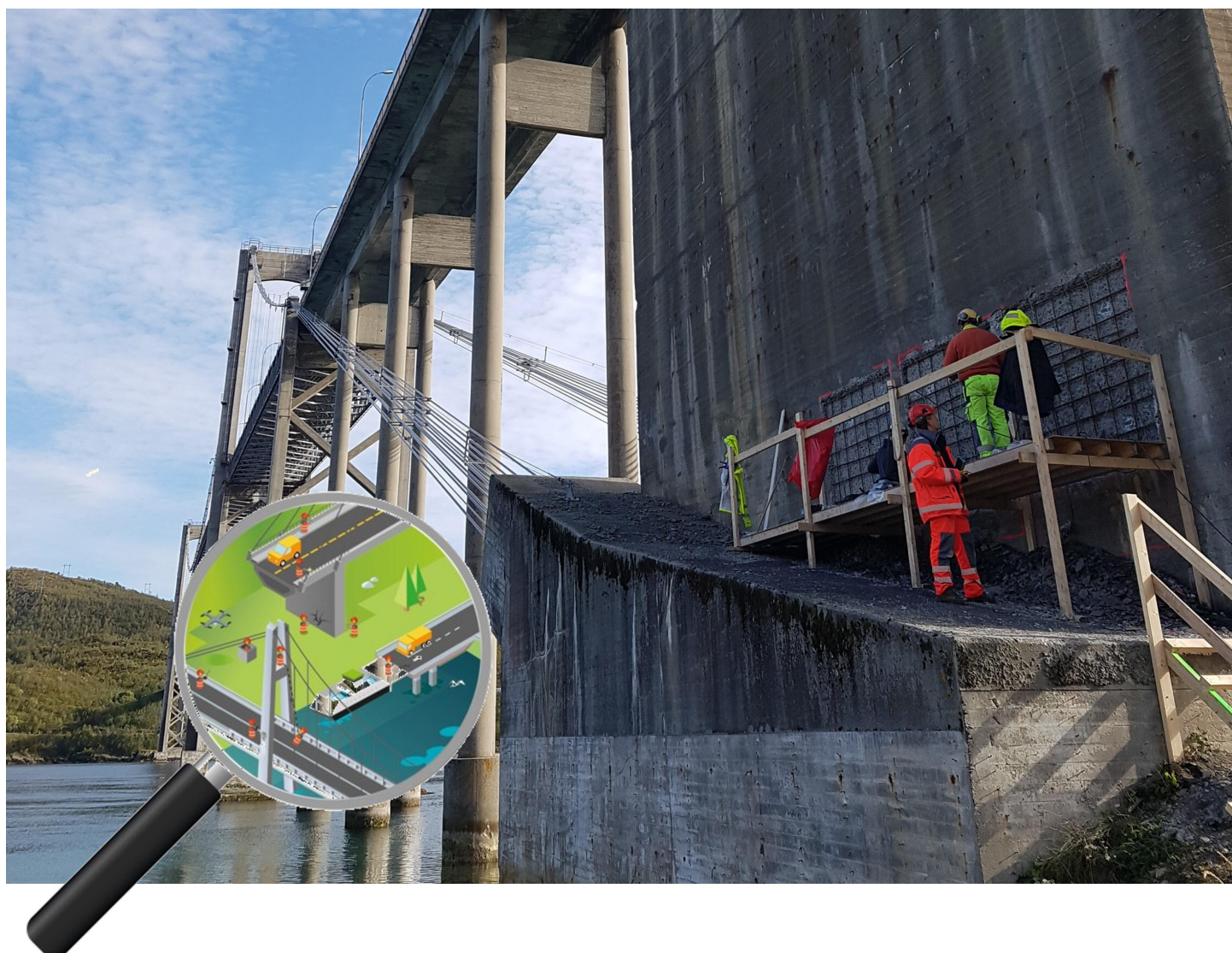


FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

Sluttrapport

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 865



Tittel

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

Undertittel

Sluttrapport

Forfatter

Interne og eksterne prosjektdeltagere

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

L10114

Rapportnummer

865

Prosjektleder

Bård M. Pedersen

Godkjent av

Øyvind Bjøntegaard

Emneord

Bruer, vedlikehold, betong, stål, forvaltningsverktøy, alkalireaksjoner, armeringskorrosjon, bly, kromat

Sammendrag

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold ble gjennomført i perioden 2017-2021. Programmet har bestått av 4 prosjekter: Forvaltningsverktøy for bruer, Armeringskorrosjon i betong, Alkalireaksjoner i betong og Rehabilitering av stålbruer. Formålet til programmet var å bidra til å optimalisere ressursbruken knyttet til inspeksjon, vedlikehold og forvaltning av bruer, og å bidra til at Statens vegvesen gjør de rette tiltakene til rett tid for å sikre at bruene er og forblir trygge. Rapporten gir en oppsummering av prosjektene med underliggende aktiviteter.

Title

The R&D program Improved bridge maintenance 2017-2021

Subtitle

Final report

Author

Internal and external project participants

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

L10114

Report number

No. 865

Project manager

Bård M. Pedersen

Approved by

Øyvind Bjøntegaard

Key words

Bridges, maintenance, concrete, steel, management tools, alkali silica reaction, reinforcement corrosion, led, chromate

Summary

The R&D program Improved bridge maintenance was carried out in the period 2017-2021. The program has consisted of the following 4 projects: Management tools for bridges, Reinforcement corrosion in concrete, Alkali-silica reactions in concrete and Rehabilitation of steel bridges. The purpose of the program was to optimize the use of resources related to inspection, maintenance and management of bridges, and to ensure that the Norwegian Public Roads Administration takes the right measures at the right time to ensure that the bridges are and remain safe. The report provides a summary of the projects with underlying activities.



Innhold

1	FoU-programmet Bedre bruvedlikehold	9
1.1	Innledning	9
1.2	Bakgrunn for programmet	9
1.3	Formål og mål	10
1.4	Prosjekter	11
1.5	Gjennomføring	11
1.6	Implementering	11
2	Prosjektorganisering og prosjektdeltagere	12
2.1	Intern organisering	12
2.2	Samarbeidspartnere.....	13
3	Prosjekt 1: Forvaltningsverktøy for bruer	14
3.1	Innledning	14
3.2	ROS-analyse for bestemmelse av inspeksjonsintervall.....	14
3.2.1	Beskrivelse.....	14
3.2.2	Implementering	15
3.2.3	Videre anbefalinger – videre arbeid	15
3.2.4	Publikasjoner.....	15
3.3	Droner og annen ny teknologi ved bruinspeksjon	15
3.3.1	Beskrivelse.....	15
3.3.2	Resultater/funn	15
3.3.3	Implementering	17
3.3.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	17
3.3.5	Publikasjoner.....	17
3.4	Vedlikeholdsstyring	17
3.4.1	Ytelsesbasert vurdering og kvalitetskontroll av eksisterende bruer	17
3.4.2	Masteroppgaver om probabilistiske metoder.....	17
3.4.3	Spin-off aktivitet	18
3.4.4	Publikasjoner.....	18
3.5	Rustrege stål i bruer.....	18
3.5.1	Beskrivelse.....	18
3.5.2	Resultater/funn	19

3.5.3	Implementering	20
3.5.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	22
3.5.5	Publikasjoner.....	22
4	Prosjekt 2: Armeringskorrosjon i betong.....	23
4.1	Innledning	23
4.1.1	Publikasjoner.....	24
4.2	Preventive tiltak	24
4.2.1	Beskrivelse.....	24
4.2.2	Resultater/funn	26
4.2.3	Implementering	27
4.2.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	28
4.2.5	Publikasjoner.....	28
4.3	Betongrehabilitering ved katodisk beskyttelse.....	29
4.3.1	Beskrivelse.....	29
4.3.2	Resultater/funn	30
4.3.3	Implementering	32
4.3.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	32
4.3.5	Publikasjoner.....	33
4.4	Vedlikehold ved mekanisk reparasjon.....	34
4.4.1	Beskrivelse.....	34
4.4.2	Resultater/funn	35
4.4.3	Implementering	37
4.4.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	37
4.4.5	Publikasjoner.....	38
4.5	Vedlikehold av spennarmerte betongkonstruksjoner	38
4.5.1	Beskrivelse.....	38
4.5.2	Resultater/funn	39
4.5.3	Implementering	42
4.5.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	43
4.5.5	Publikasjoner.....	43
4.6	Levetidsvurdering og livssyklus kostnadsberegninger for vedlikehold av betongkonstruksjoner utsatt for klorider.....	45

4.6.1	Beskrivelse.....	45
4.6.2	Resultater/funn	46
4.6.3	Implementering	48
4.6.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	48
4.6.5	Publikasjoner.....	49
5	Prosjekt 3: Alkalireaksjoner i betong.....	50
5.1	Innledning	50
5.2	Konstruktive konsekvenser.....	52
5.2.1	Beskrivelse.....	52
5.2.2	Resultater/funn	53
5.2.3	Implementering	54
5.2.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	54
5.3	Felt- og laboratorieundersøkelser	55
5.3.1	Beskrivelse.....	55
5.3.2	Resultater/funn	58
5.3.3	Implementering	60
5.3.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	61
5.4	Preventive tiltak	61
5.4.1	Beskrivelse.....	61
5.4.2	Resultater/funn	62
5.4.3	Implementering	63
5.4.4	Videre anbefalinger – videre arbeid	63
5.5	Korrektive tiltak.....	63
5.5.1	Beskrivelse.....	63
5.5.2	Resultater/funn	64
5.6	Publikasjoner	66
6	Prosjekt 4: Rehabilitering av stålbruer.....	70
6.1	Innledning	70
6.2	Vedlikehold av blymønje og kromatholdige belegg	70
6.2.1	Beskrivelse.....	70
6.2.2	Resultater/funn	71
6.2.3	Implementering	73

6.2.4	Videre anbefalinger	74
6.3	Øvrige aktiviteter	74
6.3.1	RINVE-nettverket – Automatisering og robotikk i inspeksjon og vedlikehold..	74
6.3.2	Aktiviteter som er videreført i andre prosjekter	74
6.4	Publikasjoner	75
6.5	Referanser	75
7	Måloppnåelse	76
7.1	Resultatmål	76
7.2	Statens vegvesens toppmål.....	77

Sammendrag

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold ble gjennomført i perioden 2017–2022, under ledelse av Konstruksjonsteknikk i Myndighet og regelverk, Vegdirektoratet (Tunnel, geologi og betong i Vegdirektoratet fram til omorganiseringen i 2020). Formålet med programmet har vært å optimalisere ressursbruken knyttet til inspeksjon, vedlikehold og forvaltning av bruer av betong og stål. Programmet har vært organisert i fire delprosjekter: P1 Forvaltningsverktøy for bruer, P2 Armeringskorrosjon i betong, P3 Alkalireaksjoner i betong og P4 Rehabilitering av stålbruer. Denne inndelingen ble valgt for å svare på utfordringene som ble avdekket gjennom forprosjektet som ble gjennomført i 2016.

Denne rapporten gir en beskrivelse av delprosjektene med alle underaktiviteter, hvilke resultater og funn som er gjort, hva som allerede er implementert og hva som bør implementeres. I tillegg er det gitt anbefalinger for videre arbeid samt en oversikt over alle publikasjoner.

Prosjekt 1 Forvaltningsverktøy for bruer

Prosjektet har overordnet vært rettet mot utvikling av verktøy for innsamling av tilstandsdata og effektivisering av bruinspeksjonene. På slutten av prosjektperioden ble det valgt å inkludere en aktivitet om rusttrege stål. Følgende aktiviteter er gjennomført i prosjektet:

ROS-analyse for bestemmelse av inspeksjonsintervall: Det generelle kravet er at en enkel inspeksjon skal utføres hvert år med unntak av det året det utføres hovedinspeksjon, og at hovedinspeksjon skal utføres hvert 5. år for bruer og hvert 3. år for ferjekaier og bevegelige bruer. Det gis adgang til å øke inspeksjonsintervallet, eller å la en enkel inspeksjon utgå helt dersom en ROS-analyse viser at dette er forsvarlig. For å dekke dette har følgende prosedyre blitt utviklet og implementert i kvalitetssystemet: «Forenklet ROS-analyse for endring av inspeksjonsintervall for bruer etter håndbok N401 og håndbok R411».

Droner og annen teknologi for bruinspeksjoner: Det er utarbeidet en rapport som tar for seg erfaringen med bruk av drone i tidligere Region øst i perioden 2015–2018. Inspeksjon med drone er svært godt egnet for å skaffe seg en oversikt over tilstanden, men det vil ofte være nødvendig med nærmere observasjoner og prøvetaking i enkelte lokasjoner. Det har også blitt gjennomført et innledende arbeid med bruk av drone med påmontert infrarødt kamera for å sjekke muligheten for å avdekke sprekker og delamineringer. Det kreves videreutvikling av denne teknologien for at den skal ha kunne ha nytteverdi for dette bruksområdet.

Vedlikeholdsstyring: Aktiviteten har omfattet deltagelse i en workshop i regi av et EU-prosjekt, hvor en nyutviklet modell med ytelsesbaserte indikatorer ble evaluert. En konklusjon var at metodikken er komplisert og ikke egnet for forvaltning av norske bruer. Det er videre gjennomført to masteroppgaver om bruk av probabilistiske metoder i bruforvaltning. Aktiviteten har resultert i en spin-off aktivitet «Optimalt bruvedlikehold for reduserte levetidskostnader», som omhandler forvaltning av stålbruer. Dette prosjektet, som har støtte fra forskningsrådet, ble startet opp i 2021.

Rusttrege stål i bruer: Rusttrege stål er spesielle legeringer som utvikler tette beskyttende jernoksider på overflaten, noe som reduserer korrosjonshastigheten til et nivå hvor korrosjonsbeskyttelse ikke er nødvendig. Det er utarbeidet en rapport som oppsummer norske og internasjonale erfaringer, med spesielt fokus på sammenhengen mellom eksponeringsmiljø og korrosjonshastighet. Rustrege stål bør ikke brukes i lastbærende konstruksjoner i kystmiljø eller langs vintersaltede veier hvor veisalt deponeres på konstruksjonen, og korrosiviteten i det aktuelle miljøet bør ikke overstige kategori C2 målt iht. ISO 9226.

Prosjekt 2 Armeringskorrosjon i betong

Prosjektet har vært rettet mot drift og vedlikehold av betongbruer med armeringskorrosjon. Det har vært jobbet spesielt med inspeksjonsmetoder som er egnet for å bedømme omfang av skader, samt verktøy for å bedømme konsekvenser av armeringskorrosjon på bruens levetid. Det har videre blitt utarbeidet anbefalinger for teknisk gode og økonomisk effektive reparasjonstiltak. I det følgende nevnes alle prosjektets aktiviteter, og det pekes på noen viktige funn:

Preventive tiltak: Aktiviteten har fulgt opp tidligere igangsatte feltforsøk med overflatebehandling av betong. Resultatene bekrefter tidligere erfaringer om at hydrofobierende impregneringer i form av silaner kan ha en svært god kloridbremsende effekt, både på kort og lengre sikt, forutsatt god inntrenging i betongen. Slik overflatebehandling kan være aktuell i spesielle tilfeller, f.eks. ved kvalitetsavvik i byggeprosess, ved spesielt aggressive eksponeringsforhold eller ved bruk av bindemidler med redusert bestandighet i tidlig alder.

Betongrehabilitering ved katodisk beskyttelse: En viktig delaktivitet har vært å undersøke egenskaper til mørtler brukt ved katodisk beskyttelse. Det har vært gjennomført laboratorieforsøk parallelt med feltforsøk på Tjeldsundbrua. Variasjonen i elektrisk motstand har vist seg å være stor. Arbeidet har resultert i konkrete krav til elektrisk motstand som allerede er tatt i bruk. Det er ellers gjennomført en kartlegging av bestående KB-anlegg på riks- og fylkesvegnettet.

Vedlikehold ved mekanisk reparasjon: I aktiviteten ble det bekreftet at mekanisk reparasjon der skadeårsaken er kloridinitiert armeringskorrosjon krever en meget god oversikt over skadesituasjonen (klorid- og overdekningskart) for at utbedringen skal ha lang varighet. En statusrapport på bruk av offeranoder viser at offeranoder i reparasjonens randsone kan være en mulig forbedring i noen tilfeller. Basert på resultatene i statusrapporten ble det valgt å installere offeranoder i forbindelse med rehabilitering av Bogenes fergekai.

Vedlikehold av spennarmerte betongkonstruksjoner: Etterspente kabler har vært antatt godt beskyttet, liggende i kabelkanaler injisert med mørtel, innstøpt i betongkonstruksjonene. Tilstand på etterspent armering har av den grunn ikke vært underlagt inspeksjon. Erfaring viser nå at korrosjon forekommer, med årsaker tett knyttet til materialer og utførelse benyttet i byggeperioden. Aktiviteten har kartlagt inspeksjonsmetoder, korrosjonsmekanismer,

konstruktive konsekvenser av brudd på etterspente bruer, samt utviklet beregningsmodeller for restkapasitet i korroderte førøppspente bjelkebruer.

Levetidsvurdering og livssyklus-kostnadsberegninger for vedlikehold av betongkonstruksjoner utsatt for klorider: Aktiviteten har bestått av flere mindre delaktiviteter hvor blant annet sorterteknikk, kloridprøvningsprosedyrer og modeller for livssyklus-kostnadsberegninger ble undersøkt. I aktiviteten ble det funnet at spesifikke material-/tilstandsdata fra den aktuelle konstruksjonen er helt avgjørende for å gi nøyaktige levetidsprognoser. I tillegg trenger vi en database som samler erfaringstall for kostnader og levetid av forskjellige rehabiliteringstiltak for å spisse dagens modeller.

Prosjekt 3: Alkalireaksjoner i betong

Prosjektet har vært rettet mot inspeksjon, konstruksjonsberegning og vedlikehold av bruer med alkalireaksjoner i betongen.

Det er gjennomført felt- og laboratorieundersøkelser, med enn rekke ulike metoder, av flere konkrete bruobjekter. Enkelte av disse bruene har videre vært gjenstand for konstruktive beregninger. Det er gjennomført tre store laboratorieprogrammer ved NTNU, med akselerert ekspansjon (60 og 38 °C, 100 % RF) av små og store, frie og fastholdte, uarmerte og armerte betongprøver (kuber, sylindre, prizmer og bjelker). Intern/ekstern fastholding vs. ekspansjon og ekspansjon vs. skadeutvikling/mekaniske egenskaper har vært undersøkt, og i tillegg effekten av ekspansjon på skjærøppførselen til armerte bjelker (symmetrisk og usymmetrisk armert). Ulike felt- og laboratoriemetoder for estimering av ekspansjon har vært prøvd ut og det er utarbeidet veiledninger for inspeksjon, prøvetaking og analyser ved alkalireaksjoner. Det er utviklet ulike material- og beregningsmodeller for konstruktiv analyse og kapasitetskontroll og det er utarbeidet en veiledning for bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner. Totalt 16 masterstudenter (14 ved NTNU og to ved ULAVAL, Canada) og tre ph.d.-kandidater (to ved NTNU (OsloMet) og én ved ULAVAL) har vært tilknyttet prosjektet.

Prosjektet har fulgt opp et tidligere igangsatt feltforsøk med ulike typer overflatebehandling (to silanbaserte hydrofoberende impregneringer og ett sementbasert belegg). Foreløpige resultater (etter 6 år) viser at overflatebehandling kan gi en reduksjon i både fuktinnhold og ekspansjon, men selv betong eksponert utendørs beskyttet mot nedbør fortsetter å ekspandere.

Det er gitt en oppsummering av prinsipielle korrektive tiltak og i tillegg gitt eksempler på aktuelle tiltak utført på konkrete bruer. En gjennomgang av foreliggende beregningsmodeller for karbonfiberforsterkning har avdekket uklarheter i tidligere anvisninger i forhold til hvilken utnyttelse som kan tillates i forskjellige snitt av konstruksjonen.

Flere av aktivitetene i prosjektet videreføres i det forskningsrådsstøttede NTNU-eide FoU-prosjektet MESLA (Management and Extension of Service Life of infrastructures affected by Alkali-silica reaction, 2021–2025).

Prosjekt 4: Rehabilitering av stålbruer

Prosjektet har fokusert på vedlikehold av blymønje og kromatholdige belegg. Blymønje og sinkkromat medfører en risiko for utslipp til miljø og helseskade for personell som utfører vedlikehold av belegget. Arbeidet er utført i tett samarbeid med SINTEF Industri, og det er utarbeidet en rapport: «Vedlikehold av bly- og kromatholdige belegg». Rapporten peker på følgende viktige aspekter:

Helse miljø og sikkerhet (HMS): Ved blåserensing av bly- og kromatholdige belegg er det sannsynlig at grenseverdier for bly- og kromatforbindelser overskrides. Standard trykkluftbasert åndedrettsvern som benyttes ved overflatebehandling vil trolig gi tilstrekkelig beskyttelse, siden pusteluft da tilføres utenfra. Inspektører og annet personell bør også bruke trykkluftbasert åndedrettsvern. Verneutstyr kan være nødvendig helt til støvet er fjernet. Dette må dokumenteres ved egne målinger når arbeidet pågår. Det er også krav om helseundersøkelse av arbeidstakere som arbeider med blyforbindelser, denne omfatter klinisk undersøkelse og måling av blyinnhold i blodet hver 3. måned.

Ytre miljø (YM): Utslipp av bly og kromat til vann er bare tillatt dersom mengdene er så små at kan anses å være uten miljømessig betydning, noe som må vurderes i hvert enkelt tilfelle. Nedfallstøv med rester av bly- og kromatholdig maling skal ses i forhold til aktuelle tilstandsklasser for forusenset grunn, hvor grenseverdier for bly og kromat er svært lave. Det er uavklart hvorvidt normal telting i tilstrekkelig grad vil hindre utslipp.

Overflatebehandling for beste levetidskostnader:

Belegg av blymønje: Det foreslås å utnytte beleggets levetid maksimalt for deretter å fjerne all blyholdig belegg på brua og påføre et moderne beleggssystem. Hvis belegget er i god stand, er ingen tiltak nødvendig. Hvis belegget er i dårlig tilstand, men brua har kort restlevetid vil utgangspunktet være å ikke gjøre noe, eventuelt å gjøre hyppigere inspeksjoner for å ha kontroll på bruas bæreevne. Ved lang restlevetid foreslås det å fjerne all blymønje og påføre dupleksbelegg.

Belegg av sinkkromat: Siden sinkkromatholdig maling i dupleksbelegg har gode korrosjonsbeskyttende egenskaper, og belegget ikke utgjør noen fare så lenge det sitter på brua, foreslås det i størst mulig grad å unngå blåserensing av intakt belegg. Der nedbrytningen har kommet så langt at sinkbelegget har startet å korrodere bør det blåserenses til bart stål, bygges opp med metallisering og sealer, påføres heldekkende epoksy barrierestrøk og polyuretan, eventuelt flikke med epoksy og påføre polyuretan som et heldekkende toppstrøk.

1 FoU-programmet Bedre bruvedlikehold

1.1 Innledning

I 2016 ble forprosjektet «Reduksjon av forfallet» startet opp som ett av fire forprosjekt gjennomført ved Vegdirektoratet, TMT-avdelingen. Forslagsstiller var de daværende Tunnel og betongseksjonen og Bruseksjonen i Vegdirektoratet. Forprosjektet ble ledet av Stig H. Helgestad fra Tunnel og betongseksjonen.

Forprosjektet omhandlet brukonstruksjoner. En sentral oppgave i forprosjektet var å samle innspill fra alle regionene, hvor regionene pekte på hvilke utfordringer de stod ovenfor, konkrete prosjekter, aspekter ved kompetanse og regelverk og hvilke planer regionene selv hadde innen vedlikehold og rehabilitering. Det ble gjennomført flere møter med regionene, først i Narvik hos tidligere region nord og senere i Bergen, Arendal, Drammen, Oslo, Hamar og Lillehammer. Innspillene kom fra mange fagområder.

I forprosjektet ble Vianova engasjert for å gjennomføre beregninger av sannsynlig nytte av et FoU-program for å forbedre reparasjonsmetoder for betong. Det ble utført en kost/nytte beregning for to ulike rehabiliteringsstrategier for henholdsvis platebruer med lengde på ca. 50 meter og fritt-rambyggbruer med lengde på ca. 300 meter. Rapporten «Effekten av FoU innen betongrehabilitering» var ferdigstilt i september 2016 og inngikk som en del av grunnlaget i forprosjektet.

På basis av forprosjektet ble det utarbeidet en plan for et større 5-årig forsknings- og utviklingsprogram, «Bedre bruvedlikehold» (2017–2021). Total kostnadsramme for programmet ble anslått til 23 millioner kroner.

1.2 Bakgrunn for programmet

Det er bygd vegbruer i Norge siden 1700-tallet. Fra ca. 1850 ble stål utviklet som hovedmateriale for bruer, og rundt 1920 ble de første armerte betongbruene bygd. Brubyggingen skjøt fart utover 1950-tallet og nådde en foreløpig topp på 1970-tallet. Tall fra BRUTUS (2016) viser at ca. 22 % av bruarealet i riks- og fylkesvegnettet har en alder over 50 år, 38 % har en alder mellom 30 og 50 år, mens 40 % av bruarealet er yngre enn 30 år. En stor del av bruene har dermed nådd en alder hvor det er behov for omfattende vedlikehold.

Informasjon som ble samlet inn fra regionene i forprosjektet bekreftet at det er to nedbrytningsmekanismer som forårsaker det mest vesentlige av betongskader. De mest omfattende skadene skyldes først og fremst armeringskorrosjon forårsaket av kloridinntrenging, enten fra sjøvann eller fra tinesalter. Disse skadene skyldes i stor grad alt for liberale krav til materialkvalitet og armeringsoverdekning på byggetidspunktet og mangelfull kontroll i utførelsesfasen. Det norske standardverket som var gjeldende fra 1960- til 1980-tallet fokuserte i større grad på betongkonstruksjonens lastkapasitet enn på bestandighet.

En annen viktig skademekanisme er alkalireaksjoner, en form for nedbrytning som skyldes kjemiske reaksjoner mellom visse typer bergarter i tilslaget og alkalier som i hovedsak kommer fra sementen. Alkalireaksjoner i betong ble fullt ut dokumentert som et problem i

Norge rundt 1990, og først i 1996 kom det et regelverk for å unngå problematikken i nye konstruksjoner. Det er bygget svært mange bruer før 1996 med materialsammensetning som kan føre til alkalireaksjoner. I mange av disse bruene er det allerede utviklet alkalireaksjoner, og det forventes at omfanget av denne skadetyper vil øke med økende alder på bruene.

Tilbakemeldingene fra bruforvalter-miljøene gitt i forprosjektet pekte spesielt på følgende forhold:

- Rutiner og utstyr for effektivisering av bruinspeksjoner.
- Dokumentasjon av utførte anlegg og videreutvikling av prosedyrer for material-/systemvalg ved katodisk beskyttelse.
- Retningslinjer for valg av vedlikeholdstiltak for bruer med alkalireaksjoner i betong
- Verktøy for valg av forvaltningsstrategier.

Noen flere faktorer kom til i oppstartsseminaret i 2017, spesielt behovet for å ha en aktivitet direkte knyttet opp mot spennarmering.

1.3 Formål og mål

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold har hatt som overordnet målsetning:

- Å optimalisere ressursbruken knyttet til inspeksjon, vedlikehold og forvaltning av bruer.
- Å bidra til at Statens vegvesen gjør de rette tiltakene til rett tid for å sikre at bruene er og forblir trygge.

Programmet har hatt følgende resultatmål:

- Verktøy for vurdering av tekniske og økonomiske aspekter ved ulike vedlikeholds- og reparasjonsmetoder.
- Prosedyre og erfaringsrapport for forenklete risiko- og sårbarhets (ROS)-analyser for inspeksjonsintervall.
- Erfaringsrapporter fra bruk av drone til bruinspeksjon.
- Anbefaling av inspeksjonsmetoder for å utrede omfang av skader på grunn av armeringskorrosjon.
- Verktøy for å kunne bedømme konsekvenser av armeringskorrosjon på spennsystemer for bruens levetid.
- Veiledning for valg av vedlikeholdsmetoder for betongkonstruksjoner med armeringskorrosjon.
- Veiledning for inspeksjon, prøvetaking og laboratorieundersøkelser for å dokumentere alkalireaksjoner.
- Veiledning for konstruktive analyser og kapasitetskontroll av bruer med alkalireaksjoner.
- Veiledning som beskriver preventive og korrektive tiltak for betong med alkalireaksjoner.
- Veiledning for vedlikehold av bly- og kromatholdig belegg på stålbruer.

