444 \quad (2.13)$$

Spennkabelens tyngdepunkt og plassering i felt:

$$> y_{p.1 \cdot felt} := 70 : \quad y_{p.2 \cdot felt} := 130 : \quad y_{p.3 \cdot felt} := 190 :$$

$$> y_{p \cdot etter \cdot felt} := \frac{y_{p.1 \cdot felt} + y_{p.2 \cdot felt} + y_{p.3 \cdot felt}}{3};$$

$$y_{p \cdot etter \cdot felt} := 130 \quad (2.14)$$

$$> e_{p \cdot etter \cdot felt} := y_{felt} - y_{p \cdot etter \cdot felt};$$

$$e_{p \cdot etter \cdot felt} := 439.5100309 \quad (2.15)$$

Slakkarmering i brudekket:

OK: 12 Ø12C200 (40mm fra OK)

UK: 12 Ø12C200 (200mm fra OK)

over st\ddot{o}tte: i tillegg OK Ø16C200 (45 mm fra OK)

$$> b_{brudekke} := 2500 :$$

$$> s := 200$$

$$s := 200 \quad (2.16)$$

$$> n_{stenger} := evalf\left(\frac{b_{brudekke}}{s}\right);$$

$$n_{stenger} := 12.50000000 \quad (2.17)$$

$$> \phi_{12} := 12 : \quad A_{s \cdot OK} := n_{stenger} \cdot \left(\frac{\phi_{12}}{2}\right)^2 \cdot \pi : \quad A_{s \cdot UK} := n_{stenger} \cdot \left(\frac{\phi_{12}}{2}\right)^2 \cdot \pi :$$

$$> \phi_{16} := 16 : \quad A_{s \cdot OK \cdot st\ddot{o}tte} := n_{stenger} \cdot \left(\frac{\phi_{16}}{2}\right)^2 \cdot \pi :$$

Slakkarmering i felt:

$$> A_{s \cdot felt} := A_{s \cdot OK} + A_{s \cdot UK};$$

$$A_{s \cdot felt} := 2827.433388 \quad (2.18)$$

Slakkarmering ved st\ddot{o}tte:

$$> A_{s \cdot st\ddot{o}tte} := A_{s \cdot OK} + A_{s \cdot UK} + A_{s \cdot OK \cdot st\ddot{o}tte};$$

$$A_{s \cdot st\ddot{o}tte} := 5340.707511 \quad (2.19)$$

Momentkapasitet

Originale tverrsnitt, uten korrosjonsskader:

$$> b_{brudekke} := 2500 : \quad b_{bjelke} := 420 :$$

$$> h_{brudekke} := 220 : \quad h_{bjelke} := 1200 : \quad h := h_{brudekke} + h_{bjelke} :$$

$$> A_p := A_{p \cdot f\ddot{o}r} + A_{p \cdot etter}$$

(3.1)

$$A_p := 4870.551482 \quad (3.1)$$

Spennarmeringens tyngdepunkt fra UK bjelke:

$$y_{p \cdot felt} := \frac{y_{p \cdot før} \cdot A_{p \cdot før} + y_{p \cdot etter} \cdot A_{p \cdot etter}}{A_p};$$

$$y_{p \cdot felt} := 104.3976541 \quad (3.2)$$

> Førøppspenningens tyngdepunkt fra UK bjelke :

$$y_{p \cdot før} = 91.95652172 \quad (3.3)$$

Avstand fra OK samvirke til armeringstyngdepunkt:

$$d := h - y_{p \cdot felt};$$

$$d := 1315.602346 \quad (3.4)$$

Avstand fra UK bjelke til slakkarmeringens tyngdepunkt:

$$d_s := 1335 :$$

Betong:

$$f_{ck} := 25 :$$

$$f_{cn} := 16.8 :$$

$$\gamma_{m \cdot arm_bet} := 1.4 :$$

$$f_{cd} := \frac{f_{cn}}{\gamma_{m \cdot arm_bet}};$$

$$f_{cd} := 12.00000000 \quad (3.5)$$

> **if** $f_{ck} \leq 50$ **then** $\epsilon_{cu} := 0.0035$
elif $f_{ck} > 50$ **then** *print(not ok)*
end if:

Spennarmering:

$$f_{p0.1k} := 1500 :$$

$$\gamma_s := 1.15 :$$

$$f_{pd} := \frac{f_{p0.1k}}{\gamma_s};$$

$$f_{pd} := 1304.347826 \quad (3.6)$$

$$E_p := 195 \cdot 10^3 :$$

$$\Delta \epsilon_p := 1.041 \cdot 10^{-3} :$$

$$A_{p \cdot før} :$$

$$A_{p \cdot etter} :$$

$$A_p := A_{p \cdot \text{f\u00f8r}} + A_{p \cdot \text{etter}}; \quad A_p := 4870.551482 \quad (3.7)$$

Slakkarmering:

$$f_{sk} := 400;$$

$$\gamma_{m \cdot \text{st\u00e5l}} := 1.25;$$

$$f_{sd} := \frac{f_{sk}}{\gamma_{m \cdot \text{st\u00e5l}}}; \quad f_{sd} := 320.0000000 \quad (3.8)$$

$$E_s := 210 \cdot 10^3;$$

$$\epsilon_s := \frac{f_{sd}}{E_s};$$

$$A_{s \cdot \text{st\u00f8tte}} := A_{s \cdot \text{st\u00f8tte}}; \quad A_{s \cdot \text{st\u00f8tte}} := 5340.707511 \quad (3.9)$$

Momentkapasitet i felt:

$$\alpha_b := \frac{\epsilon_{cu}}{\Delta \epsilon_p + \epsilon_{cu}}; \quad \alpha_b := 0.7707553402 \quad (3.1.1)$$

$$A_{pb} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha_b \cdot b_{brudekke} \cdot d}{f_{pd}}; \quad A_{pb} := 18657.73862 \quad (3.1.2)$$

$$\text{if } A_p \leq A_{pb} \text{ then } \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d}$$

$$\text{elif } A_p \geq A_{pb} \text{ then } \alpha := \frac{\sigma_{pd} \cdot A_p}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d}$$

$$\text{end if:}$$

$$M_{Rd \cdot \text{felt}} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6}; \quad M_{Rd \cdot \text{felt}} := 7685.227040 \quad (3.1.3)$$

$$\text{plot}_{\text{felt}} := \text{plot}(M_{Rd \cdot \text{felt}}, vt = 0 .. 100, \text{legend} = M_{Rd \cdot \text{felt}}, \text{color} = [\text{blue}]);$$

Momentkapasitet ved st\u00f8tte:

$$\alpha_b := \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_s + \epsilon_{cu}};$$

$$\alpha_b := 0.6966824644 \quad (3.2.1)$$

$$A_{pb} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha_b \cdot b_{bjelke} \cdot d_s}{f_{sd}};$$

$$A_{pb} := 11718.89574 \quad (3.2.2)$$

$$\text{if } A_p \leq A_{pb} \text{ then } \alpha := \frac{f_{sd} \cdot A_s \cdot st\ddot{o}tte}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{bjelke} \cdot d_s}$$

$$\text{elif } A_p \geq A_{pb} \text{ then } \alpha := \frac{\sigma_{sd} \cdot A_s \cdot st\ddot{o}tte}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{bjelke} \cdot d_s}$$

$$\text{end if;}$$

$$\alpha := 0.3175023788 \quad (3.2.3)$$

$$x := \alpha \cdot d_s;$$

$$x := 423.8656757 \quad (3.2.4)$$

$$\epsilon_{p \cdot UK} := \frac{x - y_{p \cdot f\ddot{o}r}}{x} \cdot \epsilon_{cu};$$

$$\epsilon_{p \cdot UK} := 0.002740684386 \quad (3.2.5)$$

$$h^- := d_s - y_{p \cdot f\ddot{o}r};$$

$$h^- := 1243.043478 \quad (3.2.6)$$

$$M_{Rd \cdot st\ddot{o}tte} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d_s \cdot b_{bjelke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d_s + \epsilon_{p \cdot UK} \cdot E_p \cdot A_{p \cdot f\ddot{o}r} \cdot h^-}{10^6}$$

$$M_{Rd \cdot st\ddot{o}tte} := 4169.288561 \quad (3.2.7)$$

Momentkapasitet i felt ved redusert kapasitet

Alternativ 1: Fjerner hele det nederste laget med spennarmering (14 tau).

$$\phi_{f\ddot{o}r} := \phi_{f\ddot{o}r}; \quad A_{p.1} := A_{p.1}; \quad y_{p.1} := y_{p.1};$$

$$\phi_{f\ddot{o}r} := 9.525$$

$$A_{p.1} := 997.5803496$$

$$y_{p.1} := 45 \quad (4.1.1)$$

$$A_{p \cdot red1} := A_p - A_{p.1};$$

$$A_{p \cdot red1} := 3872.971132 \quad (4.1.2)$$

Justerer tyngdepunkt for armeringen:

$$y_{p \cdot red} := y_{p \cdot felt} \cdot \frac{A_p}{A_{p \cdot red1}} - A_{p \cdot 1} \cdot \frac{y_{p \cdot 1}}{A_{p \cdot red1}};$$

$$y_{p \cdot red} := 119.6970020 \quad (4.1.3)$$

$$d_{red} := h - y_{p \cdot red};$$

$$d_{red} := 1300.302998 \quad (4.1.4)$$

Balansert armeringstverrsnitt:

$$\alpha_b := \frac{\epsilon_{cu}}{\Delta \epsilon_p + \epsilon_{cu}};$$

$$A_{pb} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha_b \cdot b_{brudekke} \cdot d_{red}}{f_{pd}};$$

$$\text{if } A_{p \cdot red1} \leq A_{pb} \text{ then } \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red1}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d_{red}}$$