1.4 Prosjekter

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold har bestått av fire prosjekter. De fire prosjektene er:

- Prosjekt 1: Forvaltningsverktøy for bruer
- Prosjekt 2: Armeringskorrosjon i betong
- Prosjekt 3: Alkalireaksjoner i betong
- Prosjekt 4: Rehabilitering av stålbruer

Denne inndelingen er valgt for å svare på utfordringene som ble avdekket gjennom forprosjektet. Alle delprosjektene med underliggende aktiviteter er presentert i kapitlene 3–6. Der er det gitt en kort beskrivelse av bakgrunn og målsetning for aktiviteten, viktige funn, implementering og videre arbeid.

1.5 Gjennomføring

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold foregikk i perioden januar 2017 til sommeren 2022, og med avslutningsseminar i Molde 21. september 2022.

I mars 2017 ble det arrangert en oppstartsamling der drøyt 30 personer fra regionene og Vegdirektoratet deltok. Målet med samlingen var å gi innspill til og prioritere hvilke aktiviteter de ulike prosjektene skulle arbeide med. Programplanen ble endret og detaljert i tråd med de nyeste innspillene. Som følge av endringer i ressurstilgang (personell) og løpende justeringer av ressursbruk ble programplanen senere endret i april 2019 og i april 2020.

De endringer som har blitt gjort underveis har bestått i at noen nye aktiviteter har kommet til, at aktiviteter har blitt slått sammen eller at aktiviteter ikke har blitt gjennomført. Alle slike endringer har blitt gjort i tett dialog mellom programledelsen og programeier i prosjektets første fase til og med 2019, og i samarbeid mellom programledelsen og styringsgruppen etter at denne ble etablert i 2020 (se kapittel 2 for videre beskrivelse). I et FoU-program av denne størrelsen er det nødvendig at man har tilstrekkelig grad av fleksibilitet til å kunne gjennomføre justeringer underveis.

1.6 Implementering

FoU-programmet har jobbet for at viktige resultater skulle implementeres fortløpende, og på den måten realisere programmets målsetning raskere. Resultater har blitt implementert på følgende måter:

- Oppdatering av regelverk
- Oppdatering av kvalitetssystem
- Spredning av ny kunnskap, gjennom interne konferanser, seminarer og kurs

Det forventes at alle Statens vegvesen-rapporter skal være offentlig publisert i løpet av 2022. Alle rapporter og masteroppgaver kan lastes ned via følgende link:

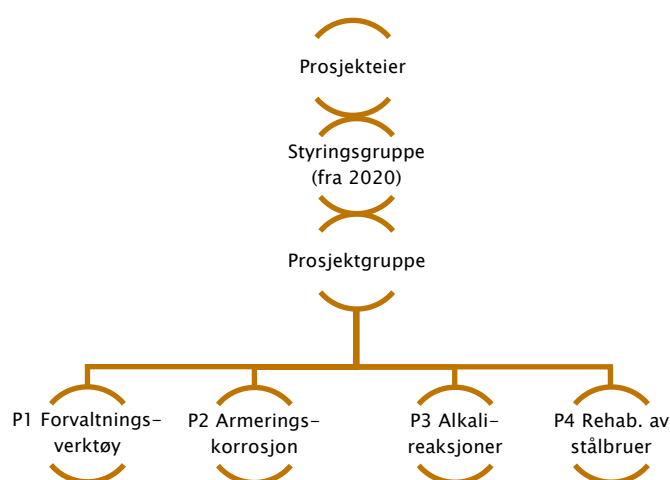
<https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/2498014>.

Prosjektresultater som er rapportert i notater er arkivert i Statens vegvesens interne arkivsystem MIME, saksnummer 20/31348.

2 Prosjektorganisering og prosjektdeltagere

2.1 Intern organisering

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold var ledet av Tunnel, geologi- og betongseksjonen i Vegdirektoratet til og med 2019. Etter omorganiseringen fra 2020 har programmet vært ledet av seksjon Konstruksjonsteknikk i Myndighet & Regelverk i Vegdirektoratet. Som organisasjonskartet under viser har FoU-programmet vært organisert med en prosjekteier, en styringsgruppe (fra 2020) og selve prosjektgruppen. På grunn av den store spredningen i aktiviteter ble det ansett som lite hensiktsmessig å opprette en referansegruppe. Oppgavene som normalt tilhører en referansegruppe ble ivaretatt gjennom møter, seminarer, workshops o.l. der fagfolk utenfor programmet kunne gi sine innspill og tilbakemeldinger.



FIGUR 1 ORGANISASJONSKART FOR FOU-PROGRAMMET BEDRE BRUVEDLIKEHOLD

Prosjekteier i programmets første fase var leder av Tunnel, geologi og betongseksjonen Claus K. Larsen. I programmets videre fase fra januar 2020 har leder for avdelingen Konstruksjoner i Myndighet & regelverk i Vegdirektoratet, Ing-Cristine Ericson vært prosjekteier.

Styringsgruppen ble etablert i 2020, og har bestått av:

- Ing-Cristine Ericson, Konstruksjoner, Vegdirektoratet, leder
- Claus K. Larsen, Styring myndighet og regelverk, Vegdirektoratet
- Morten Wright Hansen, Inspeksjon og sikkerhet, Vegdirektoratet
- Trond M. Andersen, Teknologi DoV, divisjon Drift og vedlikehold
- Kjell Harry Jensen, Teknologi DoV, divisjon Drift og vedlikehold
- Johannes Veie, Teknologi og utvikling, divisjon Utbygging

Programleder Bård M. Pedersen har representert prosjektgruppen på alle styringsgruppe-møter. I tillegg har prosjektlederne deltatt på utvalgte møter.

Det har vært engasjert prosjektledere fra Vegdirektoratet, divisjon Utbygging og divisjon Drift og vedlikehold, som følger:

Bedre bruvedlikehold	Programleder: Bård M. Pedersen, Konstruksjonsteknikk, Vegdirektoratet, fra november 2019, før det Hedda Vikan (Tunnel, geologi og betongseksjonen).
P1 Forvaltningsverktøy for bruer	Prosjektleder: Knut Ove Dahle, Teknologi, Drift og vedlikehold, fra 2018, før det Hedda Vikan (Tunnel, geologi og betongseksjonen) og Inger S. Hegrenæs (Bruseksjonen, Vegdirektoratet).
P2 Armeringskorrosjon i betong	Prosjektleder: Karla Hornbostel, Bru, Drift og vedlikehold
P3 Alkalireaksjoner i betong	Prosjektleder: Eva Rodum, fra november 2019, før det Bård M. Pedersen, begge Konstruksjonsteknikk, Vegdirektoratet
P4 Vedlikehold av stålbruer	Prosjektleder: Håkon Matre, Rv 555 Sotrasambandet, Utbygging.

2.2 Samarbeidspartnere

Regionene i Statens vegvesen har deltatt i de fleste av aktivitetene i Bedre bruvedlikehold fram til 2019. Etter omorganiseringen har det vært utstrakt samarbeid mellom Vegdirektoratet og divisjonene Drift og vedlikehold og Utbygging, i tillegg også Trøndelag, Nordland og Troms og Finnmark fylkeskommuner.

FoU-programmet Bedre bruvedlikehold har hatt en rekke eksterne samarbeidspartnere, både nasjonale og internasjonale, som har bidratt med egeninnsats på en rekke aktiviteter:

- NTNU Institutt for konstruksjonsteknikk
- SINTEF Community
- SINTEF Industri
- NTNU Institutt for maskinteknikk og produksjon
- Université Laval, Canada
- ETH, Eidgenössische Technische Hochschule, Sveits
- SINTEF Digital

Videre har programmet kjøpt tjenester fra følgende firmaer:

- Dekra Industrial AB, Sverige
- RISE KIMAB, Sverige
- Aas-Jakobsen AS
- Orbiton AS

3 Prosjekt 1: Forvaltningsverktøy for bruer

3.1 Innledning

Prosjektet har overordnet vært rettet mot utvikling av verktøy for innsamling av tilstandsdata og effektivisering av bruinspeksjonene. Opprinnelig plan inkluderte også utvikling av verktøy for estimering av skadeomfang og videre skadeutvikling og teknisk og økonomisk vurdering av tiltak. Av ressurs hensyn ble omfanget av prosjektet nedskalert og flere av de planlagte aktivitetene ble ikke gjennomført. Samtidig ble det på slutten av prosjektperioden valgt å inkludere en aktivitet på rustrege stål. Prosjektet har vært organisert i fire aktiviteter:

1. ROS-analyse for bestemmelse av inspeksjonsintervall
2. Droner og annen teknologi for bruinspeksjoner
3. Vedlikeholdsstyring
4. Rusttrege stål i bruer

Følgende personer i Statens vegvesen har vært sentrale i arbeidet: Knut Ove Dahle, Hedda Vikan, Cato Dørum og Johannes Veie. Prosjektet har hatt samarbeid med SINTEF Industri, NTNU, Aas-Jakobsen AS og Orbiton AS.

3.2 ROS-analyse for bestemmelse av inspeksjonsintervall

3.2.1 Beskrivelse

Håndbøkene R411 «Bruforvaltning riksveg» og N401 «Bruforvaltning fylkesveg» gir generelle bestemmelser for når og hvordan bruinspeksjoner skal gjennomføres. Etter at ei bru er overlevert til brueier skal det utføres rutinemessige inspeksjoner av brua i resten av levetiden. I det rutinemessige inspeksjonsprogrammet inngår følgende inspeksjonstyper:

- Enkel inspeksjon
- Hovedinspeksjon

Det generelle kravet er at en enkel inspeksjon skal utføres hvert år med unntak av det året det utføres hovedinspeksjon, og at hovedinspeksjon skal utføres hvert 5. år for bruer og hvert 3. år for ferjekaier og bevegelig bruer. Det gis imidlertid adgang til å øke inspeksjonsintervallet (dvs. å redusere antall inspeksjoner), eller å la en enkel inspeksjon utgå helt dersom en ROS-analyse viser at dette er forsvarlig. Denne muligheten ble fram til 2017 i svært liten grad benyttet.

For å gjøre ROS-analyser mer tilgjengelig for bruforvalterne ble det etablert en aktivitet for å utarbeide en mal for ROS-analyser knyttet til bruinspeksjonsintervall. Malen ble utarbeidet i et samarbeid mellom de daværende regionene og Vegdirektoratet. Det ble etablert en forenklet metodikk med prosedyre/sjekkliste for ROS-analyser for inspeksjoner, beskrevet i prosedyren «Forenklet ROS-analyse for endring av inspeksjonsintervall for bruer etter håndbok N401 og håndbok R411».

3.2.2 Implementering

Malen for forenklet ROS-analyse for bestemmelse av inspeksjonsintervall for ei enkelt bru er lagt som et internt kravdokument i Kvalitetssystemet, intern link:

<https://www.vegvesen.no/dokument/basis/filer/MKH8819922/gjeldende>.

Implementering ble igangsatt i flere av de daværende regioner i 2018. Erfaringer fra Region midt i 2018 viste at antallet enkle inspeksjoner ble redusert med ca. 65 % etter innføring av ROS-analyse. Det har blitt estimert at antall enkle inspeksjoner på landsbasis (riks- og fylkesvegbruer) kan reduseres fra 17 000 til 8–9 000 ved å bruke dagens ROS-analysemal, dvs. en reduksjon på ca. 50 %. Med en anslått pris pr. utført enkel inspeksjon på 5 000,- kroner vil Trøndelag alene kunne omdisponere ca. 2,3 millioner NOK per år. På landsbasis er tilsvarende tall 42,5 millioner NOK per år.

3.2.3 Videre anbefalinger - videre arbeid

Bruk av ROS-analyser og effekt på antall bruinspeksjoner bør følges systematisk opp. Bruken bør også følges opp for å kontrollere at viktige tilstandsdata faktisk fanges opp i tide.

3.2.4 Publikasjoner

Statens vegvesens kvalitetssystem (2021): Forenklet ROS-analyse for endring av inspeksjonsintervall for bruer etter håndbok R411.

3.3 Droner og annen ny teknologi ved bruinspeksjon

3.3.1 Beskrivelse

En hovedinspeksjon av ei bru omfatter nær visuell inspeksjon av hele brukonstruksjonen og krever normalt bruk av tilkomstutstyr, f.eks. stige, ulike brulifter, stillas, båt eller taubasert utstyr. Det har i de senere år vært en økt interesse for bruk av drone med optisk kamera til bruinspeksjon. Droner med kamera kan forflytte seg raskt og gi oversiktsbilder og videoer av høy kvalitet, så vel som detaljbilder av konstruksjonsdeler hvor det ellers er vanskelig tilkomst. Teknologien er under rask utvikling, og i framtiden vil det antagelig være vanlig med flere typer tilkoblet utstyr i tillegg til foto og video. Det pågår også arbeid med å utvikle programvare for å bearbeide den store mengden bilder og data som skapes, eksempelvis i forhold til automatisk gjenkjenning av skader på konstruksjonen.

Aktiviteten har hovedsakelig tatt for seg erfaringen med bruk av drone til bruinspeksjoner i tidligere Region øst i perioden 2015–2018, utført av Aas-Jakobsen AS og beskrevet i Statens vegvesen rapport nr. 224. I tillegg har det vært gjennomført et innledende arbeid med bruk av drone med påmontert infrarødt kamera, hvor det er undersøkt om det kan dokumentere riss og delamineringer på en betongbru. Dette er utført av Orbiton AS, og er beskrevet i Statens vegvesens rapport nr. 264.

3.3.2 Resultater/funn

Erfaringer fra Region øst:

Det er en rekke fordeler med bruinspeksjon ved hjelp av drone. Man slipper stengning av bruer, og kan dermed gjennomføre inspeksjoner på dagtid. Man trenger dermed ikke

omfattende arbeidsvarsling, og får totalt sett en sikrere inspeksjon. Vi får normalt sett et mye bedre bildegrunnlag (dekker større arealer, tas under bedre lysforhold) og dermed gode forutsetninger for å fange opp skader i en tidlig fase, og å følge opp skadeutvikling over tid.

Sammenlignet med underbrulift gir drone store fordeler på de fleste bruer, men drone alene vil ofte ikke være tilstrekkelig. I tilfeller der det er behov for eksempelvis bomkontroll, rissmålinger og/eller prøvetaking, så er det nødvendig med fysisk tilgang til de aktuelle konstruksjonsdelene. Det anbefales å benytte drone som første hjelpemiddel for å skaffe god oversikt over den visuelle tilstanden, og videre som grunnlag for valg av lokasjoner for liftoppsett for nærmere målinger og prøvetaking.

Det er imidlertid en rekke utfordringer ved bruk av drone. Regn er utfordrende, da fukt på linser vil føre til utydelige bilder. Lysforholdene er ellers avgjørende for å få gode bilder, håndtering av ulike lysforhold krever høy fototeknisk kompetanse. Å få gode bilder fra undersiden av bruer, som generelt er et mørkt område, krever spesiell omtanke mht. inspeksjonstidspunkt og lysforhold.



FIGUR 2 JULSUNDBRUA KARTLAGT MED KAMERA FRA DRONE I 2018. VELDIG GOD KVALITET PÅ BILDENE SIDEN DET ER GODE LYSFORHOLD OG INGEN ANDRE HINDRINGER. FRA BARMEN (2019).

Å ta i bruk en ny teknologi innebærer ikke bare å ta i bruk et nytt verktøy, men også en ny metodikk. Bruk av drone fordrer at det utarbeides nye arbeidsprosesser og –prosedyrer, dette er noe som må vektlegges i det videre arbeidet.

Bruk av drone og infrarødt kamera for å avdekke riss og delamineringer:

Infrarød (termisk) teknologi (IR) måler varmestråling fra et element, som for eksempel et brudekke eller et brukar. Materialfeil som f.eks. delaminering under overflaten kan dermed bli sett som «hot spots» fordi det oppstår et brudd i varmens ledningsevne gjennom betongen.

Teorien er da at f.eks. sprekker/delaminering kan oppdages med fjernvisuell inspeksjon framfor tradisjonelle metoder som forutsetter store riggarbeider.

Kjøkkøysund bru ble valgt som testobjekt fordi det er ei bru hvor tidligere inspeksjoner har avdekket en hel del riss/sprekker i betongen, både overfladiske og gjennomgående.

Konklusjon: Mange av rissene er synlige på IR-bildene, men ingen av dem er mer synlige der enn på de vanlige dagslysbildene og gir dermed ingen merverdi. Mer arbeid med teknologien er dermed påkrevet for at den skal bli interessant for dette bruksområdet.

3.3.3 Implementering

Erfaringsrapporten om bruk av droner til bruinspeksjon har gitt svært nyttig informasjon om fordeler og utfordringer med droneinspeksjoner. I tillegg tar den opp hvordan implementering av ny teknologi kan gjøre det nødvendig å endre metodikk for inspeksjon, og også regelverk for bruinspeksjon.

3.3.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

Det pågår videre arbeid for å utnytte droner mer effektivt. Spesielt gjelder dette automatisk gjenkjenning av skader ved hjelp av maskinlæring.

3.3.5 Publikasjoner

Barmen, K. H. (2019): Bruinspeksjon med drone. Muligheter og begrensninger. Erfaringer fra Region øst 2015–2018. Statens vegvesen rapport nr. 224.

Moss, T., Figuro, G. (2019): Bruinspeksjon med drone og infrarødt kamera. Resultater fra innledende forsøk. Statens vegvesen rapport nr. 264.

3.4 Vedlikeholdsstyring

3.4.1 Ytelsesbasert vurdering og kvalitetskontroll av eksisterende bruer

EU-prosjektet COST ACTION TU1406 – “Quality specifications for roadway bridges, standardization at a European level”: Prosjektet deltok i 2018 i en workshop arrangert av COST TU 1406 for å teste ut prosjektgruppens nyutviklede standardiseringsprosess og –modell for vedlikeholdsstyring, på utvalgte europeiske bruer. I modellen inngår ytelsesbaserte indikatorer brukt på delkomponenter, som samlet sett skal gi grunnlag for evaluering av bruas overordnede tilstand og funksjon. Bedre bruvedlikehold konkluderer med at metoden er komplisert og uegnet for generell bruforvaltning i Norge, men at den muligens kan anvendes og ha nytteverdi på visse kritiske samferdselskonstruksjoner.

3.4.2 Masteroppgaver om probabilistiske metoder

Prosjektet har bidratt til følgende masteroppgaver:

- Solheim, H. (2018): Probabilistic methods in management and inspection of buried steel pipe bridges. Master thesis at NTNU, Department of Structural Engineering.

En korrugert stålrørsbru består av et fleksibelt tynnvegget rør med omliggende masser som har høyere stivhet enn røret. Både stålrøret og omliggende masser bidrar til

bæreevne. Fokuset i denne masteroppgaven er bruk av probabilistiske metoder for analyse av korrugerte stålrørsbruer. Oppgaven har dekket temaene inspeksjon og tilstandsanalyse, estimering av nedbrytningshastighet, sannsynlighet for svikt og strategi for utskiftning.

- Ryvoll, N. Ø. (2020): Probability-based assessment of the Stavå bridge. Master thesis at NTNU, Department of Structural Engineering.

Masteroppgaven har tatt i bruk probabilistiske regnemetoder for å beregne lastkapasitet på Stavåbrua. Den inneholder også samfunnsøkonomiske beregninger av ulike tiltak for å redusere sannsynlighet for brudd i brua.

3.4.3 Spin-off aktivitet

Det ble sendt en søknad om IPO (Innovasjonsprosjekt i offentlig sektor) til Norges forskningsråd på temaet «Optimalt bruvedlikehold for reduserte levetidskostnader» for stålbruer. Prosjektet ble innvilget og startet opp i 2021.

Det overordnede målet med prosjektet er å forstå sammenhengen mellom beleggets levetid og vedlikeholdskostnader på den ene siden, og miljø-, konstruksjons-, og driftsparametere på den andre siden, for å kunne etablere kriterier for når og hvordan overflatevedlikehold skal iverksettes. Resultatet skal kunne innføres i IT-løsninger for forvaltning og fungere som beslutningsstøtte for bruforvaltere i Statens vegvesen og fylkeskommunene. Prosjekteier er Statens vegvesen ved divisjon Drift og vedlikehold, og hovedsamarbeidspartner er SINTEF Industri.

3.4.4 Publikasjoner

- Geiker M.R., Michel A., Stang H., Vikan H., Lepech M.D. (2018): "Design and maintenance of concrete structures requires both engineering and sustainability limit states", Proceedings Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision – Caspeele, Taerwe & Frangopol (Eds), pp. 987–991, 2018 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-62633-1.
- Ryvoll, N. Ø. (2020): Probability-based assessment of the Stavå bridge. Master thesis at NTNU, Department of Structural Engineering.
- Solheim, H. (2018): Probabilistic methods in management and inspection of buried steel pipe bridges. Master thesis at NTNU, Department of Structural Engineering.

3.5 Rusttrege stål i bruer

3.5.1 Beskrivelse

Rusttrege stål er stål som er leget med til sammen omkring 1 % kobber, krom og eventuelt fosfor for å utvikle tette og beskyttende jernoksider. Dette reduserer korrosjonshastigheten til et nivå der ytterligere korrosjonsbeskyttelse ikke er nødvendig. Rusttrege stål kalles også værbestandige stål, "weathering steel" på engelsk. Det mest kjente stålet som hører til denne gruppen er antagelig COR-TEN® utviklet av United States Steel Corporation. De er definert i ASTM-standardene A606, A242, A588 og A709 og den europeiske standarden NS-EN 10025-

5. I løpet av 1980-tallet ble det i Japan utviklet rusttrege stål med omkring 3 % nikkel for bedre motstand mot klorid. Disse er foreløpig ikke beskrevet i noen standard.

Vegvesenet har brukt rusttrege stål både i bærende konstruksjoner og i veiutrustning, som rekkverk, skiltportaler, master og stolper. Hensikten med å bruke rusttrege stål er å unngå overflatebehandling og å redusere vedlikeholdsbehovet. Materialet må derfor gi den ønskede levetiden uten korrosjonsbeskyttelse. For bærende konstruksjoner er designlevetiden normalt 100 år, mens den for veiutrustning kan være fra 25 til 50 år. For å oppnå 100 års levetid med 1 mm korrosjonsmonn må den gjennomsnittlige korrosjonshastigheten være lavere enn 10 µm/år. Med kortere levetid kan en enten tillate høyere korrosjonshastighet eller mindre korrosjonsmonn.

Det er etter hvert opparbeidet en god del erfaring med bruk av rusttrege stål internasjonalt og også i Norge, som viser at eksponeringsforholdene har stor innvirkning på korrosjonshastigheten til materialene. Generelt er det rapportert om høy korrosjonshastighet på ubehandlede rusttrege stål i marine miljøer, langs vintersaltede veier, i miljøer med konstant høy fuktighet, og i industriområder med kjemiske forurensninger. Derimot er rusttrege stål et godt valg med tanke på både kostnader og miljø når eksponeringsforholdene ligger til rette for det.

Overordnet mål med aktiviteten har vært å utarbeide anbefalinger for bruk av rusttrege stål i konstruksjoner og utrustning. Delmål har vært:

- Å undersøke sammenhengen mellom eksponeringsmiljø og korrosjonshastighet.
- Å samle norske og internasjonale anbefalinger, erfaringer og testresultater med slike stål.

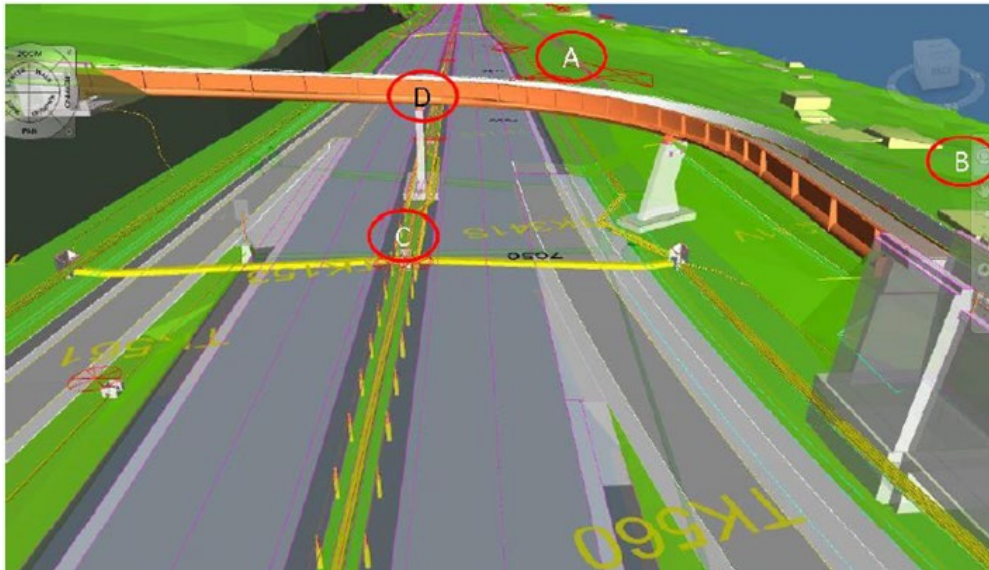
Erfaringene har blitt oppsummert i Statens vegvesen rapport Nr. 711. Rapporten gir også forslag til retningslinjer for bruk av rusttregt stål i Norge.

3.5.2 Resultater/funn

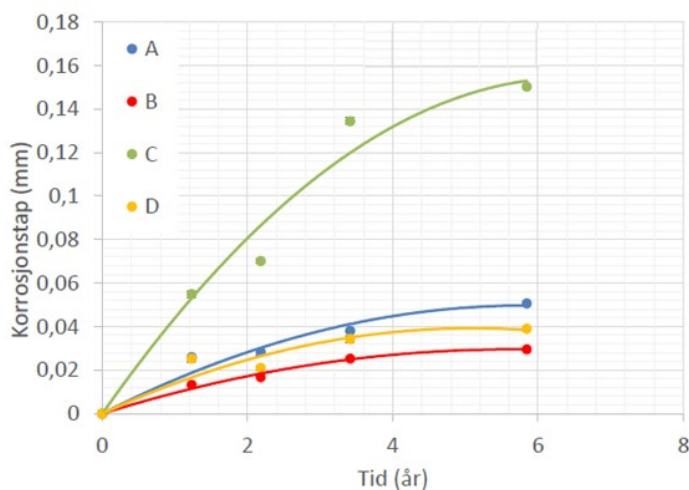
Rapporten oppsummerer erfaringer og resultater med rusttrege stål i Norge og i andre land. Den gir også en oversikt over retningslinjer som gjelder i Storbritannia, USA, Australia og Japan. Det er ikke funnet spesifikasjoner eller retningslinjer for noen av de nordiske landene, hvor rusttrege stål generelt er lite brukt.

Rusttrege stål i lastørende konstruksjoner bør ikke brukes i kystmiljø eller langs vintersaltede veier hvis veisalt deponeres på konstruksjonen. Årsaken til dette er en sterk økning av korrosjonshastighet med økende mengde klorider. Korrosiviteten i det aktuelle miljøet bør ikke overstige kategori C2, målt i henhold til ISO 9226.

I 2014 etablerte Statens vegvesen en feltstasjon for gjennomføring av korrosjonstester av en type rusttregt stål ved ei gangbru på E6 ved Espa. Prøveplater ble utplassert i ulike lokasjoner (A–D) i forhold til saltet vegbane (E6), se Figur 3. Før utplassering ble alle prøveplater veid og oppmålt (bredde, lengde og tykkelse). Umiddelbart før utplassering er platene blåserenset. Korrosjonstap fram til 6 år er vist i Figur 4.



FIGUR 3 LOKASJONER FOR UTPLASSERING AV PRØVEPLATER VED E6/ESPA. LOKASJON B ER MISVISENDE UT FRA FIGUR, DA DENNE LIGGER PÅ NEDSIDEN AV RUNDKJØRING CA. 100 METER FRA E6. LOKASJON A ER CA. 10 M FRA VEI. REF: RAPPORT T-1013, FELTTTEST AV RUSTTREGT STÅL, KIWA INSPECTA AS, 2021.



FIGUR 4 KORROSJONSTAP I DE ULIKE LOKASJONER.

Som det det framgår av figuren er korrosjonshastigheten lav i lokasjon A, B og D og avtagende med tiden, noe som viser at påvirkningen av vegsalt er liten i forhold til lokasjon C hvor effekten av vegsalt er stor.

3.5.3 Implementering

Det er utarbeidet forslag til retningslinjer for bruk av rusttregt stål som gis i det følgende:

Valg av legering

Rusttregt stål velges i henhold til NS-EN 10025-5: Varmvalsede produkter av konstruksjonsstål Del 5: Tekniske leveringsbetingelser for konstruksjonsstål med forbedret motstand mot atmosfærisk korrosjon. I henhold til N400 kan rusttregt stål i henhold til NS-EN 10025-5 som skal sveises benyttes i kvalitet S355K2W+N eller +M.

Miljøparametere

Rusttrege stål bør ikke brukes i lastbærende konstruksjoner i kystmiljø. Korrosiviteten bør ikke overstige kategori C2, målt i henhold til ISO 9226. Deponering av klorider på ståloverflata bør ikke være høyere enn 5 mg/m²/døgn, målt i henhold til ISO 9225. Langs vintersaltede veier bør det ikke brukes rusttrege stål i lastbærende konstruksjoner hvis veisalt deponeres på konstruksjonen. Hvis det ikke er mulig eller hensiktsmessig å måle deponering av klorid i henhold til ISO 9225, kan det antas at området innenfor 10 m til side for veien og 5 m over veien er eksponert for veisalt.

Rusttrege stål bør ikke benyttes i lastbærende konstruksjoner i nærheten av store punktutslipp av svoveloksider, som bergverk og prosessindustri. Deponering av svoveloksider på ståloverflata bør ikke overstige 20 mg/m²/døgn, målt i henhold til ISO 9225. Korrosiviteten bør ikke overstige kategori C2, målt i henhold til ISO 9226.

For veiutrustning kan høyere korrosjonshastighet tillates så lenge kombinasjon av korrosjonshastighet og korrosjonsmonn fortsatt gir ønsket levetid. Det bør imidlertid vurderes om avskallende korrosjonsprodukter, som sannsynligvis vil dannes hvis grenseverdiene over for klorid og korrosivitet overskrides, kan skape problemer for publikum eller kjøretøy.

N400 gir veiledning til bruk av rusttregt stål. Under kapittel 1.1 Prosjekteringsforutsetninger, krav 1.1.5–2 er det angitt at «*Bruk av rustfritt og rusttregt stål i bærende konstruksjoner skal før oppstart av prosjekteringen avklares ved teknisk kontroll av konsept, se 2.5.*». Videre er det under punkt 9.2.1 angitt følgende: «*Rusttrege stål krever ingen utvendig overflatebehandling så lenge konstruksjonen er utformet på en god måte og står i korrosivitetsklasse C3 eller lavere. NS-EN 12944-2 gir beskrivelse av ulike korrosivitetsklasser. Hvis konstruksjonen ligger i klasse C3 eller høyere, kan det monteres opp prøveplater på et lignende område og måle korrosivitetsklassen. Dersom disse målingene tilsier lavere korrosivitetsklasse, kan en legge dette til grunn. Konstruksjoner som ligger i C2 anbefales utført med 0,8 mm korrosjonstillegg. Konstruksjoner som ligger i C3 anbefales utført med 1,0 mm korrosjonstillegg. For kassetversnitt der avfuktning ikke benyttes så brukes 0,5 mm korrosjonstillegg. Det er viktig at konstruksjonen utformes slik at man får en kontrollert vannavrenning. Det anbefales å unngå små detaljer. Det anbefales sterkt at konstruksjonen ikke er utsatt for saltsprøyt. Det anbefales at rusthinnen får mulighet til å utvikle seg og har minst mulig mekanisk påvirkning. Ved oppfølging i driftsfasen anbefales det at korrosjonshastigheten måles (etter for eksempel 1, 2, 3, og 5 år) for vurdering av behov for overflatebehandling ved et senere tidspunkt. Det anbefales at korrosjonstillegger blir oppgitt i som bygd- og forvaltningsdokumentasjonen.*»

Konstruktiv utførelse

For at ønsket levetid skal oppnås må rusttrege stål tørke når været tillater det. Konstruktiv utførelse som hindrer overflata å tørke må derfor unngås. Vann fra kjørebanelen må dreneres bort fra det rusttrege stålet. Spesielt er dette viktig å være oppmerksom på ved brukskjøter eller andre overflater som samler vann. Hvis dette ikke er mulig å unngå, for eksempel i overlappende skjøter, kan innlegg av varmforsinket stål eller sinkplater brukes.

Brunt rustvann fra det rusttrege stålet kan misfarge andre komponenter og overflater i konstruksjonen og gi en uheldig visuell effekt. Vann som renner fra rusttregt stål bør derfor også dreneres bort.

3.5.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

Det er funnet at korrosjonshastigheten til rusttrege stål øker ved eksponering for klorider. Spredningen av klorider rundt vintersaltede veier er imidlertid lite undersøkt, så det er vanskelig å si hvor rusttrege stål kan benyttes langs vintersaltede veier. Det er derfor satt i gang ytterligere et arbeid på måling av klorider langs E6 ved Espa. Prøvene er montert i master, i en matrise med 1,5 m mellom hver prøve i høyden (1,5, 3, 4,5 og 6 m over bakken) og med 1,5 m mellom hver mast (1,5, 3, 4,5 og 6 m fra autovern). De siste prøvene tas inn høsten 2022, og rapport fra dette arbeidet vil foreligge i løpet av 2022.

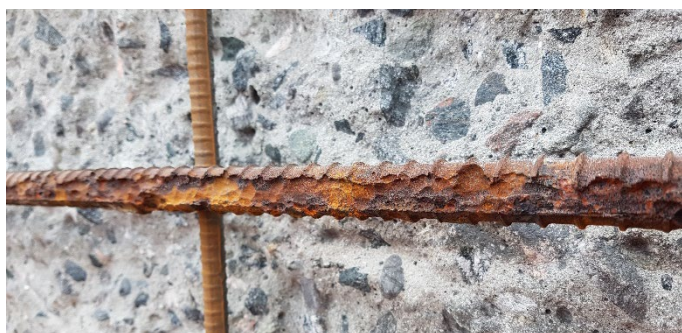
3.5.5 Publikasjoner

Knudsen, O. Ø. (2021): Rusttregt stål. Korrosjonshastighet i ulike miljøer. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021, Statens vegvesen rapport nr. 711.

4 Prosjekt 2: Armeringskorrosjon i betong

4.1 Innledning

Armert betong betraktes som et varig byggemateriale. Alle materialer blir imidlertid utsatt for nedbrytningsmekanismer, og over tid kan det oppstå skader. Armeringskorrosjon er den langt vanligste årsaken til nedbrytning av armerte betongkonstruksjoner på verdensbasis. Forskning rundt armeringskorrosjon har pågått i mer enn 100 år, med økt aktivitet de siste 50 årene. Armeringsstål i betong er i utgangspunktet beskyttet av en oksidfilm slik at stålet er passivt. Denne filmen vil ved høye mengder klorider (eller ved karbonatisering) brytes ned, og armeringen vil begynne å korrodere (ruste). Rustproduktene som dannes kan ha et volum som er 5 – 7 ganger større, noe som medfører at betongen vil kunne sprekke opp og skalle av. Nedbrytningen av armeringsjernet vil være lokal og medføre tverrsnittsreduksjon. Nedbrytningen vil på sikt redusere de mekaniske egenskapene til betongen og samvirket mellom betong og stål, og dermed redusere konstruksjonens kapasitet.



FIGUR 5 - ARMERINGSKORROSJONSSKADE. FOTO: KARLA HORNBOSTEL, STATENS VEGVESEN.

Av de ca. 12 500 riks- og fylkesvegbruene registrert med betong som hovedbyggemateriale i BRUTUS (Statens vegvesen bruforvaltningssystem) er ca. 7 % av bruene registrert med armeringskorrosjonsskader som kan få innvirkning på bæreevne over tid. Antall skader på grunn av korrosjon antas å øke vesentlig over de neste årene på grunn av en stadig økende alder på brumassen, dersom ikke framtidig vedlikehold kompenserer for dette. Tall fra BRUTUS viser at 22 % av bruarealet i riks- og fylkesvegnettet har en alder over 50 år, 38 % har en alder mellom 30 og 50 år, mens 40 % av bruarealet er yngre enn 30 år.

Bedre bruvedlikehold prosjektet 2 *Armeringskorrosjon i betong* er rettet mot drift og vedlikehold av betongruer med armeringskorrosjon. Det er behov for forskning på korrektive tiltak som vil bidra til å øke levetiden for konstruksjoner der det i dag påvises armeringskorrosjon. Det er i tillegg behov for både bedre verktøy for å stille riktige diagnoser, samt å øke kunnskapen om preventive vedlikeholdsmetoder.

Følgende resultatmål ble satt for prosjektet:

- Å anbefale inspeksjonsmetoder for å utrede omfang av skader på grunn av armeringskorrosjon samt å utvikle verktøy for å bedømme konsekvenser av armeringskorrosjon for bruens levetid.
- Å utarbeide veiledning for valg av økonomisk effektive reparasjonstiltak basert på konstruksjonens tilstand og forventet levetid.

- Å utarbeide detaljerte beskrivelser for gjennomføring av teknisk gode reparasjonstiltak.

Prosjektet har vært gjennomført i fem aktiviteter, med følgende sentrale medarbeidere fra Statens vegvesen:

- Preventive tiltak – Eva Rodum
- Betongrehabilitering ved katodisk beskyttelse – Roy Antonsen, Karla Hornbostel og Stig H. Helgestad
- Betongrehabilitering ved mekanisk reparasjon – Stig H. Helgestad
- Vedlikehold av spennarmerte betongkonstruksjoner – Lise Bathen, Roy Antonsen, Karla Hornbostel
- Levetidsvurdering og livssyklus kostnadsberegninger for vedlikehold av betongkonstruksjoner utsatt for klorider – Karla Hornbostel

Laboratorieprøving i flere av aktivitetene ble gjennomført av Statens vegvesens laboratorium sørøst og SINTEF.

I aktiviteten *Betongrehabilitering ved mekanisk reparasjon* ble det utarbeidet en statusrapport om bruk av offeranoder av RISE Research Institutes of Sweden AB.

Aktiviteten rundt spennarmering har vært gjennomført i samarbeid med NTNU Institutt for konstruksjonsteknikk v/ ph.d.-kandidat Magdalena Osmolska, ph.d.-kandidat Antonia Mengde, førsteamanuensis Daniel Cantero og professor Terje Kanstad, samt professor Roy Johnsen fra Institutt for maskinteknikk og produksjon. Arbeidet med undersøkelse av inspeksjonsmetoder og utarbeidelse av en inspeksjonsveiledning ble gjennomført i samarbeid med Dekra Industrial AB, Sverige.

Aktiviteten rundt levetidsmodeller ble gjennomført i samarbeid med ETH Zurich v/ professor Ueli Angst og forsker Carolina Käthler Boschmann.

4.1.1 Publikasjoner

Tidsskriftsartikler:

Hornbostel, K. (2019): Korrosjon av stål i betong: Ingen vei utenom kunnskap! Rust og Råte nr. 1 mars 2019, s. 47–49.

4.2 Preventive tiltak

4.2.1 Beskrivelse

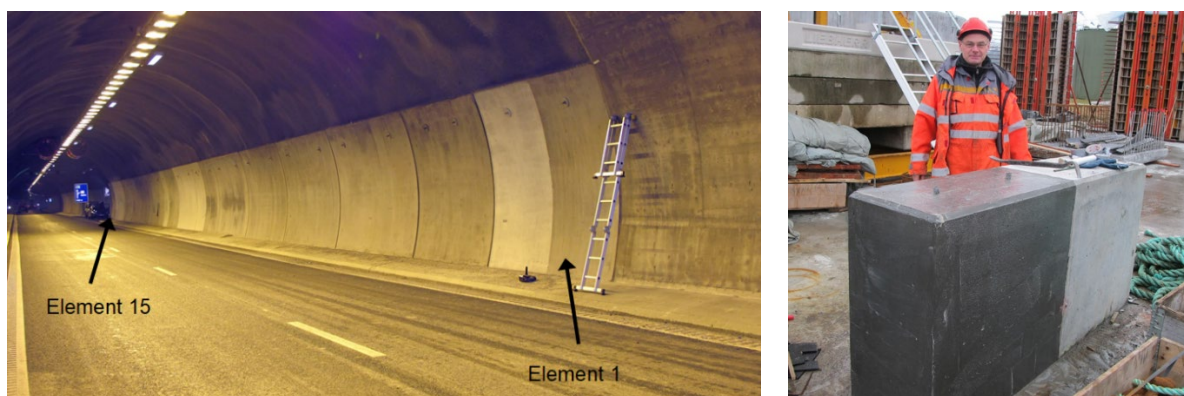
Vegnnormalene N400 og N500 gir regler for betongkvalitet og overdekning som skal sikre hhv. 100 års levetid for bruer og 50 års levetid for veggelementer i tunneler. I spesielle tilfeller kan det være behov for ekstra beskyttelse av betongen, f.eks. i særlig kloridutsatte miljøer, for særlig kompliserte konstruksjonsdeler eller ved kvalitetsavvik i byggeprosessen. En aktuell metode for en slik beskyttelse kan være påføring av en kloridbremsende overflatebehandling. Prosjektet har fulgt opp tidligere igangsatte feltforsøk med kloridbremsende overflateprodukter for betong, hhv. i Askimporten tunnel og et testprosjekt tilknyttet Tresfjordbrua. Videre er det gjennomført en avsluttende prøvingstermin etter 19 års

timesaltseksponering av overflatebehandlede betongplater utplassert på Lundevann bru. I tillegg er det gjort innledende prøving for å undersøke om den akselererte kloridtestmetoden NT Build 515, som er utviklet for hydrofoberende impregneringer, kan være egnet også for filmdannende belegg.

Askimporten tunnel er en 1050 m lang toløps vegtunnel på E18 i Østfold. Før tunnelen ble åpnet for trafikk i 2010 ble det etablert et forsøksfelt med overflatebehandling i det østgående løpet. Prefabrikkerte veggelementer ble påført til sammen sju ulike overflateprodukter (hydrofoberende impregneringer, impregneringer og belegg), se Figur 6a. To av impregneringene ble påført både i fargeløs og hvitpigmentert variant. Mellom hvert produkt ble det lagt inn et ubehandlet referansefelt. Overflateproduktenes kloridbremsende egenskaper ble undersøkt etter hhv. 5 og 10 års drift.

Ved bygging av Tresfjordbrua i Møre og Romsdal (2013–2015) ble det benyttet betong med høyt flygeaskeinnehold (39 % flygeaske av bindemiddelmengden) og tidlig overflatebehandling med hydrofoberende impregnering (silan i gelform) på landkar, fundamenter og søyler. I tilknytning til byggeprosjektet ble det støpt mange små og ett stort prøveelement (Figur 6b) for dokumentasjon av overflatebehandlingens kloridbremsende effekt på kort og lang sikt. Elementene ble avformet ved 3 døgns alder og impregnert umiddelbart etterpå. Elementene ble eksponert ved neddykking i sjøvann hhv. 3, 7 og 14 dogn etter impregnering. For hver variant ble det også eksponert ubehandlede referanseelementer. Det ble gjennomført utboring av prøvestykker og bestemmelse av kloridinntrenging etter eksponering i 6 mnd, 1, 2 og 5 år.

Lundevann bru ble rehabilitert i 1998, ved mekanisk reparasjon og overflatebehandling av kantbjelkene. I forbindelse med disse arbeidene ble det støpt ut betongplater som ble forbehandlet med/uten herdemembran og med/uten sandblåsing og overflatebehandlet med to silanbaserte impregneringer (hhv. i gel- og væskeform) og to elastiske, sementbaserte belegg. Produktene ble påført ved 4 ukers betongalder, i tillegg ble impregneringene også påført betong med 1 døgns og 1 års alder. Platene ble boltet fast til kantbjelkene på Lundevann bru, og undersøkt for kloridinntrenging etter 3, 9 og 19 år.



FIGUR 6 A) TESTFELTET I ASKIMPORTEN TUNNEL. B) SILANIMPREGNERT/UBEHANDLET STORT ELEMENT FRA TRESFJORD-PROSJEKTET. FOTO: EVA RODUM, STATENS VEGVESEN.

Fra 1998 til 2018 hadde Statens vegvesen en egen dokumentasjonsordning for kloridbremsende overflatebehandling, beskrevet i Intern rapport nr. 2034. Som resultat av et

samarbeidprosjekt med svenske og finske vegmyndigheter, ble det i 2015 utgitt en egen Nordtest-metode (NT Build 515) for akselerert prøving av hydrofoberende impregnerings kloridbremsende evne, uttrykt ved en filtreringseffekt. Både i 2015 og 2018 ble det gjort endringer i kravene til kloridbremsende overflateprodukter i Håndbok R762: Prosesskode 2. I 2015 ble den europeiske standarden NS-EN 1504-2 implementert. Denne standarden beskriver ingen prøvingsmetode for kloridmotstand, men angir at det er opp til nasjonale myndigheter både å beskrive metode og stille krav. For filmdannende belegg ble det i Håndbok R762 innført skjerpede krav til kapillærabsorpsjon og vannpermeabilitet, som substitutt for manglende krav til kloridmotstand. I 2018 ble den nye nordiske metoden implementert for hydrofoberende impregneringer, med krav til filtreringseffekt $FE_{25} \geq 65\%$. I prosjektet er det gjennomført laboratorieprøving av tre ulike filmdannende belegg iht. ordinær og modifisert NT Build 515-prosedyre for å undersøke egnetheten av metoden for belegg.

4.2.2 Resultater/funn

Resultatene fra Askimporten testfelt viser at de hydrofoberende impregneringene (silan i hhv. gel- og kremform) og det sementbaserte belegget beskytter svært godt mot kloridinntrenging, selv etter 10 år. Blant impregneringene har ett produkt en betydelig kloridbremsende effekt, mens to andre produkter ikke har noen kloridbremsende effekt i det hele tatt.

Tidlige undersøkelser av lyshet (etter én, to og fire vintersesonger) viste, som forventet, at hvite eller hvitpigmenterte produkter hadde en positiv effekt på lyshet/lysrefleksjon sammenlignet med ubehandlede referanser. Elementer med fargeløs impregnering eller hydrofoberende impregneringer skilte seg imidlertid ikke signifikant fra de ubehandlede referanseflatene.

Temperaturmålinger over knappe fire år viser at temperaturen bak hvelvet er høyere enn temperaturen i trafikkrommet i halvparten av tiden. Fukktransport fra hvelvet mot trafikkrommet vil derfor kunne foregå i store deler av året. Resultater fra måling av fuktinnhold i betongen viser økende kapillær vannmetningsgrad fra trafikkrommet mot bergsiden. Selv om elementet er beskyttet mot direkte vannpåkjenning på bergsiden, så er vanninnholdet på bergsiden svært høyt (96 % kapillær vannmetningsgrad). Dette underbygger at det pågår en vanntransport fra bergsiden mot trafikkrommet. Dette er en viktig faktor ved vurdering av type overflatebehandling av slike tunnelelementer, i og med at dette øker risikoen for akkumulering av fukt bak tette belegg, med etterfølgende avflassing og mulige frostskafer.

Resultatene fra Tresfjord prøveprosjekt viser at tidlig impregnering av betong med silan i gelform (ved 3 døgns betongalder) gir en meget god kloridbremsende effekt de første to til fem årene. Den kloridbremsende effekten øker med økende polymeriseringstid (silanens «herdetid») før eksponering (fra 3 til 14 døgn) og avtar med eksponeringstid (fra 6 mnd til 2 år). Impregnering ved 3 døgns alder og etterfølgende 14 døgn polymerisering gir en filtreringseffekt på ca. 65 % i løpet av to år.

Resultatene viser videre at kloridinntrengingen i den ubehandlede betongen ($m=0,40$, 39 % flygeaske av bindemiddelmengden) avtar med økende alder ved eksponering (fra 6 til 90 døgn). Etter 2 år er total inntrengt mengde klorider i «90 døgns»-betongen ca. 40 % av

inntrengt mengde i «10 døgns»-betongen. Kloriddiffusjonskoeffisienten reduseres med økende eksponeringstid. For betong eksponert ved 10 døgns alder er det beregnet en aldringsekspont, α , på ca. 0,65, basert på målinger etter 6 mnd, 2 år og 5 år.

Resultatene fra Lundevann bru viser ingen signifikant effekt av de ulike typer forbehandling (ingen forbehandling, sandblåsing, herdemembran og herdemembran+sandblåsing) på kloridinntrengingen. Vurderinger av overflatebehandlingenes kloridbremsende effekt er derfor basert på middelverdier for alle disse variantene pr. prøvingstermin. Den kloridbremsende effekten (filtreringseffekten) av silanimpregneringene i hhv. gelform / væskeform påført ved 4 ukers betongalder er hhv. 80/80 % etter 3 år, 90/60 etter 9 år og 85/65 % etter 19 år. Silanen i gelform har høy filtreringseffekt ved alle prøvingsterminer uavhengig av betongens alder ved påføring, mens silanen i væskeform har avtagende effekt over tid, spesielt når impregneringen er påført enten ved 1 døgns eller 1 års alder.

Inntrengingsdybder av impregneringer er en viktig faktor for langtidseffekten av denne typen overflatebehandling. For Lundevann-platene er det i tidlig fase målt langt større inntrengingsdybder for silan-gelen enn for silan-væsken – hvilket kan forklare de høyere filtreringseffektene for gelen. Forskjellen i inntrengingsdybde har imidlertid blitt utjevnet over tid og etter 19 års eksponering er det kun på enkeltvarianter hvor det er målt signifikant større inntrengingsdybder av gelen. Det er uvisst hvorfor det impregnerte yttersjiktet av betongen har blitt svekket/vanskeligere å påvise over år.

Resultatene fra akselerert kloridprøving av 3 sementbaserte overflatebelegg iht. NT Build 515 indikerer at metoden kan være egnet også til dokumentasjon av denne kategorien overflateprodukter. De to elastiske beleggene oppfører seg nokså likt og blokkerer så å si kloridinntrengingen, mens det ikke-elastiske belegget oppfører seg omtrent som referansen. Dette til tross for at oppgitte verdier for kapillærabsorpsjon og vannpermeabilitet (leverandørens datablad) indikerer at det ikke-elastiske belegget bør være «tettere» mot vannopptak enn det ene elastiske belegget.

4.2.3 Implementering

Resultatene fra Askimporten og Lundevann underbygger at de krav Statens vegvesen stiller til hydrofobere impregneringer i Håndbok R762 er riktige. Dette gjelder både krav om at produkter skal være basert på ren silan og at impregneringen skal være i gel- eller kremform. Resultatene underbygger også at det ikke bør stilles andre krav til forbehandling enn at overflaten skal være fri for gammel overflatebehandling og forurensing. Begge prosjektene gir i tillegg viktig informasjon om kloridinntrenging fra tinesalter i ubehandlet betong, som grunnlag for vurderinger knyttet til overdekningskrav m.m. i N400 og N500.

Resultatene fra Askimporten vil kunne inngå i et dokumentasjonsgrunnlag for utvikling av regelverk knyttet til overflatebehandling av veggelementer i tunnel. Det er pr. i dag ingen krav om «hvitmaling» av tunnelvegger, men slik overflatebehandling gjennomføres i stor grad, i hovedsak for å bedre kjørekomforten og trafikksikkerheten. Det er imidlertid ingen krav til produktene, og det er svært ulike erfaringer med bestandigheten av overflatebelegg. I enkelte

tunneler er det omfattende flassing av belegg, noe som medfører store vedlikeholdsbehov og eventuelt også miljøutfordringer.

Resultatene fra Tresfjord viser at påføring av silanbasert impregnering umiddelbart etter avforming av betongen gir en svært god beskyttelse av betongen, selv under ekstremt hard kloridbelastning. Foreløpige resultater fra andre prosjekter tyder på at det ikke vil være generelt behov for ekstra beskyttelse av betong med flygeaskeinnhold opptil 40 %, men løsningen kan være aktuell i spesielle situasjoner, f.eks. for spesielt utsatte konstruksjonsdeler. Resultatene kan videre ha relevans for eventuelle andre bindemiddelkombinasjoner, f.eks. ved innføring av nye sementerstatningsmaterialer, dersom slike materialer viser seg å ha redusert kloridmotstand i tidlig fase. Langtids utvikling av kloridmotstand for den ubehandlede Tresfjord-betongen vil inngå i det interne grunnlaget Statens vegvesen har fra mange feltstasjoner for oppdatering av N400.

4.2.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

Askimporten testfelt er aktuelt for videre oppfølging av kloridinntrenging i overflatebehandlede og ubehandlede elementer. Det kan i tillegg være aktuelt å gjennomføre en ny undersøkelse av effekten av de ulike overflateproduktene på overflatenes lyshet. Det bør vurderes om det skal innføres krav til overflateprodukter i tunnel, både til type produkter, materialegenskaper og utførelse.

Det store Tresfjord-elementet bør også følges opp videre. Neste prøvingstermin kan f.eks. være etter 10 eller 15 års eksponering.

Arbeidet med å tilpasse NT Build 515 til prøving av belegg bør fortsette. Det kan eventuelt være riktig å implementere den i Håndbok R762, som erstatning for skjerpet krav til kapillærabsorpsjon og vannpermeabilitet.

4.2.5 Publikasjoner

Rapporter:

- Rodum, E. (2022): Tidlig overflatebehandling av lavvarmebetong. Tresfjord – prøving etter 2 og 5 år. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021, Statens vegvesen rapport nr. 841.
- Rodum, E., (2022): Askimporten – feltforsøk med overflatebehandling. Kloridinntrengning etter 5 og 10 år. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold (2017–2021), Statens vegvesen rapport nr. 848.
- Rodum, E., Larsen, C.K. (2022): Lundevann – feltforsøk med overflatebehandling. Kloridinntrengning etter 3, 9 og 19 år. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold (2017–2021), Statens vegvesen rapport nr. 849.

Notater:

- Rodum, E. (2022): Filmdannende belegg. Akselerert prøving av kloridmotstand ved bruk av Nordtest-metoden NT Build 515. Statens vegvesen notat MIME 20/31348.

4.3 Betongrehabilitering ved katodisk beskyttelse

4.3.1 Beskrivelse

Katodisk beskyttelse (KB) er en rehabiliteringsmetode som egner seg for brukonstruksjoner hvor forholdsvis store deler av betongoverflaten er eksponert for klorider og hvor armeringen har begynt å korrodere aktivt. Korrosjonsangrepet bør ikke ha medført omfattende bomutvikling, opprissing eller avskalling av betongen, og tverrsnittsreduksjonen av armeringen må ikke være vesentlig. Katodisk beskyttelse kan i mange tilfeller være den eneste aktuelle rehabiliteringsmetoden for å sikre levetiden til en konstruksjon. Sammenlignet med alternativet nybygg, er katodisk beskyttelse både veldig kostnadseffektivt og miljøvennlig, og det kan spares mye klimagassutslipp.

Statens vegvesen har erfaringer med katodisk beskyttelse som går hele 30 år tilbake og arbeider aktivt for å videreutvikle denne rehabiliteringsmetoden. Bruer med installert katodisk beskyttelse er spredt langs hele kysten av Norge. Da metoden ble tatt i bruk for 20–30 år siden var det en betydelig variasjon av forskjellige typer anodematerialer (titanband og titannett i mørtel, stavanoder, ledende maling etc.). Etter hvert har noen systemer vist seg å fungere bedre enn andre på norske kystbruer, og i dag bruker vi hovedsakelig en type KB-anlegg med titannett sprøytet inn med tørrsprøytømørtel. Nye systemer for ledende maling er under utvikling og kan forhåpentligvis bli et kostnadseffektivt alternativ i årene fremover.

Ett av formålene med prosjektet var å kartlegge bruk av katodisk beskyttelse på norske bruer de siste 30 årene, både med tanke på å få en samlet oversikt over hvilke anlegg som er i drift per i dag og for å lære av tidligere erfaringer. I prosjektet ble det utarbeidet et notat som oppsummerer bruken av katodisk beskyttelse på riks- og fylkesvegbruer.

Det er et behov for å kartlegge hvordan dagens foretrukne KB-system kan optimaliseres med tanke på materialbruk og utførelse. Her ble det spesielt indentifisert et behov for å bedre forstå og sette krav til sprøytømørtler som brukes for mekanisk reparasjon av skadede områder forut for installasjon av KB, og mørtler for å sprøyte inn titannettet. Det finnes få presise krav både til materialegenskaper og testmetoder for disse mørteltypene. Det ble derfor etablert en feltstasjon ved Tjeldsundbrua, hvor forskjellige mørtler per i dag er under utprøving.

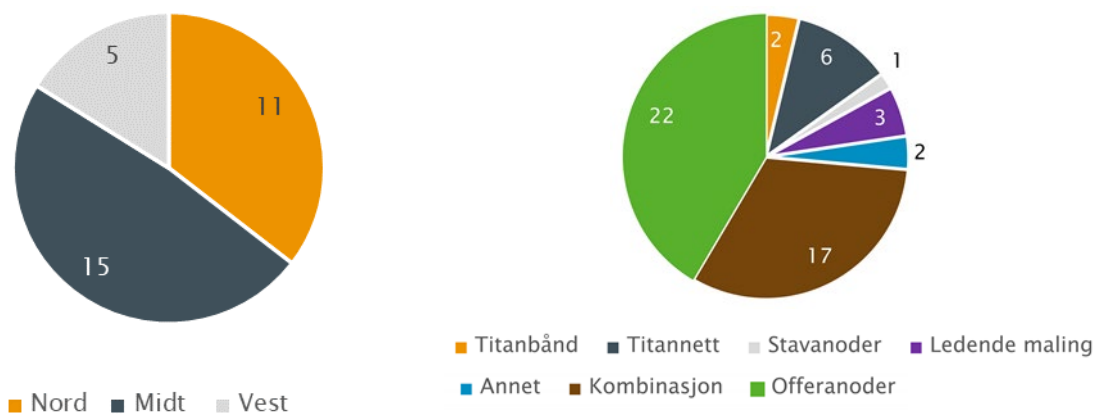


FIGUR 7 - ETABLERING AV PRØVEFELTENE VED TJELDSUNDBRUA. FOTO: KARLA HORNBOSTEL, STATENS VEGVESEN.