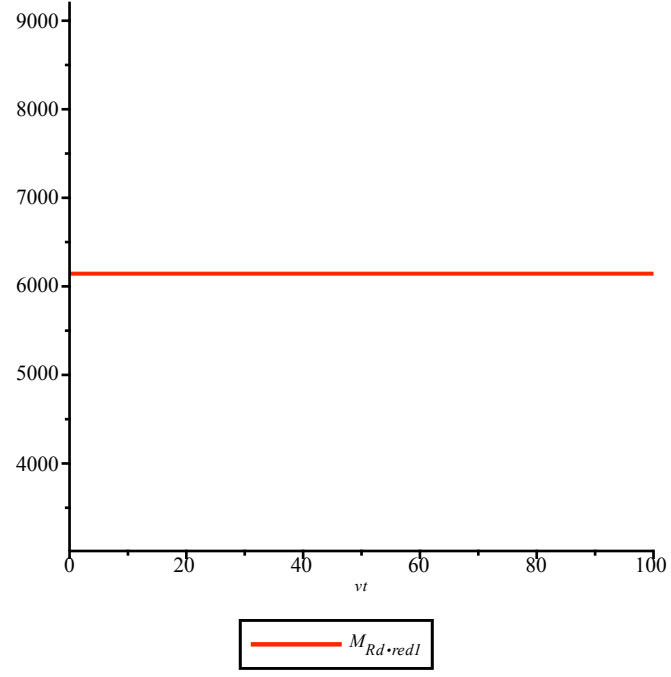
$$\text{elif } A_{p \cdot red1} \geq A_{pb} \text{ then } \alpha := \frac{\sigma_{pd} \cdot A_{p \cdot red1}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d_{red}}$$

end if:

$$M_{Rd \cdot red1} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d_{red} \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d_{red}}{10^6};$$

$$M_{Rd \cdot red1} := 6143.414443 \quad (4.1.5)$$

```
> plot_A1 := plot(M_Rd_red1, vt = 0 .. 100, legend = M_Rd_red1, color = [red]);
```



Alternativ 2: Prosentvis reduksjon på grunn av prosentvis vekttap (vt) i nederste spenntaulag:

$$\begin{aligned}
 > A_{p \cdot red2} := A_p - A_{p.1} \cdot \left(\frac{vt}{100} \right); \\
 & \quad A_{p \cdot red2} := 4870.551482 - 9.975803496 vt
 \end{aligned}
 \tag{4.2.1}$$

Antar under-armert

$$> \alpha_b := \frac{\epsilon_{cu}}{\Delta\epsilon_p + \epsilon_{cu}} ;$$

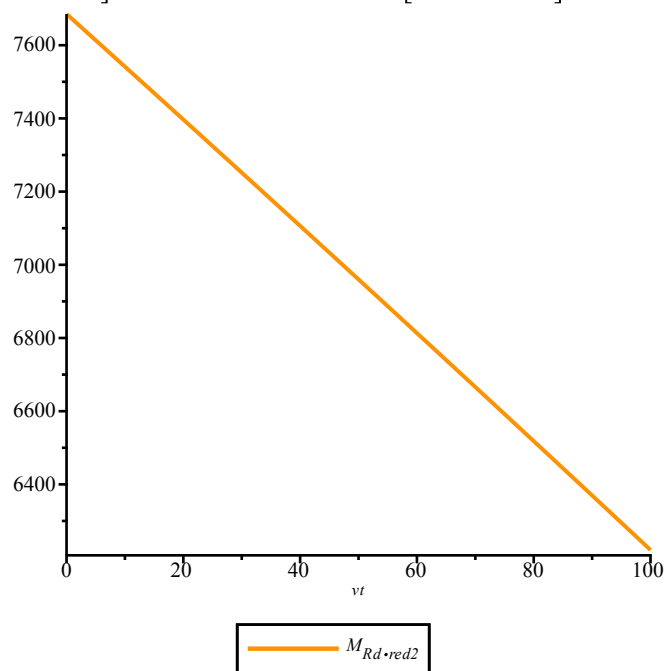
Antar under-reinforced

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red2}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} ;$$

$$> M_{Rd \cdot red2} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6};$$

$$\begin{aligned}
 M_{Rd \cdot red2} := & 41539.42878 (0.2012035671 - 0.0004121026655 vt) (0.9195185732 \\
 & + 0.0001648410662 vt)
 \end{aligned}
 \tag{4.2.2}$$

$$> plot_{A2} := plot([M_{Rd \cdot red2}], vt = 0..100, legend = [M_{Rd \cdot red2}], color = [coral]);$$



Alternativ 3: Reduksjon i nederste spenntaulag på grunn av generell korrosjon + groptæring

$$> \phi_{f\ddot{o}r} := \phi_{f\ddot{o}r}; \quad A_{p.1} := A_{p.1};$$

$$\begin{aligned}
 & \quad \phi_{f\ddot{o}r} := 9.525 \\
 & \quad A_{p.1} := 997.5803496
 \end{aligned}
 \tag{4.3.1}$$

$$> \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} := \frac{\phi_{f\ddot{o}r}}{3};$$

$$\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} := 3.175000000 \quad (4.3.2)$$

$$> \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a} := \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} \cdot (100 - vt)}{100} - 0.0376 \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} \cdot (100 - vt)}{100};$$

$$\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a} := 3.175000000 - 0.0317500000 vt - 0.000596900000 vt (100 - vt) \quad (4.3.3)$$

$$> bp_{A3} := solve(\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a} = 0, vt):$$

$$> \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_b} := 0:$$

Steg 1a:

$$> A_{p.1 \cdot red3_steg1a} := 14 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} + \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d}}{2} + \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a}}{2} \right)^2 \right);$$

$$A_{p.1 \cdot red3_steg1a} := 14 \pi (4.762500000 - 0.00793750000 vt - 0.0001492250000 vt (100 - vt))^2 \quad (4.3.4)$$

$$> A_{p \cdot red3_steg1a} := A_p - A_{p.1} + A_{p.1 \cdot red3_steg1a}:$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red3_steg1a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d}:$$

$$> M_{Rd \cdot red3_steg1a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6};$$

$$M_{Rd \cdot red3_steg1a} := 41539.42878 (0.1599933005 + 0.0005783431199 \pi (4.762500000 - 0.00793750000 vt - 0.0001492250000 vt (100 - vt))^2) (0.9360026798 - 0.0002313372480 \pi (4.762500000 - 0.00793750000 vt - 0.0001492250000 vt (100 - vt))^2) \quad (4.3.5)$$

$$> plot_{A3_steg1a} := plot([M_{Rd \cdot red3_steg1a}], vt = 0 .. bp_{A3}[2], legend = [M_{Rd \cdot red3_steg1}], color = magenta):$$

Steg 1b:

$$> A_{p.1 \cdot red3_steg1b} := 14 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} + \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d}}{2} + \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_b}}{2} \right)^2 \right);$$

$$> A_{p \cdot red3_steg1b} := A_p - A_{p.1} + A_{p.1 \cdot red3_steg1b}:$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p \cdot red3_steg1b}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red3_steg1b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$$

$$> plot_{A3_steg1b} := plot([M_{Rd \cdot red3_steg1b}], vt = bp_{A3}[2]..100, legend = [M_{Rd \cdot red3_steg1}], color = magenta) :$$

Steg 1:

$$> plot_{A3_steg1} := plots:-display(plot_{A3_steg1a}, plot_{A3_steg1b}) :$$

Steg 2a:

$$> A_{p.1 \cdot red3_steg2a} := 14 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} + 2 \cdot \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d}}{2} + \frac{2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} \cdot red_a}{2}}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$A_{p.1 \cdot red3_steg2a} := 14 \pi (4.762500000 - 0.01587500000 vt - 0.0002984500000 vt (100 - vt))^2 \quad (4.3.6)$$

$$> A_p \cdot red3_steg2a := A_p - A_{p.1} + A_{p.1 \cdot red3_steg2a} :$$

Antar under-reinforced

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p \cdot red3_steg2a}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red3_steg2a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} ;$$

$$M_{Rd \cdot red3_steg2a} := 41539.42878 (0.1599933005 + 0.0005783431199 \pi (4.762500000 - 0.01587500000 vt - 0.0002984500000 vt (100 - vt))^2) (0.9360026798 - 0.0002313372480 \pi (4.762500000 - 0.01587500000 vt - 0.0002984500000 vt (100 - vt))^2) \quad (4.3.7)$$

$$> plot_{A3_steg2a} := plot([M_{Rd \cdot red3_steg2a}], vt = 0..bp_{A3}[2], legend = [M_{Rd \cdot red3_steg2}], color = magenta) :$$

Steg 2b:

$$> A_{p.1 \cdot red3_steg2b} := 14 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} + 2 \cdot \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d}}{2} + \frac{2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} \cdot red_b}{2}}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$> A_{p \cdot red3_steg2b} := A_p - A_{p.1} + A_{p.1 \cdot red3_steg2b} :$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red3_steg2b}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red3_steg2b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$$

$$> plot_{A3_steg2b} := plot([M_{Rd \cdot red3_steg2b}], vt = bp_{A3}[2]..100, legend = [M_{Rd \cdot red3_steg2}], color = magenta) :$$

Steg 2:

$$> plot_{A3_steg2} := plots:-display(plot_{A3_steg2a}, plot_{A3_steg2b}) :$$

Steg 3a:

$$> A_{p.1 \cdot red3_steg3a} := 14 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} + 2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a}}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$A_{p.1 \cdot red3_steg3a} := 14 \pi (4.762500000 - 0.0317500000 vt - 0.000596900000 vt (100 - vt))^2 \quad (4.3.8)$$

$$> A_{p \cdot red3_steg3a} := A_p - A_{p.1} + A_{p.1 \cdot red3_steg3a} :$$

Antar under-reinforced

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red3_steg3a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red3_steg3a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} ;$$

$$M_{Rd \cdot red3_steg3a} := 41539.42878 (0.1599933005 + 0.0005783431199 \pi (4.762500000 - 0.0317500000 vt - 0.000596900000 vt (100 - vt))^2) (0.9360026798 - 0.0002313372480 \pi (4.762500000 - 0.0317500000 vt - 0.000596900000 vt (100 - vt))^2) \quad (4.3.9)$$

$$> plot_{A3_steg3a} := plot([M_{Rd \cdot red3_steg3a}], vt = 0..bp_{A3}[2], legend = [M_{Rd \cdot red3_steg3}], color = magenta) :$$