Dagens tradisjonelle og foretrukne KB-system, hvor titannett sprøytes inn med KB-mørtel, tilfører konstruksjonen ekstra vekt, noe som kan være uheldig mht bærekapasitet. Samtidig oppstår det en del støvutvikling under utførelsen av arbeidene, noe som er uheldig spesielt i områder med tett bebyggelse og mye publikumstrafikk samt for det ytre miljøet. Alternative systemer som ikke fører til betydelig vektøkning og som støver mindre under utførelsen, kan derfor i noen tilfeller være å foretrekke. Elektrisk ledende malinger er et slikt system. Det finnes noen erfaringer med dette KB-systemet fra tidligere, men mer utvikling er nødvendig for å sikre forventet levetid og funksjon.

4.3.2 Resultater/funn

I samarbeid med NTNU (prosjektoppgave og masteroppgave) ble det utarbeidet et notat som kartla bestående KB-anlegg på riks- og fylkesvegnettet. Formålet med notatet var å lage en oversikt over betongbruer (og delvis tunneler) med katodisk beskyttelse samt å gi nøkkelopplysninger om de enkelte prosjektene (som for eksempel byggeår bru, årstall for installering av KB-anlegg, type KB-system, status for drift/beskyttelsesgrad osv.). Det var stor variasjon i dokumentasjon rundt de forskjellige anleggene, men notatet gir likevel en god oversikt av bruk av KB på norske bruer og tunneler gjennom de siste 30 årene. Per i dag er det 53 KB-anlegg installert (ikke alle er i drift lengre). Rundt 20 av disse anleggene består av offeranoder montert i byggefasen på fundamenter og/eller andre neddykkete konstruksjonsdeler, altså utført som katodisk prevensjon. På de resterende anleggene er katodisk beskyttelse brukt som vedlikeholdstiltak, her som oftest med påtrykt strøm. Figur 8a viser fordelingen av anlegg med påtrykt strøm etter geografi. I Figur 8b er forskjellige anodetyper for alle 53 anleggene spesifisert.



(a) Geografisk fordeling av KB-anlegg med påtrykt strøm i Norge

(b) Bruk av ulike anodesystemer for alle registrerte KB-anlegg (inkl. offeranoder som katodisk prevensjon).

FIGUR 8 - RESULTATER FRA KARTLEGGING AV KB ANLEGG I NORGE (STATUS JANUAR 2022) FRA MIME NOTAT 20/31348-3, OVERSIKTEN INKLUDERE ANLEGG PÅ BRUER, KAIER OG I TUNNELER (UNDERSJØISK).

Fire av de bestående KB-anleggene på bruer ble ved spesialinspeksjoner kartlagt mer i detalj. Blant annet ble det funnet noen viktige hovedårsaker til gjengangerfeil på katodiske anlegg som i dag har blitt forbedret ved hjelp av tekniske beskrivelser i anbudspapirer og forbedret oppfølging i driftsfasen. Feilene gikk ofte på manglende heft mellom påsprøytet mørtel og brubetong, og var relatert til manglende eller utilstrekkelig forbehandling av overflatene før påsprøyting og/eller feil under sprøyting (dårlig utførelse og/eller værforhold), samt uegnede mørtelvalg (f.eks. mørtler med for høyt elektrisk motstand). Videre ble det registrert noen tilfeller av prosjekteringsfeil for KB-anlegg, eller svakheter i design, som opplagt har vært gjort for å spare kostnader, men som har resultert i for lav kapasitet og levetid for KB-anleggene.

KB-anlegget på Sortlandsbrua, som er SVVs eldste KB-anlegg i drift, ble undersøkt i detalj i et masterprosjekt ved NTNU. KB-anlegget består av titannett i sprøytemørtel. I oppgaven ble det konkludert med at anlegget fortsatt er fungerende, og at selv om styringen er vanskelig på grunn av sviktende referanseelektroder er det lite som tyder på at anlegget ikke klarer å beskytte armeringen etter 30 års drift. Samtidig ble det gjort observasjoner av høye kloridinnhold i KB-mørtelen og mikroriss rundt anodene, noe som muligens kommer til å påvirke systemet på sikt.

En av hovedaktivitetene i prosjektet var å undersøke egenskapene til mørtel brukt ved installasjon av katodisk beskyttelse. Det ble sett både på reparasjonsmørtler og mørtler anbefalt for innsprøyting av anodesystemer i katodiske anlegg. I 2019 ble det etablert et feltforsøk ved Tjeldsundbrua i Harstad kommune, Troms og Finnmark fylke. I feltforsøket ble det utprøvd et utvalg av aktuelle tørrsprøytemørtler. Sentralt i forsøksprogrammet var måling av elektrisk motstand sammen med prøving av katodisk beskyttelse for hver enkelt mørteltype. Utvikling av spesifikk elektrisk motstand og virkningsgrader for katodisk beskyttelse ble fulgt som funksjon av aldring, og naturlige fuktighets- og temperaturvariasjoner. Parallelt ble alle mørtler utprøvd i et eget laboratorieprogram. Det viste seg at mørtlene hadde en stor variasjon i de forskjellige materialegenskaper, og at spesielt spesifikk elektrisk motstand kunne variere

med flere 100 Ω m. Mørtelmotstand hadde en tydelig effekt på virkningsgrad/funksjon av anleggene, og det var mulig å konkludere med konkrete krav til spesifikk elektrisk motstand som sikrer at KB-anleggene fungerer tilfredsstillende.

Ledende maling ble undersøkt ved en masteroppgave på NTNU. Det ble både utført en erfaringsinnsamling og et forsøk ved et parkeringshus. Resultatene viser at forskjellige kombinasjoner av flere lag med ledende maling kan øke effekten (strømleveransen) av denne type KB-anlegg.

4.3.3 Implementering

Resultatene fra utprøving av mørtelmotstand ble direkte tatt med i anskaffelse av et nytt KB-anlegg på Gimsøystraumen bru. I anbudsbeskrivelsen ble det stilt konkrete krav til spesifikk elektrisk motstand etter 90 døgns herding. Resultatene kommer også til å bli tatt videre i oppdatering av prosessbeskrivelsen i Håndbok R762 Prosesskode 2.

Erfaringene fra masteroppgaven omkring ledende malinger ble tatt videre til et utførelsesprosjekt (KB-anlegg på Måløy bru). I prosjektet er forskjellige varianter av maling under utprøving.

Mange erfaringer fra kartlegging og inspeksjoner av eldre KB-anlegg tas videre med til nye anbudsbeskrivelser for å forbedre disse. Det ble gjort endringer både med tanke på optimal ressursbruk og ytelse i levetiden, og på valg av anodesystemer, design, strømfordeling, lokalisering av instrumentering, samt krav til mørtelsystemer og elektrisk ledningsevne. Resultatene fra arbeidet er formidlet til bransjen på flere nasjonale bru/betong-konferanser de siste årene.

4.3.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

For KB-system hvor titannett sprøytes inn med KB-mørtel, er krav til KB-mørtler (både til materialeegenskaper og til utførelse) nå forbedret. Systemet kan i det videre utvikles med tanke på å prosjektere anleggene best mulig knyttet til reelle behov for strømtetthet samt økonomisk optimalisering.

For å kunne bruke ledende maling som et alternativt system, spesielt der det er behov for å begrense vektøkningen, må vi forstå mer om hvorfor slike anlegg sviktet i tidligere år og hvilke malingssystemer som vil gi best mulig ytelse for kystbruer. Testfeltet på Måløybrua vil bli fulgt opp videre for å dokumentere anleggets funksjon over tid, både når det gjelder strømfordeling/beskyttelseeffekt og heft. Det er også søkt om forskningsmidler for 2023 for å studere eldre anlegg med ledende maling.

Hvorvidt observasjonen angående høye kloridinnhold i KB-mørtelen etter flere års bruk også gjelder andre KB-anlegg bør undersøkes videre. Nye materialprøver er tatt fra et annet KB-prosjekt (Sørstraumen bru med KB installert i 2005) i sommer 2022. Prøvene er per i dag under analyse.

Generelt er det et stort behov for å videre automatisere driften av KB-anleggene. Vegvesenet må i større grad opptre som eier av KB-data og forvalte disse mer målrettet. I dag har vi ingen automatisk varsling dersom det oppstår feil eller svikt i et KB-anlegg. Dette må vi sette søkelys på i framtiden, noe som er gitt som innspill til teknologisatsinger i divisjon Drift og Vedlikehold.

4.3.5 Publikasjoner

Rapporter:

- Hornbostel, K., Antonsen, R., Helgestad, S. H., Rognan O.-M. (2020): Feltforsøk – mørtel egnet for katodisk beskyttelse, Beskrivelse av feltforsøket FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021. Statens vegvesens rapport nr. 671.
- Helgestad, S. H., Hornbostel, K., Bjøntegaard, Ø., Antonsen, R. (2022): Feltforsøk – mørtel egnet for katodisk beskyttelse, Resultater fra laboratorieundersøkelse FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021. Statens vegvesens rapport nr. 851.
- Hornbostel, K., Antonsen, R., Helgestad, S. H. (2022): Feltforsøk – mørtel egnet for katodisk beskyttelse, Resultater etter 2,5 år felteksponering FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021. Statens vegvesens rapport nr. 850.

Notater:

- Hanssen, P. A. Ø. (2020): Kartlegging av katodisk beskyttede armerte betongbruer og tunneller på riks- og fylkesvegnett. Statens vegvesen notat MIME 20/31348-3.
- Hornbostel, K. (2021) Måledata feltstasjon Tjeldsundbrua – årsrapport 2019–2020. Statens vegvesen notat MIME 20/31348-6.

Masteroppgaver:

- Hanssen P. A. Ø. (2019): Undersøkelser av ledende anodemaling ved katodisk beskyttelse av armert betong anvendt på bruer og prøvefelt, Masteroppgave NTNU.
- Bruaas, T. B. (2019): Long-term performance of cathodic protection (CP) of marine bridge. Inspection of Sortlandsbrua 27 years after CP installation, Master thesis NTNU.

Foredrag:

- Antonsen, R. (2021): Sikrere bruer–Mer klimavennlig–Mer igjen for pengene. Narvik Vinterfestuke, Betongfagdag 2021, 11. mars 2021.
- Antonsen, R. (2020): Tyngre bruvedlikehold – Katodisk beskyttelse. Trondheim, Tekna kursdager, 9. januar 2020.
- Hornbostel, K. (2020): Reparasjonsmørtler 2 – Mot tekniske krav med FoU. Trondheim, Tekna kursdager, 9. januar 2020.
- Hornbostel, K. (2019): Sprøytemørtel og katodisk beskyttelse. Narvik, Vinterfestuke, Betongfagdag 2019, 21. mars 2019.
- Antonsen, R. (2018): Tyngre bruvedlikehold. Katodisk beskyttelse, status-forskning og innovasjonsbehov. Bergen, Betongforeningen, 18. januar 2018.
- Antonsen, R. (2018): Tyngre bruvedlikehold. Katodisk beskyttelse, status-forskning og innovasjonsbehov. Oslo, Betongforeningen, 6. november 2018.

- Antonsen, R. (2018): Tyngre bruvedlikehold. Katodisk beskyttelse, status-forsknings og innovasjonsbehov. Narvik Vinterfestuke, Betongfagdag 2018, 15. mars 2018.

4.4 Vedlikehold ved mekanisk reparasjon

4.4.1 Beskrivelse

Når armering korroderer eller betong brytes ned, vil det være naturlig å utbedre skadene som oppstår. Fjerning av skadet, kloridholdig eller karbonisert betong og gjenoppbygging til opprinnelig nivå betegnes som mekanisk reparasjon. Videre deles mekanisk reparasjon inn i tre nivåer: Forenklet, begrenset og fullstendig mekanisk reparasjon.

- Forenklet mekanisk reparasjon er det laveste nivået, her fjernes kun løs/bom og skadet betong fra skadeområdet før det bygges opp igjen. Forenklet mekanisk reparasjon utføres kun i forbindelse med elektrokjemiske reparasjonsmetoder.
- Ved begrenset mekanisk reparasjon fjernes all løs/bom og skadet betong, før det gjøres en vurdering av korrosjonstilstand av armeringsstålet. Der det er tegn til korrosjon, meisles armeringen frem og frilegges inntil det avdekkes korrosjonsfri armering. Begrenset mekanisk reparasjon kan ikke benyttes ved kloridinitiert armeringskorrosjon.
- Det siste nivået og det mest omfattende av mekanisk reparasjon, er fullstendig mekanisk reparasjon. Ved denne metoden skal all armering i karbonisert betong eller betong med for høyt kloridinnhold frilegges.

For betongbruer som er utsatt for armeringskorrosjon forårsaket av kloridinntrenging fra sjø eller vegsalting, vil enten fullstendig mekanisk reparasjon eller forenklet mekanisk reparasjon i kombinasjon med katodisk beskyttelse være aktuelle fremgangsmåter ved rehabilitering.

I dette prosjektet var formålet å gjøre en kartlegging av tilstanden til noen tidligere mekaniske reparasjoner og vurdere om resultatet ble tilfredsstillende. De tidligere regionene i SVV ble oppfordret til å gi innspill på objekter hvor det var utført mekaniske reparasjoner. Femten bruer ble befart og undersøkt. Fire av objektene ble kartlagt med EKP-målinger (elektrokjemisk potensiale). Dette er en målemetode som gir informasjon om korrosjonstilstanden til armeringsjernet. Utstyret består av en elektrode som plasseres på betongoverflaten og som er koblet til armeringen via et voltmeter. Metoden gir informasjon om potensialet til armeringsstålet som ligger like under målepunktet.

Ved mekanisk reparasjon av korrodert armering i kloridholdig betong vil det alltid være en risiko for at korrosjonen fortsetter, spesielt i overgangssonen mellom reparert og opprinnelig betong. I enkelte tilfeller kan det derfor være hensiktsmessig å legge inn et ekstra sikringstiltak for å være trygg på at reparasjonen vil fungere. En teknologi som er godt beskrevet i litteraturen, men som ikke har fått noe større innpass i de nordiske landene er bruk av offeranoder i forbindelse med mekanisk reparasjon. Den mest utbredte metoden er å feste offeranoder til frilagt armering. Anodene festes med elektrisk ledende tråd til armeringen og beskyttelsen er primært tenkt i randsonen av området som repareres. Offeranodene skal da sikre at det ikke oppstår nye korrosjonsstrømmer i området mellom ny og gammel betong. En alternativ bruk av offeranoder er å påføre offeranoden i etterkant av reparasjonen.

Offeranoden er i det tilfellet termisk sprøytet sink som påføres direkte på betongoverflaten som et belegg. For å få et bedre grunnlag for å vurdere om bruk av offeranoder i forbindelse med mekanisk reparasjon kan være en egnet metode, ble det lyst ut en konkurranse rundt temaet. Oppgaven var å skrive en «State of the Art» rapport om bruk og funksjonalitet av offeranoder. Oppdraget ble tildelt RISE Research Institutes of Sweden.

Statens vegvesens krav til materialer og utførelse ved mekanisk reparasjon er beskrevet i SVV Håndbok R762, Prosesskode 2, under kapittel 88.2 Vedlikehold, beskyttelse og reparasjon av betong, prosess 88.22 Mekanisk reparasjon. Gjenstøping av frimeislede sår kan enten utføres med betong, reparasjonsmørtel eller sprøytebetong/-mørtel. Valg av reparasjonsmateriale vil i hovedsak være avhengig av størrelsen på reparasjonen. Krav til betong som benyttes i forbindelse med større rehabiliteringsarbeider er beskrevet på samme måte som når det bygges nye konstruksjoner i betong. Når det kommer til bruk av reparasjonsmørtler så er materialkravene i stor grad basert på minimumskravene i standarden NS-EN 1504-3, men med noen tilleggskrav i tabell 88.22-1. Det er ikke stilt krav til reparasjonsmørtlers motstand mot kloridinntrenging, selv om dette er en egenskap som kan ha betydning for hvor godt en reparasjon vil fungere over tid i miljøer der det er høye nivåer av klorider. Det er imidlertid stilt krav til mørtlenes «tetthet» i form av et krav til maksimum kapillærabsorpsjon. Resultatene fra laboratorieundersøkelser av ti ulike reparasjonsmørtlers kloridmotstand ble sammenfattet i Statens Vegvesen rapport nr. 144 «Reparasjonsmørtlers kloridmotstand». Undersøkelsene omfattet sju håndmørtler og tre sprøytemørtler, i tillegg til to referansebetonger (SV-30 og SV-40). Resultatene viser at det er et stort sprik i denne egenskapen mellom de ulike reparasjonsmørtlene. Videre undersøkelser ble igangsatt for å se på om det er en sammenheng mellom reparasjonsmørtlers kloridmotstand og kapillærabsorpsjon. Til dette ble tre tørrsprøytemørtler sprøytet ut i felt og testet i laboratoriet.

4.4.2 Resultater/funn

I to av prosjektene som ble befart i aktiviteten rundt kartlegging av tidligere mekanisk reparasjoner, ble rekkverk og kantdrager skiftet ut i hele bruas lengde. Målingene og observasjonene tyder på at ved en slik omfattende utskiftning av skadet og kontaminert betong, kan korrosjonen reduseres kraftig. I tre av de andre prosjektene som ble kartlagt med EKP-målinger var det tydelig at korrosjonen hadde utviklet seg videre etter reparasjonene, se eksempel i Figur 9. Den sannsynlige forklaringen er at det ble fjernet for lite kloridinfisert betong, noe som førte til videre skadeutvikling. Årsakene kan være flere, f.eks. dårlig rengjøring av armering, feil materialvalg og/eller feil utførelse, men faktorer som tidspress, økonomiske begrensninger og for lite ressurser til detaljert innledende kartlegging kunne også være medvirkende årsaker. Under dialogen med regionene kom det frem at flere har erfart utfordringene som oppstår ved feilslått mekanisk reparasjon og at praksisen har blitt endret over de siste årene. Ved revisjon av håndbok R762 Prosesskoden i 2015 ble det innført en rekke nye krav, både til materialer, utførelse og kontroll, i tråd med NS-EN 1504-serien Produkter og systemer for beskyttelse og reparasjon av betongkonstruksjoner.

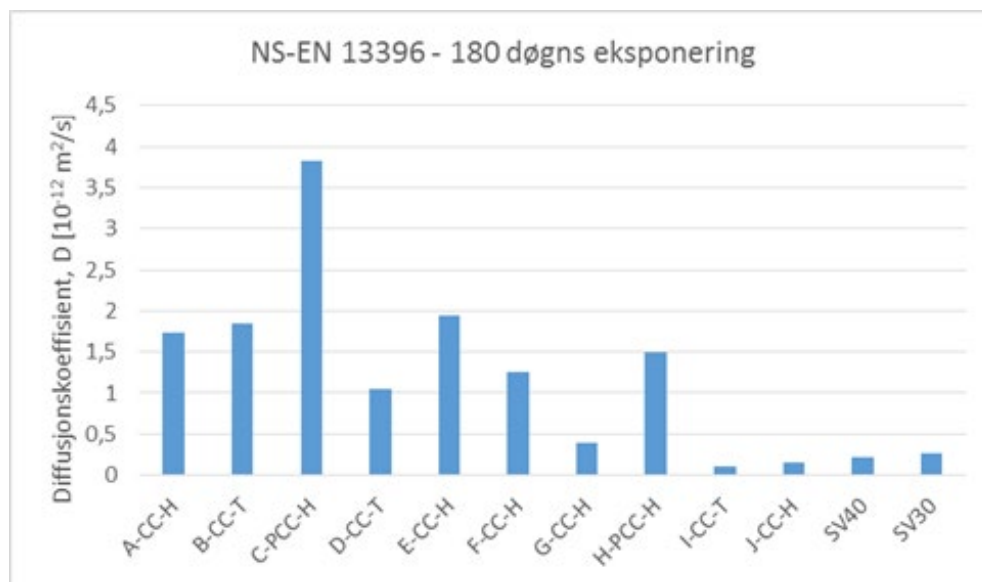


FIGUR 9 - BILDE VISER KORROSJON PÅ ARMERING I KANT MED REPARERT OMRÅDE. EIDE BRU I ROGALAND. FOTO SVV.

«State of the art» rapporten, utarbeidet av RISE Sverige, konkluderte med at de fleste undersøkelser som har blitt publisert om offeranoder i forbindelse med mekanisk reparasjon er av kontrollerte forsøk utført i et laboratorium. Det pekes på at for å unngå passivceller så kan det benyttes offeranoder av sink som på forhånd er innstøpt i en mørtel som inneholder LiOH (litiumhydroksid) for å holde offeranoden aktiv. Installasjonen kan utføres både i reparasjonsbetongen eller i randsonen utenfor det reparerte området i den opprinnelige betongen, og strømspredningen blir noe bedre dersom offeranodene installeres i den opprinnelige betongen nær grensen til reparasjonsbetongen. Offeranoder innstøpt i en mørtel som inneholder LiOH vil ha en høy initiell strømleveranse som avtar med eksponeringstiden. Strømleveransen fra anoden er videre avhengig av resistiviteten til materialet den støpes inn i. En lav resistivitet i betongen vil gi en høy strømleveranse fra anoden. En fullgod katodisk beskyttelse (100 mV depolarisasjon etter 24 timers utkobling) av armeringen er ofte begrenset til et mindre område nær anoden (ca 0,25 m). Anodens plassering har betydning for en effektiv spredning av beskyttelsesstrømmen. For offeranoder sprøytet på betongoverflaten viste forsøk at termisk sprøytet sink (99,5 % Zn) oppnådde den beste heften mot betongen. Termisk sprøytet sink er relativt åpen for fukttransport, noe som medfører at risikoen for frostsprengning blir lav. Både flamme- og lysbuesprøyting kan benyttes til å termisk sprøyte sink på betongkonstruksjoner. I feltforsøk fra Ølandsbroen i Sverige, vurderes sinksjiktet å ha en god beskyttende effekt etter 11 års drift.

Laboratorieforsøkene hvor reparasjonsmørtler ble testet for motstand mot kloridinntrengning viste at selv om alle produktene var deklartert i mørtelklasse R4 etter NS-EN 1504-3, så var det store ulikheter mellom produktene. Valg av mørtelklasse skal tilpasses den eksisterende betongen. Iht. håndbok R762 skal det, dersom ikke annet er angitt, benyttes mørtler som tilfredsstillende mørtelklasse R4. Dette er den høyeste klassen og representerer produkter som skal tilfredsstillende de strengeste kravene til mekaniske egenskaper (fasthet og stivhet). Likevel oppnår kun et fåtall av produktene en tilsvarende kloridmotstand som betongtypene SV-30 og SV-40 som ble beskrevet av Statens Vegvesen på 2000-tallet, se Figur 10.

Mørtelproduktene er anonymisert med bokstaver (A–J). Videre er det i indekseringen angitt type mørtel (CC; sementbasert mørtel eller PCC; polymermodifisert sementmørtel) og om det er en håndmørtel (H) eller sprøytemørtel (T). SV40 og SV30 er referansebetonger, ref. tidligere spesifikasjoner i Håndbok R762.



FIGUR 10 - KLORIDDIFFUSJONSKOEFFISIENTER FOR ALLE MATERIALVARIANTER, BESTEMT ETTER 180 DØGNES EKSPONERING I 3 % NaCl-LØSNING. MIDDELVERDIER FOR TO PRØVESTYKKER.

4.4.3 Implementering

Mekanisk reparasjon der skadeårsaken er kloridinitiert armeringskorrosjon krever en meget god oversikt over skadesituasjonen (klorid- og overdekningskart) for at utbedringen skal ha en hensikt og skal bli vellykket. Dersom det velges en for enkel reparasjonsmetode, kan dette medføre at nedbrytingen akselereres i de områdene som grenser til reparerte områder.

Funnene i rapport 721 «Betongrehabilitering med bruk av offeranoder» ble tatt i bruk ved at det ble valgt å installere offeranoder i forbindelse med rehabilitering av Bogenes fergekai. På kaia kommer det til å bli installert et overvåkingssystem for å følge effekten av offeranoder over en lengre periode. Prosjektet vil gi verdifull informasjon om bruk og effekt av offeranoder.

4.4.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

Basert på resultatene i rapport 721 «Betongrehabilitering med bruk av offeranoder» vurderes en utvidet mekanisk reparasjon ved bruk av offeranoder som meget interessant. Teknologien har eksistert i mer enn 20 år, men har ikke blitt prøvd ut i særlig grad i Norge. Utbedring av Bogenes fergekai med mekanisk reparasjon og offeranoder vil derfor gi veldig nyttig erfaring i årene framover. Det er ønskelig at det etter hvert blir flere prosjekter som prøver ut teknikken slik at vi opparbeider oss et bredere erfaringsgrunnlag.

Ved en seinere revisjon av prosesskode 2 (håndbok R762) bør det vurderes om krav til kloridmotstand for mørtler skal implementeres. Spesielt med tanke på reparasjoner som er forventet å ha en lengre levetid er dette en egenskap det vil være viktig å ha kontroll på.

4.4.5 Publikasjoner

Rapporter:

- Helgestad, S.H., Bjøntegaard, Ø., Rodum, E. (2019): Reparasjonsmørtlers kloridmotstand. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021, Statens vegvesens rapport nr. 144.
- Ahlström, J., Sederholm, B. (2021): Bruk av offeranoder ved betongrehabilitering. Litteratur og erfaringsstudie. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021. Statens vegvesens rapport nr. 721.

Notater:

- Hornbostel, K. (2020): Måledata feltforsøk Fiborg bru – årsrapport 2017–2019. SVV-notat MIME 20/31348–1.
- Hornbostel, K. (2021): Måledata feltforsøk Fiborg bru – årsrapport 2020. SVV-notat MIME 20/31348–5.
- Helgestad, S.H. (2022): Feltundersøkelser av mekanisk reparerte betongkonstruksjoner. SVV-notat MIME 20/31348.
- Helgestad, S.H. (2022): Kloridmotstand av tørrsprøyte-reparasjonsmørtler, SVV-notat MIME 20/31348.

4.5 Vedlikehold av spennarmerte betongkonstruksjoner

4.5.1 Beskrivelse

Byggemetode og materialer som har vært benyttet ved bygging med spennarmering har utviklet seg betydelig i løpet av de siste 50 år. En gjennomgang av Brutus viser at rundt 2 300 bruer på riks- og fylkesvegnett er registrert med spennarmering som byggemateriale, rundt 60 % av disse er førøppspente. Gjennomgangen har avdekket usikkerheter/svakheter i registreringen. Det er ikke mulig å registrere mer enn ett byggemateriale. Samvirkebruer med betydelig mengde spennarmert betong kan for eksempel være registrert med stål som hovedbyggemateriale dersom brudekket i stor grad er bygget med elementer laget av stål. Det foreligger også noe kjent feilregistrering; bruer som skulle vært registrert som «Spennbetong» er registrert som «Betong». Det er derfor grunn til å anta at tallet på bruer med spennarmering er høyere enn gjennomgangen viser. Spennkablene er et vesentlig bærende element i tillegg til slakkarmering. Bruene er i stor grad plassert i hovedvegnettet, og mange står langs kysten hvor de utsettes for værhardt klima og sjøsalt. På grunn av sin plassering i hovedvegnettet påføres flere bruer vegsalt vinterstid.

Etterspente spennkabler er i liten grad blitt inspisert og undersøkt med tanke på tilstand og funksjon, dette i hovedsak pga. mangel på egnede inspeksjonsmetoder. Normalt oppfattes spennkablene som godt beskyttet mot nedbrytning i og med at de ligger i injiserte kabelrør, montert med god avstand fra eksponerte overflater.

Erfaring har vist at korrosjon på etterspente kabler forekommer. Korrosjon på disse kablene er alvorlig av to årsaker:

- Skadene utvikler seg skjult ettersom kablene er utilgjengelige for visuell inspeksjon.
- Korrosjon på spennkabler kan i uheldige tilfeller føre til kabelbrudd med mulige deformasjoner og redusert bæreevne som konsekvens.

Dette delprosjektet retter seg mot metodikk for inspeksjon av spennsystemets tilstand fordi det utgjør en vesentlig del av bruers bæresystem.

Denne aktiviteten i FoU-programmet har undersøkt følgende:

- Ikke-destruktive inspeksjonsmetoder for spennkabler i etterspente bruer.
- Korrosjonsmekanismer på etterspent armering i kabelrør.
- Konstruktive konsekvenser av brudd i spennkabler i etterspente konstruksjoner.
- Restkapasitet i korroderte førroppsente bjelkebruer.

Det er gjennom mange år utviklet ulike metoder for å vurdere korrosjon på slakkarmering i betong. Korrosjon er en komplisert mekanisme som påvirkes av mange faktorer. Å kartlegge korrosjonsomfang og årsaker til denne er i seg selv utfordrende. Førroppsente armering kan i stor grad inspiseres som slakkarmering, men for konstruksjoner med etterspent armering i kabelrør er korrosjonsmålinger og vurderinger av betydningen av dette ytterligere komplisert. Både fordi kablene er plassert innenfor slakkarmering i betongtverrsnittet, og dermed i stor dybde fra overflaten, og fordi de i etterspente konstruksjoner er plassert i kabelrør med injiseringsmasse. Det gjør det utfordrende å tolke resultater fra ikke-destruktive metoder.

På bakgrunn av skader som ble avdekket på spennarmering i Herøysund bru i 2019 ble det igangsatt aktivitet for å forstå korrosjonsmekanismer i etterspent armering i kabelrør, samt å undersøke hva som kan være årsaken(e) til at korrosjon av den etterspente spennarmeringen starter og pågår i kabelkanalene.

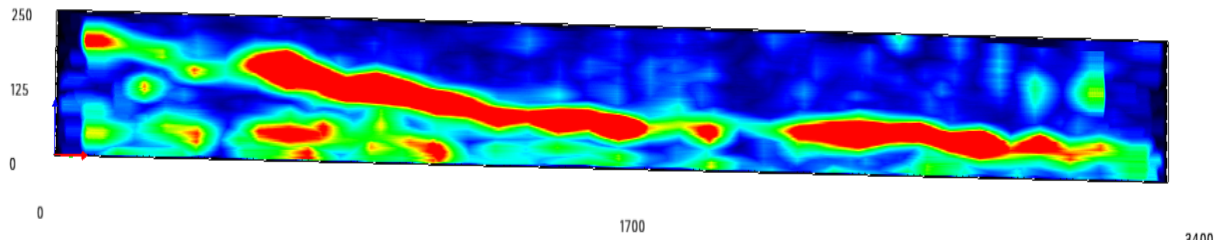
For å kunne undersøke bruer med etterspente kabler målrettet er det av betydning å kunne undersøke konstruksjonene i de snitt hvor kabelbrudd har størst konsekvens. Hva er konsekvensen av brudd i enkelttråder i disse snitt, og hva er konsekvensen av brudd i en eller flere kabler i et system med flere kabler? Forspente betongbruer utgjør en viktig gruppe bruer i Norge og i store deler av verden ellers. Slike bruer trenger oppfølging på en systematisk måte for å sikre levetid og sikkerhet i bruksperioden. I forspente betongbruer er bæresystemet avhengig av innstøpte spennkabler og at de fungerer som forutsatt.

Det er undersøkt om det kan etableres beregningsmodeller for hva konstruktive konsekvenser vil være ved ulike typer brudd i spennsystem, og om det er mulig å etablere metodikk på ett generelt grunnlag for å undersøke hva som er de kritiske snitt for den enkelte brutype.

4.5.2 Resultater/funn

4.5.2.1 Ikke-destruktive inspeksjonsmetoder for spennkabler i etterspente bruer

Det er utarbeidet en rapport (Statens vegvesen rapport nr. 699) som gir oversikt over ikke-destruktive metoder (NDT-metoder) for å kartlegge plassering av etterspent spennarmering i eksisterende konstruksjoner og metoder for å kartlegge hulrom i spennsystem. Hulrom er viktig å kunne kartlegge fordi de representerer en mulig risiko for pågående korrosjon på spennarmering. Rapporten er en utredning av tilgjengelige metoder, muligheter og begrensninger ved bruk av disse, og gir anbefalinger om forutsetninger for bruk av de enkelte metodene.



FIGUR 11 MANGLENDE INJISERING I 6 METERS LENGDE I KABELKANAL, UNDERSØKT MED ULTRALYD. FOTO: DEKRA INDUSTRIAL AB.

Det er videre utarbeidet en rapport (Statens vegvesen rapport nr. 718) med inspeksjonsmanual for undersøkelse av etterspente betongbruer med ikke-destruktive metoder (NDT-metoder). Formålet med inspeksjon er å undersøke tilstanden til etterspente bruer for skader som kan påvirke konstruksjonens bæreevne, bestandighet og sikkerhet. Inspeksjonsmanualen er et verktøy for planlegging, gjennomføring og evaluering av inspeksjon med bruk av ikke-destruktiv prøving. Den beskriver metoder som indirekte kan lokalisere korrosjon på etterspente spennkabler ved å lokalisere luft- og vannfylte hulrom i eksponerte spennkabler for å evaluere mulig korrosjon eller mulige brudd i spennsystemet.



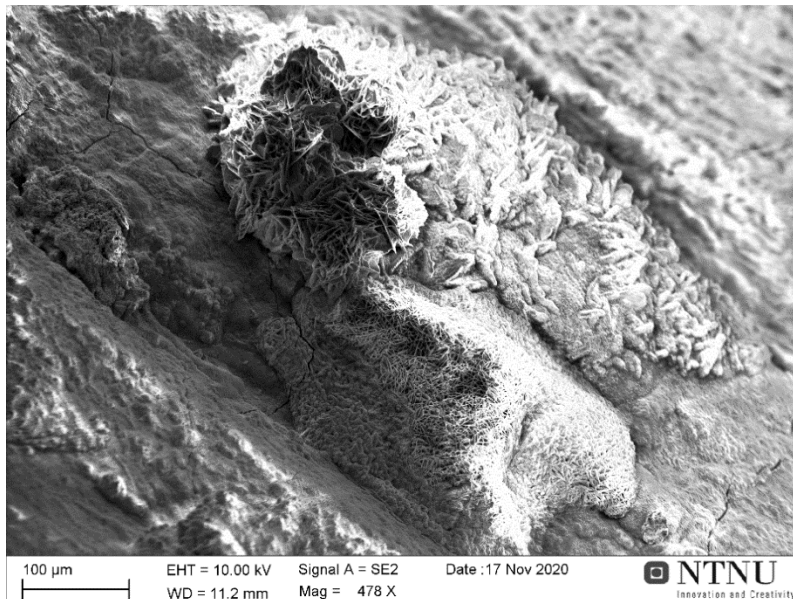
FIGUR 12 LOKALISERING AV HULROM I KABELKANALER MED ULTRALYD. FOTO: DEKRA INDUSTRIAL AB.

4.5.2.2 Korrosjonsmekanismer i etterspent armering i kabelrør

Spennkablene i Herøysund bru har vært utsatt for til dels alvorlige korrosjonsangrep. Forholdene på Herøysund har mange likhetstrekk med det som er dokumentert i litteratur fra andre land. Årsaken til korrosjonsangrepene på spennarmeringen skyldes eksponering til vann/vannholdig atmosfære/våt sementpasta som inneholder Cl^- -ioner og SO_4^{4-} -ioner. Årsaken til at korrosjonshastigheten i enkelte områder er meget høy, slik at spenntråder har gått til brudd, kan være at det oppstår galvaniske makroceller. Makrocelle (galvanisk)

korrosjon er en korrosjonsform som oppstår når anodisk og katodisk reaksjon skjer på ulike steder på en metalloverflate. Alvorlige korrosjonsangrep er funnet i områder med ufullstendig injisering. I disse områdene er det funnet; i) høyt fuktinnhold, ii) lavt totalt klorid (Cl⁻) innhold, iii) høyt fritt sulfat innhold, og iv) høy pH i porevannet.

Det er utarbeidet en rapport (Statens vegvesen rapport nr. 843) som gir oversikt over skadene på Herøysund bru, resultater av undersøkelser i laboratoriet for å forstå omfang og årsak til korrosjon, og en litteraturgjennomgang av annen erfaring på samme problemstilling. Rapporten gir en gjennomgang av ulike korrosjonsmekanismer som kan oppstå i kabalkanaler.



FIGUR 13 SEM-FOTOGRAFI. DETALJ AV KORRODERT SPENNARMERING FRA HERØYSUND BRU. FOTO: Ø. ANTONSEN, NTNU.

4.5.2.3 Konstruktive konsekvenser

Aktiviteten har etablert rammeverk for modellering av skader på spennsystemet i bruer og samlet eksisterende anbefalinger om ikke-lineære FEM-analyser av betongkonstruksjoner. Verktøyet er tilgjengelig for å utføre mer detaljorienterte stedsspesifikke studier i fremtidig arbeid. Arbeidet sorterer de mest kritiske snitt for bæreevne i synkende alvorlighetsgrad:

- 1) Snitt med maksimalt moment
- 2) Områder hvor spennkabler krysser konstruksjonsskjøter
- 3) Forankringsområder

Det foreligger tre rapporter fra aktiviteten; alle utarbeidet i samarbeid med NTNU. Aktiviteten har gitt verdifull informasjon om hvordan bæreevneberegninger bør gjennomføres, hvordan kritiske snitt kan lokaliseres og en «state of the art»-rapport (STAR) som har sett på årsaker til brudd i spennsystemer i bruer på verdensbasis, samt hva som er hovedårsaken bak bruddene.

I STAR-rapporten er det konkludert med at langt de fleste brukollapser har skjedd i ulike typer segmentbruer. Skadene er i ettertid tilskrevet både design- og utførelsesfeil under bygging. Kloridinntrenging i spennsystemet har forårsaket kraftig korrosjon som igjen har ført til brudd

i spennkabler og deretter brukollaps. Korrosjon på spennarmering med brudd på kabler som konsekvens er også funnet på andre brutyper.

4.5.2.4 Restkapasitet i førøppspente bjelkebruer

I løpet av FoU-programmet er det gjennomført en ph.d. ved Oslo Met / NTNU med tittel *Durability and structural performance of pretensioned concrete girders in coastal climate bridges* (Magdalena Osmolska).



FIGUR 14 KORROSJON I SPENNARMERING I PREFABRIKERT BJELKE. FOTO: M. OSMOLSKA, STATENS VEGVESEN.

Basert på registrerte data er typiske korrosjonsskader på prefabrickerte bjelkebruer systematisert og beskrevet. De fleste korrosjonsskader relateres til produksjons- og installasjonsfeil. Samspillet mellom geometri og eksponering (GEI: Geometry Exposure Interaction) er undersøkt for å forklare den spesielle sårbarheten til bjelker i oppleggssoner som er utsatt for kloridinitiert korrosjon. Begrepet er foreslått som alternativ til mikroklima, fordi hvor korrosjon opptrer er sterkt avhengig av både miljøeksponering og geometri. Korrosjon er antatt å opptre i større grad nær støtter, og dette er bekreftet under feltinspeksjon av bruer i kystklima. For å vurdere i hvilken grad observerte lokale skade nær støtter påvirker skjærkapasitet til NIB-bjelker, er ikke-lineære elementanalyser (NL-FEA) av korroderte og ukorroderte NIB-bjelker utført. Varierende korrosjonsplassering (bunnflens, toppflens, steg, bjelke-plate-grensesnitt), korrosjonsgrad og utvalgte modelleringsparametere er studert. Resultatene er brukt for å utvikle en metodikk for pålitelig vurdering av restkapasitet i bjelker med varierende sannsynlighet for at korrosjon pågår.

4.5.3 Implementering

Resultater av aktiviteten i FoU-programmet Bedre Bruvedlikehold vises allerede i dag ved at kunnskap som er etablert i programmet tas aktivt i bruk i bruforvaltningen. Det pågår i dag utprøving av inspeksjonsmetodikk for å vurdere tilstand til spennarmering både i Statens vegvesen og hos flere fylkeskommuner. Spesialinspeksjoner hos SVV og flere fylkeskommuner

er gjennomført basert på metodikk beskrevet i rapport nr 718, Etterspente betongbruer Inspeksjonsmanual. Metodikk for prioritering, konsekvensvurdering og inspeksjon skal forbedres og implementeres i etatens håndbøker, veiledninger og forvaltningsverktøy.

Inspeksjonsmanualen ble levert på engelsk, og vil i oversatt, bearbeidet utgave innlemmes i håndbok V441, Bruinspeksjon. Det er gjennomført en workshop, med deltagere fra fylkeskommuner og SVV, hvor erfaringer fra spesialinspeksjoner på spennarmerte bruer gjennomført i 2021 ble samlet.

4.5.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

Erfaringer fra Herøysund bru og kunnskapen fra FoU-programmet Bedre bruvedlikehold tas videre inn i FoU-programmet VESPA som ledes av divisjon Drift og Vedlikehold, DoV. Formålet med VESPA er å videreutvikle inspeksjonsmetoder og vedlikeholdsstrategier, samt å implementere resultatene i forvaltningsrutiner og –prosesser. VESPA er organisert i fire delprosjekter; Inspeksjon, casestudier, kartlegging av konsekvenser og utbedringsmetodikk, samt opplæring i egen organisasjon.

Fremtidige gode og effektive rutiner for inspeksjon og vedlikehold av forspente betongbruer i Norge videreutvikles i VESPA. Det videreutvikles metoder for inspeksjon av spennsystem i etterspente betongbruer og etableres rutiner for prioritering av inspeksjonsrekkefølge. Det skal også utvikles metoder for å kunne gjøre kapasitets- og bestandighetsvurderinger for forspente betongbruer med skader på spennsystem. I tillegg skal verktøy og metoder for mulige utbedringstiltak kartlegges.

Sammenhengen mellom kloridinnhold, pH og fritt sulfat i porevannet og effekt på nedbryting av passivfilmen og etterfølgende korrosjon på spennarmeringen undersøkes videre, og et notat er under utarbeidelse: *Corrosion testing of tensile wire*. Notatet vil oppsummere funn fra korrosjonsforsøk utført på uskadde spenntråder, hentet fra broen som ble revet på fylkesvei 302 ved Farriseidet i Larvik i 2018. Broen ble bygget i 1974. Funnene gir gode indikasjoner på hva som bidrar til at korrosjon oppstår i kabelkanaler. Arbeidet skal videreføres i eget FoU-prosjekt i regi av Nordland fylkeskommune hvor SVV er samarbeidspartner.

4.5.5 Publikasjoner

Rapporter:

- Karlsson, A., Jilderda, P., Täljsten, B. (2021): Utredning av metoder for inspeksjon av etterspent armering i betongbruer. Statens vegvesens rapport nr. 699.
- Karlsson, A., Jilderda, P., Boström, E. (2021): Etterspente betongbruer – Inspeksjonsmanual. Statens vegvesens rapport nr. 718.
- Johnsen, R. (2022) Herøysund Bru – Korrosjon av spennarmering. Statens vegvesens rapport nr. 843.
- Menga, A., Kanstad, T., Cantero, D. (2022): Corrosion induced failures of post-tensioned bridges. Report NTNU (ISBN: 978-82-7482-200-9).
- Cantero, D., Kanstad, T. (2022): Numerical investigations of damaged post-tension systems and their structural effect on bridges. Report NTNU (ISBN: 978-82-7482-202-3).

- Pinto, G., Cantero, D. (2022): Modelling post-tensioned structures with DIANA FEM software. Report NTNU (ISBN: 978–82–7482–201–6).

Artikler:

- Osmolska M.J., Kanstad T., Hendriks M.A.N, Hornbostel K., Markeset G., (2019): Durability of pretensioned concrete girders in coastal climate bridges: Basis for better maintenance and future design, Structural Concrete. Journal of the *fib*, (2019) 1–16.
- Osmolska, M.; Hornbostel, K.; Kanstad, T., Hendriks M.A.N., Markeset, G. (2020): Inspection and Assessment of Corrosion in Pretensioned Concrete Bridge Girders Exposed to Coastal Climate. *Infrastructures* 2020, 5, 76.
- Osmolska M., Kanstad, T. Hendriks, M.A.N., Markeset, G. (2022) Numerical investigation into the effects of corrosion on the shear performance of pretensioned bridge girders with cast-in-place slabs. Submitted.
- Menga A., Kanstad T., Cantero D., Hornbostel K., Klausen A.B.E., Bathen L., (2022): Corrosion-induced damages and failures of post-tensioned bridges: a literature review, Submitted.

Notater:

- Bathen, L (2021): STAR Post-tensioning practice in Norway 1960–2021, bidrag til *fiB* WG 1.15 «Bulletin; Management of post-tensioned concrete bridges». Statens vegvesen notat MIME 20/31348–8.
- Danner, T. (2020): Undersøkelser av injiseringsmasse fra kabelkanal til Herøysund bru. SINTEF prøvingsrapport, Statens vegvesen notat MIME 20/31348–4.
- Johnsen, R. (2022): Notat under utarbeidelse: *Corrosion testing of tensile wire*.

Masteroppgaver:

- Aasheim, M., Hangaard, L. (2018): Analyse av FFB-bru med korrosjonsskadet spennarmering. Tilstandsvurdering og kapasitetskontroll av Osstrupen bru. Master thesis NTNU.
- Amiri, H., Moen E. (2019): Styrkeberegning og analyse av eksisterende spennarmert buebru. Master thesis NTNU.
- Kvale, H.R., Opheim, T.J. (2019): Modellering av etteroppspente betongbruer med korrosjonsskadet spennarmering. Master thesis NTNU.
- Musach, M.T. (2020): Post-tension concrete beam modelling and analysis in DIANA via Python. Bachelor thesis NTNU.
- Ukvitne, E. , Vangdal, H. (2021): Kapasitetskontroll og analyse av etteroppspent bru med redusert spennarmering. Master thesis NTNU.
- Vestad, H., Vestad, M. (2021): Non-linear behaviour of insufficiently grouted post-tensioned concrete members. Master thesis NTNU.
- Czesak, J.J. (2022): Behavior of Post-Tensioned concrete box girder with multiple damaged tendons, A Case Study of the Sykkylvsbrua in Møre og Romsdal county. Master thesis NTNU.
- Melaku, M. (2022): Nonlinear analysis of post tensioned RC beam in DIANA using python. Master thesis NTNU.

- Myhre, B. H. (2022): Effects of chloride, sulfate and pH on the corrosion of tensile-wires in grouted tendon-ducts in Herøysundet bridge. Master thesis NTNU.

Foredrag:

- Menga, A., Kanstad, T., Cantero, D., Bathen, L., Hornbostel, K. (2021) Review of corrosion-induced failures of post-tensioned bridges. Online, 3rd CACRCS Workshop Capacity Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structure, 30th Nov. – 3rd Dec. 2021.
- Antonsen, R., Bathen, L. (2020) Spennkabler og korrosjon Online, Betongcast nr. 14.
- Bathen, L. (2020) Etterspente bruer i vegnettet. Bruvedlikeholdskonferansen 2020.

4.6 Levetidsvurdering og livssyklus-kostnadsberegninger for vedlikehold av betongkonstruksjoner utsatt for klorider

4.6.1 Beskrivelse

Optimaliserte vedlikeholdsplaner basert på faktisk og forventet framtidig tilstand er kun mulig om man har de riktige verktøyene og modellene som basis for vurderingene. Formål med aktiviteten var å få en oversikt over dagens muligheter innen levetidsvurderinger og livssyklus-kostnadsberegninger.

For å fastslå tilstanden til en betongkonstruksjon som er utsatt for kloridinitiert korrosjon finnes det forskjellige destruktive og ikke-destruktive metoder. Mest vanlig, og antakelig også mest relevant, er bestemmelse av kloridinnhold i overdekningsjiktet til betongen. For å vurdere hvilken prøveprosedyre som er mest hensiktsmessig for ulike inspeksjonsformål, ble det tatt kloridprøver fra et landkar ved Dalselv bru nær Mo i Rana i Nordland. Med «prøveprosedyre» menes her en kombinasjon av prøvetaking og kloridanalyse. Det ble utført både direkte utboring av betongstøv og utboring av kjerner for etterfølgende fresing av betongstøv. Videre ble det utført kloridanalyser både ved RCT-metoden og potensiometrisk titrering. Faktorer som tidsbruk, kostnader, omfang av destruktiv prøvetaking, nøyaktighet av resultater og gjennomførbarhet ble studert.

For mange eldre bruer i utsatte miljøer, vil kloridene etter hvert ha nådd armeringen. For slike bruer er det viktig å anslå hvilke konstruksjonsdeler som korroderer aktivt og hvor korrosjonshastigheten er høyest. Det finnes i dag forskjellige NDT-metoder (ikke-destruktive testmetoder) for å anslå korrosjonstilstand (elektrokjemiske potensialer) og korrosjonshastighet. Kommersielt tilgjengelig utstyr ble utprøvd på referansebjelker fra en feltstasjon SVV etablerte i 1993 i Sandnessjøen, Nordland. Målet med denne undersøkelsen var å sammenligne påliteligheten av måleresultatene for de ulike metodene og å vurdere anvendeligheten av det kommersielle utstyret.

I framtiden kommer «structural health monitoring» (tilstandsovervåkning) antagelig til å ha en sentral rolle i forvaltningen og vedlikeholdsplanleggingen. Formålet er å automatisere tilstandskontrollene ved å installere sensorer som kontinuerlig overvåker ulike tilstandsparametere. For å kunne bruke slike systemer må vi ha et utvalg av pålitelige sensorer som registrerer ulike tilstandsparametere (spesifikk elektrisk motstand, elektrokjemiske potensialer, relativ fuktighet, osv.) som kan gi oss verdifull informasjon med tanke på

levetidsanalyser. Det finnes flere kommersielle sensorer på markedet. I prosjektet ble multiringelektroder utprøvd både i laboratoriet og i felt. Med en multiringelektrode (MRE) kan betongens elektriske motstand måles i forskjellige dybder i betongen. Installert i overdekningssjiktet kan elektroden gi informasjon om f.eks. fuktvekslinger med ytre miljø og/eller karbonatiseringsdybde. Denne typen informasjon er nyttig med tanke på modellering av initieringsfasen (inntrenging av klorider eller karbonatisering i betongoverdekningen).



FIGUR 15 - MULTIRINGELEKTRODE (MRE) FØR INNSPRØYTING BRUKT UNDER FELTFORSØK VED TJELDSUNDBRUA. FOTO: KARLA HORNBOSTEL, STATENS VEGVESEN.

Som hovedaktivitet i prosjektet ble det inngått et samarbeid med ETH–Zurich. ETH har utviklet en levetidsmodell som baserer seg på faktiske tilstandsdata fra aktuelle konstruksjoner. På basis av kjerneuttak og laboratorieprøving for bestemmelse av relevante parametere som kloriddiffusjonskoeffisient og kritisk kloridverdi, blir konstruksjonens levetid modellert. I tillegg ble det tatt i bruk en beregningsmetode som bestemmer en optimal rehabiliteringsstrategi basert på estimerte rehabiliteringskostnader og levetid av forskjellige tiltak. Framgangsmåten som ble foreslått av ETH ble prøvd for tre brukonstruksjoner med fokus på konstruksjonselementet kantdrager.

4.6.2 Resultater/funn

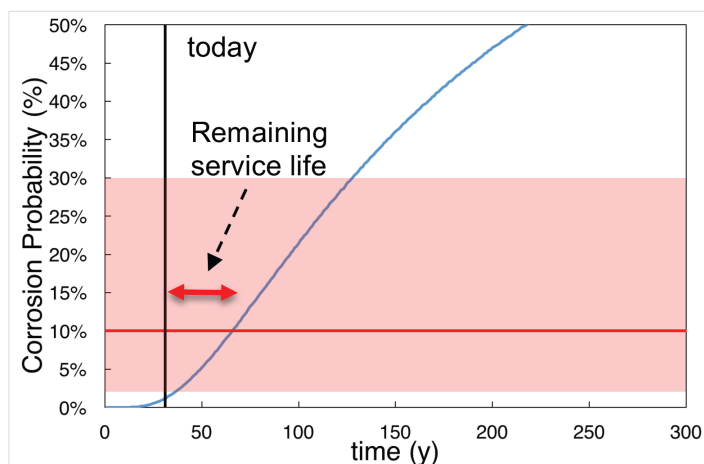
Uttesting av prøveprosedyre for kloridinnhold viste seg å være utfordrende på den aktuelle konstruksjonen (Dalselv bru), hvor det etter hvert ble usikkert om kloridene i betongen skyldtes inntrenging fra sjøvann eller om noen av kloridene var innstøpt ved byggingen av brua. Ikke desto mindre kunne det konkluderes med at utboring av støv og kloridanalyse med den enkle og forholdsvis billige RCT-metoden godt kan brukes ved ordinære tilstandskontroller hvor det skal vurderes om kloridinnholdet ved armering har nådd et kritisk nivå og/eller om kloridene er innblandet ved støping av betongen. For levetidsanalyser og/eller i forskningsøyemed er det imidlertid nødvendig å bruke mer presise data som kun kan

framskaffes ved utboring av kjerner, fresing av støv og en nøyaktig kloridanalysemetode. Resultatene er rapportert i mime notatet 20/31348–2.

Blant metodene som er valgt for å studere korrosjon av armering i betong med kommersielt NDT-utstyr, ble det funnet at elektrokjemiske potensialmålinger i tett avstand (avstand mellom enkle målepunkter maks 5 cm) ga en god indikasjon på den faktiske korrosjonstilstanden. Korrosjonshastighet og betongresistivitetmålinger på de samme bjelkene fulgte trenden til potensialmålingene. Resultatene er publisert i tidsskriftet «Nordic Concrete Research».

I laboratorieforsøket med multiringelektroden (MRE) ble elektroder støpt inn i betong og eksponert for tre forskjellige omgivelser i laboratoriet, henholdsvis sjøvann, ferskvann og luft med 100 % RF, seinere ble prøvestykkene også tørket. Målingene blir sammenlignet med kondisjonerte prøvestykker av samme betong lagret i forskjellige RF (55, 75, 85, 95, 97 og 100 %). Formålet med dette var å se om MRE kan brukes til å estimere RF og RF-gradienter gjennom overdekningssonen. I forsøket lyktes vi bare delvis med å skape stabile eksponeringsbetingelser for referanseprøvene. Spesielt for lave RF (<85 %) var det utfordrende å vedlikeholde stabile betingelser. I framtidige forsøk må det legges spesiell vekt på å utvikle gode prosedyrer for å opprettholde stabile eksponeringsbetingelser. Selv om vi møtte flere utfordringer i forsøket, har det vist seg at multiringelektroder innstøpt i betongoverdekningen kan gi nyttig informasjon om fuktutvekslingen mellom betongen og det ytre miljøet. I forsøket var det mulig å anslå dybden av betongoverdekning som var påvirket av endringer i eksponeringen for de aktuelle prøvene. Resultatene er dokumentert i mime notatet 20/31348–7.

Samarbeid med ETH Zurich viste at det er mulig å kombinere tilstandsundersøkelser, laboratorietesting og matematiske modeller for å finne en optimal vedlikeholdsstrategi tilpasset spesifikke konstruksjoner. For de tre undersøkte kantbjelkene, viste det seg at en tilstandsvurdering basert på klorid- og overdekningsmålinger ikke nødvendigvis er tilstrekkelig for å vurdere det faktiske korrosjonsrisikoen for armeringen. I kombinasjon med laboratoriemålinger av kritisk kloridinnhold for de konkrete konstruksjonsdelene, var det mulig å gjøre en mer detaljert og nøyaktig vurdering av korrosjonsrisikoen enn man vanligvis har mulighet for utfra mer generelle verdier for kritisk kloridinnhold, se eksempel i Figur 16. Resultatene kan brukes i en kostnadsanalyse hvor ulike vedlikeholdstiltak (her overflatebehandling, mekanisk reparasjon og katodisk beskyttelse) med tilhørende kostnads- og levetidsestimat inngår i grunnlaget for å velge den mest økonomiske vedlikeholdsstrategien.



FIGUR 16 - KORROSJONSSANNSYNLIGHET OVER TID FOR EN AV BRUENE UNDERSØKT I PROSJEKTET MED ETH. LYSERØDT OMRÅDE ILLUSTRERER ET UTVALG AV ANVENDTE GRENSER FOR KORROSJONSSANNSYNLIGHET. I NOTATET BLE DET VALGT 10% SOM UTGANGSPUNKT BASERT PÅ FIB-MODEL CODE BULLETIN 34 (2006). REF. SVV RAPPORT 818.

4.6.3 Implementering

Forsøket med MRE har vist at sensorer som overvåker en konstruksjons tilstand med tanke på utvikling av spesifikk elektrisk motstand er tilgjengelig for kommersiell bruk. Målingene kan benyttes for indirekte å studere fuktutveksling med omgivelsene som igjen kan gi viktig informasjon om initieringsfasen (inntrenging av klorider og/eller karbonatisering). Plassering av sensor og datainnsamling må gjennomtenkes nøye før bruk. Kunnskap fra forsøket har blitt videreført i to FoU-prøveprosjekter, hhv. i prosjektets KB-aktivitet, se avsnitt 4.4, og i Norcem's NewsceM-prosjekt, hvor MRE ble montert i bjelker utplassert i SVVs feltstasjon i Austefjorden. Erfaringene implementeres i Norsk forening for betongrehabiliterings sitt arbeid med en publikasjon rundt instrumentert overvåking av betongkonstruksjoner (NFB publikasjon nr. 2).