Steg 3b:

$$> A_{p.1 \cdot red3_steg3b} := 14 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} + 2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_b}}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$> A_{p \cdot red3_steg3b} := A_p - A_{p.1} + A_{p.1 \cdot red3_steg3b} :$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red3_steg3b}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red3_steg3b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$$

$$> plot_{A3_steg3b} := plot([M_{Rd \cdot red3_steg3b}], vt = bp_{A3}[2] .. 100, legend = [M_{Rd \cdot red3_steg3}], color = magenta) :$$

Steg 3:

$$> plot_{A3_steg3} := plots:-display(plot_{A3_steg3a}, plot_{A3_steg3b}) :$$

Steg 4a:

$$> A_{p.1 \cdot red3_steg4a} := 14 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{3 \cdot \phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$A_{p.1 \cdot red3_steg4a} := 14 \pi (4.762500000 - 0.0476250000 vt - 0.000895350000 vt (100 - vt))^2 \quad (4.3.10)$$

$$> A_{p \cdot red3_steg4a} := A_p - A_{p.1} + A_{p.1 \cdot red3_steg4a} :$$

Antar under-reinforced

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red3_steg4a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red3_steg4a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} ;$$

$$M_{Rd \cdot red3_steg4a} := 41539.42878 (0.1599933005 + 0.0005783431199 \pi (4.762500000 - 0.0476250000 vt - 0.000895350000 vt (100 - vt))^2) (0.9360026798 - 0.0002313372480 \pi (4.762500000 - 0.0476250000 vt - 0.000895350000 vt (100 - vt))^2) \quad (4.3.11)$$

$$> plot_{A3_steg4a} := plot([M_{Rd \cdot red3_steg4a}], vt = 0 .. bp_{A3}[2], legend = [M_{Rd \cdot red3_steg4}], color = magenta) :$$

Steg 4b:

$$> A_{p.1 \cdot red3_steg4b} := 14 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{3 \cdot \phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_b}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$> A_{p \cdot red3_steg4b} := A_p - A_{p.1} + A_{p.1} \cdot red3_steg4b :$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red3_steg4b}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red3_steg4b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$$

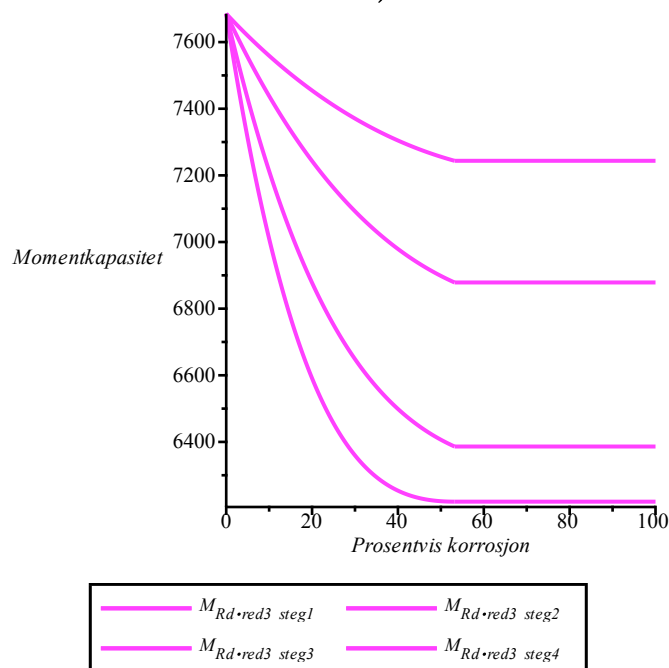
$$> plot_{A3_steg4b} := plot([M_{Rd \cdot red3_steg4b}], vt = bp_{A3}[2]..100, legend = [M_{Rd \cdot red3_steg4}], color = magenta) :$$

Steg 4:

$$> plot_{A3_steg4} := plots:-display(plot_{A3_steg4a}, plot_{A3_steg4b}) :$$

Alternativ 3:

$$> plot_{A3} := plots:-display(plot_{A3_steg1}, plot_{A3_steg2}, plot_{A3_steg3}, plot_{A3_steg4}, labels = [Prosentvis korrosjon, Momentkapasitet]);$$



Alternativ 4: Prosentvis reduksjon på grunn av prosentvis vekttap (vt) i to nederste spenntaulag:

$$> A_{p \cdot red4} := A_p - (A_{p.1} + A_{p.2}) \cdot \left(\frac{vt}{100} \right);$$

$$A_{p \cdot red4} := 4870.551482 - 17.10137742 vt$$

(4.4.1)

Antar under-armert

$$> \alpha_b := \frac{\epsilon_{cu}}{\Delta\epsilon_p + \epsilon_{cu}};$$

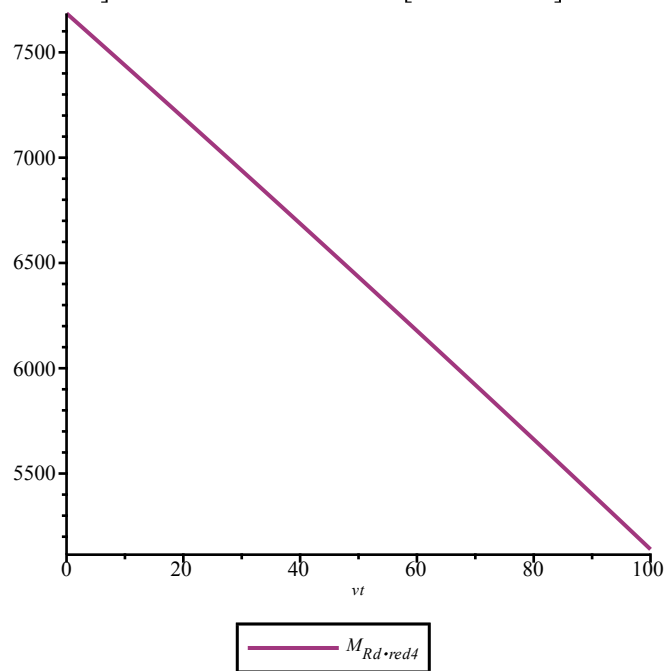
Antar under-reinforced

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p \cdot red4}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d};$$

$$> M_{Rd \cdot red4} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6};$$

$$M_{Rd \cdot red4} := 41539.42878 \text{ (0.2012035671 - 0.0007064617122 vt) (0.9195185732 + 0.0002825846849 vt)} \quad (4.4.2)$$

$$> plot_{A4} := plot([M_{Rd \cdot red4}], vt = 0..100, legend = [M_{Rd \cdot red4}], color = [maroon]);$$



Alternativ 5: Reduksjon i to nederste spenntaulag på grunn av generell korrosjon + groptæring

$$\begin{aligned}
 > \phi_{f\ddot{o}r} &:= \phi_{f\ddot{o}r}; & A_{p.1} &:= A_{p.1}; & A_{p.2} &:= A_{p.2}; \\
 & & & & \phi_{f\ddot{o}r} &:= 9.525 \\
 & & & & A_{p.1} &:= 997.5803496 \\
 & & & & A_{p.2} &:= 712.5573926
 \end{aligned} \quad (4.5.1)$$

$$\begin{aligned}
 > \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\dd{a}d} &:= \frac{\phi_{f\ddot{o}r}}{3}; \\
 & & \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\dd{a}d} &:= 3.175000000
 \end{aligned} \quad (4.5.2)$$

$$\begin{aligned} > \phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a &:= \frac{\phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot (100 - vt)}{100} - 0.0376 \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot (100 - vt)}{100}; \\ \phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a &:= 3.175000000 - 0.03175000000 vt - 0.0005969000000 vt (100 - vt) \end{aligned} \quad (4.5.3)$$

$$> bp_{A5} := solve(\phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a = 0, vt):$$

$$> \phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_b := 0:$$

Steg 1a:

$$> A_{p.1 + 2.red5_steg1a} := (14 + 10) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d + \frac{\phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d}{2} + \frac{\phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a}{2}}{2} \right)^2 \right);$$

$$A_{p.1 + 2.red5_steg1a} := 24 \pi (4.762500000 - 0.007937500000 vt - 0.0001492250000 vt (100 - vt))^2 \quad (4.5.4)$$

$$> A_{p \cdot red5_steg1a} := A_p - A_{p.1} - A_{p.2} + A_{p.1 + 2.red5_steg1a}:$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red5_steg1a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d}:$$

$$> M_{Rd \cdot red5_steg1a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6};$$

$$\begin{aligned} M_{Rd \cdot red5_steg1a} &:= 41539.42878 (0.1305573959 + 0.0009914453484 \pi (4.762500000 \\ &- 0.007937500000 vt - 0.0001492250000 vt (100 - vt))^2) (0.9477770416 \\ &- 0.0003965781394 \pi (4.762500000 - 0.007937500000 vt \\ &- 0.0001492250000 vt (100 - vt))^2) \end{aligned} \quad (4.5.5)$$

$$> plot_{A5_steg1a} := plot([M_{Rd \cdot red5_steg1a}], vt = 0 .. bp_{A5}[2], legend = [M_{Rd \cdot red5_steg1}], color = cyan):$$

Steg 1b:

$$> A_{p.1 + 2.red5_steg1b} := (14 + 10) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d + \frac{\phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d}{2} + \frac{\phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_b}{2}}{2} \right)^2 \right);$$

$$> A_{p \cdot red5_steg1b} := A_p - A_{p.1} - A_{p.2} + A_{p.1 + 2.red5_steg1b}:$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p \cdot red5_steg1b}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red5_steg1b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$$

$$> plot_{A5_steg1b} := plot([M_{Rd \cdot red5_steg1b}], vt = bp_{A5}[2] .. 100, legend = [M_{Rd \cdot red5_steg1}], color = cyan) :$$

Steg 1:

$$> plot_{A5_steg1} := plots:-display(plot_{A5_steg1a}, plot_{A5_steg1b}) :$$

Steg 2a:

$$> A_{p.1 + 2.red5_steg2a} := (14 + 10) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} + 2 \cdot \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d}}{2} + \frac{2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} \cdot red_a}{2}}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$A_{p.1 + 2.red5_steg2a} := 24 \pi (4.762500000 - 0.01587500000 vt - 0.0002984500000 vt (100 - vt))^2 \quad (4.5.6)$$

$$> A_{p \cdot red5_steg2a} := A_p - A_{p.1} - A_{p.2} + A_{p.1 + 2.red5_steg2a} :$$