Resultatene fra prosjektet med ETH rundt levetidskostnadsanalysene ble videreformidlet til bruforvalterne av de tre respektive bruene som nå kan jobbe ut ifra resultatene som ble funnet i prosjektet.

4.6.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

Livssyklusberegninger og modellering av vedlikeholdsstrategier kommer til å være en sentral arbeidsmetode i framtidens bruforvaltning. For å optimalisere levetidsanalyser må vi ha tilgang til pålitelig data. Blant annet trenger vi en database som samler erfaringstall fra kostnader og levetid av forskjellige rehabiliteringstiltak, eksisterende data tilgjengelig i vegvesenet er ikke detaljerte nok og/eller kun basert på erfaringer fra enkelte anlegg. En oppdatert og vedlikeholdt database vil gjøre det mulig å modellere forskjellige rehabiliteringstiltak på en mye mer presis måte enn hva vi kan legge til grunn i dag. Å fremskaffe informasjon om tilstanden til en konstruksjon med tanke på armeringskorrosjon er et møysommelig arbeid som kan innbefatte både prøvetaking, laboratorieanalyser, NDT målinger og sensorovervåking. Resultatene fra prosjektet viser at vi ikke kan generalisere om vi ønsker en nøyaktig levetidsmodell for en gitt konstruksjon, men tvert imot at vi må innhente konstruksjons-spesifikke tilstandsdata.

4.6.5 Publikasjoner

Rapporter:

- Boschmann Käthler, C., Angst, U. (2022): Levetidsanalyse av kantdragere for tre bruer FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021. Statens vegvesen rapport nr. 818.

Tidsskriftsartikler:

- Hornbostel, K., Danner, T., Geiker, M. R. (2020): Non-destructive Test Methods for Corrosion Detection in Reinforced Concrete Structures. Nordic Concrete Research 2020, (62), 41–61.

Notater:

- Hornbostel, K., Rodum, E. (2020): Prøvetaking og analysemetoder for bestemmelse av kloridinnhold i betong (feltundersøkelser Dalselv bru 18–2035). Statens vegvesen notat MIME 20/31348–2.
- Hornbostel, K., Bjøntegaard, Ø. (2020): Multiringelektroder for oppfølging av fuktvariasjoner i betong. Statens vegvesen notat MIME 20/31348–7.

5 Prosjekt 3: Alkalireaksjoner i betong

5.1 Innledning

Alkalireaksjoner er en kjemisk-fysisk prosess som innebærer at alkalier i betongens sementpasta reagerer med visse kvartsholdige bergarter i tilslaget. Reaksjonsproduktet er en alkaligel som sveller under vannabsorpsjon. Dette fører til at betongen ekspanderer. Volumøkningen kan gi problemer med fugeklemming og forskyvning av lagre, og den setter opp strekkspenninger i betongen. Når strekkspenningene overskrider betongens strekkfasthet, oppstår rissdannelser. Ekspansjon av armert betong vil gi tilleggskrefter som virker på konstruksjonen sammen med egenvekt og nyttelast. Tilleggskreftene kan i gitte situasjoner bli betydelige, og det er behov for modeller for å kunne beregne disse kreftene. I framskredent stadium vil skadene påvirke betongens strekkfasthet og E-modul, etter hvert også trykkfasthet, samt åpne for følgeskader som frostnedbrytning og armeringskorrosjon. Eksempler på typiske skader er vist i Figur 17.



FIGUR 17 TYPISKE SKADER SOM FØLGE AV ALKALIREAKSJONER I BETONG: FORSKYVNINGER, BRUDD, KRAKELERINGSRISS OG RISS PARALLELT MED LASTRETNING

Alkalireaksjoner er en skadetype som for alvor ble oppdaget i Norge på slutten av 1980-tallet. Siden den gang har det vært utført mye forskning på faktorer som påvirker skademekanismen, og det har blitt utviklet metoder for dokumentasjon av både tilslag og bindemidler for å unngå skader i nye konstruksjoner. Norsk regelverk for å forhindre alkalireaksjoner kom først i 1996, og betongkonstruksjoner bygd før den tid kan ha potensiale for å utvikle skader over tid. Norske bergarter og norsk klima (lave temperaturer) tilsier at det vil ta lang tid før de første symptomer på skadeutvikling viser seg, enten i form av deformasjoner eller opprissing.

Antall konstruksjoner med skader på grunn av alkalireaksjoner har vært stadig økende, og det er nå dokumentert skader i bruer bygd så sent som på tidlig 1980-tall. Med denne utviklingen øker behovet for å håndtere eksisterende betongbruer med denne typen skader. Statens vegvesen har hatt FoU-aktiviteter knyttet til inspeksjon, konstruksjonsberegninger og tiltak siden 2010. Flere aktiviteter som ble startet i FoU-programmet Varige konstruksjoner (2012–2015) ble videreført i Bedre bruvedlikehold.

Prosjektets hovedmålsetning har vært å:

- Utvikle retningslinjer for konstruksjonsanalyse og kapasitetskontroll.
- Utvikle metodikk for å kvantifisere graden av ekspansjon og degradering av mekaniske egenskaper.

- Utrede om det finnes preventive vedlikeholdstiltak som kan redusere reaksjons-/ ekspansjonshastigheten.
- Angi prinsipielle korrektive tiltak for å redusere effekten av betongens ekspansjon på konstruksjonens funksjon eller bæreevne.

I tråd med prosjektets målsetning har arbeidet vært organisert i fire aktiviteter:

1. Konstruktive konsekvenser
2. Felt- og laboratorieundersøkelser
3. Preventive tiltak
4. Korrektive tiltak

Det har vært gjennomført felt- og laboratorieundersøkelser av flere konkrete bruobjekter og enkelte av disse igjen har vært gjenstand for konstruksjonsberegninger.

Hver aktivitet er nærmere beskrevet i kapittel 5.2, 5.3, 5.4 og 5.5. En samlet oversikt over prosjektets publikasjoner er gitt i kapittel 5.6.

Følgende personer fra Statens vegvesen har vært sentrale i gjennomføringen av prosjektet: Håvard Johansen, Bård M. Pedersen og Eva Rodum.

Prosjektet har hatt FoU-samarbeid med følgende eksterne partnere:

- NTNU Institutt for Konstruksjonsteknikk (2018–2022): ARKON – Konstruktive konsekvenser av ASR.
- Laval Université i Quebec, Canada (2017–2020): Preventive tiltak og karakterisering av skadegrad for bruer med alkalireaksjoner.
- SINTEF Community (2017–2019): FoU-prosjektet 236661 ASR – Alkali-silica reaction in concrete – reliable concept for performance testing.
- ph.d.-samarbeidsavtale med Simen Sørgaard Kongshaug, OsloMet (tidligere HiOA)/NTNU, (2017–2020): Konstruktive konsekvenser av alkalireaksjoner.
- SINTEF Digital (2020–2022): Ikke-linearitet i betong – metoder for å detektere riss i betong.



FIGUR 18 REPRESENTANTER FRA PROSJEKLEDELSEN OG EKSTERNE SAMARBEIDSPARTNERE. BAK FRA VENSTRE: BÅRD M. PEDERSEN, SVV, JAN LINDGÅRD, SINTEF, EVA RODUM, SVV. FORAN FRA VENSTRE: PH.D.-STUDENTENE PETTER HEMSTAD, NTNU, KATHRINE MÜRER STEMLAND, NTNU OG MATHIEU CHAMPAGNE, ULAVAL

5.2 Konstruktive konsekvenser

5.2.1 Beskrivelse

En hovedmålsetning i prosjektet har vært å utvikle beregningsmetodikk og beregningsmodeller for bruer med alkalireaksjoner. Som ledd i dette arbeidet ble det tidlig i prosjektet inngått et samarbeid med NTNU Institutt for konstruksjonsteknikk. Samarbeidsprosjektet ble kalt ARKON. Sentrale personer fra NTNU har vært professor Terje Kanstad, seniorforsker Hans Stemland og ph.d.-stipendiat Kathrine Mürer Stemland. SINTEF har bistått med utstøping og eksponering av betongprøver, samt prøving av mekaniske egenskaper.

I ARKON har det vært gjennomført mange aktiviteter, herunder følgende:

- Et stort omfang av laboratorieundersøkelser, i hovedsak utført som del av ph.d.-oppgaven til Kathrine Mürer Stemland, se kapittel 5.3.
- 14 Masteroppgaver.
- Veiledning av ph.d.-stipendiat Simen Sørgaard Kongshaug, i samarbeid med Oslo Met.
- Undersøkelser og beregninger av Elgeseter bru.

Elgeseter bru ble diagnostisert med alkalireaksjoner i betongen i 1990. De første tegn på ekspansjon av betongen var relatert til overbygningen, henholdsvis reduksjon av fugeåpning og forskyvning av søyletopper i tre akser på bysida. I 2003 ble fugen saget opp og søyletopper i akse 7–9 rettet opp. I forbindelse med rehabiliteringsarbeidet i 2014–15 (forsterkning av søyler og bjelker, utskifting av slitelag/fuktmembran og etablering av nye gang-/sykkelfelt) ble brua innlemmet som objekt i FoU-programmet Varige konstruksjoner (2012–2015). Det ble gjennomført omfattende felt- og laboratorieundersøkelser, og brua ble brukt som utgangspunkt for utarbeidelsen av en veiledning i konstruktiv analyse for slakkarmerte bruoverbygninger med alkalireaksjoner (Statens vegvesen rapport nr. 601, Stemland m.fl., 2016).

Arbeidet med Elgeseter bru ble videreført innenfor Bedre bruvedlikehold/ARKON. Det har vært gjennomført to masteroppgaver hvor lastsituasjonen for overbygningen av Elgeseter bru har vært beregnet iht. ovennevnte veiledning (Nordhaug og Stemland, 2018, og Myklebust, 2018). Resultater fra disse masteroppgavene avdekket et behov for å gjennomføre en ny spesialinspeksjon og nye kontrollberegninger av brua. Trøndelag fylkeskommune inngikk en kontrakt med Aas-Jakobsen AS om dette arbeidet, og det ble etablert et samarbeid med ARKON, både om bistand i beregningsarbeidet og framskaffelse av flere tilstandsdata for betongen i overbygningen. Basert på Aas-Jakobsens beregningsrapport er det i Bedre bruvedlikehold gjort en videre vurdering av kreftene fra alkalireaksjonene og betydningen av disse for kapasiteten til brua. Som del av Kathrine M. Stemlands ph.d.-arbeid er det utarbeidet en relevant artikkel (Stemland m.fl., 2022).

I en masteroppgave analyserte Furdal og Vevang (2021) Elgeseter bru ved hjelp av skallteori. Selv om armerings-plasseringen i brua ikke er tilpasset denne typen beregninger ga oppgaven verdifull innsikt i bruas virkemåte og kapasitetsutnyttelse, spesielt for tverretningen.

Brua ble også brukt som objekt i case-studier utført av ph.d.-kandidat Simen S. Kongshaug som anvendte avansert materialmodellering og ikkelineær FE-analyse. I en studie (Kongshaug

m.fl., 2021) benyttes en 3-spenns modell av en av brubjelkene. Her var det et hovedpoeng å belyse betydningen av å modellere ulike materialeegenskaper, som f.eks. opprissing, krypning, ikkelineær materialoppførsel for betong og armering og ekspansjonens spenningsavhengighet. Videre ble effekten av ekspansjonens variasjon over bjelkehøyden undersøkt. I et annet arbeid (Kongshaug m.fl., 2022) var målsettingen å undersøke om den frie alkali-ekspansjonen kan identifiseres fra målte deformasjoner og om beregnede spenninger og tilhørende rissutvikling kan valideres mot observasjoner. For å demonstrere metoden ble Elgeseter bru modellert med skallelementer og den aktuelle materialmodellen generalisert for også å kunne brukes i slike elementer.

Flere andre bruer med alkalireaksjoner har vært inkludert i masteroppgaver hvor det er utført beregninger av lastsituasjon og kapasitet. Spesielt kan nevnes Tromsøbrua (1016 m lang frittframbyggbru, byggeår 1960), hvor den spennarmerte fritt frambyggdelen (Sandnes og Skaug, 2017), viaduktene (Knutsdatter, 2018) og brua som helhet (Aandal, Skarstein og Vangen, 2022) er modellert og kontrollert for utnyttelsesgrad og kapasitet. Videre har det vært utført undersøkelser av Tjeldsundbrua (1001 m lang hengebru, byggeår 1967), hvor den vestre viadukten (Grimsmo og Welle, 2017) og brutårn og dekke i hengespenn (Bratten og Iversen, 2020) er analysert og vurdert med tanke på kapasitet. I tillegg har to mindre platebruer på E6 i Trøndelag, Fiborg (213 m, byggeår 1975) og Vold over jernbane (61 m, byggeår 1966), vært vurdert av masterstudenter (Aas og Åkre, 2019, Iversen og Selvik, 2019).

5.2.2 Resultater/funn

I arbeidet med flere bruer med alkalireaksjoner er det vist hvordan typiske skader på grunn av alkalireaksjoner kan tas hensyn til i beregninger. I tillegg er det fokusert på å vise hvordan ekspansjon på grunn av alkalireaksjoner kan ivaretas ved bæreevneklassifisering av bruer ved hjelp av elastiske rammeanalyser. Som regel vil slike tradisjonelle og relativt enkle analyser være tilstrekkelig for å bestemme dimensjonerende lastvirkninger. I noen tilfeller gir ikke rammeanalyser gode nok svar, og mer komplekse FEM-analyser med ikkelineære materialmodeller kan være påkrevet. I sitt ph.d.-studium har Simen Sørgaard Kongshaug utviklet materialmodeller som ivaretar både alkalireaksjoner og de øvrige viktige egenskapene til betongen. Materialmodellene er basert på litteraturstudium og egne forsøk (Kongshaug m.fl. 2020), inkluderer betongens generelle materialeegenskaper, opprissing, krypning, og ikkelineær oppførsel i trykk, i tillegg til alkali-ekspansjonens spenningsavhengighet. Materialmodellene er implementert i FE-programmet Abaqus og er anvendt i så vel 1D som 2D og 3D i forskjellige demonstrasjonseksempler. Erfaringene med metodikken er gjennomgående positive, og slike analyser kan være et nyttig verktøy i framtidig evaluering av konstruksjoner. Et viktig resultat er at ekspansjonens spenningsavhengighet har stor betydning for resultatene, blant annet ved at effekten av ulik ekspansjon over tverrsnittene modereres. I forslag til videre arbeid anbefales det ytterligere eksperimentelt arbeid slik at denne effekten kvantifiseres bedre og modelleringen forbedres.

Arbeidet knyttet til Elgeseter bru har vært avgjørende for å forstå sammenhengen mellom eksponeringsbetingelser og skadeomfang, relasjonen mellom ekspansjon og ulike skade-

parametere, samt å verifisere beregningsresultater. Brua er lastberegnet for klasse Bk 10/60 av Aas–Jakobsen AS, i beregningene ble det også tatt hensyn til antatte AR-ekspansjoner. AR-kreftene ble bestemt for forskjellige stivhetsantakelser. Det var likevel nødvendig med en nærmere vurdering av disse kreftene i kapasitetskontrollen av brua. Kapasiteten til brua er vurdert til å være tilstrekkelig under forutsetning av at det tillates noe flytning og omfordeling av AR-momentene (Stemland, K.M. og Stemland, H., 2022a). Dette støttes også av (Kongshaug m.fl., 2022) hvor det vises at inkludering av AR-ekspansjonens spenningsavhengighet modererer aksialkreftene som AR-ekspansjonens variasjon over tverrsnittet forårsaker.

Beregningene som er gjennomført for de ulike bruene i de ulike masteroppgavene viser ofte en utnyttelsesgrad på over 1,0 pga. tilleggskreftene AR-ekspansjonen gir. Som regel kan imidlertid dette håndteres ved en nærmere vurdering og reduksjon av tvangsmomentene fra AR-ekspansjonen og temperatur og momentomlagring i bruddgrensetilstanden. Sammendragene fra alle masteroppgavene er sammenstilt i et eget NTNU-notat (Kanstad, 2022).

5.2.3 Implementering

Basert på resultater og erfaringer fra masteroppgavene og arbeidet med flere bruer, blant annet Elgeseter bru, er det utarbeidet en veiledning om hvordan alkalireaksjoner i betong kan ivaretas i forbindelse med bæreevneklassifisering av bruer, SVV-rapport 855 *Bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner*. Veiledningen har hovedfokus på elastiske rammeanalyser og kapasitetskontroll av bruoverbygninger.

Mange studenter har gjennom sine ph.d.- og masteroppgaver fått verdifull kompetanse som de tar med seg til sine arbeidsgivere. De vil dermed kunne bli ressurspersoner i framtidig samarbeid om bruer med alkalireaksjoner.

Resultatene og erfaringene fra alkalireaksjons-aktivitetene i Bedre Bruvedlikehold er inkludert i undervisningen ved NTNU i faget TKT 4222 Betongkonstruksjoner 3, i tillegg til i prosjekt- og masteroppgaver. I tillegg har prosjektmedarbeiderne bidratt med foredrag i EVU-kursene KT 6003: Prosjektering av bruer og KT 6004: Betongteknologi for bruer – drift og vedlikehold. Prosjektet har derfor bidratt med mye ny kunnskap ut til industrien.

5.2.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

Forskningsrådet har bevilget midler til det 5-årig FoU-prosjektet MESLA (Management and Extension of Service Life of infrastructures affected by Alkali-silica reaction, 2021–2025). MESLA er en direkte videreføring av Bedre bruvedlikehold, prosjekt alkalireaksjoner, og har som målsetning å øke kunnskapen innenfor konstruktive konsekvenser av alkalireaksjoner. Prosjektet ledes av NTNU, i samarbeid med SINTEF. Statens vegvesen er partner sammen med Bane NOR, Trøndelag fylkeskommune, SINTEF Narvik og Norconsult. I tillegg deltar tre utenlandske universiteter (Laval, Ottawa og Gustave Eiffel).

Prosjektet vil få tilgang til utvalgte bruer med pågående alkalireaksjoner, både for feltundersøkelser, instrumentert overvåking og prøveuttak (WP1). Utborede prøver vil bli undersøkt ved ulike laboratorieanalyser (WP2). Det skal utvikles avanserte materialmodeller

og metoder for last- og kapasitetsberegninger (FEM-analyser; WP3) og det vil bli utført beregninger etter ulike metoder på utvalgte bruer ("demonstrators"). Det forventes at resultatene vil bidra til utvikling av retningslinjer for forvaltning av betongbruer med alkalireaksjoner.

5.3 Felt- og laboratorieundersøkelser

5.3.1 Beskrivelse

I denne aktiviteten er det gjennomført undersøkelser av reelle brukonstruksjoner (felt/lab) og iverksatt omfattende laboratorieprogram for undersøkelser av laboratoriestøpte prøver. Laboratorieprogrammene er nært knyttet til arbeidet med å utvikle modeller og prosedyrer for beregning av ekspansjonens virkning på brukonstruksjoners lastsituasjon, beskrevet i kapittel 5.2.

Målsetningen med aktiviteten har vært todelt:

- Videreutvikle prøvingsmetodikk for å dokumentere skadeomfang og kvantifisere effekt av alkalireaksjoner på indre opprissing, E-modul og trykkfasthet.
- Forstå effekten av ekstern og intern fastholding på betongens ekspansjon og effekten av intern fastholding på skjærbruddoppførselen.

De metoder som er benyttet i arbeidet er i hovedsak:

- Bestemmelse av overflaterissindeks i felt (Surface Crack Index = SCI)
- Bestemmelse av ekspansjon ved bruk av ekstensometer på overflatemonterte knaster
- SDT = Stiffness Damage Test
- DRI = Damage Rating Index - metoden
- IA = Image Analysis

Systematisk måling av overflateriss er en feltmetode, måling av ekspansjon mellom knaster på overflaten er egnet både i felt og laboratorium, mens SDT, DRI og IA er laboratoriemetoder som utføres på utborede betongkjerner eller tildannede planslip.

SDT-metoden har vært mye brukt i Canada og er i de senere år videreutviklet ved universitetet i Ottawa (professor Leandro Sanchez). Metoden ble tatt i bruk i Norge for første gang i Bedre bruvedlikehold – på kjerner fra Fiborg bru, videre også på kjerner fra Elgeseter bru og i stort omfang på laboratorieeksponert betong (laboratorieprogram 1, 2 og 3 – se etterfølgende beskrivelse). SDT er en mekanisk test hvor et prøvestykke belastes syklisk opp til ca. 40 % av trykkfastheten, i fem sykler, før prøven belastes til brudd. Basert på spennings-/tøyningskurven beregnes ulike skadeindekser (bl.a. SDI = Stiffness Damage Index) og E-moduler. For laboratorieeksponerte prøver er det rapportert en god (men tilslagsavhengig) sammenheng mellom ekspansjon og SDI.

DRI-metoden er også en metode som er mye brukt i Canada. Gjennom samarbeid med professor Benoit Fournier ved Laval Université (ULaval) har det blitt utført DRI-analyser av både felt- og laboratorieeksponerte prøver fra norske bruer, som del av Mathieu Champagne sin master- og ph.d.-oppgave. Metoden innebærer tildanning av (ikke-impregnerte) planslip (som dekker kjernenes diameter x lengde), påtegning av rutenett á 1 x 1 cm² på overflaten og

manuell telling av ulike skadeparametere (riss, alkaligel, reaksjonsrender) innenfor hver rute. Analysene gjennomføres ved bruk av mikroskop. De ulike skadeparametere vektet med ulike faktorer og det beregnes en DRI for hele eller deler av planslipet. Fra Canada er det rapportert om god sammenheng mellom skadeindeksene SDI og DRI.

Gjennom et mastergradsprosjekt ved ULVAL (Roy–Tremblay, M., 2022) har det pågått utvikling av programmer for automatisert fotoanalyse av fluorescensimpregnerte planslip (Image Analysis = IA). Formålet har vært å kvantifisere intern opprissing, enten som %-vis andel av arealet eller ved total risslengde. Planslip tildannet fra flere norske bruer har vært inkludert i utviklingen av metoden. Tidligere erfaringer, fra laboratorieeksponert betong (Jan Lindgårds ph.d.), har vist god korrelasjon mellom resultater fra IA og ekspansjon.

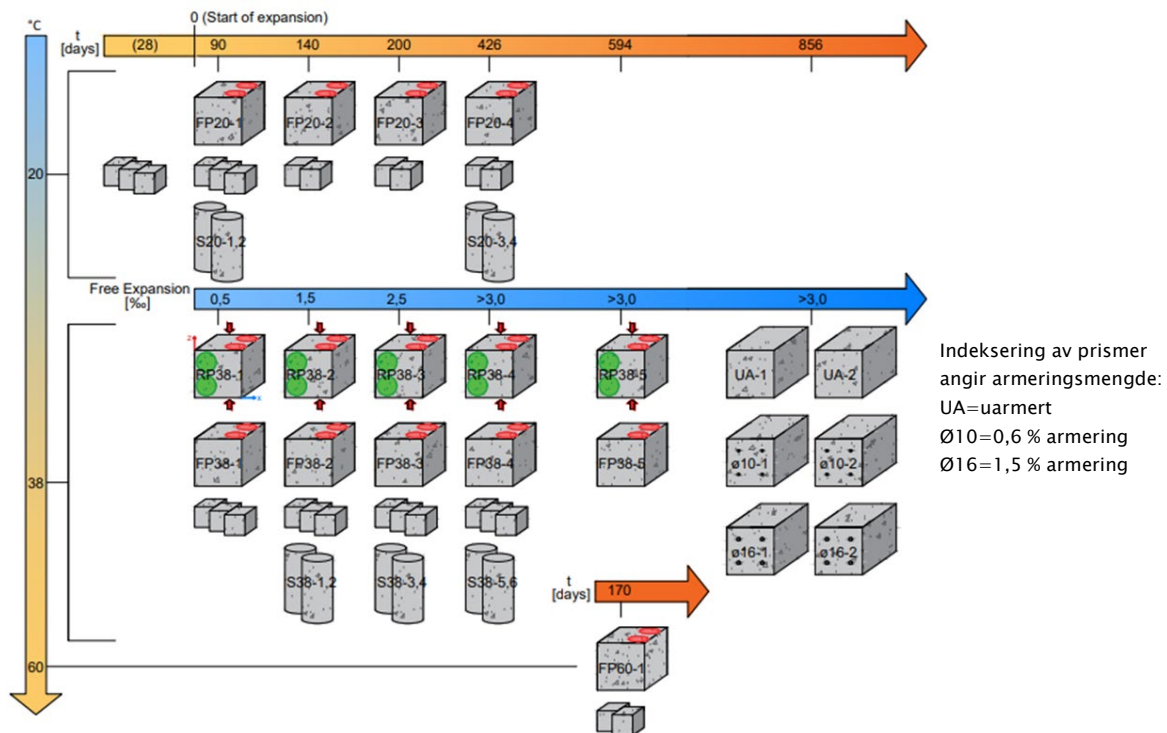
Det er gjennomført tre store laboratorieprogram i løpet av prosjektperioden, hhv. i 2018, 2019 og 2020. Det har vært støpt ulike betongprøver (uarmerte 230mm kuber og Ø150/300mm sylindre, og armerte 230x230x300mm³ prizmer og 200x300x1250/3000mm³ bjelker), med kjent alkalireaktiv betongresept, som har vært eksponert for normale/akselererte betingelser (20/60/38°C og 100 % RF), fri eller eksternt/internt fastholdt mot ekspansjon, til ulike ekspansjonsnivå (0,5/1,0/1,5/2,5/>3,0 % fri ekspansjon). I løpet av eksponeringsperioden er betongprøvene løpende undersøkt for bestemmelse av ekspansjonsforløp og ulike skadeparametere iht. SDT-metoden, samt skjærbruddoppførsel for de armerte bjelkene. Laboratoriearbeidet (støping, eksponering og prøving) er gjennomført i samarbeid mellom NTNU og SINTEF. Den overordnede målsetningen har vært å finne en relasjon mellom ekspansjon og endringer i mekaniske egenskaper, som utgangspunkt for å kunne bestemme ekspansjonsnivået i virkelige konstruksjoner gjennom mekanisk prøving. Det er derfor også sett på SDT-resultater fra prøver fra Elgeseter bru, hvor den totale ekspansjonen antas kjent (Stemland, K.M. m.fl., 2022).

Laboratorieprogram 1 (2018) ble gjennomført i samarbeid mellom masterstudent Oddvar Oseland (Oseland, 2018) og ph.d.-kandidat Simen Sørgaard Kongshaug (Kongshaug m.fl. 2020). Totalt 10 stk. 230 mm kuber ble eksponert ved 60°C/100 % RF, fem av disse ble belastet med en én-aksiell trykkspenning på 3 MPa. Utboring av kjerner for prøving iht. SDT-metoden ble utført etter 5, 10, 15 og 21 ukers eksponering, som ga hhv. ca. 1,5, 3, 3,5 og 4,5 % fri ekspansjon.

Laboratorieprogram 2 (2019) og 3 (2020) ble gjennomført som del av ph.d.-kandidat Kathrine Mürer Stemlands prosjekt. Det ble benyttet samme betongresept som i 2018, men akselerert temperatur ble redusert fra 60 til 38°C for å sikre en mer realistisk reaksjons-/ekspansjonsutvikling og for å gjennomføre prøving ved lavere ekspansjonsnivå.

I laboratorieprogram 2 ble totalt 10 stk. 230 mm kuber (halvparten belastet med en én-aksiell trykkspenning på 3 MPa), 6 stk. Ø150/300 mm sylindre og 6 stk. prizmer (230x230x300 mm³, med hhv. 0 %, 0,6 % og 1,5 % armering) eksponert ved 38°C/100 % RF til ekspansjonsnivå 0,5, 1,5, 2,5 og >3 % (fri ekspansjon). Fra kubene og prismene ble det boret ut kjerner for prøving iht. SDT-metoden, mens sylindrene ble SDT-testet direkte. To studenter gjennomførte sine masteroppgaver tilknyttet laboratorieprogram 2 (Kirkhaug, 2019 og Løseth, 2019). En oversikt

over totalt antall prøver, inklusive referanseprøver lagret ved 20°C / 100 % RF og 100 mm terninger for trykkfasthetsprøving er vist i Figur 19.

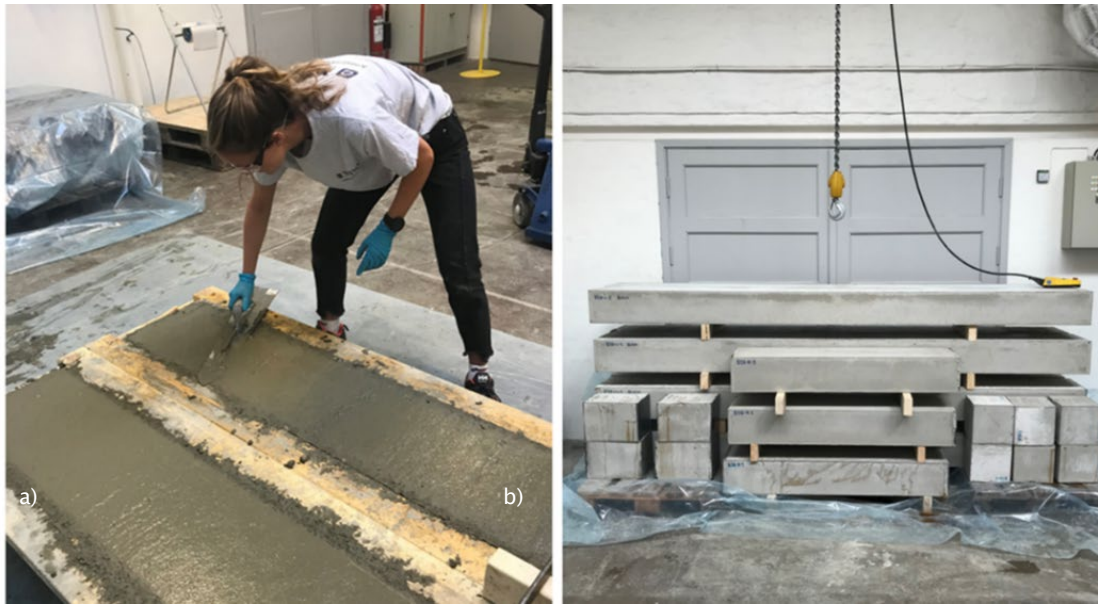


FIGUR 19 OVERSIKT OVER LABORATORIEPROGRAM 2 (2019). FIGUREN ANGIR EKSPONERINGSBETINGELSER/-TID, EKSPANSJONSnivå FOR DE ULIKE PRØVER, SAMT HVILKE KUBER SOM BLE EKSPONERT FRI (FP) OG FASTHOLDT (RP). 1 STK. 230 MM KUBE BLE REPETERT EKSPONERT VED 60 °C FOR Å FÅ DIREKTE LINK TIL LABORATORIEPROGRAM 1. FIGUR: KATHRINE M. STEMLAND, NTNU.

I laboratorieprogram 3 inngår totalt:

- 6 stk. armerte bjelker 200x300x3000 mm³, herav 3 stk. med 2Ø10 mm stenger i overkant og 3Ø20 mm stenger i underkant (usymmetrisk armert) og 3 stk. med 3Ø20 mm armering i over- og underkant (symmetrisk armert).
- 3 stk. bjelker 200x300x1250 mm³ med 3Ø20 mm stenger i over- og underkant,
- 4 stk. 230 mm kuber (hvorav én kube ble belastet med en én-aksiell trykkspenning på 3 MPa).
- 4 stk. prismer (230x230x300 mm³, med hhv. 0 %, 1,5 % og 2,4 % armering).

Prøvene ble eksponert ved 38°C/100 % RF til ulike ekspansjonsnivå (0,5, 1,0 og 1,5 ‰ for bjelkene). En symmetrisk og en usymmetrisk armert bjelke ble i tillegg lagret ved 20°C/100 % RF som referanser. Kubene og prismene ble testet i henhold til SDT-metoden for å følge opp prøvestykkene fra laboratorierie 2. De lange bjelkene (200x300x3000 mm³) ble benyttet til skjærforsøk, mens de korte bjelkene (200x300x1250 mm³) ble benyttet til utboring av prøvesylindere til SDT-testing og utsaging av skiver for dokumentasjon av intern opprissing/skadegrad (DRI- og planslipanalyser). Kjerner og skiver ble tildannet både på tvers av og parallelt med armeringen. Foto fra utstøping av prøvene i laboratorieprogram 3 er vist i Figur 20.



FIGUR 20 A) UTSTØPING AV BJELKER OG B) UTSTØPTE PRØVER I LABORATORIEPROGRAM 3. FOTO: NTNU.

Et mindre samarbeid har vært gjennomført med SINTEF Digital, hvor formålet har vært å undersøke mulighetene for å måle den ikke-lineære responsen til betongprøver utsatt for ulik spenning som en indikator for mikrooppripping. Målingene kan deles inn i tre kategorier: (i) Static measurements, (ii) resonant frequency measurements (NRUS), and (iii) pumppulse measurements (DAET). SINTEF Digital har fått tilgang til og gjennomført målinger på betongprismer med kjent ekspansjon (etter akselerert prøving ved betongprismemetoden), på betongsylindre under SDT-prøving og armerte bjelker under momentbelastning (knyttet til Kathrine M. Stemlands ph.d., laboratorieprogram 2 og 3, nevnt over).

5.3.2 Resultater/funn

Erfaringene fra felt- og laboratorieundersøkelser av flere konstruksjoner med alkalireaksjoner i Norge og Canada er oppsummert som del av Mathieu Champagnes ph.d.-prosjekt (Champagne m.fl., 2022). Metodene som er inkludert i undersøkelsene er overflaterissindeks (Surface Crack Index = SCI), Damage Rating Index (DRI), automatisert fotoanalyse av planslip (Image Analysis = IA), kapillær vannmetningsgrad (Degree of Capillary Saturation = DCS) og relativ fuktighet (RF). Erfaringene har vist at SCI målt vinkelrett på hovedrissretningen viser god korrelasjon med intern skadegrad bestemt ved DRI. Metoden er egnet til å avdekke variasjoner i skadegrad mellom ulike konstruksjonsdeler og til å følge skadeutviklingen over tid. DRI har vist seg egnet til å påvise interne skader/oppripping og kvantifisere skadegrad i de undersøkte konstruksjonselementer. Metoden vil også avdekke variasjoner i skade f.eks. i ulike dybder fra betongoverflaten. Det ble påvist god korrelasjon mellom IA og DRI, der planslip var tildannet fra motstående flater i samme sagesnitt. Den største utfordringen har vært å få tildannet representative planslip av tilstrekkelig høy kvalitet. Det er funnet en god sammenheng mellom værpåkjønning/ fuktinnhold og skadegrad (SCI/DRI). DCS er en praktisk metode som er godt egnet til å bestemme fuktinnhold og fuktgradienter, og DCS er funnet å korrelere bra med RF.

Resultatene fra laboratorieprogram 1 (Kongshaug m.fl., 2020) viser at en ekstern fastholding på 3 MPa reduserer ekspansjonen i lastretningen, uten at det observeres en overføring av ekspansjon til den frie retningen. Undersøkelser av riss i planslip viser at ekspansjonen i en gitt retning korrelerer med omfanget av mikroriss vinkelrett på denne retningen. SDT-resultatene viser videre at både skadeindikatorene (SDI, PDI og NLI) og reduksjonen i E-modul er spenningsavhengig ved at disse parameterne er mindre påvirket i lastretningen enn i tverretningen.

Resultatene fra laboratorieprogram 2 (Stemland, K.M., 2022a) viser en tydelig reduksjon av ekspansjon i prøvenes belastede/armerte retning. Ekspansjonen til prøven belastet med 3 MPa er redusert i lastretningen med ca. 50 % ved en fri ekspansjon på ca. 2 ‰ og ca. 60 % ved en fri ekspansjon på ca. 3 ‰. Ekspansjonen i de frie retningene på den belastede prøven er lik som for de frie prøvene. Trykkspenningen i de armerte prismene bygger seg gradvis opp med ekspansjonen og når flytning i armeringen ved en ekspansjon på 2,7 ‰, da er spenningen i betongen for prismene med 0,6 % og 1,5 % armering henholdsvis 3 og 9 MPa. Reduksjonen i ekspansjonen i armeringsretningen er ca. 35 og 40 % for disse prøvene ved en fri ekspansjon på ca. 2 ‰.

Resultatene fra SDT viser en tilnærmet lineær relasjon både for forholdet mellom SDI og ekspansjon og endring i E-modul og ekspansjon opp til en ekspansjon på ca. 2,0 ‰ for de frie prøvene. Ved ekspansjoner som er større enn 2,0 ‰ flater utviklingen av både reduksjonen av E-modul og SDI-verdiene ut. Prøvene fra de belastede og armerte retningene får noe lavere SDI-verdi sammenlignet med de frie prøvene med samme ekspansjon, spesielt ved høyere ekspansjoner.

Resultatene fra laboratorieprogram 3 (Stemland, K.M., 2022b) viser godt samsvar med resultatene fra laboratorieprogram 2 for de repetitive prøvene. Prismene med høyere armeringsmengde (2,4 %) fikk en reduksjon i ekspansjon på ca. 45 % i armeringsretningen ved en fri ekspansjon på 2 ‰.

Testingen av bjelkenes skjærkapasitet, se Figur 21, viser en tydelig økning i skråriss-last med økt ekspansjon på bjelkene. Økningen er omtrent 25 og 35 % i forhold til referansebjelkene ved det høyeste ekspansjonsnivået (1,5 ‰), for henholdsvis de usymmetrisk- og symmetrisk armerte bjelkene. Dette skyldes forspenningseffekten fra armeringen, som dermed øker kapasiteten.



FIGUR 21 BJELKE MED AR-EKSPANSJON BELASTET TIL SKJÆRBRUDD I LABORATORIET. FOTO: KATHRINE MÜRER STEMLAND, NTNU.

SINTEF Digital (Diez og Johansen, 2022) har konkludert med at måling av den ikke-lineære endringen i hastighet og amplitude under statisk trykkbelastning på en betongsylinder fungerer bra og kan utføres med høy nøyaktighet. Det er potensial for å videreutvikle metoden slik at den kan utføres samtidig med en standard SDT-test i laboratoriet. De to andre metodene har svakheter/utfordringer som vil kreve grundigere laboratorieundersøkelser og modifikasjoner for å se om de kan være egnet for feltmålinger.

5.3.3 Implementering

Prosjektet har gitt innspill til arbeidet med revisjon av Håndbok V441 (2019): Bruinspeksjon, og alkalireaksjoner i betong er nå mye grundigere behandlet. Det er innført koblinger mellom flere skadetyper (bevegelse, deformasjon, brudd, riss/sprekk) og alkalireaksjoner, det er introdusert en feltmetode for systematisk måling av rissvidder og det er spesifisert at en kontroll av bæreevne må inkludere mulige tilleggslaster fra alkalireaksjoner.

Det er under utarbeidelse en ny veiledning i felt- og laboratorieundersøkelser av bruer med alkalireaksjoner (Rodum og Pedersen, 2022). Veiledningen beskriver typiske skadetyper som opptrer på brukonstruksjoner med alkalireaksjoner, beskriver ulike felt- og laboratoriemetoder som er aktuelle for dokumentasjon av skadeårsak og skadeomfang og gir prosedyrer for gjennomføring av felt- og laboratorieundersøkelser. Veiledningen er et supplement til Håndbok V441: Bruinspeksjon.

Resultater fra prosjektet er løpende implementert i kursmateriell for NTNU sitt EVU-kurs KT6004: Betongteknologi for bruer – drift og vedlikehold. Det ble holdt ett kurs i 2018 og det vil bli holdt et nytt kurs høsten 2022.

SDT-metoden har blitt en etablert metode ved inspeksjon av konstruksjoner med alkalireaksjoner og SINTEF har utviklet prosedyrer for gjennomføring og behandling av resultater.

5.3.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

Feltundersøkelser, overvåkning og laboratorieanalyser av utborede prøver fra bruer med alkalireaksjoner vil fortsette innenfor FoU-prosjektet MESLA (2021–2025), se prosjektbeskrivelsen i kapittel 5.2.4.

Et videre samarbeid med SINTEF Digital om videreutvikling av metoder for detektering/kvantifisering av opprissing av betong kan være aktuelt, forutsatt at prosjektet har egen finansiering f.eks. fra Forskningsrådet.

5.4 Preventive tiltak

5.4.1 Beskrivelse

Det er tre betingelser som må være oppfylt for at alkalireaksjoner skal kunne utvikles i en betongkonstruksjon: Alkaliinnholdet må være tilstrekkelig høyt, innholdet av alkalireaktive bergarter må være over en viss grense og betongen må ha tilgang på tilstrekkelige mengder fukt. Tilslagets bergartssammensetning og alkaliinnholdet er gitt og kan ikke endres. Den eneste faktoren som kan styres etter at betongen er støpt er fuktinnholdet. En allment akseptert nedre grense for utvikling av alkalireaksjoner er 80 % RF, og erfaringer har vist at skadeutviklingen øker med økende fuktinnhold i betongen over denne grenseverdien.

Det er ikke ansett mulig å stoppe en pågående skadeutvikling i en utendørs konstruksjon, men et aktuelt tiltak for å forsinke videre skadeforløp kan være å redusere fuktinnholdet i betongen gjennom for eksempel overflatebehandling eller skjerming mot vannpåkjønning.

I FoU-prosjektet Varige konstruksjoner ble det igangsatt et laboratorie-/feltprogram for å undersøke 1) effekten av overflatebehandling på fuktinnholdet i en utendørs eksponert betong og 2) relasjonen mellom fuktinnhold og ekspansjon. Aktiviteten ble videreført i Bedre bruvedlikehold og gjennomføres i samarbeid med SINTEF. I 2014 ble det støpt to typer prøveelementer med alkalireaktiv betong, ett sett mindre (Ø150 mm x 300 mm) og ett sett større (Ø400 mm x 800 mm) sylindre. Sylindrene ble preeksonert i akselerert klima (ca. 95 % RF og 38 °C) til en ekspansjon på ca. 1 %. Sylindrene ble deretter overflatebehandlet, hhv. med to hydrofoberende impregneringer (silaner, i krem- og gelform) og ett sementbasert elastisk belegg, før de ble utplassert på SINTEFs feltstasjon i Trondheim i juni 2015. De overflatebehandlede sylindrene ble plassert utendørs, se Figur 22. Enkelte ubehandlede referanser ble plassert utendørs og enkelte under tak, beskyttet mot regn. Noen små ubehandlede sylindre ble i tillegg lagt i bøtter med 93 % RF. Sylindrene følges opp med årlige målinger av ekspansjon, vektendring, fuktinnhold m.m. som rapporteres i et SINTEF-notat (Skjølvold m.fl., 2022). I tillegg ble det i 2019 tatt ut én liten sylinder pr. variant for laboratorieundersøkelser av fuktinnhold og intern opprissing (DRI).



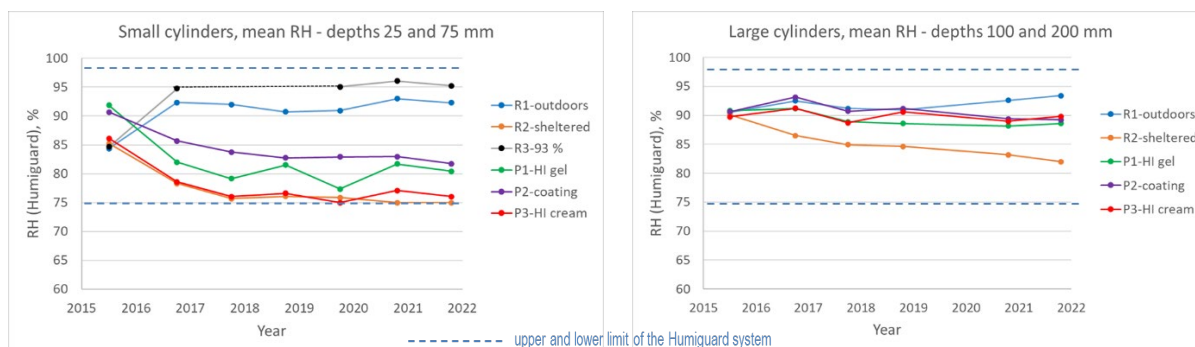
FIGUR 22 SMÅ OG STORE SYLINDRE, MED OG UTEN OVERFLATEBEHANDLING UTPLASSERT PÅ SINTEFS FELTSTASJON. FOTO: EVA RODUM, STATENS VEGVESEN.

I tillegg til feltforsøkene på Voll er det som del av samarbeidet med Laval-universitet i Canada gjennomført et litteraturstudium om effekten av overflatebehandling på alkalireaktiv betong.

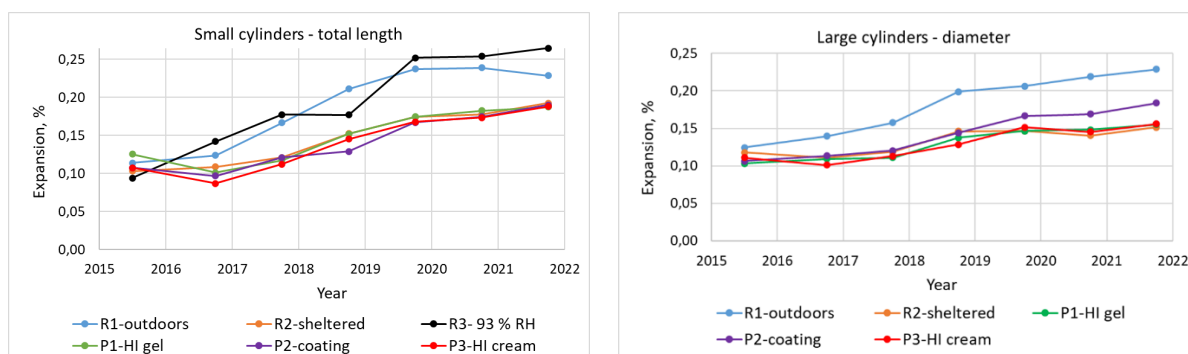
5.4.2 Resultater/funn

Forsøkene på Voll er så langt evaluert etter 4 og 6 års eksponering i felt (Rodum m.fl., 2022). Resultatene viser at overflatebehandlingen har redusert både fuktinnhold (Figur 23) og ekspansjon (Figur 24) i forhold til ubehandlede, utendørs referanser. Det må tas i betraktning at de to silan-produktene har en svært god inntrenging i betongen, hhv. 21 mm for gelen og 11 mm for kremen, hvilket gir gode forutsetninger for å oppnå god vannavvisende effekt over tid. Så store inntrengingsdybder er imidlertid svært vanskelig å oppnå i virkelige konstruksjoner utført under feltforhold. Selv om ekspansjonshastigheten er redusert så fortsetter ekspansjonen, selv for de ubehandlede sylindrene som står beskyttet mot regn.

Statusrapporten fra Canada (Champagne, M. and Fournier, B., 2022) oppsummerer erfaringene med hydrofobere impregneringer (silan og siloksan) og går i dybden på virkemåte og hvilke parametere som påvirker effekten.



FIGUR 23 FUKTUTVIKLING I SMÅ SYLINDRE (MIDDELVERDIER AV DYBDE 25 OG 75 MM) OG STORE SYLINDRE (MIDDELVERDIER AV DYBDE 100 OG 200 MM), FRA UTPLASSERING I FELT I JUNI 2015. (RODUM M.FL., 2022).



FIGUR 24 EKSPANSJONSUTVIKLING FOR SMÅ SYLINDRE (ENDRING I TOTAL LENGDE) OG STORE SYLINDRE (ENDRING I DIAMETER), FRA UTPLASSERING I FELT I JUNI 2015. (RODUM M.FL. 2022)

5.4.3 Implementering

Foreløpige resultater fra Voll-prosjektet anses som lovende og viser at overflatebehandling potensielt kan bidra til å bremse skadeutviklingen i betong med alkalireaksjoner. Det er for tidlig å konkludere entydig, og feltforsøkene må følges opp over flere år.

5.4.4 Videre anbefalinger – videre arbeid

Feltforsøkene på Voll vil bli fulgt opp videre i et samarbeidsprosjekt med SINTEF.

Nye feltforsøk i form av fullskala pilotprosjekter på eksisterende bruer bør vurderes igangsatt. Det bør velges bruer med alkalireaksjoner i relativt tidlig stadium (begrenset rissutvikling). Et pilotprosjekt må gjennomføres under kontrollerte forhold, omfatte både overflatebehandlede og ubehandlede referanser og inkludere et eget måleprogram for ekspansjons- og RF-utvikling.

5.5 Korrektive tiltak

5.5.1 Beskrivelse

Med korrektive tiltak menes vedlikeholdstiltak som har til hensikt å redusere effekten av betongens ekspansjon på konstruksjonens funksjon eller bæreevne. Tiltak innenfor denne kategorien kan være:

- Forsterkning – ytre fastholding som reduserer betongens volumutvidelse eller holder betongverrsnittet sammen.
- Saging av sliss/kapping for å utløse eller hindre indre spenninger som følge av betongens ekspansjon.
- Injisering – tetting av riss eller sammenliming av fragmenter med tanke på å gjenopprette konstruksjonsdelens funksjonelle eller konstruktive egenskaper.

Denne typen tiltak vil ikke stoppe ekspansjonen, og spesielt for tiltakene slissing og injisering vil den videre ekspansjonen av betongen være en utfordring for varigheten av tiltaket.

Injisering benyttes en del i damkonstruksjoner for å tette mot vanngjennomgang, men det må forventes at det relativt raskt vil oppstå nye riss i eller ved injeksjonsmassen. Ved omfattende injisering under trykk kan det videre være en risiko for at det initieres nye riss i

konstruksjonen, både som følge av selve injeksjonstrykket og som følge av endringer i alkaligelens ekspansjonsmuligheter. For brukonstruksjoner er injisering i hovedsak aktuelt i kombinasjon med forsterkning, eventuelt også i kombinasjon med overflatebehandling.

Saging av slisser benyttes i mange tilfeller som et gjentakende tiltak i damkonstruksjoner. Ved relativt smale slisser eller store spenninger er erfaringen gjerne at slissene lukker seg relativt raskt etter saging. For brukonstruksjoner vil denne typen tiltak først og fremst være aktuell i form av saging av bruplata for åpning av fuger. Kapping og oppretting av søyler som er faststøpt med en ekspanderende overbygning kan også være aktuelt, f.eks. slik det ble gjort på Elgeseter bru.

Ekstern forsterkning av konstruksjonsdeler kan utføres ved påliming av karbonfiberbånd, kappestøp, påliming av stålplater eller oppspenning med kabler/stag. Forsterkning kan bidra til å fordele rissene, fra få store til mange små, eller faktisk også redusere ekspansjonen. For å motvirke ekspansjonen i betydelig grad kan det være nødvendig å foreta en aktiv oppspenning.

Prosjektet har ikke initiert egne aktiviteter innenfor korrektive tiltak, men har vært involvert i, observert eller evaluert arbeid utført på hhv. Tjeldsundbrua, Fiborg bru og Elgeseter bru.

Enkelte søyler og bjelker på Elgeseter bru ble i 2014–15 forsterket med karbonfiberbånd. I ARKON har forsterkningsarbeidene vært diskutert, både når det gjelder beregningsmetodikk og hvilke bidrag den aktuelle forsterkningen på Elgeseter bru gir til kapasiteten. Beregningsmodeller for forsterkning av betongkonstruksjoner med forskjellige typer pålimte bånd eller vev er beskrevet i *fib*-bulletinene 14, 35 og 90, samt i Norsk betongforenings publikasjon nr. 36. Disse dokumentene er gjennomgått og diskutert i et NTNU-notat (Stemland, K.M. og Stemland, H., 2022b). Videre er det utført en masteroppgave som har sett på lastvirkningene av alkalireaksjoner og kapasiteten av de forsterkede bjelkedelene av Elgeseter bru (Christensen og Sande, 2020). Karbonforsterkningens bidrag til bjelkenes kapasitet er også vurdert og inkludert i den overordnede vurderingen av brua (Stemland, K.M. og Stemland, H., 2022a).

5.5.2 Resultater/funn

Tjeldsundbrua er ei 1001 m lang hengebru, bygd i 1967, som knytter Hinnøya (Harstad) til fastlandet. Brua har påvist alkalireaksjoner i betongen og dette har ført til oppsprekking av søyler og lukking av fugene i viaduktene. I 2018 ble det gjennomført omfattende reparasjoner knyttet til fugene. Bruplata ved akse 9 ble kappet ca 50 cm og hele overbygningen mellom akse 22 og akse 9, med en total lengde på 238 m og ei vekt på 2000 tonn, ble flyttet 20 cm bakover ved hjelp av hydrauliske jekker slik at det igjen ble god åpning i fugene. Før kappingen ble det etablert ny tverrbærer i akse 9 og gjennomført en forsterkning av underliggende skivepilar. Rehabiliteringsarbeidene ble prosjektert av Haug og Blom-Bakke AS med innspill fra Bedre bruvedlikehold v/ Hans Stemland. Ansvarlig for rehabiliteringen var Roy Antonsen i Statens vegvesen. Det ble utarbeidet en film hvor kapping og jekking av overbygningen ble vist, se Figur 25.



FIGUR 25 STILLBILDE FRA VIDEOEN OM REHABILITERINGSARBEIDENE PÅ TJELDSUNDBRUA I 2018. FOTO: TOMAS ROLLAND/GØRAN SOFIENLUND, STATENS VEGVESEN ([HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=VOFmBRhtKCI](https://www.youtube.com/watch?v=voFmBRhtKCI))

Fiborg bru er ei 213 m lang platebru bygd i 1975. Brua ligger på E6 i Trøndelag. Alkalireaksjoner i betongen medførte ekspansjon av bruplata slik at fugene ble lukket og søyleoppleggene forskjøvet. Brua ble rehabilitert i 2017, med saging av fuger og støping av nye opplegg for søylene, se Figur 26. Bedre bruvedlikehold inspiserte arbeidene og fikk tatt ut betongkjerner for laboratorieundersøkelser. Prosjektering og utførelse av rehabiliterings-tiltakene ble utført i regi av Statens vegvesen Region midt.



FIGUR 26. FIBORG BRU UNDER REHABILITERING. A) EKSPANSJON AV OVERBYGNINGEN HAR FØRT TIL FORSKYVNING AV SØYLEOPPLEGG. B) OPPJEKKING AV PLATE FOR FORSTERKNING AV SØYLEOPPLEGG OG MONTERING AV NY NEOPRENPLATE C) STØPING AV NYE, UTVIDEDE OPPLEGG FOR SØYLENE PÅ UNDERSIDE PLATE. FOTO: EVA RODUM, STATENS VEGVESEN

Det finnes flere typer kompositter som benyttes til forsterkning av betongkonstruksjoner. I bærende konstruksjoner er det likevel bånd og vev av karbonfiber som har fått størst anvendelse, siden E-modulen er noenlunde den samme som for vanlig armering. Det er produsentene av disse komposittene som står bak det meste av utviklingsarbeidet, og det er også de som har gjort mye av de nødvendige beregningene så langt. Dette har ført til at slike forsterkninger har vært ganske høyt utnyttet i en periode og at sikkerheten nødvendigvis ikke er godt nok ivaretatt. Utnyttelsen av slike bånd og vev er derfor blitt strammet inn ganske betydelig i *fib*-bulletin 90, som også er grunnlaget for ny Eurocode 2. Norsk betongforenings publikasjon NB 36 *Forsterkning av betongkonstruksjoner* er fra 2006, og selve beregningsdelen i denne publikasjonen burde vært revidert. Det teoretiske grunnlaget i NB36 Vedlegg C er imidlertid fortsatt like aktuelt og bidrar til å øke forståelsen av *fib*-bulletin 90.

5.6 Publikasjoner

Rapporter:

- Johansen, H. (2022): Bæreevneklassifisering av bruer med alkalireaksjoner. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021. Statens vegvesen rapport nr. 855.
- Rodum, E. og Pedersen B.M. (2022): Inspeksjon av bruer med alkalireaksjoner. Felt- og laboratoriemetoder. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021. Statens vegvesen rapport nr. 852.
- Stemland, K.M. (2022a): Effekter av AR-ekspansjon på frie, fastholdte og armerte prøver. Alkalireaksjoner i betong. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021. Statens vegvesen rapport nr. 853.
- Stemland, K.M. (2022b): Skjærforsøk av AR-ekspanderte bjelker. Alkalireaksjoner i betong. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021 Statens vegvesen rapport nr. 854.
- Champagne, M. and Benoit, B. (2022): Use of hydrophobic impregnation to counteract ASR in concrete structure – a review report. Draft report, Department of Geology and Geological Engineering, Laval University, Québec, Canada.