Antar under-reinforced

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p \cdot red5_steg2a}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red5_steg2a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} ;$$

$$M_{Rd \cdot red5_steg2a} := 41539.42878 (0.1305573959 + 0.0009914453484 \pi (4.762500000 - 0.01587500000 vt - 0.0002984500000 vt (100 - vt))^2) (0.9477770416 - 0.0003965781394 \pi (4.762500000 - 0.01587500000 vt - 0.0002984500000 vt (100 - vt))^2) \quad (4.5.7)$$

$$> plot_{A5_steg2a} := plot([M_{Rd \cdot red5_steg2a}], vt = 0 .. bp_{A5}[2], legend = [M_{Rd \cdot red5_steg2}], color = cyan) :$$

Steg 2b:

$$> A_{p.1 + 2.red5_steg2b} := (14 + 10) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} + 2 \cdot \frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d}}{2} + \frac{2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\ddot{a}d} \cdot red_b}{2}}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$> A_{p \cdot red5_steg2b} := A_p - A_{p.1} - A_{p.2} + A_{p.1 + 2.red5_steg2b} :$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red5_steg2b}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red5_steg2b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$$

$$> plot_{A5_steg2b} := plot([M_{Rd \cdot red5_steg2b}], vt = bp_{A5}[2]..100, legend = [M_{Rd \cdot red5_steg2}], color = cyan) :$$

Steg 2:

$$> plot_{A5_steg2} := plots:-display(plot_{A5_steg2a}, plot_{A5_steg2b}) :$$

Steg 3a:

$$> A_{p.1 + 2.red5_steg3a} := (14 + 10) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\dd{a}d} + 2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\dd{a}d \cdot red_a}}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$A_{p.1 + 2.red5_steg3a} := 24 \pi (4.762500000 - 0.03175000000 vt - 0.0005969000000 vt (100 - vt))^2 \quad (4.5.8)$$

$$> A_{p \cdot red5_steg3a} := A_p - A_{p.1} - A_{p.2} + A_{p.1 + 2.red5_steg3a} :$$

Antar under-reinforced

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red5_steg3a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red5_steg3a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} ;$$

$$M_{Rd \cdot red5_steg3a} := 41539.42878 (0.1305573959 + 0.0009914453484 \pi (4.762500000 - 0.03175000000 vt - 0.0005969000000 vt (100 - vt))^2) (0.9477770416 - 0.0003965781394 \pi (4.762500000 - 0.03175000000 vt - 0.0005969000000 vt (100 - vt))^2) \quad (4.5.9)$$

$$> plot_{A5_steg3a} := plot([M_{Rd \cdot red5_steg3a}], vt = 0..bp_{A5}[2], legend = [M_{Rd \cdot red5_steg3}], color = cyan) :$$

Steg 3b:

$$> A_{p.1 + 2.red5_steg3b} := (14 + 10) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\dd{a}d} + 2 \cdot \phi_{f\ddot{o}r \cdot tr\dd{a}d \cdot red_b}}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$> A_{p \cdot red5_steg3b} := A_p - A_{p.1} - A_{p.2} + A_{p.1 + 2.red5_steg3b} :$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red5_steg3b}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red5_steg3b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$$

$$> plot_{A5_steg3b} := plot([M_{Rd \cdot red5_steg3b}], vt = bp_{A5}[2] .. 100, legend = [M_{Rd \cdot red5_steg3}], color = cyan) :$$

Steg 3:

$$> plot_{A5_steg3} := plots:-display(plot_{A5_steg3a}, plot_{A5_steg3b}) :$$

Steg 4a:

$$> A_{p.1 + 2.red5_steg4a} := (14 + 10) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{3 \cdot \phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_a}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$A_{p.1 + 2.red5_steg4a} := 24 \pi (4.762500000 - 0.04762500000 vt - 0.0008953500000 vt (100 - vt))^2 \quad (4.5.10)$$

$$> A_{p \cdot red5_steg4a} := A_p - A_{p.1} - A_{p.2} + A_{p.1 + 2.red5_steg4a} :$$

Antar under-reinforced

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red5_steg4a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red5_steg4a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} ;$$

$$M_{Rd \cdot red5_steg4a} := 41539.42878 (0.1305573959 + 0.0009914453484 \pi (4.762500000 - 0.04762500000 vt - 0.0008953500000 vt (100 - vt))^2) (0.9477770416 - 0.0003965781394 \pi (4.762500000 - 0.04762500000 vt - 0.0008953500000 vt (100 - vt))^2) \quad (4.5.11)$$

$$> plot_{A5_steg4a} := plot([M_{Rd \cdot red5_steg4a}], vt = 0 .. bp_{A5}[2], legend = [M_{Rd \cdot red5_steg4}], color = cyan) :$$

Steg 4b:

$$> A_{p.1 + 2.red5_steg4b} := (14 + 10) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{3 \cdot \phi_{f\ddot{o}r} \cdot tr\ddot{a}d \cdot red_b}{2} \right)^2 \right) ;$$

$$> A_{p \cdot red5_steg4b} := A_p - A_{p.1} - A_{p.2} + A_{p.1} + 2 \cdot red5_steg4b :$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red5_steg4b}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red5_steg4b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$$

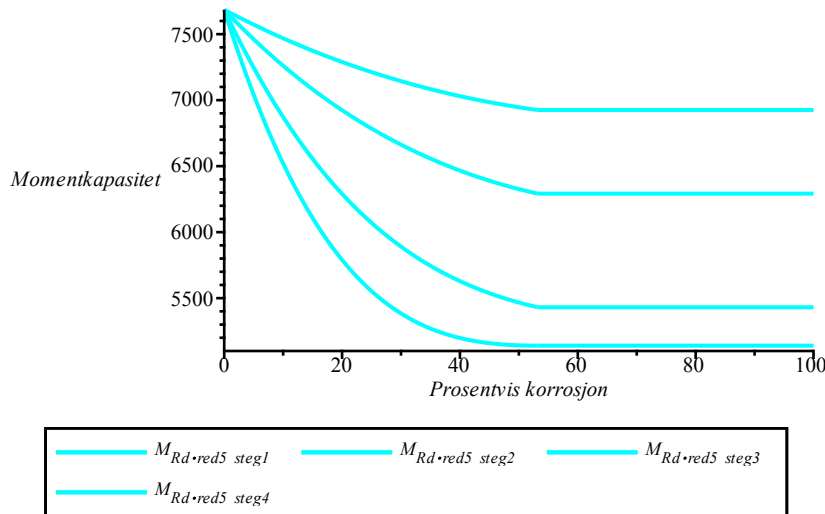
$$> plot_{A5_steg4b} := plot([M_{Rd \cdot red5_steg4b}], vt = bp_{A5}[2]..100, legend = [M_{Rd \cdot red5_steg4}], color = cyan) :$$

Steg 4:

$$> plot_{A5_steg4} := plots:-display(plot_{A5_steg4a}, plot_{A5_steg4b}) :$$

Alternativ 5:

$$> plot_{A5} := plots:-display(plot_{A5_steg1}, plot_{A5_steg2}, plot_{A5_steg3}, plot_{A5_steg4}, labels = [Prosentvis korrosjon, Momentkapasitet]);$$



Alternativ 6: Prosentvis reduksjon på grunn av prosentvis vekttap (vt) i all spennarmering:

$$> \alpha_b := \frac{\epsilon_{cu}}{\Delta\epsilon_p + \epsilon_{cu}} :$$

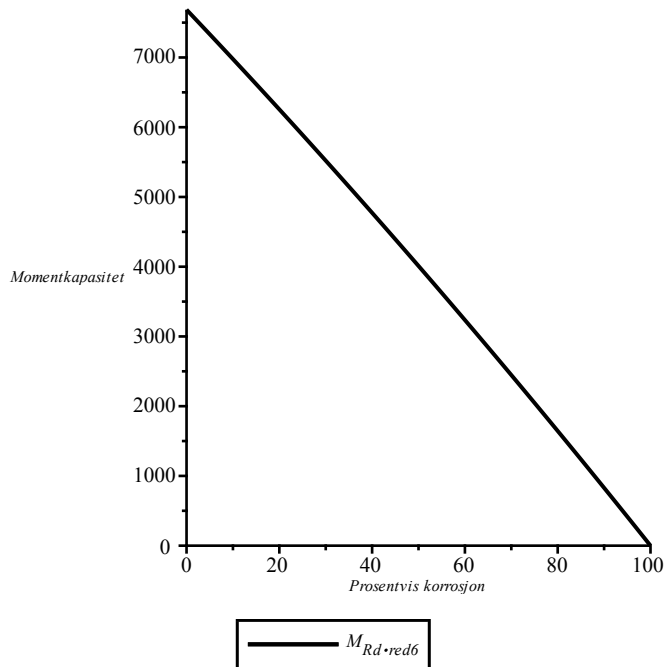
Antar under-reinforced

$$> M_{Rd \cdot red6} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \left(\frac{f_{pd} \cdot (100 - vt)}{100} \cdot A_p \right)}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot \left(1 - 0.4 \cdot \frac{f_{pd} \cdot (100 - vt)}{100} \cdot A_p \right) \cdot d}{10^6} ;$$

(4.6.1)

$$M_{Rd \cdot red6} := 83.57881244 (100 - vt) (0.9195185732 + 0.0008048142685 vt) \quad (4.6.1)$$

> plot_{A6} := plot([M_{Rd · red6}], vt = 0..100, labels = [Prosentvis korrosjon, Momentkapasitet],
 legend = [M_{Rd · red6}], color = [black])



Alternativ 7: Reduksjon i all spennarmering på grunn av generell korrosjon + groptæring

(Tar høyde for at både før oppspent armering og etter oppspent armering består av 7-tråds spenntau)

> $\phi_{før} := \phi_{før}; \quad \phi_{etter} := \phi_{etter};$

$$\phi_{før} := 9.525$$

$$\phi_{etter} := 26$$

(4.7.1)

> $\phi_{før \cdot tråd} := \frac{\phi_{før}}{3}; \quad \phi_{etter \cdot tråd} := \frac{\phi_{etter}}{3};$

> $\phi_{før \cdot tråd \cdot red_a} := \frac{\phi_{før \cdot tråd} \cdot (100 - vt)}{100} - 0.0376 \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{før \cdot tråd} \cdot (100 - vt)}{100};$

$$\phi_{før \cdot tråd \cdot red_a} := 3.175000000 - 0.0317500000 vt - 0.000596900000 vt (100 - vt) \quad (4.7.2)$$

> bp_{A7} := solve($\phi_{før \cdot tråd \cdot red_a} = 0, vt$):

> $\phi_{før \cdot tråd \cdot red_b} := 0;$

> $\phi_{etter \cdot tråd \cdot red_a} := \frac{\phi_{etter \cdot tråd} \cdot (100 - vt)}{100} - 0.0376 \cdot vt \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi_{etter \cdot tråd} \cdot (100 - vt)}{100};$

$$\phi_{etter \cdot tråd \cdot red_a} := \frac{26}{3} - \frac{13 vt}{150} - 0.001629333333 vt (100 - vt) \quad (4.7.3)$$

> $\phi_{etter \cdot tråd \cdot red_b} := 0 :$

Steg 1a:

$$> A_{p \cdot før \cdot red7_steg1a} := (14 + 10 + 10 + 10 + 2) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \phi_{før \cdot tråd} + \frac{\phi_{før \cdot tråd}}{2} + \frac{\phi_{før \cdot tråd \cdot red_a}}{2}}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_{p \cdot etter \cdot red7_steg1a} := 3 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \phi_{etter \cdot tråd} + \frac{\phi_{etter \cdot tråd}}{2} + \frac{\phi_{etter \cdot tråd \cdot red_a}}{2}}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_{p \cdot red7_steg1a} := A_{p \cdot før \cdot red7_steg1a} + A_{p \cdot etter \cdot red7_steg1a} :$$

$$A_{p \cdot red7_steg1a} := 46 \pi (4.762500000 - 0.007937500000 vt - 0.0001492250000 vt (100 - vt))^2 + 3 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{600} - 0.0004073333332 vt (100 - vt) \right)^2 \quad (4.7.4)$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red7_steg1a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red7_steg1a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} ;$$

$$M_{Rd \cdot red7_steg1a} := 41539.42878 \left(0.001900270251 \pi (4.762500000 - 0.007937500000 vt - 0.0001492250000 vt (100 - vt))^2 + 0.0001239306686 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{600} - 0.0004073333332 vt (100 - vt) \right)^2 \right) \left(1 - 0.0007601081004 \pi (4.762500000 - 0.007937500000 vt - 0.0001492250000 vt (100 - vt))^2 - 0.00004957226744 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{600} - 0.0004073333332 vt (100 - vt) \right)^2 \right) \quad (4.7.5)$$

> $plot_{A7_steg1a} := plot([M_{Rd \cdot red7_steg1a}], vt = 0 .. bp_{A7}[2], legend = [M_{Rd \cdot red7_steg1a}], color = gray) :$

Steg 1b:

$$> A_{p \cdot \text{f\o{r}} \cdot \text{red7_steg1b}} := (14 + 10 + 10 + 10 + 2) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \phi_{\text{f\o{r}} \cdot \text{tr\aa{d}}} + \frac{\phi_{\text{f\o{r}} \cdot \text{tr\aa{d}}}}{2} + \frac{\phi_{\text{f\o{r}} \cdot \text{tr\aa{d}} \cdot \text{red_b}}}{2}}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_{p \cdot \text{etter} \cdot \text{red7_steg1b}} := 3 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \phi_{\text{etter} \cdot \text{tr\aa{d}}} + \frac{\phi_{\text{etter} \cdot \text{tr\aa{d}}}}{2} + \frac{\phi_{\text{etter} \cdot \text{tr\aa{d}} \cdot \text{red_b}}}{2}}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_{p \cdot \text{red7_steg1b}} := A_{p \cdot \text{f\o{r}} \cdot \text{red7_steg1b}} + A_{p \cdot \text{etter} \cdot \text{red7_steg1b}} :$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot \text{red7_steg1b}}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{\text{brudekke}} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot \text{red7_steg1b}} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{\text{brudekke}} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$$

$$> \text{plot}_{A7_steg1b} := \text{plot}([M_{Rd \cdot \text{red7_steg1b}}], \text{vt} = \text{bp}_{A7}[2] .. 100, \text{legend} = [M_{Rd \cdot \text{red7_steg1}}], \text{color} = \text{gray}) :$$

Steg 1:

$$> \text{plot}_{A7_steg1} := \text{plots}:-\text{display}(\text{plot}_{A7_steg1a}, \text{plot}_{A7_steg1b}) :$$

>

Steg 2a:

$$> A_{p \cdot \text{f\o{r}} \cdot \text{red7_steg2a}} := (14 + 10 + 10 + 10 + 2) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{\text{f\o{r}} \cdot \text{tr\aa{d}}} + 2 \cdot \frac{\phi_{\text{f\o{r}} \cdot \text{tr\aa{d}}}}{2} + \frac{2 \cdot \phi_{\text{f\o{r}} \cdot \text{tr\aa{d}} \cdot \text{red_a}}}{2}}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_{p \cdot etter \cdot red7_steg2a} := 3 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{etter \cdot tråd} + 2 \cdot \frac{\phi_{etter \cdot tråd}}{2} + \frac{2 \cdot \phi_{etter \cdot tråd} \cdot red_a}{2}}{2} \right)^2 \right) :$$

$$\begin{aligned} > A_{p \cdot red7_steg2a} &:= A_{p \cdot før \cdot red7_steg2a} + A_{p \cdot etter \cdot red7_steg2a} \\ A_{p \cdot red7_steg2a} &:= 46 \pi (4.762500000 - 0.01587500000 vt - 0.0002984500000 vt (100 \\ &\quad - vt))^2 + 3 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{300} - 0.0008146666665 vt (100 - vt) \right)^2 \end{aligned} \quad (4.7.6)$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red7_steg2a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red7_steg2a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} ;$$

$$\begin{aligned} M_{Rd \cdot red7_steg2a} &:= 41539.42878 \left(0.001900270251 \pi (4.762500000 - 0.01587500000 vt \right. \\ &\quad \left. - 0.0002984500000 vt (100 - vt))^2 + 0.0001239306686 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{300} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 0.0008146666665 vt (100 - vt) \right)^2 \right) \left(1 - 0.0007601081004 \pi (4.762500000 \right. \\ &\quad \left. - 0.01587500000 vt - 0.0002984500000 vt (100 - vt))^2 \right. \\ &\quad \left. - 0.00004957226744 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{300} - 0.0008146666665 vt (100 - vt) \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (4.7.7)$$

$$> plot_{A7_steg2a} := plot([M_{Rd \cdot red7_steg2a}], vt = 0 .. bp_{A7}[2], legend = [M_{Rd \cdot red7_steg2}], color = gray) :$$

Steg 2b:

$$\begin{aligned} > A_{p \cdot før \cdot red7_steg2b} &:= (14 + 10 + 10 + 10 + 2) \cdot \left(\pi \right. \\ &\quad \left. \cdot \left(\frac{\phi_{før \cdot tråd} + 2 \cdot \frac{\phi_{før \cdot tråd}}{2} + \frac{2 \cdot \phi_{før \cdot tråd} \cdot red_b}{2}}{2} \right)^2 \right) : \end{aligned}$$

$$> A_{p \cdot etter \cdot red7_steg2b} := 3 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{etter \cdot tråd} + 2 \cdot \frac{\phi_{etter \cdot tråd}}{2} + \frac{2 \cdot \phi_{etter \cdot tråd} \cdot red_b}{2}}{2} \right)^2 \right);$$

>

$$> A_{p \cdot red7_steg2b} := A_{p \cdot før \cdot red7_steg2b} + A_{p \cdot etter \cdot red7_steg2b};$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red7_steg2b}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d};$$

$$> M_{Rd \cdot red7_steg2b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6};$$

$$> plot_{A7_steg2b} := plot([M_{Rd \cdot red7_steg2b}], vt = bp_{A7}[2]..100, legend = [M_{Rd \cdot red7_steg2}], color = gray);$$

Steg 2:

$$> plot_{A7_steg2} := plots:-display(plot_{A7_steg2a}, plot_{A7_steg2b});$$

Steg 3a:

$$> A_{p \cdot før \cdot red7_steg3a} := (14 + 10 + 10 + 10 + 2) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{før \cdot tråd} + 2 \cdot \phi_{før \cdot tråd} \cdot red_a}{2} \right)^2 \right);$$

$$> A_{p \cdot etter \cdot red7_steg3a} := 3 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{etter \cdot tråd} + 2 \cdot \phi_{etter \cdot tråd} \cdot red_a}{2} \right)^2 \right);$$

$$> A_{p \cdot red7_steg3a} := A_{p \cdot før \cdot red7_steg3a} + A_{p \cdot etter \cdot red7_steg3a};$$

$$A_{p \cdot red7_steg3a} := 46 \pi (4.762500000 - 0.03175000000 vt - 0.0005969000000 vt (100 - vt))^2 + 3 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{150} - 0.001629333333 vt (100 - vt) \right)^2 \quad (4.7.8)$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red7_steg3a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d};$$

$$> M_{Rd \cdot red7_steg3a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6};$$

$$M_{Rd \cdot red7_steg3a} := 41539.42878 \left(0.001900270251 \pi (4.762500000 - 0.03175000000 vt - 0.0005969000000 vt (100 - vt))^2 + 3 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{150} - 0.001629333333 vt (100 - vt) \right)^2 \right) \quad (4.7.9)$$

$$\begin{aligned}
& - 0.0005969000000 \, vt \, (100 - vt)^2 + 0.0001239306686 \, \pi \left(13 - \frac{13 \, vt}{150} \right. \\
& \left. - 0.001629333333 \, vt \, (100 - vt) \right)^2 \left(1 - 0.0007601081004 \, \pi \, (4.762500000 \right. \\
& \left. - 0.03175000000 \, vt - 0.0005969000000 \, vt \, (100 - vt) \right)^2 \\
& \left. - 0.00004957226744 \, \pi \left(13 - \frac{13 \, vt}{150} - 0.001629333333 \, vt \, (100 - vt) \right)^2 \right)
\end{aligned}$$

> $plot_{A7_steg3a} := plot([M_{Rd \cdot red7_steg3a}], vt = 0 .. bp_{A7}[2], legend = [M_{Rd \cdot red7_steg3}], color = gray) :$

Steg 3b:

> $A_{p \cdot før \cdot red7_steg3b} := (14 + 10 + 10 + 10 + 2) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{før \cdot tråd} + 2 \cdot \phi_{før \cdot tråd \cdot red_b}}{2} \right)^2 \right) :$

> $A_{p \cdot etter \cdot red7_steg3b} := 3 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{\phi_{etter \cdot tråd} + 2 \cdot \phi_{etter \cdot tråd \cdot red_b}}{2} \right)^2 \right) :$

>

> $A_{p \cdot red7_steg3b} := A_{p \cdot før \cdot red7_steg3b} + A_{p \cdot etter \cdot red7_steg3b} :$

Antar under-armert

> $\alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red7_steg3b}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$

> $M_{Rd \cdot red7_steg3b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} :$

> $plot_{A7_steg3b} := plot([M_{Rd \cdot red7_steg3b}], vt = bp_{A7}[2] .. 100, legend = [M_{Rd \cdot red7_steg3}], color = gray) :$

Steg 3:

> $plot_{A7_steg3} := plots:-display(plot_{A7_steg3a}, plot_{A7_steg3b}) :$

Steg 4a:

> $A_{p \cdot før \cdot red7_steg4a} := (14 + 10 + 10 + 10 + 2) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{3 \cdot \phi_{før \cdot tråd \cdot red_a}}{2} \right)^2 \right) :$

$$> A_{p \cdot etter \cdot red7_steg4a} := 3 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{3 \cdot \phi_{etter} \cdot tråd \cdot red_a}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_{p \cdot red7_steg4a} := A_{p \cdot før \cdot red7_steg4a} + A_{p \cdot etter \cdot red7_steg4a} :$$

$$A_{p \cdot red7_steg4a} := 46 \pi (4.762500000 - 0.04762500000 vt - 0.0008953500000 vt (100 - vt))^2 + 3 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{100} - 0.002444000000 vt (100 - vt) \right)^2 \quad (4.7.10)$$

Antar under-armert

$$> \alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_{p \cdot red7_steg4a}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d} :$$

$$> M_{Rd \cdot red7_steg4a} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6} ;$$

$$M_{Rd \cdot red7_steg4a} := 41539.42878 \left(0.001900270251 \pi (4.762500000 - 0.04762500000 vt - 0.0008953500000 vt (100 - vt))^2 + 0.0001239306686 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{100} - 0.002444000000 vt (100 - vt) \right)^2 \right) \left(1 - 0.0007601081004 \pi (4.762500000 - 0.04762500000 vt - 0.0008953500000 vt (100 - vt))^2 - 0.00004957226744 \pi \left(13 - \frac{13 vt}{100} - 0.002444000000 vt (100 - vt) \right)^2 \right) \quad (4.7.11)$$

$$> plot_{A7_steg4a} := plot([M_{Rd \cdot red7_steg4a}], vt = 0 .. bp_{A7}[2], legend = [M_{Rd \cdot red7_steg4}], color = gray) :$$

Steg 4b:

$$> A_{p \cdot før \cdot red7_steg4b} := (14 + 10 + 10 + 10 + 2) \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{3 \cdot \phi_{før} \cdot tråd \cdot red_b}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_{p \cdot etter \cdot red7_steg4b} := 3 \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{3 \cdot \phi_{etter} \cdot tråd \cdot red_b}{2} \right)^2 \right) :$$

$$> A_{p \cdot red7_steg4b} := A_{p \cdot før \cdot red7_steg4b} + A_{p \cdot etter \cdot red7_steg4b} :$$

Antar under-armert

$$\alpha := \frac{f_{pd} \cdot A_p \cdot red7_steg4b}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b_{brudekke} \cdot d}$$

$$M_{Rd \cdot red7_steg4b} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot \alpha \cdot d \cdot b_{brudekke} \cdot (1 - 0.4 \cdot \alpha) \cdot d}{10^6}$$

```
> plotA7_steg4b := plot([MRd \cdot red7\_steg4b], vt = bpA7[2]..100, legend = [MRd \cdot red7\_steg4 ], color = gray) :
```

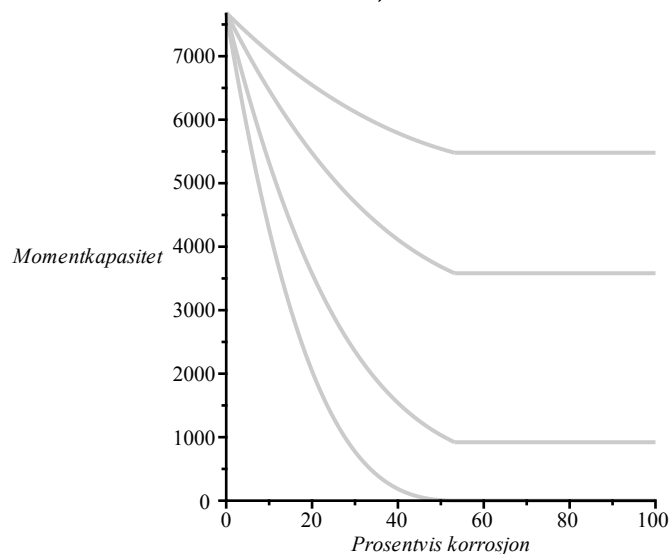
Steg 4:

```
> plotA7_steg4 := plots:-display(plotA7_steg4a, plotA7_steg4b) :
```

```
>
```

Alternativ 5:

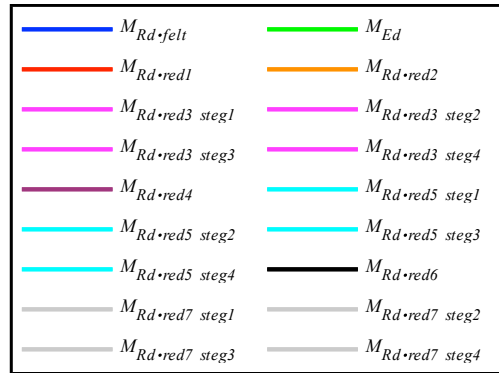
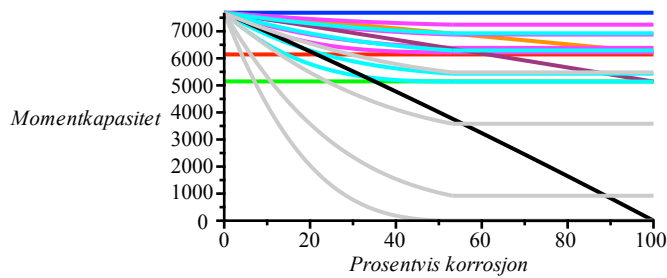
```
> plotA7 := plots:-display(plotA7_steg1, plotA7_steg2, plotA7_steg3, plotA7_steg4, labels = [Prosentvis korrosjon, Momentkapasitet]);
```



Plot

Alle alternativer i ett plot

```
> plotalle := plots:-display(plotfelt, plotlast, plotA1, plotA2, plotA3, plotA4, plotA5, plotA6, plotA7, labels = [Prosentvis korrosjon, Momentkapasitet])
```



Laster og original kapasitet

$$\begin{aligned} > \text{plot}_{last_ \%} := \text{plot} \left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd \cdot felt}}, vt = 0 .. 100, \text{legend} = M_{Ed}, \text{color} = [green], \text{labels} \right. \\ &= \left. [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet] \right) : \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} > \text{plot}_{felt_ \%} := \text{plot} \left(\frac{M_{Rd \cdot felt}}{M_{Rd \cdot felt}}, vt = 0 .. 100, \text{legend} = M_{Rd \cdot felt}, \text{color} = [blue], \text{labels} \right. \\ &= \left. [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet] \right) : \end{aligned}$$

Reduksjon i kapasitet sammenlignet med original kapasitet

Alternativ 1

$$\begin{aligned} > \text{plot}_{A1_ \%} := \text{plot} \left(\frac{M_{Rd \cdot red1}}{M_{Rd \cdot felt}}, vt = 0 .. 100, \text{legend} = M_{Rd \cdot red1}, \text{color} = [red], \text{labels} \right. \\ &= \left. [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet] \right) : \end{aligned}$$

Alternativ 2

$$> \text{plot}_{A2_ \%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd \cdot red2}}{M_{Rd \cdot felt}} \right], vt = 0 .. 100, \text{legend} = [M_{Rd \cdot red2}], \text{color} = [coral], \text{labels} \right)$$

$= [\text{Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet}] :$

Alternativ 3

$> \text{plot}_{A3_steg1a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red3_steg1a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 0 .. bp_{A3}[2], legend = [M_{Rd} \cdot red3], color = magenta \right) :$
 $\text{plot}_{A3_steg1b\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red3_steg1b}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = bp_{A3}[2] .. 100, color = magenta \right) :$

$> \text{plot}_{A3_steg2a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red3_steg2a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 0 .. bp_{A3}[2], color = magenta \right) :$
 $\text{plot}_{A3_steg2b\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red3_steg2b}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = bp_{A3}[2] .. 100, color = magenta \right) :$

$> \text{plot}_{A3_steg3a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red3_steg3a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 0 .. bp_{A3}[2], color = magenta \right) :$
 $\text{plot}_{A3_steg3b\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red3_steg3b}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = bp_{A3}[2] .. 100, color = magenta \right) :$

$> \text{plot}_{A3_steg4a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red3_steg4a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 0 .. bp_{A3}[2], color = magenta \right) :$
 $\text{plot}_{A3_steg4b\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red3_steg4b}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = bp_{A3}[2] .. 100, color = magenta \right) :$

$> \text{plot}_{A3_ \%} := \text{plots:-display}(\text{plot}_{A3_steg1a\%}, \text{plot}_{A3_steg1b\%}, \text{plot}_{A3_steg2a\%}, \text{plot}_{A3_steg2b\%}, \text{plot}_{A3_steg3a\%}, \text{plot}_{A3_steg3b\%}, \text{plot}_{A3_steg4a\%}, \text{plot}_{A3_steg4b\%}, labels = [\text{Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet}]) :$

$> \text{plot}_{A3_steg1a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red3_steg1a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 0 .. 4, legend = [M_{Rd} \cdot red3], color = magenta \right) :$

```

> plot_A3_steg2a% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red3\_steg2a}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt = 4..8, color = magenta ] :
=
> plot_A3_steg3a% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red3\_steg3a}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt = 8..14, color = magenta ] :
=
> plot_A3_steg4a% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red3\_steg4a}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt = 14..bp_A3[2], color = magenta ] :
plot_A3_steg4b% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red3\_steg4b}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt
= bp_A3[2]..100, color = magenta ] :
> plot_A3b_% := plots:-display(plot_A3_steg1a%, plot_A3_steg2a%, plot_A3_steg3a%, plot_A3_steg4a%,
plot_A3_steg4b% labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet] ) :

```

Alternativ 4

```

> plot_A4_% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red4}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt = 0..100, legend = [M_{Rd} \cdot red4 ], color = [maroon], labels
= [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet] ] :

```

Alternativ 5

```

> plot_A5_steg1a% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red5\_steg1a}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt = 0..bp_A5[2], legend = [M_{Rd} \cdot red5 ], color
= cyan ] :
plot_A5_steg1b% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red5\_steg1b}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt = bp_A5[2]..100, color
= cyan ] :
> plot_A5_steg2a% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red5\_steg2a}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt = 0..bp_A5[2], color = cyan ] :
plot_A5_steg2b% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red5\_steg2b}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt
= bp_A5[2]..100, color = cyan ] :
> plot_A5_steg3a% := plot( [ [  $\frac{M_{Rd} \cdot red5\_steg3a}{M_{Rd} \cdot felt}$  ], vt = 0..bp_A5[2], color = cyan ] :

```

$$plot_{A5_steg3b\%} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red5_steg3b}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt \right)$$

$$= bp_{A5}[2]..100, color = cyan) :$$

$$> plot_{A5_steg4a\%} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red5_steg4a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 0..bp_{A5}[2], color = cyan \right) :$$

$$plot_{A5_steg4b\%} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red5_steg4b}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt \right)$$

$$= bp_{A5}[2]..100, color = cyan) :$$

$$> plot_{A5_ \%} := plots:-display(plot_{A5_steg1a\%} plot_{A5_steg1b\%} plot_{A5_steg2a\%} plot_{A5_steg2b\%} plot_{A5_steg3a\%} plot_{A5_steg3b\%} plot_{A5_steg4a\%} plot_{A5_steg4b\%} labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]) :$$

$$> plot_{A5_steg1a\%} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red5_steg1a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 0..4, legend = [M_{Rd} \cdot red5], color = cyan \right) :$$

$$> plot_{A5_steg2a\%} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red5_steg2a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 4..8, color = cyan \right) :$$

$$> plot_{A5_steg3a\%} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red5_steg3a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 8..14, color = cyan \right) :$$

$$> plot_{A5_steg4a\%} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red5_steg4a}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 14..bp_{A5}[2], color = cyan \right) :$$

$$plot_{A5_steg4b\%} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red5_steg4b}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt \right)$$

$$= bp_{A5}[2]..100, color = cyan) :$$

$$> plot_{A5b_ \%} := plots:-display(plot_{A5_steg1a\%} plot_{A5_steg2a\%} plot_{A5_steg3a\%} plot_{A5_steg4a\%} plot_{A5_steg4b\%} labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]) :$$

Alternativ 6

$$> plot_{A6_ \%} := plot \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot red6}{M_{Rd} \cdot felt} \right], vt = 0..100, legend = [M_{Rd} \cdot red6], color = [black], labels \right)$$

$$= [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]) :$$

Alternativ 7

$$\begin{aligned} > \text{plot}_{A7_steg1a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg1a}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt = 0 .. bp_{A7}[2], \text{legend} = [M_{Rd} \cdot \text{red7}], \text{color} \right. \\ &= \text{gray} \left. \right) : \quad \text{plot}_{A7_steg1b\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg1b}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt = bp_{A7}[2] .. 100, \text{color} \right. \\ &= \text{gray} \left. \right) : \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} > \text{plot}_{A7_steg2a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg2a}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt = 0 .. bp_{A7}[2], \text{color} = \text{gray} \right) : \\ \text{plot}_{A7_steg2b\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg2b}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt \right. \\ \left. = bp_{A7}[2] .. 100, \text{color} = \text{gray} \right) : \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} > \text{plot}_{A7_steg3a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg3a}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt = 0 .. bp_{A7}[2], \text{color} = \text{gray} \right) : \\ \text{plot}_{A7_steg3b\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg3b}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt \right. \\ \left. = bp_{A7}[2] .. 100, \text{color} = \text{gray} \right) : \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} > \text{plot}_{A7_steg4a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg4a}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt = 0 .. bp_{A7}[2], \text{color} = \text{gray} \right) : \\ \text{plot}_{A7_steg4b\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg4b}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt \right. \\ \left. = bp_{A7}[2] .. 100, \text{color} = \text{gray} \right) : \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} > \text{plot}_{A7\%} := \text{plots:-display}(\text{plot}_{A7_steg1a\%} \text{plot}_{A7_steg1b\%} \text{plot}_{A7_steg2a\%} \text{plot}_{A7_steg2b\%} \\ \text{plot}_{A7_steg3a\%} \text{plot}_{A7_steg3b\%} \text{plot}_{A7_steg4a\%} \text{plot}_{A7_steg4b\%} \text{labels} = [\text{Prosentvis korrosjon}, \\ \text{Reduksjon av momentkapasitet}]) : \end{aligned}$$

$$> \text{plot}_{A7_steg1a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg1a}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt = 0 .. 4, \text{legend} = [M_{Rd} \cdot \text{red7}], \text{color} = \text{gray} \right) :$$

$$> \text{plot}_{A7_steg2a\%} := \text{plot} \left(\left[\frac{M_{Rd} \cdot \text{red7_steg2a}}{M_{Rd} \cdot \text{felt}} \right], vt = 4 .. 8, \text{color} = \text{gray} \right) :$$

> $plot_{A7_steg3a\%} := plot\left(\left[\frac{M_{Rd \cdot red7_steg3a}}{M_{Rd \cdot felt}}\right], vt = 8..14, color = gray\right) :$

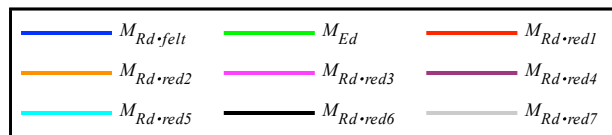
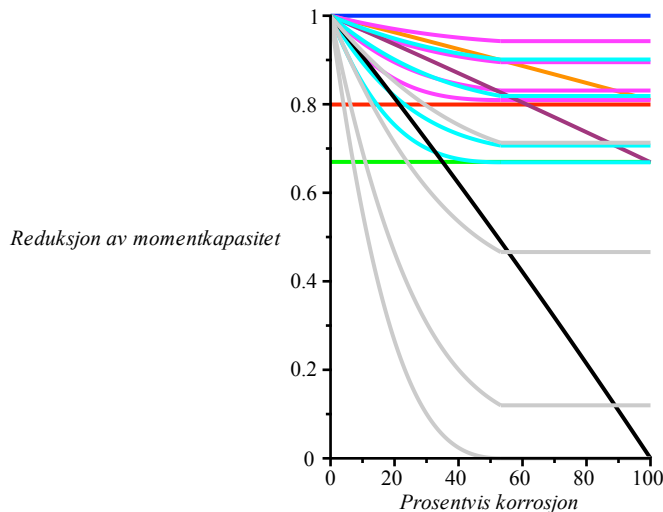
> $plot_{A7_steg4a\%} := plot\left(\left[\frac{M_{Rd \cdot red7_steg4a}}{M_{Rd \cdot felt}}\right], vt = 14..bp_{A7}[2], color = gray\right) :$

$plot_{A7_steg4b\%} := plot\left(\left[\frac{M_{Rd \cdot red7_steg4b}}{M_{Rd \cdot felt}}\right], vt = bp_{A7}[2]..100, color = gray\right) :$

> $plot_{A7b_ \%} := plots:-display(plot_{A7_steg1a\%}, plot_{A7_steg2a\%}, plot_{A7_steg3a\%}, plot_{A7_steg4a\%}, plot_{A7_steg4b\%}, labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]) :$

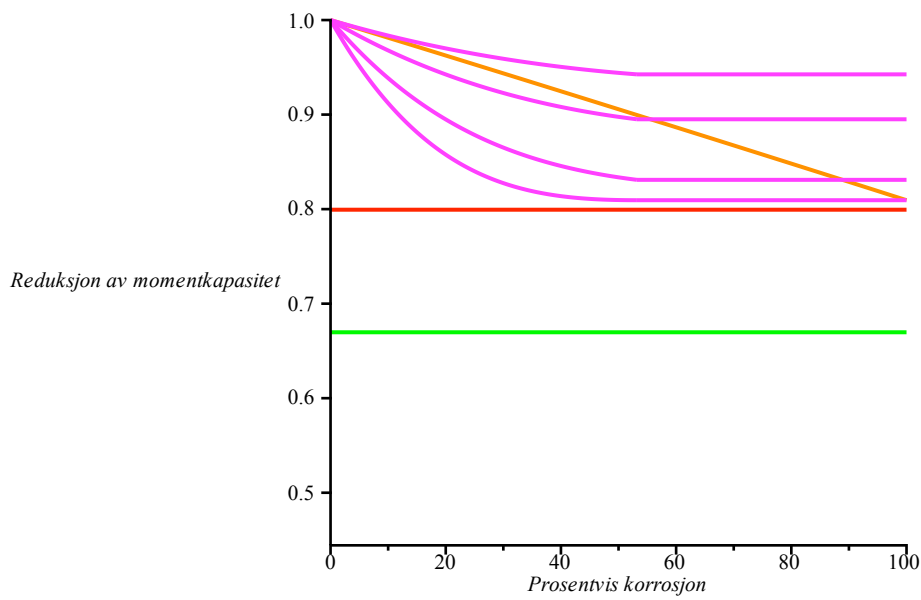
Alle alternativer, i tillegg til dimensjonernde moment og dimensjonerende laster

> $plot_{alle\%} := plots:-display(plot_{felt_ \%}, plot_{last_ \%}, plot_{A1_ \%}, plot_{A2_ \%}, plot_{A3_ \%}, plot_{A4_ \%}, plot_{A5_ \%}, plot_{A6_ \%}, plot_{A7_ \%}, labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]) ;$

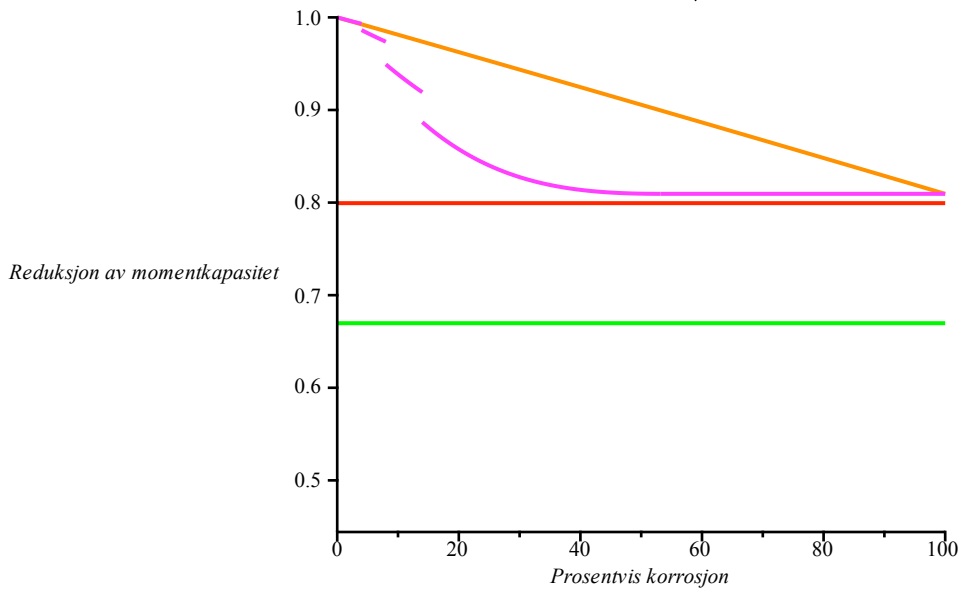


Alternativ 1, 2 og 3:

> $plots_{1+2+3} := plots:-display(plot_{last_ \%}, plot_{A1_ \%}, plot_{A2_ \%}, plot_{A3_ \%}, labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]) ;$

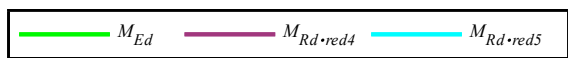
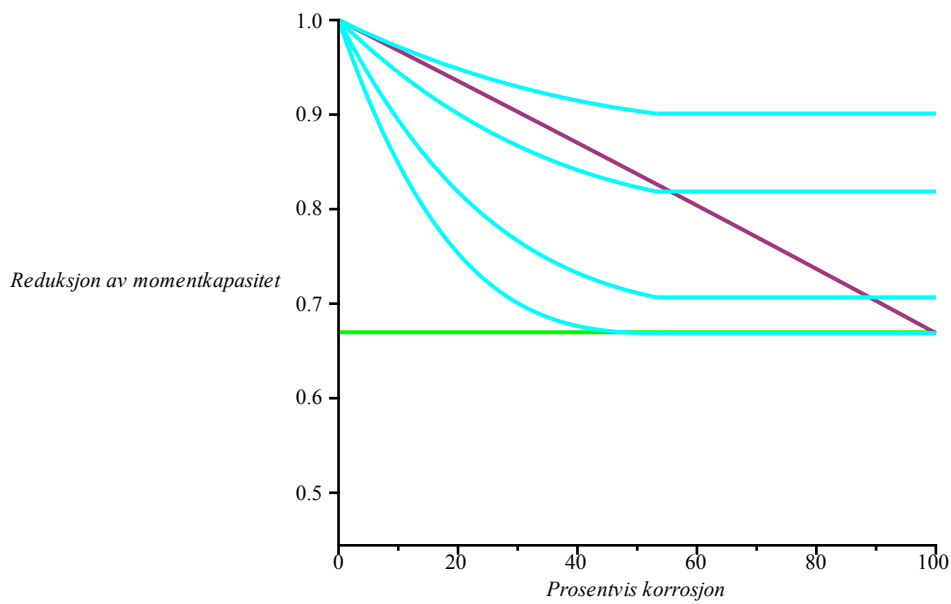


> $plots_{1+2+3_b} := plots:-display(plot_{last_ \%}, plot_{A1_ \%}, plot_{A2_ \%}, plot_{A3b_ \%}, labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]);$

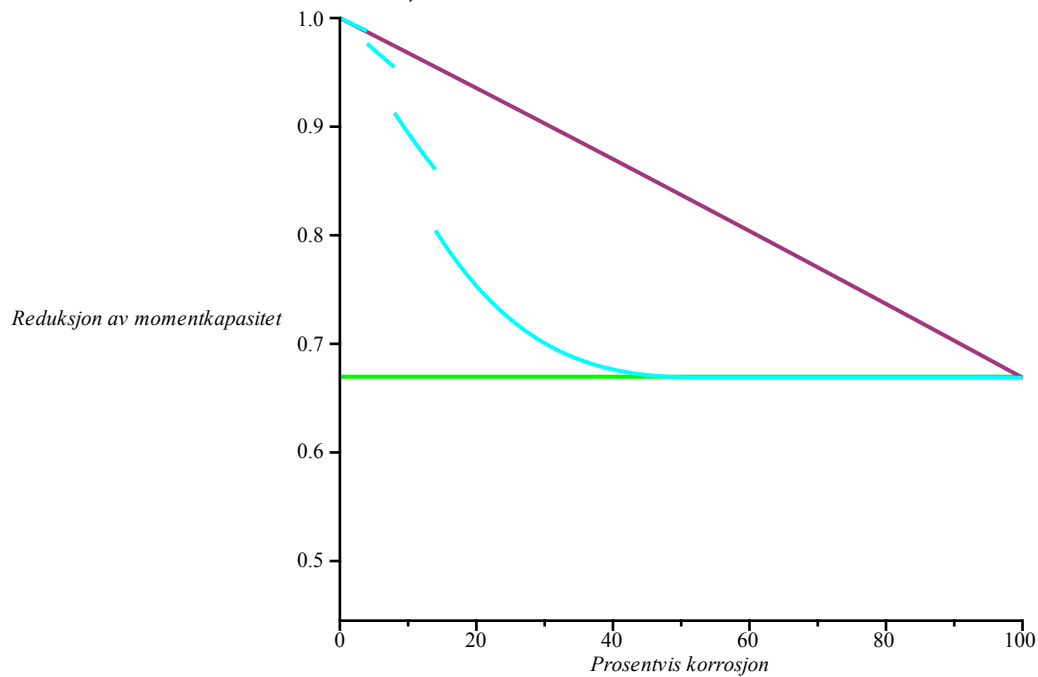


Alternativ 4 og 5:

> $plots_{4+5} := plots:-display(plot_{last_ \%}, plot_{A4_ \%}, plot_{A5_ \%}, labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]);$

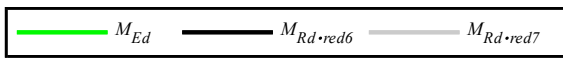
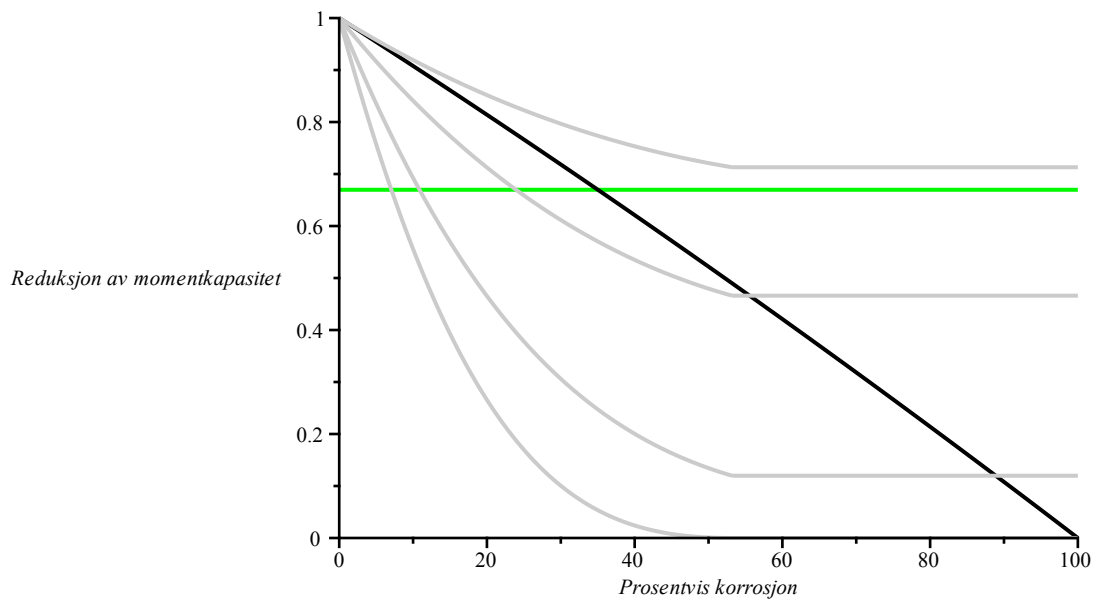


> $plots_{4+5_b} := plots:-display(plot_{last_ \%}, plot_{A4_ \%}, plot_{A5b_ \%}, labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]);$



Alternativ 6 og 7:

> $plots_{6+7} := plots:-display(plot_{last_ \%}, plot_{A6_ \%}, plot_{A7_ \%}, labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]);$



> `plots6 + 7_b := plots:-display(plotlast_% plotA6_% plotA7b_% labels = [Prosentvis korrosjon, Reduksjon av momentkapasitet]);`