Tidsskrift:

- Pedersen, B.M. (2018): Bestandig betong med alkalireaktivt tilslag. mur+betong, utgave 2/2018, pp 47–49.
- Kongshaug, S. S.; Oseland, O.W.; Kanstad, T.; Hendriks, M.; Rodum, E.; Markeset, G. (2020) Experimental investigation of ASR-affected concrete – The influence of uniaxial loading on the evolution of mechanical properties, expansion and damage indices. Construction and Building Materials. vol. 245.
- Kongshaug, S.S., Larsen, R.M., Hendriks, M.A.N., Kanstad, T., Markeset, G. (2021): Load effects in reinforced concrete beam bridges affected by alkali-silica reaction – constitutive modelling including expansion, cracking, creep and crushing. Engineering Structures, volume 245.
- Pedersen, B.M., Rodum, E., Lindgård, J. and Haugen M. (2021): Prevention of ASR by use of low alkali OPC and silica fume. Field and lab studies from the Maridal culvert and the Storo bridge in Oslo, incl. assessment of residual expansion, Portuguese journal of structural engineering, Serie III, number 15.
- Champagne M, Rodum E, Pedersen B, Lindgård J, Roy-Tremblay, M., Fournier B, Bissonnette B, Duchesne, C. (2022): Field and laboratory investigations on condition assessment of ASR-affected structures. Under final revision prior to submission in peer reviewed journal.
- Kongshaug, S.S., Hendriks, M.A.N., Kanstad, T., Markeset, G. (2022): Toward identifying the ASR-induced stresses from displacement measurements and crack observations— Demonstration on a beam bridge in Norway. Engineering Structures, volume 263.
- Stemland, K.M., Johansen, H., Kanstad, T. (2022): Load effects of ASR induced expansion in reinforced concrete and their consequences for structural assessment. Submitted for publication in Nordic Concrete Research.

Internasjonale konferanser:

- Kongshaug, S.S., Kanstad, T., Hendriks, M., Kioumarsis, M. og Markeset, G. (2017): Challenges related to structural modelling and assessment of concrete structures affected

by alkali–silica reactions. Proceedings of XXIII Nordic Concrete Research Symposium, Danmark.

- Stemland, K.M., Rodum, E., Kanstad, T. (2022): Stiffness damage testing of laboratory cast alkali–silica reactive concrete and cores drilled from a real concrete structure. Proceedings of 16th ICAAR Conference, Lisboa, Portugal.
- Hammer, T.A., Lindgård, J., Pedersen, B.M. (2022): A study on ASR in high strength lightweight aggregate concrete. Proceedings of 16th ICAAR Conference, Lisboa, Portugal.
- Rodum, E., Pedersen, B.M., Skjølvold, O., Champagne, M. and Lindgård, J. (2022): Effect of different field exposure conditions and surface treatments on internal relative humidity (RH) and expansion. Proceedings of 16th ICAAR Conference, Lisboa, Portugal.
- Pedersen, B.M., Rodum, E., Lindgård, J. and Haugen M. (2022): Prevention of ASR by use of low alkali OPC and silica fume. Field and lab studies from the Maridal culvert and the Storo bridge in Oslo, incl. assessment of residual expansion. Proceedings of 16th ICAAR Conference, Lisboa, Portugal.
- Stemland, K.M., Kanstad, T., Rodum, E. (2022): ASR expansion – effect of restraint and relation to degradation. Proceedings of XXIV Nordic Concrete Research Symposium, Sweden.
- Lindgård, J., Kanstad, T., Pedersen, B.M., Rodum, E. (2022): Management and Extension of Service Life of infrastructures affected by Alkali-silica reaction (MESLA). Proceedings of XXIV Nordic Concrete Research Symposium, Sweden.

Nasjonale konferanser:

- Rodum, E. (2019): Felt- og laboratorieundersøkelser for bruer med alkalireaksjoner. Bedre bruvedlikehold – rett tiltak til rett tid. Foredrag ved Teknologidagene, Statens vegvesen, Trondheim, 2019–10–22.
- Stemland, K.M. (2019): Konstruktiv analyse og kapasitetskontroll av bruer med alkalireaksjoner. Bedre bruvedlikehold – rett tiltak til rett tid. Foredrag ved Teknologidagene, Statens vegvesen, Trondheim, 2019–10–22.
- Kanstad, T. (2019): Konstruktive konsekvenser av alkalireaksjoner. ARKON prosjektet – hva har vi lært så langt? Norsk betongdag, Trondheim, 2019–10–23.
- Rodum, E. (2021): Felt- og laboratorieundersøkelser for bruer med alkalireaksjoner. Foredrag ved Betongrehabiliteringsdagene, Oslo, 30. nov.–1. des. 2021.
- Stemland, H. (2021): Hvordan påvirker alkalireaksjoner bruens lastsituasjon og kapasitet? Foredrag ved Betongrehabiliteringsdagene, Oslo, 30. nov.–1. des. 2021.

EVU-kurs:

- Pedersen, B.M. (2018, 2022): Alkalireaksjoner – Mekanismer og styrende parametre. Leksjon 2.5, EVU-kurs KT 6004: Betongteknologi for bruer – drift og vedlikehold, NTNU.
- Pedersen, B.M. (2018, 2022): Alkalireaksjoner – Skadetyper. Leksjon 2.6, EVU-kurs KT 6004: Betongteknologi for bruer – drift og vedlikehold, NTNU.
- Rodum, E. (2018, 2022): Alkalireaksjoner – Tilstandsregistrering. Leksjon 2.7, EVU-kurs KT 6004: Betongteknologi for bruer – drift og vedlikehold, NTNU.

- Rodum, E. (2018, 2022): Alkalireaksjoner – Vedlikehold og reparasjon. Del 1: Preventive tiltak. Leksjon 2.11, EVU-kurs KT 6004: Betongteknologi for bruer – drift og vedlikehold, NTNU.
- Stemland, H. (2018, 2022): Alkalireaksjoner – Vedlikehold og reparasjon. Del 2: Korrektive tiltak (knyttet til konstruktive forhold). Leksjon 2.12, EVU-kurs KT 6004: Betongteknologi for bruer – drift og vedlikehold, NTNU.
- Kanstad, T. (2021): Konstruktive konsekvenser av alkalireaksjoner. EVU-kurs KT 6003: Prosjektering av bruer, NTNU.

Masteroppgaver:

- Grimsmo, T. og Welle, K. (2017): Beregning og oppfølging av eksisterende bruer med betydelig skadeomfang. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Sandnes, E. og Skaug, L.M.B. (2017): Beregning av fritt frambyggbru med alkalireaksjoner. Tilstandskontroll og kapasitetskontroll av Tromsøbrua. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Knutsdatter, S.M. (2018): Beregning og oppfølging av eksisterende bruer med betydelig skadeomfang. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Myklebust, E. (2018): Assessment of an existing bridge suffering from Alkali-Silica reaction. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Nordhaug, K.O. og Stemland, K.M. (2018): Beregning av bru med alkalireaksjoner. Tilstandsvurdering og kapasitetskontroll av Elgeseter bru. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Oseland, O. (2018): The effect of accelerated ASR on the mechanical properties and degree of damage of concrete over time – with and without uniaxial compressive stress. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Iversen, H.M.R. og Selvik, T.A. (2019): Beregning og oppfølging av alkaliskadet bru. Analyse og kapasitetskontroll. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Aas, T. og Åkre, E.B. (2019): Styrkeberegning av platebru med alkalireaksjoner. Tilstandsvurdering og kapasitetskontroll av Vold bru. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Kirkhaug, J.R. (2019): Alkali-Silica Reactions – Influence on Expansion, Damage Parameters and Mechanical Properties with and without Uniaxial Stress Restraint. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Løseth, T.P. (2019): ASR affected concrete – Experimental investigation of mechanical properties, expansion and damage indices. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Bratten, T.H. og Iversen, R.F. (2020): Beregninger på eksisterende hengebru med betydelig skadeomfang. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Christensen, E.S. og Sande, S.F. (2020): Evaluation of Externally Reinforced Bridge Exposed to Alkali-Silica Reactions Condition. Assessment of Elgeseter Bridge. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.

- Champagne M. (2020): Applying the Damage Rating Index for the spatial damage assessment in concrete specimens affected by alkali–silica reaction (ASR). MSc Thesis, Université Laval, Canada.
- Furdal, H.O. og Vevang, J.R. (2021): Assessment of Elgeseter Bridge Suffering from Alkali–Silica Reactions. Analysis and capacity verification of the bridge deck with finite element shell models. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Aandal, T., Skarstein, R.E. og Vangen, H.A. (2022): Kapasitetskontroll og evaluering av Tromsøbrua. Norges eldste fritt frambygg-bru. Masteroppgave, Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.
- Roy–Tremblay, M. (2022): Utilisation of Image Analysis as a tool to quantify damage in concrete affected by ASR. MSc Thesis under preliminary revision. Department of Geology and Geological Engineering, Laval University, Québec, Canada.

Annet:

- Diez, A. og Johansen, T.F. (2022): Non–destructive testing of concrete using measurements of non–linearity. SINTEF–notat, 2022–05–02. MIME 20/31348–9.
- Skjølvold, O., Anton, Y. og Lindgård, J. (2022): SVV–sylindre – prøving i felt i perioden 2015–2021. SINTEF–notat. MIME 20/31348.
- Stemland, K.M. og Stemland, H. (2022a): Kapasitetskontroll av Elgeseter bru med nærmere vurdering av AR–lastene. NTNU–notat. MIME 20/31348.
- Stemland, K.M. og Stemland, H. (2022b): Vurdering av nye retningslinjer for karbon–fiberforsterkning av betongkonstruksjoner. NTNU–notat. MIME 20/31348.
- Kanstad, T. (2022): Masteroppgaver relatert til «Konstruktive konsekvenser av ASR» i perioden 2015–2022. NTNU–notat, 2022–08–26. MIME 20/31348–10.

6 Prosjekt 4: Rehabilitering av stålbruer

6.1 Innledning

Prosjektet er rettet mot vedlikehold av korrosjonsbeskyttende belegg på stålbruer. Arbeidet har i hovedsak dreid seg om de ulike aspektene rundt eldre belegg med bly eller kromat, dette gjelder tekniske og økonomiske aspekter samt helse- og miljømessige forhold. Dette beskrives nærmere i kapittel 6.2. De andre delene av prosjektet beskrives kortfattet i kapittel 6.3.

Sentrale personer fra Statens vegvesen i dette arbeidet har vært Håkon Matre Prosjektet, og det har vært FoU-samarbeid med SINTEF Industri v/ seniorforsker Ole Øystein Knudsen.

6.2 Vedlikehold av blymønje og kromatholdige belegg

6.2.1 Beskrivelse

Arbeidet har vært utført i tett samarbeid med Ole Øystein Knudsen hos SINTEF Industri, som har skrevet rapporten «Vedlikehold av bly- og kromatholdige belegg». Innholdet i de etterfølgende underkapitlene bygger på denne rapporten.

Målsetning med prosjektet har vært å velge en strategi for å unngå helse- og miljøskader og lage prosedyrer for hvordan denne typen belegg skal behandles. Delmål har vært å:

- Beskrive relevante myndighetskrav i forbindelse med vedlikehold av belegg med tungmetaller.
- Estimere omfanget av belegg med tungmetaller på norske bruer.
- Samle erfaringer med vedlikehold av belegg med tungmetaller fra andre land og bransjer.

Stålbruer bygd fram til midten av 1960-tallet i Norge ble normalt belagt med blymønje for korrosjonsbeskyttelse. I 1965 ble malingsspesifikasjonen endret og termisk sprøyta sink eller aluminium med maling (dupleksbelegg) ble anbefalt for bruer i kyststrøk. Overgangen skjedde trolig gradvis, slik at det i arbeidet med rapporten er antatt at blymønje hovedsakelig ble brukt på bruer åpnet før 1967. Deretter ble dupleksbelegg med termisk sprøyta sink og alkyd/klorkautsjuk benyttet, der det første strøket inneholdt sinkkromat. Sinkkromat ble byttet ut med sinkfosfat i 1977. Det er her antatt at utskifting av sinkkromat gikk raskt, siden det ikke ville ha vesentlige følger for prosjektering eller kostnader. Ifølge Brutus er det omkring 2200 små og store bruer av stål med byggeår til og med 1977 som fortsatt er i drift. Blymønje ble anbefalt for bruer i innlandsstrøk fram til 1977.

Blymønje og sinkkromat medfører en risiko for utslipp til miljø og helseskade for personell som utfører vedlikehold av belegget. Statens vegvesen har et betydelig antall bruer bygd i tidsrommet hvor disse beleggene ble brukt, med behov for overflatevedlikehold. Ifølge opplysninger fra en malingsleverandør i 1977 inneholdt blymønje 1,2 kg blyoksid pr liter maling, mens de kromatholdige malingene som ble spesifisert mellom 1965 og 1977 inneholdt 0,25 – 0,3 kg sinkkromat per liter.



FIGUR 27 TJELDSUNDBRUA BYGGEÅR 1967. KILDE: BRUTUS.

6.2.2 Resultater/funn

Rapporten peker på viktige aspekter innenfor tre kategorier:

- Helse, miljø og sikkerhet (HMS)
- Ytre miljø (YM)
- Overflatebehandling for beste levetidskostnader

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

Blåserensing av bly- og kromatholdige belegg medfører helserisiko og dermed ekstra krav til arbeidsgiver vedrørende beskyttelse og oppfølging av arbeidstakere. Bestemmelser i "Forskrift om utførelse av arbeid, bruk av arbeidsutstyr og tilhørende tekniske krav" om blyforbindelser (ved blåserensing av blymønje) og kreftfremkallende kjemikalier (ved blåserensing av kromatholdig maling) skal følges. Arbeidstilsynet angir grenseverdier for forurensninger i arbeidsatmosfæren:

- Bly og blyforbindelser: 0,05 mg/m³ luft
- Kromatforbindelser: 0,005 mg/m³ luft

Ved blåserensing av bly- og kromatholdige belegg er det sannsynlig at disse grenseverdiene overskrides. Standard trykkluftbasert åndedrettsvern som benyttes ved overflatebehandling vil trolig gi tilstrekkelig beskyttelse, siden pusteluft da tilføres utenfra. Inspektører og annet personell bør også bruke trykkluftbasert åndedrettsvern. Blåsestøv vil legge seg etter en viss tid, men kan raskt virvles opp igjen som følge av bevegelser i lufta, forårsaket for eksempel av annet arbeid eller vind. Verneutstyr kan derfor være nødvendig helt til støvet er fjernet. Dette må imidlertid dokumenteres ved egne målinger når arbeidet pågår.

Forskriftens § 3–25 spesifiserer også krav om helseundersøkelse ved arbeid med bly og blyforbindelser: Arbeidstaker som skal arbeide med bly og blyforbindelser, skal gjennomgå helseundersøkelse før arbeidstakeren settes til slikt arbeid og videre hver 3. måned. Helseundersøkelsen skal omfatte klinisk undersøkelse og måling av blyinnholdet i blodet.

Ytre miljø (YM):

Forurensningsforskriften, kapittel 29: "Forurensninger fra mekanisk overflatebehandling og vedlikehold av metallkonstruksjoner i tilknytning til faste anlegg/installasjoner" omhandler blant annet utslipp av bly og kromat.

Utslipp av bly og kromat til vann omtales i § 26. Utslipp av disse komponenter er bare tillatt dersom mengdene er så små at de må anses å være uten miljømessig betydning. Fylkesmannen kan gi veiledning med å vurdere hva som anses å være uten miljømessig betydning.

§ 29–5 om utslipp til luft sier at støv/partikler fra blåserensing av metallkonstruksjoner ikke skal medføre at mengde nedfallsstøv overstiger 5 g/m² i løpet av 30 dager. Nedfallsstøv som inneholder rester av bly- og kromatholdig maling vil imidlertid måtte ses i forhold til tilstandsklasser for forurenset grunn. Grenseverdiene for konsentrasjon av bly og kromat i de ulike tilstandsklassene er svært lave, spesielt for kromat. Det er foreløpig uavklart i hvilken grad normal telting i tilstrekkelig grad vil hindre utslipp.

Krav til behandling av avfall i henhold til avfallsforskriften. Det er rimelig å anta at blåsemiddel fra blåserensing av bruer med bly- og kromatholdig belegg vil være i kategori 1, farlig avfall. Vi kan anta følgende:

- Forbruk av blåsemiddel: 50 kg/m² for malingsbelegg (bly) og 75 kg/m² for dupleksbelegg (kromat).
- Filmtykkelse for bly- og kromatholdig maling: 100 µm.
- Innhold av blyoksid i blymønje: 1,2 kg/liter.
- Innhold av sinkkromat: 0,3 kg/liter.

Det er også en viss fare for at tidligere utført reparasjon av belegg har ført til forurensning av grunnen under. Der det er utført blåserensing tidligere, eller belegget har flasket av brua, bør det undersøkes om grunnen under brua er forurenset. Avhengig av tilstandsklasse og risiko for spredning kan det være krav om fjerning av forurenset grunn.

Overflatebehandling for beste levetidskostnader:

For bruer der det er kjent at belegget inneholder tungmetaller bør følgende tas i betraktning før valg av rengjøringsmetode og reparasjonsbelegg:

- Bruas forventede restlevetid
- Beleggets tilstand
- Korrosivitet på stedet

Belegg med blymønje:

Figur 28 viser en enkel matrise over kombinasjoner av beleggtilstand og restlevetid med forslag til tiltak for blymønje. Kort sagt foreslås det å utnytte beleggets levetid maksimalt for deretter å fjerne alt blyholdig belegg på brua og påføre et moderne beleggssystem. Hvis belegget er i god stand er ingen tiltak nødvendig. Hvis belegget er i dårlig tilstand, men brua har kort restlevetid vil utgangspunktet være å ikke gjøre noe, eventuelt å gjøre hyppigere

inspeksjoner for å ha kontroll på bruas bæreevne. Ved lang restlevetid foreslås det å fjerne all blymønje og påføre dupleksbelegg.

Restlevetid	Lang	Avvente	Fjerne all blymønje. Påføre dupleksbelegg.
	Kort	Ingen tiltak nødvendig	Vurdere behov for tiltak ut fra risiko for tap av bæreevne eller miljøskade
		God	Dårlig
Beleggtilstand			

FIGUR 28. VURDERING AV TILTAK SOM FUNKSJON AV TILSTAND PÅ BLYMØNJE OG RESTLEVETID FOR BRUA. FRA KNUDSEN (2019).

Belegg med sinkkromat:

Siden sinkkromatholdig maling i dupleksbelegg har gode korrosjonsbeskyttende egenskaper, og belegget ikke utgjør noen fare så lenge det sitter på brua, foreslås det i størst mulig grad å unngå blåserensing av intakt belegg.

Der nedbrytningen har kommet så langt at sinkbelegget har startet å korrodere bør det blåserenses til bart stål, bygges opp med metallisering og sealer, påføres heldekkende epoksy barrierestrøk og polyuretan, eventuelt flikke med epoksy og påføre polyuretan som et heldekkende toppstrøk. Begge metoder utføres i henhold til prosess 88.37 i håndbok R762 Prosesskode 2.

Avhengig av korrosiviteten på stedet kan det tillates at stålet korroderer i en periode. I lite korrosivt miljø, typisk innlandsmiljø, kan dette være mange år. I kystmiljø, og spesielt for stål som står nær sjøen, må vedlikeholdet starte noen få år etter at stålet har startet å korrodere.

I noen tilfeller har det blitt utført preventivt vedlikehold på et stadium der sinkbelegget ikke har startet å korrodere. Utløsende tilstand for vedlikeholdet har for eksempel vært avflassing av toppstrøk (Rombaksbrua i 2011). Hvis dette anses å være kostnadsbesparende i et levetidsperspektiv må det vurderes.

6.2.3 Implementering

Implementering av funn lar seg ikke direkte gjøre i R762 Prosesskode 2 da funn og konklusjoner i denne rapporten retter seg mer mot planlegging og strategi enn direkte gjennomføring av et vedlikeholdsprosjekt. Omtalt problematikk rundt HMS og YM er ikke fullstendig og en strategi/program må videreutvikles. Dette arbeidet videreføres av Divisjon Drift og vedlikehold.

I desember 2019 ble det sendt ut et brev til alle brukoordinatorene med informasjon om funn (17/24590–14 Bly- og kromatholdige malinger på eldre bruer). Dette ble gjort for å sikre at informasjon ble gjort tilgjengelig før oppdelingen i 2020 hvor bruer på fylkesveger ble overført til fylkene.

6.2.4 Videre anbefalinger

FoU-programmet Bedre Bruvedlikehold har vært i møter med Divisjon for Drift og vedlikehold som er rett part for å sikre videre arbeid med problemstillingen og implementering av funn i rett system. Det må jobbes videre for å videreutvikle strategi for laveste levetidskostnader.

Risikovurdering med spesielt fokus på HMS og YM før vedlikehold av belegg er under implementering i kvalitetssystemet. Det bør spesielt jobbes videre med følgende:

HMS:

- Undersøke forhold rundt blåserensing (hva er realitetene)
- Byggherreforskriften (kartlegge ansvar/tiltak)
- Arbeidsgiveransvaret (kartlegge ansvar/tiltak)
- Implementere i rett system (kvalitets-systemet)
- Lage prosedyrer for oppfølging av denne typen arbeider

YM:

- Gjøre undersøkelser og kartlegge forurensing etter tidligere utført vedlikehold
- Lage prosedyrer for tiltak ved nytt vedlikehold

6.3 Øvrige aktiviteter

6.3.1 RINVE-nettverket – Automatisering og robotikk i inspeksjon og vedlikehold

RINVE ([RINVE \(sintef.no\)](http://RINVE.sintef.no)) er et norsk nettverk delfinansiert av Norges Forskningsråd og skal bidra til utvikling i norsk næringsliv av automatisering og robotisering innen inspeksjon og vedlikehold. Et viktig moment i dette er RINVEs målsetning om å bidra til å mobilisere til økt og vellykket norsk deltakelse i EU-søknader innen inspeksjons- og vedlikeholdsrobotikk som strategisk satsningsområde for robotikk i EU. Statens vegvesen er medlem av nettverket.

6.3.2 Aktiviteter som er videreført i andre prosjekter

Robotbasert vedlikehold – Surface Dynamics:

Surface Dynamics ser på muligheten for å bruke robotisert vedlikehold av bruer. Bedre bruvedlikehold har vært med å bistå Surface Dynamics i utviklingen av ideen og finne en passende konstruksjon for testing. Surface Dynamics søkte om og fikk innvilget støtte til prosjektet fra Innovasjon Norge. Prosjektet følges opp videre av divisjon Drift og vedlikehold, ved Team FDV bru.

Hovedmålet er todelt;

- å utvikle fullgod tilkomst-evne for en overflaterhabiliteringsrobot slik at roboten kan nå frem til vanskelig tilgjengelige områder på overflater over sjø uten bruk av stillas
- å utvikle ny og egnet oppsamlingsteknikk av malingrester, som er båret av robot ved arbeid uten stillas og med mål å fungere bedre enn dagens manuelle teknikk. Overflater over sjø er typisk undersider av offshoreinstallasjoner og undersider av bruer på biltrafikkens veinett.

Strategi for vedlikehold av belegg:

Det var opprinnelig målsetning med en aktivitet for å utvikle vedlikeholdsstrategi for belegg på stålbruer som gir lavest mulig levetidskostnad, gjennom å utvikle metoder for å bestemme optimalt tidspunkt for vedlikehold av belegg. Det ble i regi av Prosjekt 1 i samarbeid med SINTEF utarbeidet en søknad til Norges forskningsråd: Innovasjonsprosjekt i offentlig sektor: Optimalt bruvedlikehold for reduserte levetidskostnader. Prosjektet ble innvilget og startet opp i 2021.

6.4 Publikasjoner

- Knudsen, O. Ø. (2019): Vedlikehold av bly- og kromatholdige belegg. FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021, Statens vegvesen rapport nr. 595.

6.5 Referanser

- Arbeidstilsynet (2011): Forskrift om tiltaksverdier og grenseverdier for fysiske og kjemiske faktorer i arbeidsmiljøet samt smitterisikogrupper for biologiske faktorer (forskrift om tiltaks- og grenseverdier). Arbeids- og sosialdepartementet, Oslo.
- Lovdata (2011): Forskrift om utførelse av arbeid, bruk av arbeidsutstyr og tilhørende tekniske krav. Arbeids- og sosialdepartementet, Oslo.

7 Måloppnåelse

7.1 Resultatmål

I de foregående kapitler er det redegjort for hvilke aktiviteter som er gjennomført i de ulike prosjektene, hvilke resultater som er oppnådd og hvordan resultatene er implementert.

FoU-programmet har levert mange gode bidrag til den overordnet målsetning om å optimalisere ressursbruken knyttet til inspeksjon, vedlikehold og forvaltning av bruer.

Ved oppstart av programmet ble det satt en rekke konkrete resultatmål, se kapittel 1.3. Ved avslutning av FoU-programmet er det gjort en evaluering av disse med tanke på måloppnåelse, se Tabell 1.

Leveransene fra de ulike prosjektene går langt utover de nevnte resultatmålene, også på tema som ikke inngår i lista. Dette er ikke ytterligere utdypet her, men framgår av de foregående kapitler.

TABELL 1 LEVERANSER I FORHOLD TIL FoU-PROGRAMMETS RESULTATMÅL

Resultatmål	Leveranser
Verktøy for vurdering av tekniske og økonomiske aspekter ved ulike vedlikeholds- og reparasjonsmetoder	Aktiviteten ble av ressurshensyn tatt ut av prosjektplanen, se kapittel 3.1.
Prosedyre og erfaringsrapport for forenklete risiko- og sårbarhets (ROS)-analyser for inspeksjonsintervall	Forenklet ROS-analyse for endring av inspeksjonsintervall for bruer etter håndbok R411 er implementert i Statens vegvesens kvalitetssystem.
Erfaringsrapporter fra bruk av drone til bruinspeksjon	Det er levert to rapporter: – Statens vegvesen rapport nr. 224. – Statens vegvesen rapport nr. 264.
Anbefaling av inspeksjonsmetoder for å utrede omfang av skader på grunn av armeringskorrosjon	Det er levert: – En inspeksjonsmanual for etterspente bruer (Statens vegvesens rapport nr. 718) – To tidsskriftsartikler med anbefalinger for bruk av ikke-destruktive metoder for inspeksjon av slakkarmerte/førøppspente konstruksjoner. Det er videre gjort en evaluering av prosedyrer for bestemmelse av kloridinntrenging i betong.
Verktøy for å kunne bedømme konsekvenser av armeringskorrosjon på spennsystemer for bruens levetid	Det er levert: – En rapport fra NTNU på konstruktive konsekvenser av korrosjon på etterspente konstruksjoner. – En ph.d.-oppgave som inkluderer en vurdering av konstruktive konsekvenser av korrosjon på førøppspente konstruksjoner.

Veiledning for valg av vedlikeholds- metoder for betongkonstruksjoner med armeringskorrosjon	Det er gjort et innledende arbeid på dette temaet, en studie ved ETH basert på en kombinasjon av tilstandsundersøkelser, laboratorietesting og matematiske modeller for å finne en optimal vedlikeholdsstrategi for spesifikke konstruksjoner (Statens vegvesen rapport nr. 818).
Veiledning for inspeksjon, prøvetaking og laboratorieundersøkelser for å dokumentere alkalireaksjoner	Lvert i form av Statens vegvesen rapport nr. 852. Direkte input til V441: Bruinspeksjon i 2019
Veiledning for konstruktive analyser og kapasitetskontroll av bruer med alkalireaksjoner	Lvert i form av Statens vegvesen rapport nr. 855.
Veiledning som beskriver preventive og korrektive tiltak for betong med alkalireaksjoner	Det er levert en konferanseartikkel med resultater fra forsøk med preventive tiltak (overflatebehandling) og en beskrivelse av prinsipielle korrektive tiltak (denne rapportens kapittel 5.5)
Veiledning for vedlikehold av bly- og kromatholdig belegg på stålruer	Lvert i form av Statens vegvesen rapport nr. 595.

7.2 Statens vegvesens toppmål

Statens vegvesens hovedmål om et effektivt, miljøvennlig og trygt transportsystem i 2050 er brutt opp i fem konkrete toppmål. Resultatene fra Bedre bruvedlikehold treffer alle toppmålene, på den måten det er skissert i Tabell 2.

TABELL 2 BIDRAG TIL Å TREFFE TOPPMÅLENE I STATENS VEGVESEN

Statens vegvesens toppmål	Bidrag fra Bedre bruvedlikehold
Enklere reisehverdag og økt konkurranssevne for næringslivet	Inspeksjons- og vedlikeholdsrutiner som reduserer behovet for stenging av bruer
Mer for pengene	Riktig vedlikehold til riktig tid reduserer levetidskostnadene
Effektiv bruk av ny teknologi	Prosedyrer for inspeksjon med drone og inspeksjon av spennkabler
Nullvisjon for drepte og hardt skadde	Prosedyrer for å sikre at bruene opprettholder sin bæreevne
Bidra til å nå Norges klima og miljømål	Vedlikehold (med lavt CO ₂ -utslipp) forlenger bruens levetid og reduserer behovet for nybygging (med høyt CO ₂ -utslipp)



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag