

nr. 86

Publikasjon

OFU Gimsøystraumen bru –
Sluttrapport

Instrumentering, dokumentasjon og verifikasjon



Statens vegvesen
Vegdirektoratet

Veglaboratoriet

Publikasjon nr. 86

OFU Gimsøystraumen bru

Instrumentering,
dokumentasjon
og verifikasjon

Forfattere: Bård Espelid Geir Ivar Sletten Øystein Vennesland Erik Sellevold Ketil Videm Roar Myrdal Aage Blankvoll	Firma: Det Norske Veritas Det Norske Veritas NTNU NTNU Universitetet i Oslo Rescon AS Statens vegvesen Nordland	Sluttrapport OFU Gimsøystraumen bru: Instrumentering, dokumentasjon og verifikasjon OFU rapport nr.: S-97-045 Dato: juni 1998 Antall sider: 128
Ekstrakt: Denne rapporten presenterer arbeidet som er utført av IDV-gruppen med hensyn på å utarbeide instrumenteringsprogram, følge opp installert instrumentering, samt tolkning av innsamlede måleverdier for å kartlegge og dokumentere effekten av ulike vedlikeholds- og reparasjonstiltak. I tillegg beskriver rapporten hvordan måleresultatene har bidratt til en kontinuerlig oppfølging av den generelle tilstandsutviklingen til brua både i overbygning og søyler.	Stikkord: Bru Betong Armeringskorrosjon Instrumentering Overvåkning	
Extract: This report presents the work carried out by the Instrumentation, Documentation and Verification (IDV) Working Group of the Gimsøystraumen Bridge Repair Project. The main tasks of the IDV Working group comprised preparation and specification of the instrumentation programmes, evaluation and interpretation of the collected data with respect of both effect of the trial repairs and general condition development.	Keywords: Bridge Concrete Corrosion Instrumentation Monitoring	

Omslagsdesign: Svein Aarset, Oslo
 Forsidebilde: S. Bøckmann, Bodø
 Illustrasjoner: Det Norske Veritas, Bergen / SCC Abel Engh as, Drammen
 Redaksjon/
 produksjonskoordinator: Helge Holte, Veglaboratoriet
 Trykk: Helli Grafisk as, Oslo
 Opplag: 800

Forord

Prosjektet «OFU Gimsøystraumen bru» er et samarbeid mellom Statens vegvesen, Rescon AS og Statens Nærings- og Distriktsutviklingsfond (SND). Prosjektet knytter forskning og ulike utviklingsoppgaver til reparasjon av Gimsøystraumen bru i Nordland. Prosjektet startet i 1993 og ble avsluttet i 1997. Prosjektet er bygget rundt to større kontrakter der den ene er en offentlig forsknings- og utviklingskontrakt (OFU-kontrakt).

En OFU-kontrakt er en avtale mellom en offentlig etat og en norsk bedrift som påtar seg å levere et produkt eller en tjeneste. En forutsetning er at det foreligger et offentlig anskaffelsesbehov som ikke kan dekkes tilfredsstillende gjennom eksisterende tilbud. Formålet med OFU-kontrakter er tosidig. Det er for det første å bedre og effektivisere offentlig virksomhet ved bruk av nye løsninger og for det andre å styrke bedriftenes leveringsmuligheter til det offentlige samt bidra til å øke konkurranseevnen hjemme og ute. Ordningen finansieres over budsjettet til Næringsdepartementet som har delegert administrasjon av OFU-kontrakter til SND.

Det har i løpet av de siste 10 årene blitt fokusert på skader på våre kystbruer av betong. Behovet hos Statens vegvesen for nye vedlikeholds- og reparasjonsmetoder for betongbruer i kystklima er i korte trekk bakgrunnen for inngåelsen av OFU-kontrakten mellom Statens vegvesen Vegdirektoratet og Rescon AS. Omfanget av OFU-kontrakten var opprinnelig på 16,55 millioner kroner der finansieringen ble gjort av Statens vegvesen, SND og Rescon AS med fordelingen 40/40/20. Partene har senere øket sin innsats i prosjektet slik at endelig budsjett ble 25,3 millioner kroner. I Statens vegvesen inngår prosjektet i etatsatsningsområdet TUBTU - Teknisk utvikling innen bru og tunnelbygging.

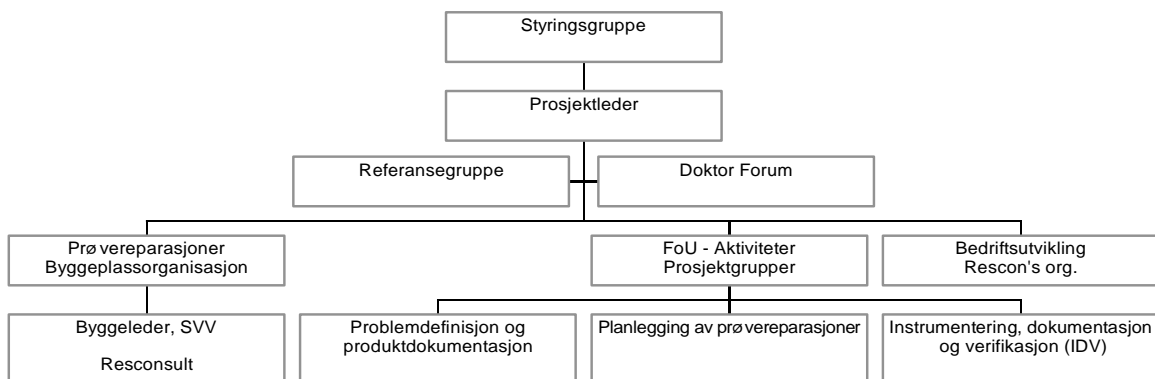
Den andre store kontrakten i prosjektet ble inngått mellom Statens vegvesen Nordland og Resconsult AS som er datterbedrift til Rescon AS. Kontrakten omfattet prøvereparasjoner av Gimsøystraumen bru og hadde en budsjetttramme på 10 millioner kroner.

«OFU Gimsøystraumen bru» har vært et spesielt prosjekt ved at det knyttet sammen forsknings- og utviklingsaktiviteter, praktiske problemstillinger i prøvereparasjoner av Gimsøystraumen bru i Nordland til målrettet produktutvikling hos Rescon AS. Andre sentrale deler av prosjektet har vært doktorgradsutdanning og sertifisering av kvalitetssystemet til Rescon og Resconsult i henhold til ISO 9000-serien.

Gimsøystraumen bru ble bygget i tidsrommet 1979-1981. Brua var godt egnet som forsøksobjekt fordi brua ikke hadde kritiske skader som krevde øyeblikkelige repara-

sjoner. Det var også viktig at brua var representativ for kystbruer bygget i 1970- og 1980-årene både når det gjelder brutype og hvilke spesifikasjoner som ble brukt.

I Statens vegvesen har det vært et nært samarbeid mellom Nordland vegkontor, Bruavdelingen og Veglaboratoriet i Vegdirektoratet. Prosjektorganisasjonen er vist nedenfor.



Det har vært mindre endringer i prosjektorganisasjonen gjennom prosjektperioden. I prosjektets siste år har det ikke vært utført prøve-reparasjoner og byggeplassorganisasjonen ble følgelig lagt ned. I tillegg ble Problemdefinisjonsgruppen og Prøve-reparasjonsgruppen slått sammen til én prosjektgruppe, Reparasjonsgruppen. Denne har sammen med IDV-gruppen hatt ansvaret for utarbeidelsen av sluttdokumentasjonen i prosjektet.

Styringsgruppen har bestått av: Arnfinn Pettersen (Statens vegvesen Nordland), Geir Tjugum (Rescon AS), Håvard Østlid (Veglaboratoriet), Olav Grindland (Bruavdelingen), Elisabeth Schjølberg (Vegdirektoratet, Produksjonsavdelingen), Gørild Malm Cornejo (Veglaboratoriet) og Jan Henrik Sæther (SND).

Prosjektleder har vært Aage Blankvoll (Statens vegvesen Nordland). Både prosjektleder og ansvarlig hos Rescon for gjennomføring av prosjektet, Bernt Kristiansen har møtt fast i styringsgruppen.

Reparasjonsgruppen har bestått av: Reidar Kompen (Veglaboratoriet), Aage Blankvoll og Tor Berg (Statens vegvesen Nordland), Per Austnes (Statens vegvesen Møre og Romsdal), Einar Noremark (Statens vegvesen Hordaland), Knut Grefstad (Bruavdelingen), Bernt Kristiansen og Bjørn Bonsak (Rescon AS) og Jon Halden (SCC Abel Engh AS).

IDV-gruppen har hatt følgende medlemmer: Bård Espelid (Det Norske Veritas), Øystein Vennesland og Erik Sellevold (Norges teknisk - naturvitenskapelige universitet, NTNU), Ketil Videm (Universitetet i Oslo), Bernt Kristiansen og Roar Myrdal (Rescon AS), Claus K. Larsen og Finn Fluge (Veglaboratoriet), Aage Blankvoll og Tor Berg (Statens vegvesen Nordland).

Resultatene fra prosjektet er å finne i følgende dokumentasjon:

1. Resultatbrosjyre:
 - Hovedresultater og oversikt over sluttokumentasjon.
2. Anbefalinger fra prosjektet:
 - Anbefalinger for inspeksjon, reparasjon og overflatebehandling av kystbruer i betong
 - Anbefalinger for instrumentert korrosjonsovervåkning av kystbruer i betong.
3. Sluttrapportene:
 - Klimapåkjennning og tilstandsvurdering
 - Prøvere-reparasjon og produktutvikling
 - Instrumentering, dokumentasjon og verifikasjon (IDV).
4. Rapportserie med en rekke detaljrapporter som omhandler større eller mindre temaer behandlet i prosjektet.
5. Dr. avhandlinger ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet (NTNU) og Universitetet i Oslo (UiO):
 - «Chloride binding in concrete – Effect of concrete composition and surrounding environment» (Claus K. Larsen, NTNU, 1998)
 - «Evaluation of Electrochemical Techniques for Assessing Corrosion of Steel in Concrete» (Roar Myrdal, UiO, 1997).
6. Flere av prosjektdeltakerne har presentert resultater fra prosjektet på ulike seminarer og konferanser i Norge, Norden og internasjonalt. Den største samling av «papers» fra prosjektet er å finne i Proceedings fra prosjektets avslutningskonferanse Repair of Concrete structures i Svolvær, 28. - 30. mai 1997.

Det vil bli foretatt en videre oppfølging av de utførte prøvere-reparasjonene på Gimsøystraumen bru. Oppfølgingen vil strekke seg over en 5-årsperiode med mulighet for forlengelse i 5 år til. Oppfølging vil bli gjort både gjennom fortsatt drift av overvåkningssystemet og ved jevnlig inspeksjoner og kontrollmålinger på brua.

Resultatene fra oppfølgingsprosjektet vil i første rekke bli kanalisert gjennom revisjoner av prosjektets Reparasjonsanbefaling og Instrumenteringsanbefaling. De sentrale aktørene i oppfølgingsprosjektet er Statens vegvesen Nordland, Bruavdelingen, Vegteknisk avdeling og Rescon AS.

Sammendrag

Denne rapporten presenterer arbeidet som er utført av IDV- gruppen med hensyn på å utarbeide instrumenteringsprogrammer, følge opp installert instrumentering og tolke innsamlede måleverdier for å kartlegge og dokumentere effekten av ulike reparasjons- og vedlikeholdstiltak. I tillegg beskriver rapporten hvordan måleresultatene har bidratt til en kontinuerlig oppfølging av den generelle tilstandsutviklingen til brua både i overbygning og søyler.

Prøvereparasjoner

I prosjektperioden er det utført tre prøvereparasjoner som alle har vært ledsaget av følgende arbeider:

- Forhåndskartlegging
- Mekanisk reparasjon og overflatebehandling
- Instrumentering og overvåkningsutstyr
- Dokumentasjon.

I forbindelse med prøvereparasjonene har IDV-gruppen først og fremst fokusert på det andre og fjerde punktet listet ovenfor.

Erfaringene fra prosjektet er at det ved så omfattende instrumentering som ble utført på brua er det av avgjørende betydning å ha en klar instrumenteringsstrategi og detaljerte prosedyrer og spesifikasjoner for alt installeringsarbeid. I tillegg er det svært viktig å dokumentere instrumenteringen systematisk og med hensyn på alle installasjonsdetaljer. Installerte instrumenteringssystemet må verifiseres helt fra sensor hvor målesignal blir generert til måleverdi som blir presentert for sluttbruker. Når kvalitetssikrende aktiviteter ikke ble gjennomført, var en større mengde av de innsamlede måleverdiene beheftet med så stor usikkerhet at bruksverdien forsvant.

Alle målesignal bør konverteres fra analoge til digitale verdier så nært målestedet som mulig. Det vil bidra til at målesignalene i mindre grad vil være påvirket av støy av for eksempel elektrisk/magnetisk karakter.

Måleresultater

I løpet av prosjektperioden har den relative endringen for de ulike måleparametrene som reflekterer armeringens korrosjonstilstand vært relativt liten. Målingene har således ikke gitt et grunnlag for å trekke sikre holdepunkter vedrørende behandlingenes effekt med hensyn på armeringskorrosjon. Dette skyldes trolig i stor grad at tilstanden i de instrumenterte områdene av brua var relativt god slik at det vil ta tid før det oppstår endringer i korrosjonstilstanden som kan belyse effektene av de ulike vedlikeholds- og reparasjonstiltak som er gjennomført.

Gjennom prosjektperioden er det blitt ervervet betydelig kompetanse med anvendelse av målemetoder som tidligere har vært lite anvendt i felt. Dette gjelder måling av oksygentransport til innstøpt stål samt motstands- og fuktendringer i betongen. Disse målingene har bidratt til en bedre forståelse av transportmekanismer i betongen og hvilken effekt overflatebehandling kan ha på disse.

Videre arbeid / anbefalinger

Prosjektperiodens varighet har vært relativt kort i forhold til forventet hastighet for korrosjonsinitiering og utvikling. Endringer i tilstanden til brua vil først forventes over noe tid, og derfor er det som tidligere nevnt sterkt anbefalt å forlenge måleperioden for å følge denne tilstandsendringen. Et slikt måleprogram bør sikre kontinuitet i målingene, kontinuerlig oppfølging og vurdering av måleresultater og gjennomføring av spesielle undersøkelser for å verifisere og utdype resultater og mekanismer. I et videre oppfølgingsprogram bør det legges vekt på følgende:

- Kontinuerlig faglig oppfølging og vurdering av måleresultater
- Kontinuerlig kvalitetssikring av datainnsamlingssystem
- Prioritering av målinger som skal videreføres, og vurdering av målefrekvens
- Gjennomføring av supplerende laboratorieundersøkelse for å verifisere feltmålinger, for eksempel fukttilstand i betongen
- Vurdering av ny instrumentering eller tilleggsinstrumentering.

Dersom disse aktivitetene gjennomføres og følges opp, så vil Gimsøystraumen bru gi svært verdifull informasjon om langsiktige nedbrytningsmekanismer og effekter av utførte reparasjonstiltak.

Summary

Introduction

The objectives of the OFU-Gimsøystraumen Bridge Repair Project were:

- Increase of competence in maintenance and repair of concrete bridges
- Obtain new knowledge and understanding of factors governing the durability of bridges in a harsh marine environment
- Further development of existing products and development of new products for maintenance and repair of concrete bridges
- Produce guidelines for maintenance and repair of concrete bridges
- Carry out maintenance and repair of Gimsøystraumen bridge in a technically and economically optimal way
- Classification of the companies Rescon and Resconsult in accordance with the ISO-9000 series
- Increase the competitive power of Rescon in the home market and to increase the export of their products and services.

The project started in 1993 for an initial period of four years. The research has brought forward many interesting and important results. The need for a follow-up period of 10 years has been highlighted.

The three main parties involved in the project were the Norwegian Public Roads Administration (NPRA), the Norwegian Industrial and Regional Development Fund (SND) and Rescon AS. Rescon is the only wholly Norwegian owned company which develops and produces products for maintenance and repair of concrete structures.

Many of the results of the project were presented at an international conference in May 1997 to mark the end of the project. The papers were published in the Proceedings from this conference /39/ and in the Additional papers to the proceedings /40/.

This report presents the work carried out by the Instrumentation, Documentation and Verification (IDV) Working Group of the Gimsøystraumen Bridge Repair Project. The main tasks of the IDV-working group comprised the following activities:

- Preparation and specification of instrumentation programmes
- To follow up installed instrumentation and interpret and evaluate collected data in order to map and document the effect of the different repair and surface treatments
- Evaluation and interpretation of the collected data with respect to the general condition development both in the columns and the cantilevered box of the bridge.

Trial Repairs

In the project period three trial repairs have been carried out. These have been accompanied by the following activities:

- Condition survey
- Mechanical repair and surface treatment
- Instrumentation and data acquisition
- Documentation.

The instrumentation activities carried out on the bridge were comprehensive. The experience gained from the project clearly identified that such work should be based on an unambiguous instrumentation strategy and detailed specific procedures for all installation work. In addition, it is very important to document all instrumentation principles and systems, including installation related details. Furthermore, the importance of verifying the complete instrumentation system, from the signal generated at the sensor to the presentation of results for the end-user, has been experienced. The project revealed that when marginal quality control and assurance were performed the reliability of the collected data was reduced accordingly. This gave, as a consequence, some data with little or no end-user value.

A very important experience made in the instrumentation activity of the Gimsøystraumen Bridge Repair Project, was that the analogue sensor signals should be converted to digital values close to the sensor location in order to reduce the influence of noise, e.g. electro-magnetically induced.

Measurements

The parameters reflecting the corrosion status and activity of the reinforcement of the bridge showed little or no variation or development during the project period. Based on the measurements performed in this period, no definite conclusions regarding the effect of the repairs and surface treatments can be made. This, however, was probably due to the fact that there was little or no reinforcement corrosion prior to the performed repair and surface treatments. Consequently, a longer monitoring period is required to detect possible effects of the repairs and surface treatments. It is therefore strongly recommended to extend the duration of the measurement period.

During the project period extensive know-how and experience on the application of advanced measurement techniques and principles on a full-scale structure have been accumulated. This includes for example measurement of oxygen transport to embedded steel and recording resistivity and humidity fluctuations in the concrete. These types of measurements have contributed significantly to the understanding of different transport mechanisms in concrete, and how these can be influenced by concrete surface treatments.

Further Work/Recommendations

As previously mentioned, the project period has been too short to expect significant changes in the corrosion condition of the embedded steel. Possible degradation effects will require longer exposure periods, and as previously recommended, an extension of the current measurement period is required. An extended measurement activity should both secure the continuity and reliability of the measurements as well as an evaluation of the collected data. These activities should also be the basis for the initiation and execution of specific examinations to verify and thoroughly evaluate data and mechanisms. In an extended measurement programme, the following aspects should be given attention:

- Definition of parameters and measurements to be included in the extended programme and evaluation of frequency of measurements
- Continuous professional control and evaluation of collected data
- Continuous quality control of the data acquisition system
- Execution of supporting laboratory work to verify field measurements, e.g. related to the humidity condition of the concrete
- Evaluation of new or additional instrumentation.

If these activities are implemented, the Gimsøystraumen Bridge will provide valuable and unique information and understanding of long-term degradation and effects of repair and surface treatment works.

Innhold

1	Innledning	1
2	Målsetting for IDV-gruppens arbeid	2
3	Beskrivelse av brua og klimaet på brustedet	3
3.1	Bruas konstruksjon.....	3
3.2	Klimabelastning.....	5
3.3	Kloridbelastning og tilstand	5
4	Prøvereparasjoner	8
4.1	Generelt.....	8
4.2	Prøvereparasjon 1 (1993)	9
4.3	Prøvereparasjon 2 (1994)	10
4.4	Prøvereparasjon 3 (1995)	11
5	Beskrivelse av utført arbeid	13
5.1	Strategi og mål for instrumenteringen på brua.....	13
5.2	Utført instrumentering.....	14
5.2.1	<i>Typer sensorer og instrumenteringsomfang</i>	14
5.2.2	<i>Referanseelektroder for måling av korrosjonspotensialer</i>	15
5.2.3	<i>Polarisasjonsmotstand/lineærpolarisering</i>	16
5.2.4	<i>FCB-sonde</i>	19
5.2.5	<i>Oksygentransport</i>	20
5.2.6	<i>Elektrisk motstand</i>	21
5.2.7	<i>Fuktmålinger/relativ fuktighet</i>	24
5.2.8	<i>Temperaturmåling</i>	25
5.3	Plassering og montering av sonder	26
5.4	Datainnsamling	30
5.5	Installasjon - oppsummering og anbefalinger	31
5.6	Vurdering av elektrokjemiske teknikker til å måle korrosjonshastighet i felt	32
5.6.1	<i>Galvanostatisk puls</i>	32
5.6.2	<i>Måling av lineær polarisasjonsmotstand (LPR) med potensiodynamisk sveip</i>	32
5.6.3	<i>Potensiostatisk måling av lineær polarisasjonsmotstand</i>	33
5.6.4	<i>Måling av polarisasjonsmotstand med vekselstrømsimpedansspektroskopi</i>	33
5.6.5	<i>Vurdering av korrosjon ut fra elektrokjemisk støy</i>	33
5.7	Verifikasjon og kvalitetssikring av sensorer, måledata, datainnsamlings-system og dataoverføringsystem	34
5.7.1	<i>Overvåkingssystem</i>	34
5.7.2	<i>Resultater fra verifikasjonsprosessen</i>	35
5.7.3	<i>Lekkstrømseffekter/elektrokjemisk støy</i>	36
5.7.4	<i>Utførte korrektive tiltak</i>	36
5.7.5	<i>Kort beskrivelse av installerte overvåkingssystem</i>	37
5.7.6	<i>Erfaringer og anbefalinger</i>	39

6	Resultater og observasjoner	40
6.1	Miljø- og værdata	40
6.1.1	Temperatur	40
6.1.2	Vindstyrke	42
6.1.3	Vindretning	44
6.1.4	Relativ fuktighet	44
6.1.5	Soltimer	45
6.1.6	Nedbør	45
6.1.7	Saltinnhold i sjøvannet	46
6.2	Betongens fukttilstand/fuktighetsmålinger	46
6.2.1	Instrumentering på brua	46
6.2.2	Prøveuttak og laboratorieprøving	47
6.2.3	Resultater og diskusjon	47
6.3	Motstandsmålinger	50
6.3.1	Instrumentering på brua	50
6.3.2	Laboratorieforsøk	51
6.3.3	Resultater, laboratorieforsøk	51
6.3.4	Resultater, in situ målinger	53
6.4	Elektrokjemiske tilstandskontrollmålinger	57
6.4.1	Innledning	57
6.4.2	EKP-målinger	58
6.4.3	Mangelen på samsvar mellom EKP-måling og potensialer målt med innstøpte referanseelektroder	58
6.4.4	Måling med Gecor 6	59
6.5	Elektrokjemiske målinger med innstøpte sensorer	60
6.5.1	Generelt	60
6.5.2	Potensial og polarisasjonsmotstand	60
6.5.3	Oksygentransport	62
6.6	Tilleggsmålinger	67
6.6.1	Generelt	67
6.6.2	Forenklet måling av oksygentransport	67
6.6.3	Måling av polarisasjonsmotstand	67
7	Oppsummering og konklusjoner	68
7.1	Sensortyper og målemetoder	68
7.1.1	Vurdering av klimapåkjønning	69
7.1.2	Potensialmålinger	70
7.1.3	Polarisasjonsmotstand	71
7.1.4	Elektrisk motstand	72
7.1.5	Relativ fuktighet	72
7.1.6	Hovederfaring med tilstandskontrollmålingen	74
7.1.7	Oksygentransport	74
7.1.8	Temperatur	75
7.2	Instrumentering	75
7.3	Innstøping av sensorer	76
7.4	Måloppnåelse	76
7.5	Forbedringer/modifikasjoner	77
7.6	Anbefalinger/videre arbeid	77
8	Referanser	81
	Vedlegg: Oversikt over og koordinater for installerte sensorer	83

1 Innledning

Betongkonstruksjoner kan være utsatt for armeringskorrosjon. I de siste ti årene har tildels betydelige korrosjonsskader på kystbruer blitt registrert. Skadeårsakene er flere og sammensatte, men mangelfull bygningsteknisk eller konstruksjonsmessig utførelse er en vesentlig årsak til den observerte nedbrytningen.

Dersom nedbrytningen av kystbruene fikk utvikle seg, kunne den over tid medføre svært høye reparasjonskostnader. For å utvikle effektive tiltak som kunne settes inn på et tidlig og forebyggende tidspunkt i nedbrytingsprosessen, ble prosjektet OFU Gimsøystraumen bru startet. En hovedmålsetting var å utvikle produkter og reparasjonsprosedyrer som kunne bidra til at prosjektert levetid på kystbruene kunne oppnåes på et kostnadsoptimalt og funksjonssikkert vis.

I utprøvingen av de forskjellige prøvereparasjonstiltakene ble det tidlig i prosjektet klart at mulige effekter av tiltakene måtte dokumenteres med instrumentert overvåking. Det var også en forventning om at denne type målinger ville bedre forståelsen for nedbrytningsmekanismene i en betongkonstruksjon og hvilke forhold og miljøparametre som påvirker korrosjonsprosessene. En slik grunnleggende kunnskap kunne også bidra til å utvikle effektive vedlikeholds- og reparasjonssystemer.

Denne sluttrapporten presenterer arbeidet som er utført av IDV-gruppen for å instrumentere ulike områder på Gimsøystraumen bru for å kartlegge og dokumentere effekter av ulike vedlikeholds- og reparasjonstiltak.

Rapporten gir innledningsvis en beskrivelse av Gimsøystraumen bru og en omtale av de makro- og mikroklimatiske forhold på brustedet. Videre beskrives prøvereparasjonene utført i perioden 1993–1995 både med hensyn på hvor på brua de er utført og hvilke behandlinger som er iverksatt.

Hoveddelen av rapporten presenterer målsettingene med instrumenteringssystemet som ble installert på brua i løpet av prosjektperioden. Det er også gitt en detaljert beskrivelse av de ulike typene av instrumentering og sensorer som er brukt. I datainnsamlingsfasen ble det tidlig avdekket et behov for å kvalitetssikre innsamlede måledata og arbeidet for å gjennomføre dette er også beskrevet i rapporten. For å underbygge både tolkning av data og forståelse av elektrokjemiske prosesser på det innstøpte stålet, ble det gjennomført en rekke tilleggsmålinger på brua. Disse målingene er også beskrevet og presentert i rapporten. Arbeidet med å kvalitetssikre måleverdier og vurdere ulike parametres innflytelse på korrosjonstilstanden til det innstøpte stålet, ble en hovedaktivitet i IDV-gruppen sitt arbeid.

2 Målsetting for IDV-gruppens arbeid

IDV-gruppen har hatt oppgaver i prosjektet både i forkant og etterkant av de utførte prøvereparasjonene. Målsettingene med IDV-gruppens arbeid har vært:

- å utarbeide instrumenteringsopplegg for å kartlegge hvorvidt ulike vedlikeholds- og reparasjonstiltak benyttet under prøvereparasjoner påvirker armeringens korrosjonstilstand, betongens fuktforhold, betongens elektriske motstand, armeringens oksygentilgang (katodekapasitet) og andre faktorer av betydning for armeringskorrosjon
- å etterprøve og forhåpentligvis dokumentere antakelser om klimapåkjønning og armeringskorrosjon som var utgangspunkt for valg av reparasjonsstrategi ved prøve-reparasjoner
- å belyse tilstandsutviklingen over tid på brua med hensyn på armeringskorrosjon
- generelt å bedre forståelse om nedbrytningsmekanismer i kystklima
- å sikre påliteligheten av innsamlede måleresultater.
- å oppnå kompetanseheving i forbindelse ulike aspekter av instrumentert korrosjons-observasjon som strategi for observasjon, installasjon av sensorer, dataoverføring, håndtere, presentere og tolke måleresultater.
- å komme frem til velegnede metoder for instrumentert korrosjonsobservasjon som kan anbefales ved fremtidige reparasjonsprosjekter og for nye betongkonstruksjoner.

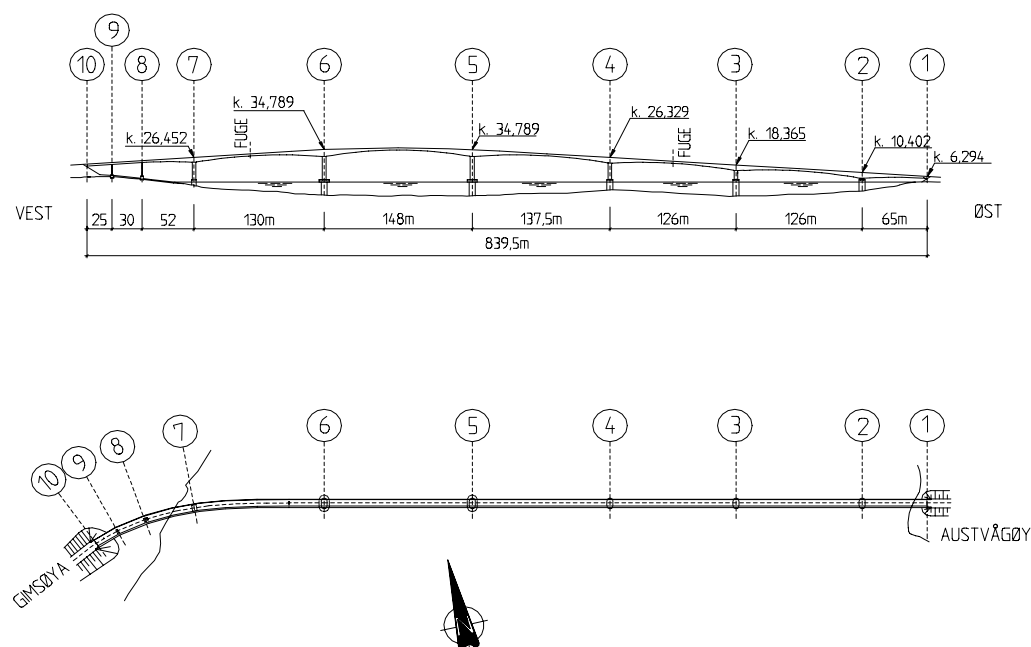
IDV-gruppen har også gitt forslag og kommentarer til spesielle forsøk i felt og laboratorium for å frembringe resultater og/eller kalibreringer som har kunnet belyse relevansen av de målinger som har vært utført på brua.

3 Beskrivelse av brua og klimaet på brustedet

3.1 Bruas konstruksjon

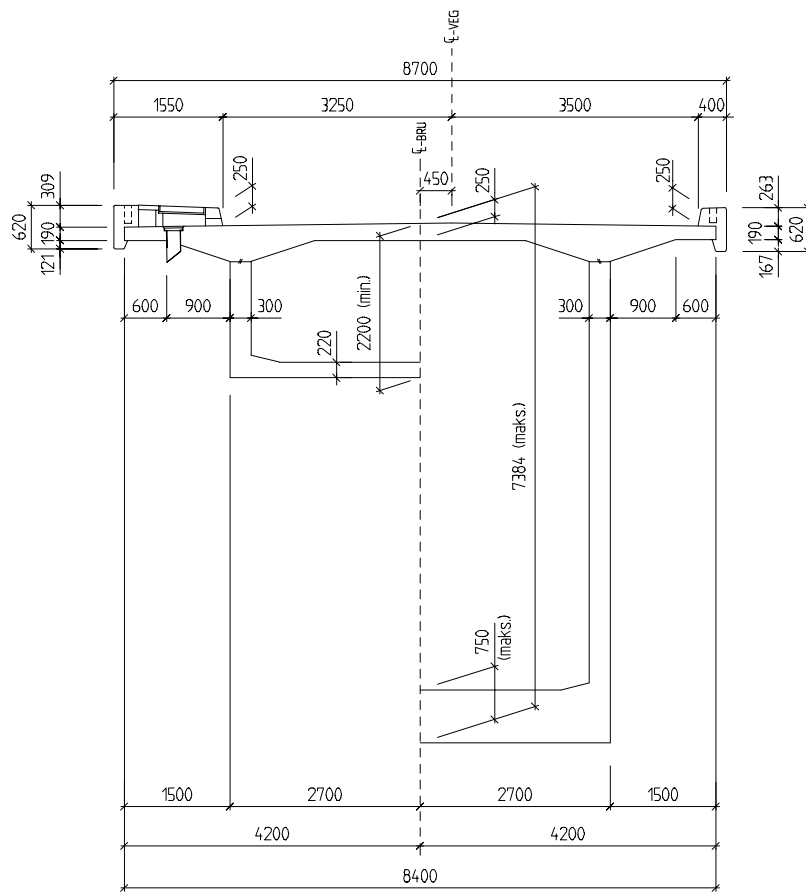
Gimsøystraumen bru ligger ca. 30 km vest for Svolvær langs E10 og forbinder Austvågøy med Gimsøy. Brua er til sammen 840 m lang fordelt på 9 felt, se figur 3.1-1. Brua er en fritt frambygg bru (FFB) i etterspent betong med åpent kassetverrsnitt. Kassehøyden varierer fra 2,2 m til 7,4 m. Tverrsnitt av brukassen er vist i figur 3.1-2.

Orienteringen til brua er tilnærmet øst / vest i bruas lengderetning. Brua ligger i ytre kyststrøk med forholdsvis hard klimabelastning. Forskjellige deler av brua er utsatt for ulik grad av klimapåkjøring. Dette kan illustreres ved at kjørebanelen stiger fra 6 m over havet ved landkar i akse 1 til 36,5 m over havet ved seilingsløp mellom akse 5 og 6.



Figur 3.1-1: Gimsøystraumen bru.

Overbygningen er fritt opplagt på landkarene i akse 1 og 10. Brua har bevegelsesfuger ved landkar i akse 1, akse 3 + 63 m, akse 6 + 74 m og ved landkar i akse 10. Mellom disse fugene er overbygningen kontinuerlig. Overbygningen er støpt monolittisk med søylene som er fast innspent i fundamentene.



Figur 3.1-2: Tverrsnitt av brukassen.

Søyler i aksene 3-7 er hule og utført i slakkarmert betong. I aksene 3, 4 og 7 er søyledimensjonene 3,5 m x 5,4 m og i aksene 5 og 6 er dimensjonene 4,0 m x 5,4 m. Veggtykkelsen er 0,40 m. I akse 2, 8 og 9 er søylene massive. Søyledimensjonen i akse 2 er 3,5 m x 5,4 m, og 0,5 m x 3,0 m i aksene 8 og 9.

Det ligger 3 høyspentkabler på gulvet inne i brukassen. Kablene forsyner hele Lofoten vest for brua med elektrisk kraft. Hovedkabelen er på 132 kV, og typisk effektleveranse er 15 MW i sommerhalvåret og 25 MW i vinterhalvåret.

Prosjektert betongkvalitet for underbygning (søyler) var C35. Prosjektert overdekning for underbygning var 50 mm. For overbygning var prosjektert betongkvalitet C40, med overdekning 30 mm. For horisontale konstruksjonsdeler var det tillatt å bruke monteringsjern i overdekningssonen. Armeringskvalitet var Ks 50 og Ks 40 (bøyler). Brua ble bygget i perioden 1979-1981. Utførende entreprenør var Ing. T. Furuholmen AS og Dr.ing. A. Aas-Jakobsen var konstruktør.

Bruas konstruksjon og initialkvalitet er nærmere beskrevet i sluttrapport OFU Gimsøystraumen bru: «Klimapåkjenning og tilstandsvurdering» /1/

3.2 Klimabelastning

Brua ligger i et ytre kyststrøk med typisk kystklima.

Automatisk registrering av værdata er utført siden oktober 1993 da det ble montert en værstasjon på brua midt mellom akse 5 og 6. Værstasjonen registrerer vindhastighet og vindretning, temperatur i luft og på kassevegger (nord og sør), relativ fuktighet, soltimer og nedbør.

Temperaturmålingene viser at det er forholdsvis små variasjoner over året. F.eks. varierte månedsmiddel i perioden juli 95 til juni 96 bare fra -2,6 °C til +9,9 °C, dvs. i underkant av 13 °C. Frostpåkjenningen på betongen er liten. Det er svært sjelden at det forekommer spesielt lave vintertemperaturer, og antall perioder med temperatur under 0 °C er få.

Vindstyrken varierer over hele året med kastevinder på opptil 40 m/s. De klart dominerende vindretningene er fra sør og nord, mens brua går ca. øst-vest. Det er mest nedbør ved sør/sørvestlig vind. Dette er sannsynlig årsaken til den karakteristiske «sandblåste» sørflaten.

For mer utførlige opplysninger om værdata og klimabelastning henvises det til egen værdatarapport /2/, samt kapittel 6 i denne rapporten.

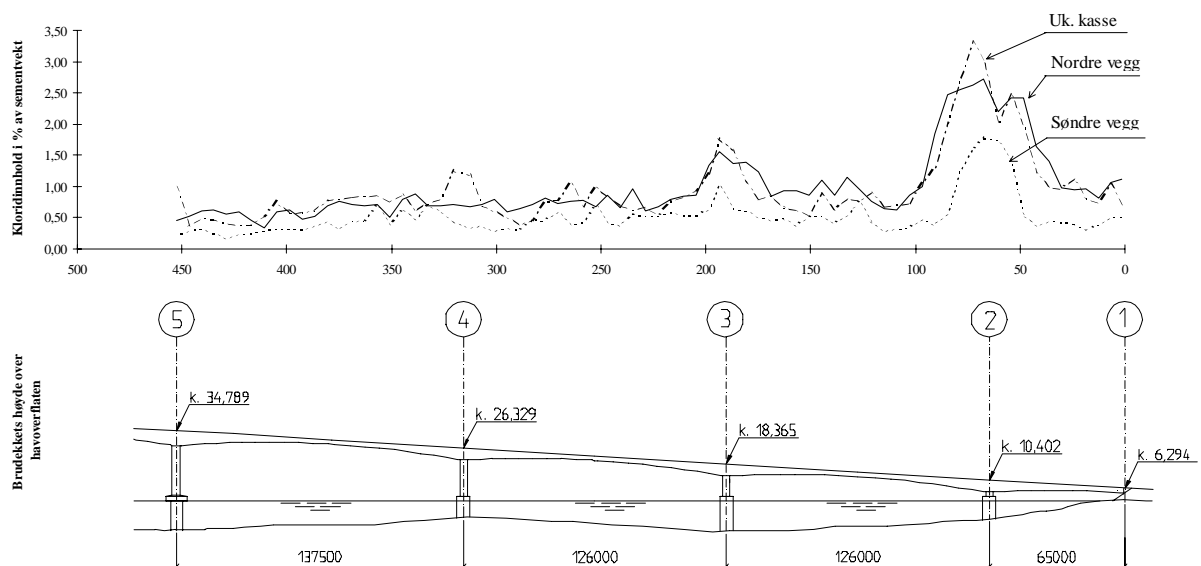
3.3 Kloridbelastning og tilstand

Kloridbelastningen på ulike deler av brua er varierende, se figur 3.3-1. Som beskrevet i sluttrapport OFU Gimsøystraumen bru: «Klimapåkjenning og tilstandsvurdering» /1/, er kloridbelastningen på utsatte kystbruer bestemt hovedsakelig av fire faktorer:

1. **Høyde over sjø.** På Gimsøystraumen bru er kloridbelastningen svært høy opp til 12 - 15 m over sjøen for deretter å avta med høyden.
2. **Lo/le-effekten.** Kloridbelastningen er markert større på flater som ligger i le for vind og nedbør. Effekten kan bero på regnbelastning/ikke-regnbelastning og undertrykk på le-siden som gjør at sjørokk legger seg på betongoverflaten.
3. **Størrelse og form på værpåkjente flater.** Påkjenningen er større på store tverrsnitt og tverrsnitt med uheldig geometrisk utforming (og spesielt på le-siden av disse) i nærheten av søyler.

4. **Mikroklima nederst på søyler.** På Gimsøystraumen bru har kloridinnholdet en tendens til å bli lavere (men er fortsatt høyt) helt nederst på søylene. Dette kan skyldes lokale geometrieffekter eller avvasking av regnvann og sjøvann.

Disse hovedfaktorene virker samtidig, og gir til sammen mønsteret for kloridbelastningen. Størst kloridinntrengning på overbygningen har en på le-siden av store flater i liten høyde over sjøen. Underkant av bruoverbygning hører definitivt med blant le-flatene.



Figur 3.3-1: Gjennomsnittlig kloridnivå i dybde 0–10 mm på undersiden, sørvegg og nordvegg av brukassen på Gimsøystraumen bru.

Tilstanden til brua er preget av at 70-tallets overdekningskrav i Prossesskode og Norsk Standard i for dårlig grad ivaretok bestandighetsmessige hensyn. Dette har spesielt gitt seg utslag for overbygningen der krav til overdekning var 30 mm. Virkelig overdekning er dessuten målt til å ligge i underkant av det spesifiserte kravet. Klimabelastning har ført til at overbygningen rundt akse 2, som ligger svært lavt over vannet, har fått et svært høyt kloridinnhold. Klimabelastningen i dette området er markant høyere på nordsiden av kassevegg som ligger mot nord enn lo-siden. Synlige skader i form av rustutfelling og bom er derfor lokalisert til nordvegg og underkant av kasse på begge sider av akse 2. Bruk av monteringsjern med overdekning på ca. 20 mm har vist seg å ha betydelige og uheldige konsekvenser for det observerte skadebildet til brua. Men også konstruktiv armering er angrepet av korrosjon.

Søylene på brua er i god forfatning. Hovedårsaken er det var stilt krav til høyere overdekning for søyler enn for overbygning. Målinger av overdekning viser at gjennomsnittlig overdekning møter kravet på 50 mm, og svært liten del av armeringen har mindre

overdekning enn 40 mm. Det er ingen alvorlige skader pga. korrosjon på armeringen på søyler, men enkelte steder nederst på søylene har armeringskorrosjon startet opp.

Kloridbelastning og tilstanden til brua er nærmere beskrevet i Sluttrapport OFU Gimsøystraumen bru: «Klimapåkjenning og tilstandsvurdering» /1/.

4 Prøvereparasjoner

4.1 Generelt

Prøvereparasjonene i 1993, 1994 og 1995 omfattet reparasjon av samtlige søyler og overbygningen mellom akse 1 og 3. Alle prøvereparasjonene ble bygget opp på samme måte og ble inndelt i følgende arbeider:

- 1) Forhåndskartlegging
- 2) Mekanisk reparasjon og overflatebehandling
- 3) Instrumentert overvåking
- 4) Dokumentasjon.

Innholdet av prøvereparasjonene, bakgrunnen for de valg som ble gjort i forkant av hver enkelt prøvereparasjon og erfaringer fra hver enkelt prøvereparasjon er utførlig beskrevet i «Sluttrapport OFU Gimsøystraumen bru: Prøvereparasjon og produktutvikling» /3/.

Oppfølging ved hjelp av instrumentert overvåking var en sentral del av prøve-reparasjonene. Målsetningen med instrumenteringen var å dokumentere virkningen av de ulike vedlikeholds- og reparasjonsmetoder som ble benyttet. I instrumenteringen ble det lagt vekt på oppfølging av armeringens korrosjonstilstand og de faktorer som påvirket korrosjonstilstanden, f.eks. betongens fukttilstand. I tillegg var det et mål å foreta felt-utprøving av ulike målesystemer for korrosjonsovervåking.

4.2 Prøvereparasjon 1 (1993)

Prøvereparasjon 1 (1993) omfattet utprøving av forskjellige produkter på mindre prøvelfelter på overbygningen i felt 2. Alle disse prøvelfeltene lå i områder som var bedømt å ligge i grenseområde for armeringskorrosjon bedømt ut fra kloridinnhold i armeringsnivå. Det ble etablert 4 prøvelfelt og 4 referansefelt som belter rundt hele kassen. Prøvelfeltene hadde en bredde på 6,0 m, mens referansefeltene hadde en bredde på 3,0 m. Beliggenheten av prøve- og referansefeltene er vist i tabell 4.2-1.

Tabell 4.2-1: Oversikt over tiltak under prøvereparasjon i felt 2 i 1993.

Lokalisering:		Type behandling	Tiltenkt funksjon
Prøvefelt	Avstand fra akse 2		
1	16 – 22 m	Fjerning av \approx 30 mm kloridholdig betong ved hjelp av vannmeisling. Oppbygging med Rescon DS sprøytebetong. Sandblåsing og overflate-behandling med Rescon Cem-Elastic. Halve feltet tilsatt Rescon GFI-1.	Elastisk sement/lateks-basert tykkfilmsbelegg (Rescon Cem-Elastic) er kloridbremsende, elastisk (rissoverbyggende) og diffusjonsåpent. I halve feltet er mørtelen tilsatt korrosjonsinhibitor.
2	28 – 34 m	Sandblåsing og påføring av Rescon GFI-2 og deretter overflatebehandling med Rescon Cem-Elastic tilsatt Rescon GFI-2.	Kloridbremsende, elastisk, diffusjonsåpent belegg tilsatt korrosjonsinhibitor. Underlag også tilsatt korrosjonsinhibitor.
3	95,5 – 101,5 m	Sandblåsing og overflatebehandling med Rescon Cem-Elastic.	Kloridbremsende, elastisk, diffusjonsåpent belegg.
4	113,5 – 119,5 m	Sandblåsing og overflatebehandling med Rescon CI-brems.	Impregneringsmateriale som er vannavvisende og derved kloridbremsende.

Referansefelt 1 ligger inntil prøvelfelt 1 ($X = 22 - 25$ m).

Referansefelt 2 ligger inntil prøvelfelt 2 ($X = 34 - 37$ m).

Referansefelt 3 ligger inntil prøvelfelt 3 ($X = 92,5 - 95,5$ m).

Referansefelt 4 ligger inntil prøvelfelt 4 ($X = 110,5 - 113,5$ m).

Før prøvereparasjonen startet ble det foretatt en detaljert forhåndskartlegging av tilstanden til prøvelfelter og referansefelt, det vises til /4/. Sluttrapporten fra prøvereparasjonen /3/ gir flere detaljer om prøvereparasjonen.

4.3 Prøvereparasjon 2 (1994)

Prøvereparasjon 2 (1994) ble utført på søylene i akse 3, 4 og 5 fra overkant av fundamentet og opp til underkant av overbygningen. Prøvereparasjon 2 (1994) omfattet en mekanisk reparasjon av alle betongskader/svakhetssoner som avskallinger, bomsoner, støpe-skjøter osv. etterfulgt av forskjellige typer overflatebehandling på søylene i akse 3, 4 og 5. På de øvrige søylene ble det foretatt mekanisk reparasjon etterfulgt av overflatebehandling med Rescon CI-brems.

Før prøvereparasjonen startet ble det foretatt en visuell kontroll av alle flatene til prøvesøylene. I tillegg ble det etablert et prøvelfelt med bredde på 2 meter og høyde på 1 meter i 1-2 m høyde over fundamentene på alle langsiden. I disse prøvelfeltene ble det utført materialundersøkelser, og det vises til /3/ for detaljert beskrivelse av utført arbeid.

Det ble benyttet 4 forskjellige systemer for overflatebehandling av søylene i akse 3, 4 og 5. I tabell 4.3-1 er overflatebehandlingen som ble påført de forskjellige søylene og flatene beskrevet.

Tabell 4.3-1: Oversikt over overflatebehandling på søylene i akse 3, 4 og 5.

Lokalitet		Type behandling	Tiltenkt funksjon
Søyle nr.:	Flateposisjon		
3	Øst	Overflatebehandling med Rescon CI-brems	Vannavvisende, kloridbremsende impregneringsmiddel
	Sør	Overflatebehandling med Rescon CI-brems	Vannavvisende, kloridbremsende impregneringsmiddel
	Vest	Ingen behandling	Referansefelt
	Nord	Overflatebehandling med Rescon CI-brems	Vannavvisende, kloridbremsende impregneringsmiddel
4	Øst	Overflatebehandling med Rescon Cem-Elastic	Diffusjonsåpent, elastisk, kloridbremsende tykkfilmsbelegg
	Sør	Overflatebehandling med Rescon Epoflex	Diffusjonstett, kloridtett tykkfilmsbelegg
	Vest	Overflatebehandling med Rescon Epoflex	Diffusjonstett, kloridtett tykkfilmsbelegg
	Nord	Overflatebehandling med Rescon Cem-Elastic	Diffusjonsåpent, elastisk, kloridbremsende tykkfilmsbelegg
5	Øst	Overflatebehandling med Rescon CI-brems og Rescon Protect Lasur	Kloridbremsende, karbonatiseringsbremsende, diffusjonsåpent, estetisk
	Sør	Overflatebehandling med Rescon CI-brems og Rescon Protect Lasur	Kloridbremsende, karbonatiseringsbremsende, diffusjonsåpent, estetisk
	Vest	Ingen behandling	Referansefelt
	Nord	Overflatebehandling med Rescon CI-brems og Rescon Protect Lasur	Kloridbremsende, karbonatiseringsbremsende, diffusjonsåpent, estetisk

4.4 Prøvereparasjon 3 (1995)

Prøvereparasjon 3 (1995) ble utført på undersiden av overbygningen i spenn 1 og 2, dvs. mellom akse 1 og akse 3. Prøvereparasjon 3 (1995) omfattet en mekanisk reparasjon av alle betongskader og svakhetssoner som avskallinger, bomsoner, støpeskjøter osv. etterfulgt av ulike typer overflatebehandling.

Meisling ble utført med håndholdt, luftdrevet utstyr. Rengjøring av armering ble utført med sandblåsing. Det var gitt et krav om at armeringen skulle ha renhetsgrad tilsvarende Sa 2,5. I støpeskjøter hvor det er tett armering og i dype sår var det vanskelig å tilfredsstille kravet, spesielt på baksiden av armeringen. Det var også vanskelig å tilfredsstille dette kravet når det var omfattende groptæring, da små og tynne hulrom i jernet ikke gir adkomst for sandblåserstrålen.

Oppmørtlingen ble i hovedsak utført med tørrsprøyting av Rescon DS-RSF. Dette er en modifisert utgave av Rescon DS som ble benyttet i de første prøvereparasjonene. Hovedforskjellen er at førstnevnte har mindre svinn.

Type av overflatebehandling ble valgt på bakgrunn av bedømming av tilstand. Dette er beskrevet i «Sluttrapport OFU Gimsøystraumen bru: Prøvereparasjon og produktutvikling» /3/. Hovedprinsipp var at de mest utsatte delene skulle ha den mest omfattende overflatebehandlingen. Lokalisering av de ulike overflatebehandlingene med funksjons-beskrivelse er vist i tabell 4.4-1.

Tabell 4.4-1: Oversikt over overflatebehandling i felt 1 og 2 fra Prøvereparasjon 3 (1995).

Lokalisering		Type behandling	Tiltenkt funksjon
Felt nr.	Avstand i meter fra (angitt) første akse		
1 (akse 1-2)	11,00-38,45	Overflatebehandling med Rescon Cem- Elastic	Diffusjonsåpent, elastisk, kloridbremsende tykkfilmsbelegg
1 (akse 1-2)	38,45-50,95	Overflatebehandling med Rescon Epoxy Cem L	Kloridtett, diffusjonstett tykkfilmsbelegg
1 (akse 1-2) - 2 (akse 2-3)	50,95 - 16,00	Overflatebehandling med Rescon Cem Elastic	Diffusjonsåpent, elastisk, kloridbremsende tykkfilmsbelegg
2 (akse 2-3)	25,00-28,00	Overflatebehandling med Rescon Cem-Elastic	Diffusjonsåpent, elastisk, kloridbremsende tykkfilms belegg
2 (akse 2-3)	37,00-92,50	Overflatebehandling med Rescon Silimp 100 + Rescon Protect Lasur	Kloridbremsende, karbonatiseringsbremsende, diffusjonsåpent, estetisk
2 (akse 2-3)	119,5-122,5	Overflatebehandling med Rescon Silimp 100	Vannavvisende, kloridbremsende impregneringsmiddel

De udekkede delene av felt 2 tilhørte Prøvereparasjon 1 (1993) og ble følgelig ikke berørt i 1995.

5 Beskrivelse av utført arbeid

5.1 Strategi og mål for instrumenteringen på brua

Hensikten med den utførte instrumenteringen var flersidig. Først og fremst var målet å ha et overvåkingssystem som gav informasjon om effekten av de forskjellige vedlikeholds- eller reparasjonstiltak som skulle utprøves i prøvereparasjonene. Det var derfor lagt vekt på å inkludere målinger som kunne gi informasjon om sannsynlige effekter av de ulike behandlingene. De effekter man tok sikte på å måle var:

- Korrosjonspotensialet til armeringen
- Polarisasjonsmotstand for armeringen (en funksjon av korrosjonshastighet)
- Elektrisk motstand (en funksjon av fuktighet og en viktig parameter for korrosjonshastighet)
- Fukttilstanden for betongen
- Oksygentransport i betongen
- Temperatur.

Vurderingen av de forskjellige vedlikeholdstiltak skulle delvis (i tillegg til inspeksjonsresultater) baseres på sammenligning av sensordata fra prøve- og referansefelt og delvis på langtidsutviklingen av de forskjellige sensordata.

Et annet viktig mål med den utførte instrumenteringen var feltutprøving av målesystemer. Det er liten erfaring med flere av denne typer målinger, det gjelder både i Norge og internasjonalt, og målet med installeringen var derfor også å komme fram til et instrumenteringsopplegg som ved bruk i fremtidige prosjekter kunne gi verdifull informasjon om sentrale korrosjonsparametre. Ved prosjektets start ble det derfor foretatt en evaluering av mulige metoder og sensortyper som skulle inngå i instrumenteringsopplegget.

5.2 Utført instrumentering

5.2.1 Typer sensorer og instrumenteringsomfang

Deler av Gimsøystraumen bru ble instrumentert for korrosjonsovervåking i perioden 1993 til 1995. Det ble installert sensorer for kartlegging av armeringens korrosjonstilstand og faktorer som påvirker denne.

Tabell 5.2-1 viser en oversikt over typer sensorer som er benyttet og instrumenteringsomfanget på Gimsøystraumen bru. Prinsipiell virkemåte for hver sensortype er beskrevet seinere i dette kapitlet.

Tabell 5.2-1: Instrumenteringsomfanget på Gimsøystraumen bru.

Type instrumentering / sensor	Antall sensorer				
	Prøverep. 1 (1993)	Prøverep. 2 (1994)	Prøverep. 3 (1995)	Tillegg (1995)	Totalt 1993-1995
<i>Korrosjonspotensial:</i>					
ERE 10/20	16	12	4	--	32
Ag/AgCl	--	6	--	4*	10
Grafitt	11	--	--	--	11
Bly	11	--	--	--	11
Polarisasjonsmotstand	12	12	4	4	32
FCB-sondeplate	2	--	--	--	2
Oksyngrensetransport	15	6	2	2	25
<i>Elektrisk motstand:</i>					
Multiring	14	--	--	--	14
2-bolter	14	12	--	--	26
Wenner-elektroder	--	--	4	4	8
Belegg	7	--	--	--	7
Relativ fuktighet	8	8	--	--	16
Temperatur	16	18	4	6	44

* De fire Ag/AgCl elektrodene som ble installert under tilleggsinstrumenteringen i 1995 viste ustabile verdier og ble i 1996 erstattet med fire ERE 20 elektroder.

5.2.2 Referanseelektroder for måling av korrosjonspotensialer

For registrering av armeringens korrosjonspotensial er fire typer referanseelektroder benyttet. Disse er:

- Manganoksid (ERE 10, ERE 20)
- Sølv/sølvklorid
- Grafitt
- Bly.

For å få mer erfaring med disse referanseelektroderne som alle blir benyttet i Norge og internasjonalt, ble elektrodene i mange lokaliteter installert i grupper for å kunne sammenliknes. Tabell 5.2-2 viser egenpotensialet til ulike referanseelektroder og deres innbyrdes potensialforhold.

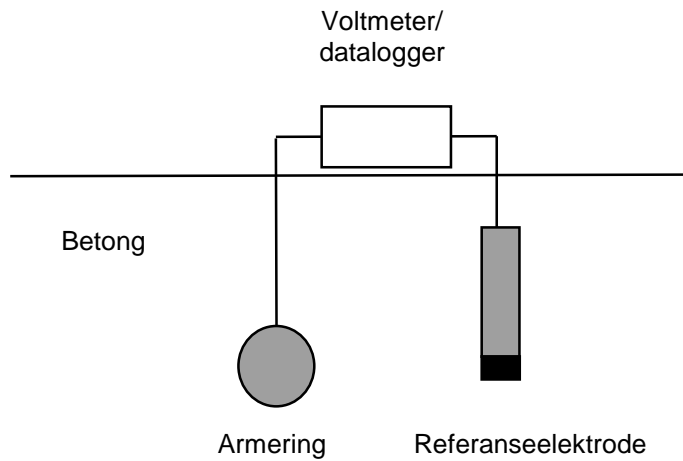
Tabell 5.2-2: Referanseelektroders potensial i forhold til standard hydrogenelektrode (SHE) og Cu/CuSO₄ ved 25 °C.

Referanseelektrode	Potensial mot SHE (mV)	Potensial mot Cu/CuSO ₄ (mV)	Referanse
Cu/CuSO ₄ (sat)	+316	0	ASTM-C876 /5/
Ag/AgCl, sat KCl	+199	-117	R.D. Caton /6/
Ag/AgCl, 1M KCl	+235	-81	ASTM G3-89 /7/
Mettet kalomel (SCE)	+244	-72	ASTM G3-89 /7/
MnO ₂ (ERE10/ERE20)	≈+395 ^{*)}	≈+79	Force & Myrdal, Videm, /8/, /9/
Bly ^{**)}	ca. -450	ca. -770	Myrdal, Videm /9/
Grafitt ^{**)}	ca. +150	ca. -170	Myrdal, Videm /9/

^{*)} Potensialet i mettet Ca(OH)₂ (pH = 12,5). Elektroden er pH-følsom, ca. -30 mV/ΔpH som følge av «liquid junctions» i overgangen elektrode/ytre elektrolytt. I betong med pH = 13,5 er derfor potensialet ca. +365 mV mot SHE.

^{**)} Omtrentlig verdi i betong. Bly og grafitt er oksygen- og pH-følsomme.

Registrering av korrosjonspotensial er en passiv måling der måleobjektet (armeringen) ikke påtrykkes elektriske signaler. Se prinsippskisse i figur 5.2-1.

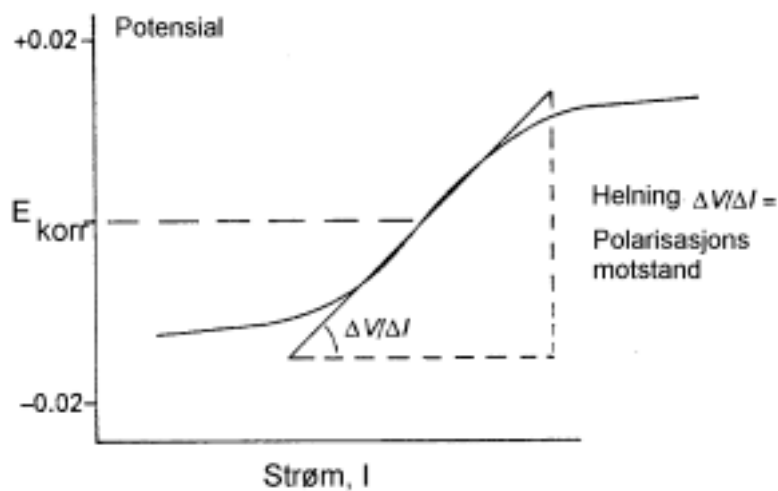


Figur 5.2-1: Måling av armeringens korrosjonspotensial ved hjelp av innstøpt referanse elektrode.

5.2.3 Polarisasjonsmotstand / lineærpolarisering

Teori

Polarisasjonsmotstandsteknikken er basert på at polarisasjonskurvene har et lineært område like ved korrosjonspotensialet, som vist på figur 5.2-2.



Figur 5.2-2: Prinsipp for lineærpolariseringsmålinger og typisk resultatkurve.

I dette området er der en lineær sammenheng med polarisasjonsmotstanden gitt av Sterns ligning /16/:

$$R_p = \Delta E / \Delta I \quad (\text{Ligning 5.1})$$

der $\Delta E = E_{\text{påtrykt}} - E_{\text{korr.}}$ (ved LPR-målinger prøver en å holde ΔE innenfor ± 10 mV).
 R_p -verdien har igjen sammenheng med korrosjonsstrømmen $I_{\text{korr.}}$ etter følgende uttrykk:

$$I_{\text{korr.}} = B / R_p \quad (\text{Ligning 5.2})$$

hvor B er gitt av:

$$B = \frac{\beta_a \cdot \beta_k}{2,303(\beta_a + \beta_k)} \quad (\text{Ligning 5.3})$$

Korrosjonshastigheten $i_{\text{korr.}}$ vil være gitt av:

$$i_{\text{korr.}} = \frac{B}{R_p \cdot A} \quad (\text{Ligning 5.4})$$

β_a og β_k er Tafelkonstantene for henholdsvis anodereaksjonen og katodereaksjonen. For aktivt korroderende stål i betong har en funnet /11/ at både anodisk og katodisk Tafelkonstant er omkring 120 mV og da blir B-verdien i likning 5.3 lik 26 mV. For stål som er passivt vil den anodiske Tafelkonstanten fortsatt typisk være 120 mV, mens den katodiske Tafelkonstanten går mot uendelig. I dette tilfellet blir B-verdien 52 mV. Disse B-verdiene brukes så i likning 5.4 for å regne ut korrosjonshastigheten til innstøpt stål.

Opprinnelig baserte Stern and Geary /16/ sin teori for å fastlegge korrosjonshastigheter gjennom lineær polarisering på følgende antakelser:

- Anodiske og katodiske reaksjoner involvert i korrosjonsprosessen var aktiveringskontrollerte.
- Spenningsfallet i elektrolytten som målinghen ble utført i var neglisjerbart.
- Korrosjonspotensialet til metallet er signifikant forskjellig fra det reversible potensialet for de anodiske og katodiske reaksjoner involvert.

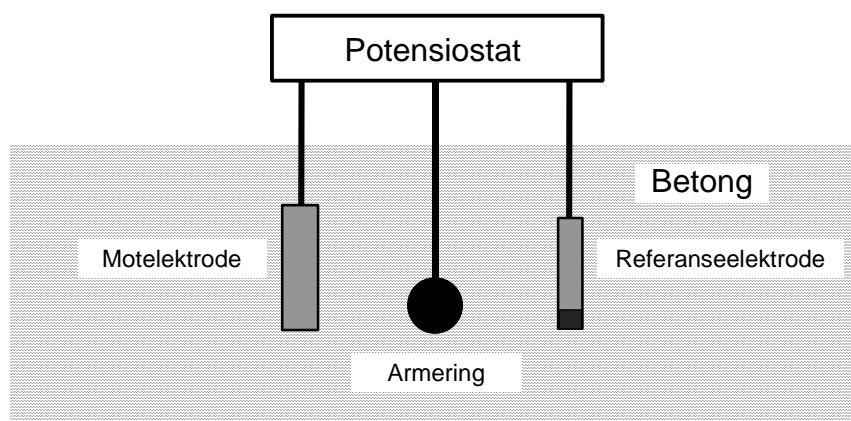
Oldham og Mansfield /22/ modifiserte tilnærmingsprinsippet til Stern og Geary, og utviklet analytiske teknikker som modererte forutsetningene gitt ovenfor, bl.a. slik at korrosjonshastigheten kunne bestemmes selv om diffusjons- eller transportkontrollerte reaksjoner var involvert.

Ved bruk av lineærpolariseringsmålinger for å fastlegge korrosjonshastigheten til stål innstøpt i betong, må en være oppmerksom på følgende feilkilder som kan påvirke resultatene:

1. Betong har relativt høy elektrisk motstand, og dette vil kunne gi et spenningsfall (IR) som følge av strømtransport mellom motelektrode og arbeidselektrode. Dette spenningsfallet, som vil øke som funksjon av økende strøm, vil gi en feil i relasjonen $(\Delta E/\Delta I)_{E_{korr}}$ og fører til for høye verdier for R_p . Effekter av ohmsk spenningsfall i målekretsen kan unngås dersom det brukes en potensiostat med innebygget IR-kompensasjon.
2. Selv om målingene foretaes i et potensialområde som ligger nær stålets korrosjonspotensiale, vil en i betong erfare at det tar lang tid før likevekt innstilles. Dette kan skyldes at hastigheten av de elektrokjemiske reaksjonene er transportkontrollerte eller at den elektrokjemiske responsen skyldes tidsavhengige oksidtransformasjoner. Måletiden vil derfor kunne påvirke måleresultatet. Korte måletider vil kunne gi for høyere strømverdier enn det som registreres ved lengre måletider. Dette vil spesielt være situasjonen for stål som er passivt eller i en ikke-korroderende aktiv tilstand.
3. Ved feltmålinger ligger den største usikkerheten i at måling av polarisasjonsmotstand og ikke minst omregning av denne til korrosjonshastighet betinger at kjenner arealet av armering som målingen er utført på. Hvis man definerer den virkelige polarisasjonsmotstand som $R_{p_{reell}}$ og den målte som $R_{p_{målt}}$, vil $R_{p_{reell}}/R_{p_{målt}}$ representere feilen i målingen. Denne feilen er avhengig av mange forhold som eksempelvis:
 - Størrelse på motelektroden (større feil ved lite areal på motelektrode)
 - Armeringskonfigurasjon og geometriske forhold
 - Variasjon i avstand mellom motelektrode og arbeidselektrode og mellom arbeidselektrode og referanselektrode.

Det er vanskelig å tallfeste feilen de ulike kildene kan representere. For innstøpt stål i passiv tilstand kan feilen og usikkerheten i målingen bli svært stor, mens for aktivt korroderende stål vil feilkildenes innflytelse bli betraktelig mindre. En kan derfor ikke ha forventning om å kartlegge korrosjonshastigheter eksakt med denne teknikken, men heller anse metoden som et verktøy til å identifisere spesielle områder hvor det er høy korrosjonsaktivitet. Dette betinger imidlertid at målingene utføres av personell med spesiell kompetanse på måleteknikk og tolkning av resultater.

Polarisasjonsmotstand på innstøpt stål måles ved hjelp av en potensiostat som regulerer strømmen mellom motelektrode og arbeidselektrode slik at forhåndsinnstilt potensial mellom arbeidselektrode og referanselektrode oppnåes. Måleoppsettet er skjematisk vist i figur 5.2-3.



Figur 5.2-3: Måling av polarisasjonsmotstand ved hjelp av innstøpt motelektrode og innstøpt referanseelektrode.

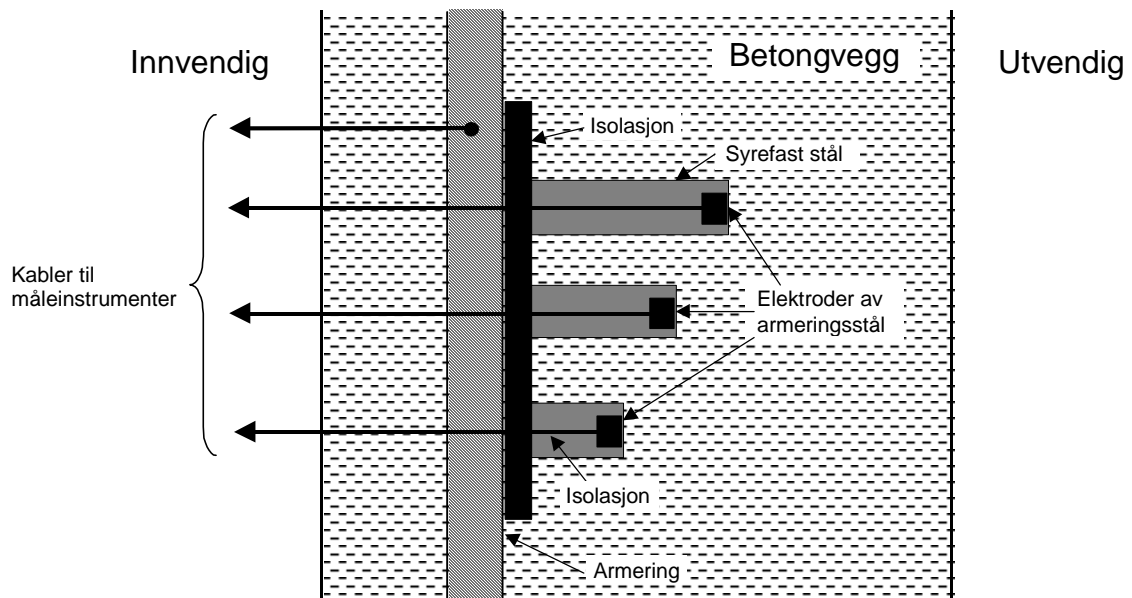
På Gimsøystraumen bru er det montert en motelektrode i form av to kortsluttede stålbolter, en på hver side av armeringen. Dette er gjort for å oppnå en mest mulig jevn fordeling av strømmen til/fra armeringen under polariseringen. Under Prøvereparasjon 1 (1993) ble det valgt å kappe armeringen til ca. 8 cm eksponert lengde for å sikre et definert areal ved bestemmelse av korrosjonshastigheten. Dette ble ikke gjort under Prøvereparasjon 2 (1994) og 3 (1995) fordi det var tvil om den avkappede lengden var representativ for korrosjonstilstanden til hovedarmeringen. Referanselektroden som er brukt under polariseringen er også støpt inn i betongen og ligger nær opptil armeringsbit/armering som skal polariseres for å minimalisere effekten av IR-fallet under målingen. Potensiostaten som ble brukt under målingene var en automatisert Princeton Applied Research Co (PARC) 263 koplet til en bærbar PC for dataregistrering. Denne potensiostaten har en innebygget funksjon for IR-kompensering, men denne ble ikke brukt fordi det viste seg vanskelig å få dette til å virke stabilt under feltbetingelsene på Gimsøystraumen. Alle målinger på brua er derfor uten IR-kompensering med de usikkerheter det innebærer.

5.2.4 FCB-sonde

Sonden, som er utviklet av SINTEF (FCB) i Trondheim, registrerer ikke korrosjonstilstanden til armeringen, men tilstanden til stålsonder plassert i betongen. To slike sonder ble brukt under Prøvereparasjon 1 (1993) i de mekanisk reparerte prøvefeltene 1A og 1B. Sonden består av 3 stålbolter montert på en plate. Platen ble forankret til armeringen etter at betongen var fjernet ved vannmeisling. Boltene er stilt inn for avstand 20, 30 og 40 mm til ny overflate med sprøytebetong. FCB-sonden er vist i figur 5.2-4.

FCB-sonden har en egen referanseelektrode av type ERE10 (ikke vist på figur 5.2-4). Det eksponerte arealet for stålelektrodene er 1 cm².

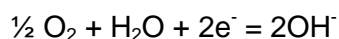
Ved å følge boltenes potensial og polarisasjonsmotstand vil en etterhvert kunne detektere korrosjonsaktivitet som følge av kloridinntrengning.



Figur 5.2-4: FCB-sonde.

5.2.5 Oksygentransport

Ved å potensiostatisk polarisere en innstøpt sonde eller et isolert segment av armeringsnett katodisk vil en kunne få informasjon om katodeaktiviteten på det innstøpte stålet. Da den dominerende katodereaksjonen er oksygenreduksjon, vil denne type måling foretatt over lang tid (måneder eller år) kunne gi informasjon om oksygentransporten til det innstøpte stålet. Denne type informasjon er viktig fordi den kan belyse korrosjonsform av innstøpt stål lokalt, fare for «makrocelle» korrosjon og i hvilken grad ulike miljøparametre påvirker korrosjonsprosessen. Målingene er basert på at når det påtrykkes et negativt potensial (innen et visst potensialområde) på stål innstøpt i betong er den eneste katodereaksjonen reduksjon av oksygen på ståloverflaten:



(Ligning 5.5)

Ved å påtrykke et konstant potensial innen dette potensialområdet på stålet kan oksygentransporten (eller retttere sagt hastigheten for oksygenreduksjon på ståloverflaten) måles som en elektrisk strøm. Ved å anvende Faradays lov kan massetransporten (fluksen) beregnes /7/:

$$J = I_{\text{grensestrøm}} / nF \quad (\text{Ligning 5.6})$$

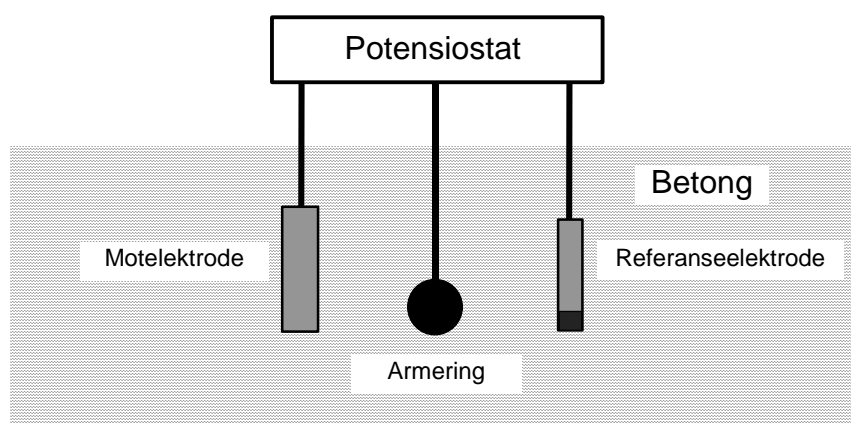
$$J = \text{fluks} \quad (\text{mol/m}^2\text{s})$$

$$I = \text{strømtetthet} \quad (\text{A/m}^2)$$

$$n = \text{overføringstall (valens)} \quad (4)$$

$$F = \text{faradays konstant} \quad (\text{As})$$

Målingene utføres normalt ved hjelp av en potensiostat, referanseelektrode, motelektrode og selve arbeidselektroden som vist i figur 5.2-5.



Figur 5.2-5: Måling av oksygenreduksjon med innstøpte elektroder.

Motelektroden (anoden) kan være inert eller korroderende. Med inert elektrode vil det foregå en tilsvarende oksygenproduksjon på anoden som oksygenreduksjonen på katoden. På Gimsøystraumen bru ble det brukt korroderende anoder (galvaniserte bolter) der anodereaksjonen er produksjon av Zn-ioner.

5.2.6 Elektrisk motstand

Korrosjon av stål innstøpt i betong innebærer en strømtransport gjennom betongen fra korroderende områder til ikke-korroderende områder. Derfor vil den elektriske motstanden til betongen spille en viktig rolle når det gjelder størrelsen på de strømmene som kan oppstå lokalt på en betongkonstruksjon. Den elektriske motstanden vil være

påvirket av mange parametre som strukturell oppbygging av betongen lokalt (tilslag/pasta-forholdet og armeringskonfigurasjon), betongens porøsitet og porestruktur, porestrukturens vannmetningsgrad (fuktinnhold), porevannets kjemi (oppløste ioner), kloridinnhold og temperatur. Den elektriske motstanden kan derfor variere lokalt mellom ulike anodiske og katodiske områder, såvel som over kort tid pga. temperaturendring og over lengre tid pga. endringer i fuktinnhold og /eller oppløste ioner.

Det forhold at den elektriske motstanden lokalt vil være påvirket av betongens fuktinnhold innebærer at motstandsmålinger indirekte også vil reflektere betongens vannmetningsgrad.

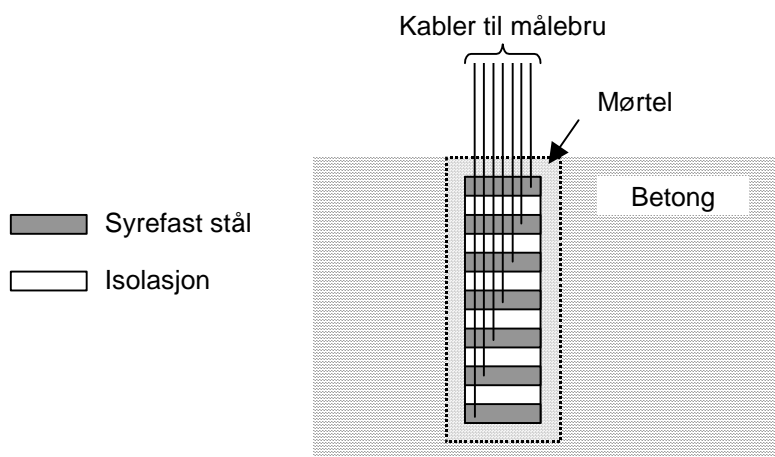
Ved feltinstallasjoner vil det normalt være umulig å måle spesifikk motstand pga. ubestemt geometri osv. Felldata vil derfor primært være nyttige i forbindelse med å detektere endringer/forskjeller over tid og lokalitet, samt til å registrere eventuelle effekter av overflatebehandling og andre reparasjons- og vedlikeholdstiltak.

Motstand måles vanligvis ved å registrere spenningsfallet som oppstår når en kjent strøm sendes mellom to elektroder. Spenningsfallet kan registreres mellom de strømførende elektrodene eller mellom strømløse punkter plassert i en fast avstand i strømfeltet. Vanligvis anvendes en vekselstrøm for måling av motstand for å unngå polariserings-effekter på de strømførende elektrodene.

Ulike metoder og sonder kan anvendes for måling av elektrisk motstand i betongen. På Gimsøystraumen bru er det benyttet fire ulike sondetyper:

Multiringelektrode

Sonde bestående av 9 stålringer som er «stabet» oppå hverandre med et tynt sjikt elektrisk isolerende material (plast) mellom hver ring. Sonden er plassert slik at ytterste ring flukter med betongoverflaten og de øvrige ringene befinner seg i økende dybde fra overflaten. Den elektriske motstanden måles direkte mellom hver ring med vekselstrøm og målingene skal gi en motstandsprofil i betongoverdekningen. Multiringelektroden er vist i figur 5.2-6.



Figur 5.2-6: Multiringelektrode.

2-bolt elektrode

Sonde bestående av to stålbolter plassert noen cm fra hverandre i betongoverdekningen. Motstanden mellom boltene måles direkte med vekselstrøm.

4-bolt elektrode (Wennerelektrode)

Sonde bestående av fire stålbolter plassert på linje med innbyrdes lik avstand (noen cm) i betongoverdekningen. Motstanden mellom de to innerste boltene beregnes ut fra målt spenning mellom disse når vekselstrøm sendes mellom de to ytterste boltene. Ved Wenner-prinsippet vil den store og varierende motstanden i overgangssonen stål-mørtel-betong **ikke** registreres, i motsetning til de to ovenfornevnte sondetypene. Wenner-målinger karakteriserer derfor best endringer i betongens motstand. Et elektrodeoppsett etter Wennerprinsipper er vist i figur 5.2-7.

Med Wennerprinsippet er det en teoretisk sammenheng mellom målt motstand og betongens spesifikke motstand:

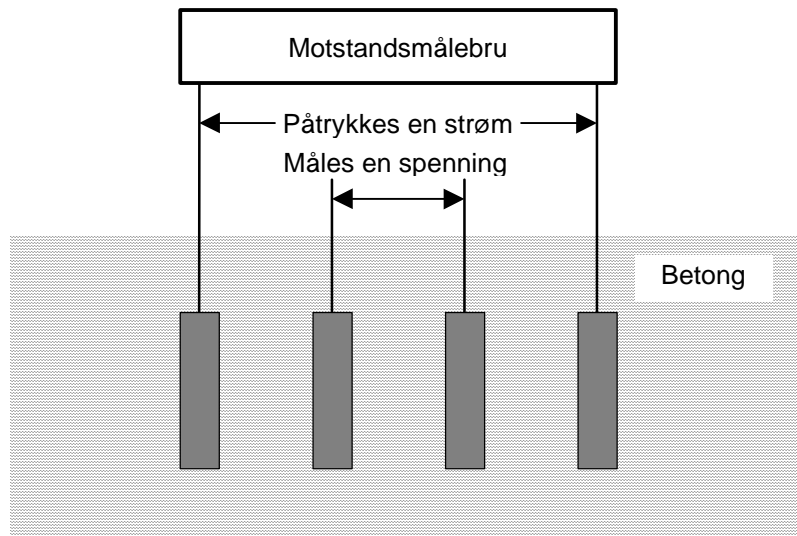
$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot V/I \quad (\text{Ligning 5.7})$$

a = avstanden mellom elektrodene

V = spenningen

I = strømmen.

Uttrykket gjelder for en ideell situasjon med et uendelig betongvolum og uten påvirkning fra nærliggende armering.



Figur 5.2-7: Motstandsmåling med Wennerelektrode.

Elektrisk ledende belegg

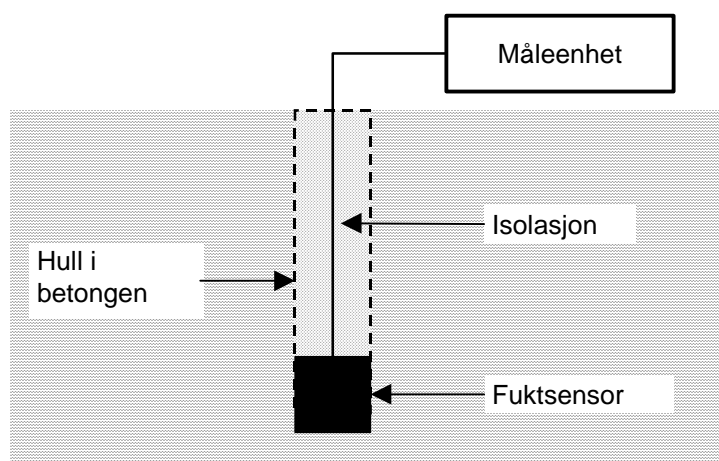
Sonde bestående av to parallelle striper av ledende belegg på betongoverflaten. Avstanden mellom dem er noen få cm. Motstanden mellom stripene måles direkte med vekselstrøm. Den målte motstanden vil først og fremst reflektere motstanden i betongens overflatesjikt i motsetning til de andre 3 sondetypene som ligger 10-50 mm inn fra overflaten.

5.2.7 Fuktmålinger / relativ fuktighet

Fukttilstanden og dens variasjon over sted og tid kan ha stor betydning for ulike nedbrytningsprosesser i betongen. Samtlige delprosesser er fuktavhengige med hensyn på utviklingen av armeringskorrosjon. Betydningen av fukt for ulike prosesser kan listes som følger:

- Karbonatisering er raskest ved ca. 50 % relativ fuktighet (RF)
- Kloridinntrengning er maksimal under veksling mellom uttørking og kapillærsug av saltvann
- Oksygentransport er raskest i tørr betong
- Vanntettet betong har lavest elektrisk motstand.

Bestemmelse av fukttilstand og dens variasjon over tid er derfor viktig for å forstå nedbrytningsmekanismer, for å utføre levetidsvurderinger og for å bestemme levetidsforlengende tiltak.



Figur 5.2-8: Prinsippskisse for måling av relativ fuktighet i betong.

Måling av relativ fuktighet i kombinasjon med temperatur er utført på Gimsøystraumen bru med kommersielt tilgjengelige målesonder. Disse måler samsvarende verdier for RF og temperatur i et forseglet hull boret inn i betongen. Med jevne mellomrom ble sondene kalibrert over saltløsninger med kjent RF. En prinsippkisse av målesystemet er vist i figur 5.2-8. Fuktnivået i betongen er også målt ved å bestemme vannmettingsgraden DS (Degree of Saturation) på utmeislede prøver. Bestemmelsen gjøres etter følgende måte:

Med vinkelsliper skjæres to spor med ca. 5 cm avstand og tilsvarende dybde. Det meisles ut prøver i to nivåer som pakkes omhyggelig i plast. I laboratoriet veies prøvene, tørkes ved 105 °C og veies for bestemmelse av vanninnhold. Deretter blir prøvene vannmettet og veid på nytt. Differansen mellom vannmettet og tørr betong = porevolumet og forholdet mellom opprinnelig vanninnhold og porevolumet = vannmettingsgraden (DS) for betongen. Prosedyre for prøveuttak er gitt i metodebeskrivelse 15.518 i Håndbok 015 «Feltundersøkelser» /12/, mens fullstendig prosedyre for bestemmelse av vannmetningsgrad er beskrevet i OFU Gimsøystraumen bru: «Anbefalinger for inspeksjon, reparasjon og overflatebehandling av kystbruer i betong» /13/.

5.2.8 Temperaturmåling

Temperaturen i betongen er spesielt viktig ved tolkning av måleresultater som er fremkommet fra øvrig instrumentering. På brua ble derfor temperaturen målt nær de innstøpte sondene i ulike dybder i betongen. Det ble benyttet termoelementer av typen kopper/konstantan.

Som regel ble termoelementtrådene loddet, men ved en anledning, Prøvereparasjon 1 (1993), ble ledningene bare tvunnet sammen før innstøping. Det viste seg at flere av

termoelementene med sammentvinnede tråder ble ustabile. Termoelementtrådene må loddes og elementet kalibreres før innstøping.

5.3 Plassering og montering av sonder

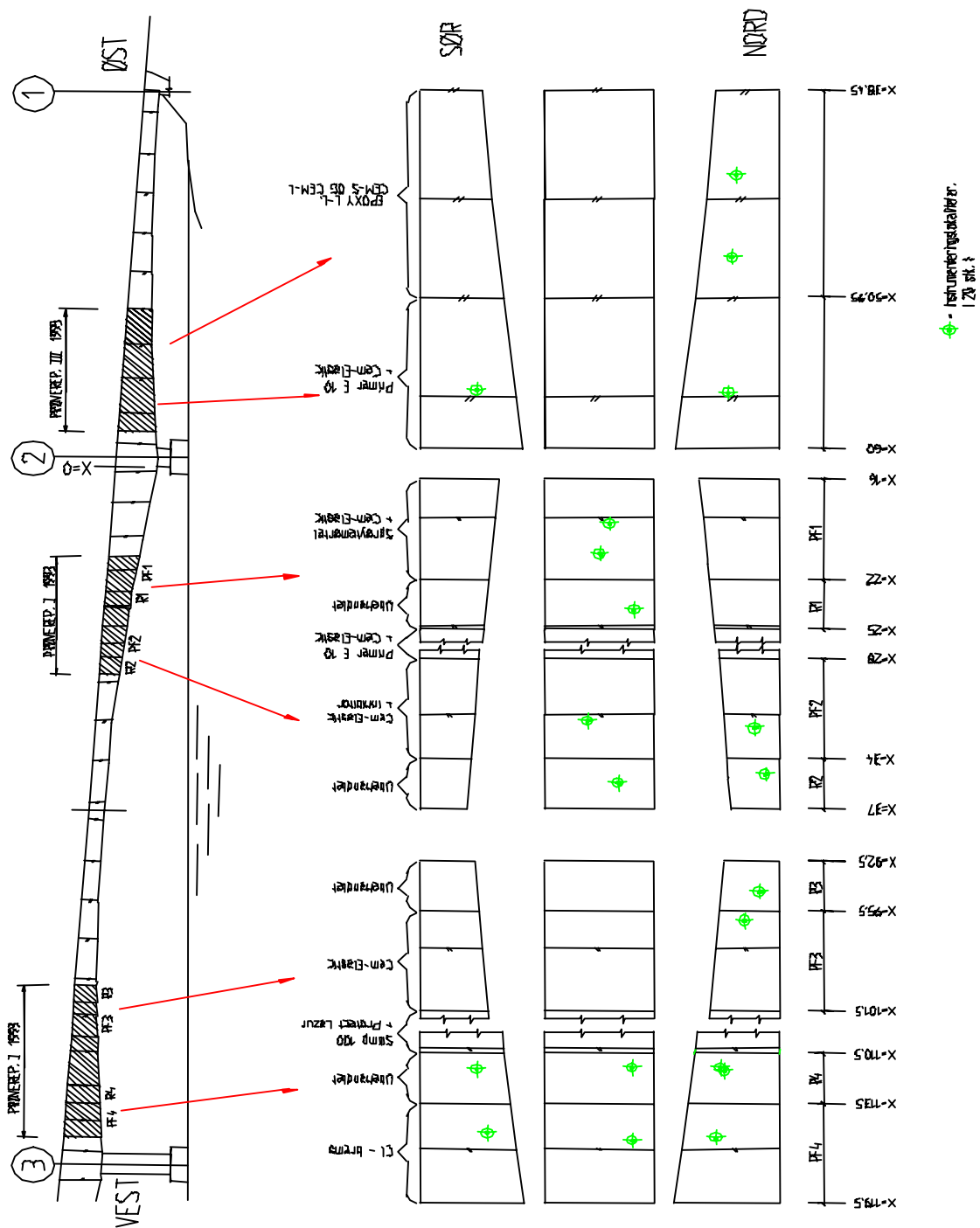
De ulike sensorene er plassert i grupper i prøve- og referansefelt i brukassa på overbygning og i yttervegg på søyler. Følgende områder er instrumentert:

- Prøvereparasjon 1 (1993) Brukassa i overbygning mellom akse 2 og 3.
Utvendig sørvegg
Utvendig underside
Utvendig nordvegg.

- Prøvereparasjon 2 (1994) Søyler i akse 3, 4 og 5.
Utvendig østvegg
Utvendig vestvegg.

- Prøvereparasjon 3 (1995) Brukassa i overbygning mellom akse 1 og 2.
Utvendig sørvegg
Utvendig nordvegg
Innvendig nordvegg.

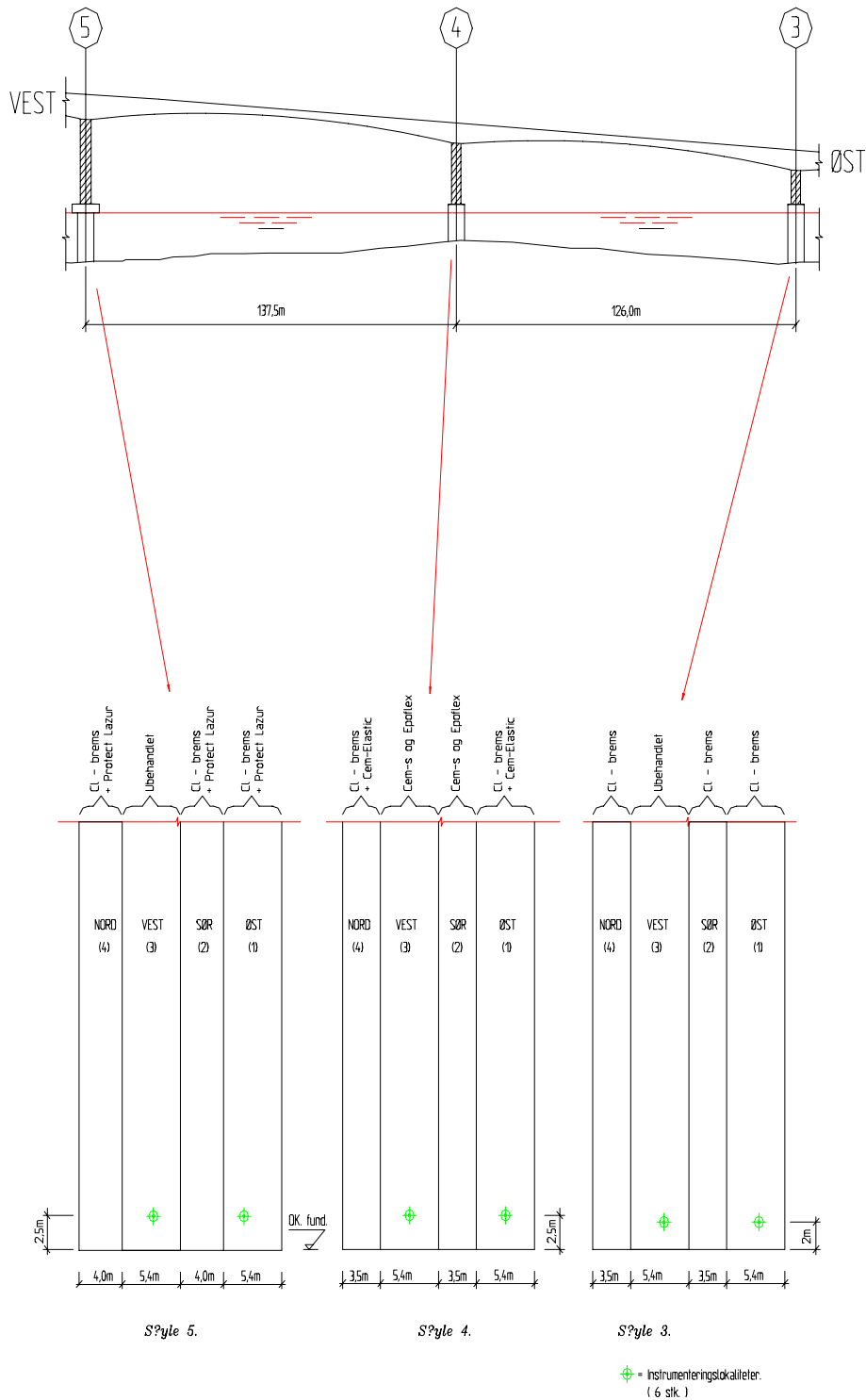
Figurene 5.3-1 og 5.3-2 viser lokaliseringen av prøveparasjoner og plasseringen av instrumenteringen i henholdsvis overbygning og søyler på Gimsøystraumen bru.



NY FIGUR SKAL INN ! ER SENDT DIREKTE TIL TRYKKERI !!!!!

Figur 5.3-1: Prøvereparasjoner og instrumenteringslokalteter på overbygning i spenn 1 og 2.

NY FIGUR SKAL INN ! ER SENDT DIREKTE TIL TRYKKERI !!!!!



Figur 5.3-2: Prøvereparasjoner og instrumenteringslokalteter på søyle 3, 4 og 5.

Der det var praktisk mulig ble sondene plassert i borhull fra innsiden av konstruksjonen for å sikre enkle kabelstrekk og minimalisere skader/forstyrrelser i overdekningen.

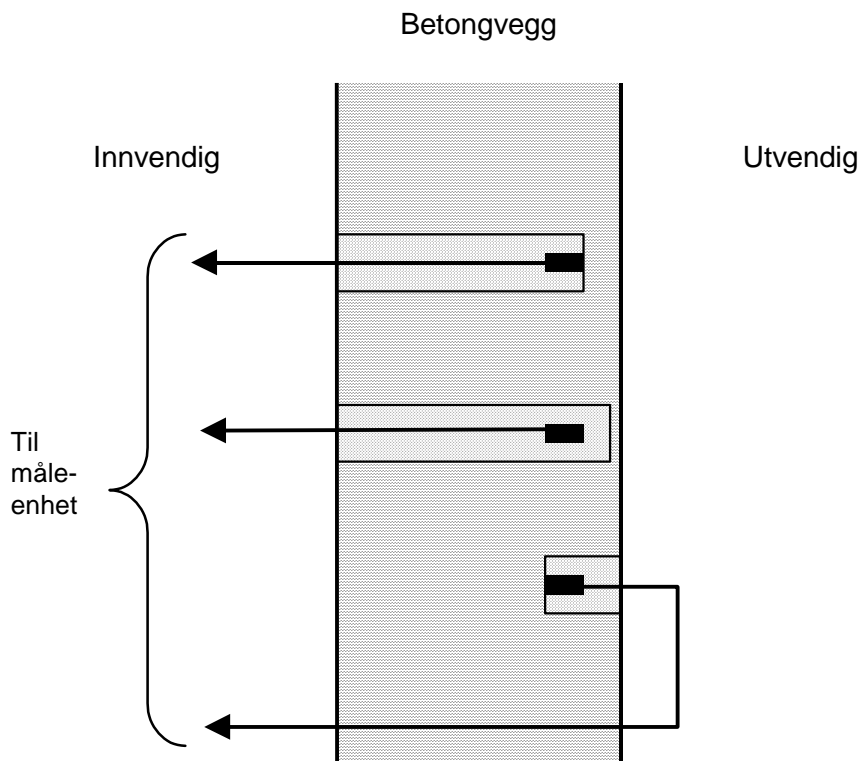
I kasseveggene på overbygningen ble de fleste sensorene plassert i borhull fra innsiden av kassa. Noen er installert i borhull fra yttersiden. I underside kasse er samtlige sensorer plassert i borhull fra yttersiden. I søylene er fuktsensorene plassert i borhull fra innsiden, mens de øvrige sensorene er installert fra utsiden.

Tabell 5.3-1 viser at det ble benyttet ulike sementmørtler ved sondeinstalleringen. Mistanke om lav ledningsevne i Rescon Nonset 50 førte til at mikrosilika ble utelatt fra mørtelen under Prøvereoperasjon 2 (1994). Ut fra mistanke om svinnproblemer og manglende heft i overgangene sonde/mørtel og mørtel/betong, ble det brukt en sementmørtel med svinnreducerende tilsetningsstoff under Prøvereoperasjon 3 (1995).

Tabell 5.3-1: Mørtler benyttet ved installering av sonder under prøveoperasjonene på Gimsøystraumen bru.

Prøvereoperasjon	Lokalitet	Mørteltype	Mørtelkarakteristika
1 (1993)	Brukasse mellom akse 2 og 3	Rescon Nonset 50	Sementmørtel som er svakt ekspanderende i plastisk fase. Inneholder mikrosilika. Ikke svinnkompensert.
2 (1994)	Søyer i akse 3, 4 og 5	Modifisert Rescon Nonset 50	Rescon Nonset 50 uten mikrosilika. Ikke svinnkompensert.
3 (1995)	Brukasse mellom akse 1 og 2	Rescon Hullfix	Sementmørtel uten mikrosilika med svinnreducerende tilsetningsstoffer.

Valget av instrumenteringslokalitet innen hvert prøve- og referansefelt ble valgt på grunnlag av forhåndsundersøkelsen. Valget av eksakt sondeplassering ble i stor grad bestemt av EKP-målingene, slik at instrumentering for korrosjonspotensial og polarisasjonsmotstand i størst mulig grad ble plassert i punkter med lavest EKP (høyest sannsynlighet for pågående korrosjon). Armeringsføringen lokalt (ofte svært tett) i et instrumenteringsområde, samt ønsket om minst mulig skader i betongen fra instrumenteringsarbeidet, var retningsgivende for den innbyrdes plasseringen av de øvrige sondene. Figur 5.3-3 viser ulike løsninger for plassering av sonder i borhull. Alle variantene er benyttet på Gimsøystraumen bru, med hovedvekt på løsningen med sondeledninger trukket direkte inn i konstruksjonen, særlig sidevegger i brukassa.



Figur 5.3-3: Prinsippkisse som viser ulike løsninger for sondeinnstallering på Gimsøystraumen bru.

5.4 Datainnsamling

Alle måleledningene fra sondene er trukket inn i brukassa og søylene og samlet i koblingsbokser, én for hver instrumenteringslokalitet. Det er i alt 25 koblingsbokser. Fra koblingsboksene er det trukket måleledninger til en sentral datalogger plassert inne i brukassa. Her registreres måledata hver 6. time året rundt. En oppsatt værstasjon er også tilknyttet overvåkingssystemet. Overføring av data til bruker skjer via telemodem.

Å måle polarisasjonsmotstand er ikke en del av overvåkingssystemet. Disse målingene gjøres manuelt med medbrakt måleutstyr lokalt ved koblingsboksen.

Avsnitt 5.7.4 beskriver årsaken til at det ble installert et nytt datainnsamlingssystem i oktober 1995.

5.5 Installasjon - oppsummering og anbefalinger

Det er installert 396 målesonder for overvåking av korrosjonstilstanden på Gimsøystraumen bru. Disse er spredt over deler av brukassa i spenn 1 og 2 og i søylene i akse 3, 4 og 5. I enkelte lokaliteter, særlig på søyler, er sensortettheten stor. Dette har nødvendigvis medført dannelse av mange betongsår i forbindelse med monteringsarbeidet selv om det ble gjort bestrebelser for å skape minst mulig sårskader. Alle sår ble fylt med mørtel og avrettet mot betongoverflaten.

Det var vanskelig å finne et akseptabelt kompromiss mellom ønsket om tilstrekkelig instrumentering og minimalt med inngrep i konstruksjonen. Man bør generelt forsøke å etterkomme følgende forutsetninger:

- Ikke for store borhulldiametre
- Borhullmørtel uten polymertilsetning. Den bør ha minimalt svinn og en resistivitet nær betongens
- Størst mulig grad av ledningsgjennomføring i samme hull som tilhørende sensor
- Minst mulig slissespor på betongoverflaten (minimal lengde, bredde og dybde). Dette setter krav til innbyrdes sensorplassering og ledningsdimensjoner.

Det er viktig at installeringsarbeidet utføres i henhold til prosedyrer og spesifikasjoner. I etterkant er det vanskelig å utbedre eventuelle feil og mangler som måtte oppstå. Videre er det viktig at den originale betongen skades minst mulig og selvfølgelig primært at selve installasjonene i området **ikke** endrer fenomenene som skal måles ved f.eks. å endre temperatur, fukttilgang osv. Måleledningene, som lett inntar «spaghetti-form», må merkes omhyggelig på flere steder for å sikre identifikasjon ved tilkobling til måleinstrumenter.

5.6 Vurdering av elektrokjemiske teknikker til å måle korrosjonshastighet i felt

I de seinere år har det vært utført mye arbeid for å utvikle elektrokjemisk baserte måleteknikker for å gi en rask og entydig vurdering av korrosjonshastigheten for innstøpt stål. Følgende metoder er blitt vurdert som feltmålemetoder:

- Galvanostatisk puls
- LPR med potensiodynamisk sveip
- LPR med potensiostatisk polarisasjon
- Vekselstrøm – impedans – spektroskopi
- Elektrokjemisk støy.

5.6.1 Galvanostatisk puls

Hensikten med målingen er å bestemme korrosjonshastigheten lokalt på innstøpt stål. I korthet består målingene i at et stålstykke med kjent areal påtrykkes en konstant strøm en definert, relativt kort tidsperiode (sekunder eller minutter) og den tilhørende potensialforandring måles mot en referanseelektrode. Ut fra kurvens forløp kan korrosjonshastigheten anslås. Dersom man har tilgang på stål med et kjent og begrenset areal (slik som den avkappede armeringen i Gimsøystraumen bru) er dette en aktuell elektrokjemisk metode til å anslå korrosjonshastighet.

5.6.2 Måling av lineær polarisasjonsmotstand (LPR) med potensiodynamisk sveip

Prinsippet for metoden er beskrevet i kapittel 5.2.3. Man forventer hverken for denne metoden eller noen av de andre elektrokjemiske metodene noe nøyaktig tall for korrosjonshastighet, men primært å kunne skille mellom ubetydelig og betydelig korrosjonshastighet. Undersøkelser på avkappet armering i Gimsøystraumen bru viser at vanskelighetene med å tolke måleresultatene er svært undervurdert. Metoden er derfor ikke generelt anvendbar i felt.

5.6.3 Potensiostatisk måling av lineær polarisasjonsmotstand

Forsøk har blitt utført på Gimsøystraumen bru og i laboratoriet i den hensikt å undersøke metodens muligheter. Det brukes samme utstyr som for måling av lineær polarisasjonsmotstand (LPR) med potensiodynamisk sveip, men potensialet holdes konstant 10 til 20 mV fra korrosjonspotensialet. Strømmen registreres som funksjon av tiden og potensialet korrigeres for spenningsfall i betongen mellom arbeidselektroden og referanselektroden. Desto høyere forhold for strøm dividert med påtrykt potensialforandring, desto høyere korrosjonshastighet, ifølge teorien. Målinger på avkappet armering i Gimsøystraumen bru viste at strømstyrken sank med tiden i en lang periode, kanskje flere døgn. Teorien for å «oversette» målingene til korrosjonshastighet svikter på grunn av dette og gir det forvirrende resultat at den beregnede korrosjonshastigheten blir lavere desto lengre måletid man bruker. Metoden er neppe generelt anvendbar i felt.

5.6.4 Måling av polarisasjonsmotstand med vekselstrøms-impedansspektroskopi

Hensikten med målingene er å bestemme korrosjonshastigheten av stålet. Vekselstrøms-impedansspektroskopi er omtalt i litteraturen som en meget pålitelig måte til å bestemme korrosjonshastigheten av stål i betong. Men samtidig pekes det på at utstyret er dyrt, målingene tar lang tid (timer) og tolkningen er vanskelig. Metoden er for tidkrevende til feltbruk i større skala.

5.6.5 Vurdering av korrosjon ut fra elektrokjemisk støy

Uniform korrosjon av stål i betong er en nokså stabil prosess med små forandringer i løpet av noen timer. Derfor er også korrosjonspotensialet temmelig stabilt. Groptæring og andre typer lokalangrep er prosesser som foregår med brå forandringer. Armeringen på Gimsøystraumen bru viste seg å være en stor antenne som tok opp elektrisk støy som helt overdøvet signaler generert av korrosjon. Man kan ikke utelukke at det skyldes kraftkablene i brua, men det er neppe hele forklaringen. Metoden er neppe generelt anvendbar i felt.

5.7 Verifikasjon og kvalitetssikring av sensorer, måledata, datainnsamlings-system og dataoverføringsystem

5.7.1 Overvåkingssystem

For å kunne dokumentere tilstanden til brua og mulige effekter av prøvereparasjonene, ble det som før beskrevet installert et betydelig antall (396 stykker totalt) sensorer på brua. For å registrere data fra disse sensorene, var det behov for 450 ulike målekanaler. I første del av prosjektperioden ble datainnsamlingen foretatt med CAMUR autorisert datainnsamlingsystemer, som skjematisk vist i figur 5.7-1 og beskrevet i kapittel 5.7.5. Dette systemet ble utviklet for å kunne ivareta oppfølging av et stort antall målekanaler på et kostnadseffektivt vis. Imidlertid viste det seg at de innsamlede måleverdiene var beheftet med usikkerhet og uforklarlige variasjoner slik at påliteligheten til de innsamlede verdiene ble sterkt redusert.

Erfaringer med datainnsamlingsystemet på brua det første driftsåret var preget av:

- Det var en stor datamengde som ble presentert til brukerne hvert kvartal.
- Noen måleresultater varierte sterkt uten åpenbar grunn.
- Måleverdier ble presentert som til ingeniørverdier uten statistisk behandling.
- Måleverdier ble presentert for 3 måneders perioder og ga følgelig isolert ikke informasjon om årstidsvariasjoner.
- Noen sensorer hadde sluttet å fungere trolig pga. miljøbelastningene.

For å gjenopprette tillit til datainnsamlingsystemet, ble det høsten 1994 initiert en verifikasjonsprosess som skulle gjennomgå hele overvåkings- og datainnsamlings-systematikken. Hovedmålsettingen med denne prosessen var å kartlegge årsakene til at måleverdier var beheftet med usikkerhet, samt å foreslå tiltak for å redusere usikkerhet av innsamlede måleverdier og sikre pålitelighet i målingene for resten av prosjektperioden.

Arbeidsomfanget og resultatet fra verifikasjonsarbeidet av datainnsamlingsystemet er beskrevet i de følgende kapitler.

5.7.2 Resultater fra verifikasjonsprosessen

Som nevnt i kapittel 3.1, er det plassert tre høgspenkabler i brukassa. Som en del av verifikasjonsprosessen, ble det høsten 1994 foretatt kontrollmålinger på brua for å undersøke om disse kraftkablene kunne påvirke de innsamlede måleverdiene. De utførte kontrollmålingene resulterte i følgende funn og anbefalinger:

- Høgspenkablene induserte et vekselstrømfelt som påvirket målinger foretatt inne i brukassa.
- For lange signalkabler plassert parallelt med kraftkablene kunne vekselstrømfeltet indusere signalstøy for svake signal. Kraftige målesignal og korte måleledninger var ubetydelig påvirket.
- Kabelarmeringen til kraftkablene var jordet på begge sider av brua. Dette kunne gi en sirkulerende strøm i kabelarmeringen hvor kabelarmeringen/betong/sjø utgjorde en del av strømbanen. Dette kunne gi polariseringseffekter på armeringen lokalt, spesielt i områder som var neddykket i sjø. Dette er nærmere beskrevet i kapittel 5.7.3.
- Det ble også avdekket at dokumentasjonen av det komplette overvåkingssystemet, dvs. koplings- og databehandlingssystematikk var noe mangelfull.
- Det ble funnet at enkeltmålinger var presentert med gale måleverdier. Disse ble fjernet fra rapporteringen.

For å motvirke mulige støykilder og usikkerheter, ble følgende anbefalinger gitt:

- Sammenkopling av jordledning for 230 V installasjoner og armering i brua i henhold til retningslinjer gitt i NVE 1991-FEB /14/.
- Verifikasjon av at sensorgenerert målesignal samsvarte med verdi registrert i datainnsamlingssystemet.
- Installasjon av sensorer og signalkabler så langt som praktisk mulig fra kraftkablene og med minst mulig krysning. All nødvendig krysning av kraftkabler burde utføres vinkelrett på disse. Jording av sensorer signalomformere og signalledninger burde utføres i henhold til anerkjente normer, f. eks. Elektrisitetstilsynets «Retningslinjer for jording i maritime anlegg» /15/.
- For å minimalisere støy fra kraftkablene, ble det anbefalt at måledata ble konvertert til digitale signal så nært målestedet som mulig **før** de ble overført til en sentral data-lagringseenhet.

5.7.3 Lekkstrømseffekter / elektrokjemisk støy

Potensialmålinger på armeringsnettet i brua har vist at det eksisterer et 50 Hz vekselstrømsignal i bruarmeringen. Vekselstrømsignalet skyldes med størst sannsynlighet induuerte spenninger fra tre høyspentkabler som gjennomløper brukassa. Kabelarmeringene til de tre høyspentkablene er jordet i hver ende av brua. Når kabelarmeringene jordes i begge ender, vil den induuerte spenningen sette opp en sirkulerende strøm i kabelarmeringen med retur i jord, som for brua vil være armering/betong og sjø. I en slik krets vil vanligvis impedansen være lav, derfor vil selv små induuerte spenninger kunne forårsake relativt høye strømmer.

I og med at armeringen er diskontinuerlig, kan returstrømmene gå inn og ut av ett av undervannsfundamentene som lokalt vil polariseres anodisk. Potensialgradeintmålinger på fundamentet i akse 6 under vann har vist at dette er tilfelle. Under en strømvastengning, fikk en målt feltgradienter som ble induert når kraftkablene igjen ble strømførende. Relativt høye anodiske strømmer ble registrert på fundamentets østside (varierte fra 9-27 mA/m² målt på betongens overflate). Visuelt ble det også observert korroderende armering ved undervannsinnspeksjon av fundamentet i disse områdene. Mulig nedbrytning av fundamentene som følge av lekkstrømseffekter bør overvåkes.

Vekselstrømsignalet i armeringen vil kunne påvirke målingene på brua dersom ikke riktige forholdsregler tas med hensyn til jording av instrumenter og filtrering av signaler.

5.7.4 Utførte korrektive tiltak

For å motvirke effekten av ulike støykilder, verifisere innsamlede måleverdier samt å sikre kontinuitet i datainnsamlingsprosessen, ble det besluttet å installere et datainnsamlingssystem i tillegg til CAMUR systemet. Tilleggssystemet, IMP produsert av Solartron, er vist i figur 5.7-2 og kort beskrevet i kapittel 5.7.5. Det er basert på lokale måleenheter som kan plasseres ved de ulike måle- og prøvefelt. Signaloverføringer i dette systemet er digitalisert, slik at støy-påvirkningen skulle være mindre enn for CAMUR-systemet.

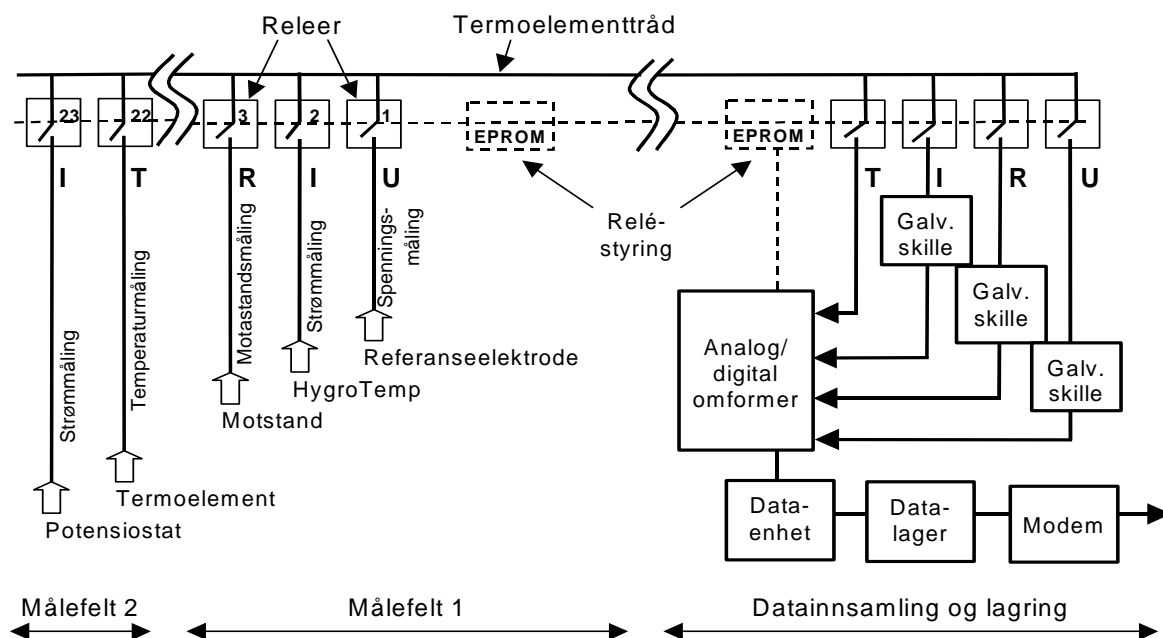
I tillegg til å installere et alternativt datainnsamlingssystem, ble følgende tiltak for å bedre påliteligheten til innsamlede data iverksatt:

- Elektriske koplingskjema for signalinnganger og signalbehandling ble laget.
- Flere konstante referansesignal ble lagt inn i målesystemet for å verifisere målepålitelighet.
- Kanaler med sammenfallende eller åpenbart gale måleverdier ble spesielt kontrollert og rettet/eventuelt eliminert.

- Ukentlig oppfølging av datainnsamlingsystemene for å kontrollere/verifisere at de fungerte som forutsatt ble utført.
- Etablering av driftslogg med loggføring av alle hendelser/observasjoner som kunne ha betydning for innsamlede måleverdier.

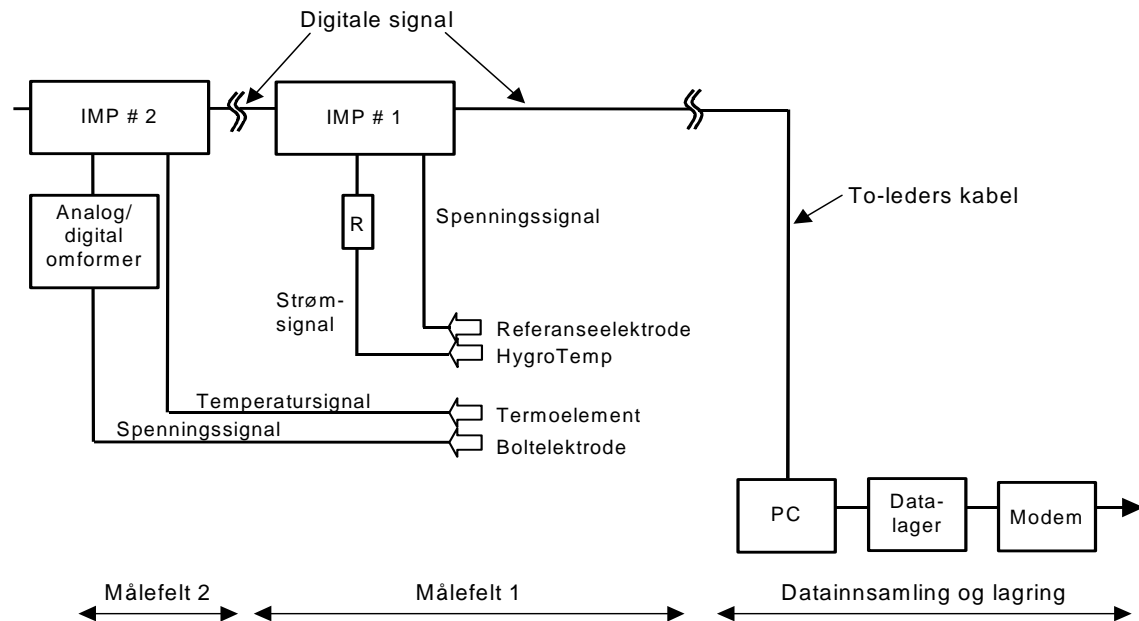
5.7.5 Kort beskrivelse av installerte overvåkingsystem

CAMUR-systemet



Figur 5.7-1: CAMUR – skjematisk oversikt.

CAMUR-systemet består av en dataenhet som styrer en analog/digital omformer. Kanaloversikten som er permanent lagret i EPROMene sørger for at riktig sensor tilkobles riktig signalbehandlereenhet, (T for Termoelement, I for strøm, R for motstand og U for potensial) slik at for eksempel en motstand, R, blir målt som en motstand og ikke et termoelement. Dersom kanaltilordningen er feil, blir heller ikke måleresultatet riktig. Mellom den sentralt plasserte datainnsamlingsenheten og målefeltene er det trukket kabler for styring av reléene og termoelementtråd for overføring av signaler. Alle data som samles inn blir lagret i datalageret og overføres til brukerens PC ved hjelp av et modem. Slik kan data fra CAMUR-systemet hentes uten at det er nødvendig å være fysisk tilstede på broen.

IMP-systemet

Figur 5.7-2: IMP - skjematisk oversikt.

IMP-systemet består av en sentralt plassert PC som kommuniserer med en Isolated Measurement Pod (IMP) (eller en selvstendig måleenhet) via en to-leders kabel. Opptil 20 IMPer kan seriekobles over en total lengde på over 1,5 km. Hver IMP har en unik adresse og kan være tilkoblet inntil 20 målesensorer. IMPen bør plasseres nærmest mulig sensorene. IMP-systemet kan bare måle likespenning. For måling av strøm er det derfor nødvendig å måle spenningsfallet over en fast, kjent motstand R. Ved måling av vekselspenning må signalet konverteres til likespenning med en AC/DC-omformer. I hver IMP er det en analog/digital omformer. Måleresultatet overføres digitalt til PCen, og er dermed ikke påvirket av støy fra lange måleledninger. Alle data som samles inn blir permanent lagret i datalageret og overføres på samme måte som for CAMUR til brukerens PC ved hjelp av et modem. På denne måten kan også data fra IMP-systemet hentes uten at det er nødvendig å være fysisk tilstede på broen.

5.7.6 Erfaringer og anbefalinger

For å følge opp prøvereparasjonene og tilstandsutviklingen til brua ble det installert et svært omfattende datainnsamlingssystem. Sett på bakgrunn av omfanget og kompleksiteten til systemet, kan det i etterkant konkluderes med at det var for liten tid tilgjengelig for planlegging og verifikasjon av det opprinnelige datainnsamlingssystemet. Dette førte til at kvaliteten på de innsamlede måleverdiene i første del av prosjektperioden var lite tilfredsstillende. Det er derfor en klar anbefaling fra prosjektet at det ved installasjon av et automatisert datainnsamlingssystem, så er det nødvendig at alle elementer fra målsetting med installasjonen til sluttbruk av måleverdier må være en del av planprosessen.

Etter at prosjektet besluttet å iverksette verifikasjonsprosessen og gjennomførte korrektive tiltak, så fikk en i stor grad gjenopprettet tillit til de innsamlede måleverdiene. Dette bidro også til at datainnsamlingssystemet oppfylte de opprinnelige målsettingene som var satt til dette. Dette medførte en stor tilleggsinnsats som krevde økte ressurser i prosjektperioden. Imidlertid bidro dette tilleggsarbeidet til at man fikk en bedre forståelse for hva som kan påvirke et målesignal i en konstruksjon i utsatt miljø. Dette gjaldt forhold knyttet til sensorutforming, installasjonsprosedyrer, dataoverføring, kabelføring, data-lagring, datakonvertering og eksterne støykilder og forstyrrelser. Disse erfaringene er svært verdifulle og vil bidra til at fremtidige instrumenteringsprosjekter kan utføres med kvalitetssikrede prosedyrer slik at datapålitelighet oppnåes, og bruksverdien for sluttbruker sikres.

6 Resultater og observasjoner

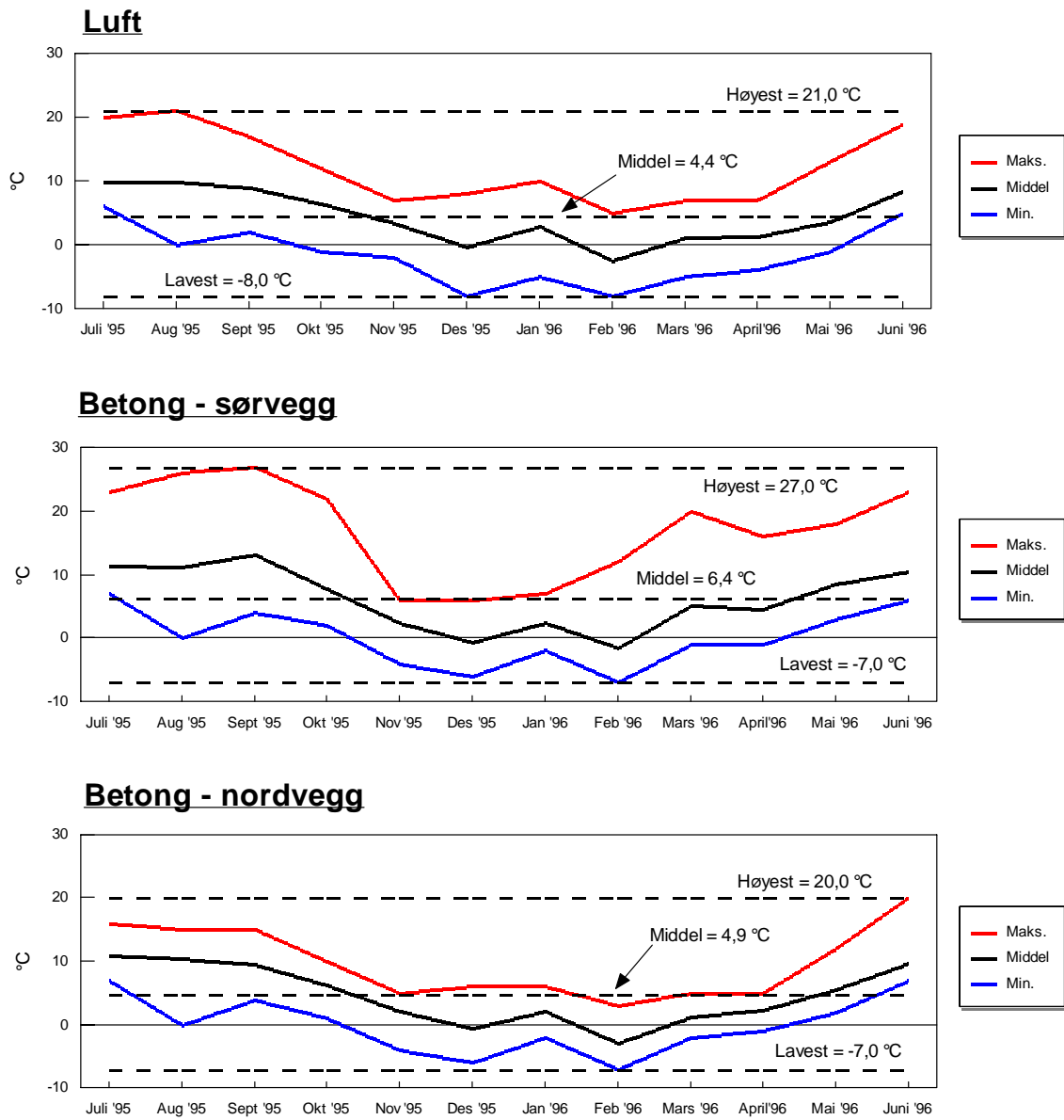
6.1 Miljø og værdata

6.1.1 Temperatur

Lufttemperaturen viser relativt små svingninger over året. Noe som er naturlig for kystklima, se figur 6.1-1. Sommertemperaturen er relativt lav og i vintermånedene er det få perioder under 0 °C. Middelttemperaturen for perioden juli 1995 til juli 1996 var 4,4 °C. Laveste målte temperatur var -8 °C i desember 1995. Høyeste målte temperatur var 21 °C i august 1995. I løpet av vinteren 1995/1996 var det registrert 36 perioder med lufttemperatur under 0 °C, tilsammen 1275 timer. Temperaturen på kasseveggene, vist i figur 6.1-1, varierte som forventet som funksjon av lufttemperatur og solstråling. Temperatursensorene i kasseveggene som er installert i forbindelse med værstasjonen, ligger i dybde 50 mm fra overflaten. Tallrike temperaturmålinger i forskjellige dybder har vist at temperaturgradienter i betongen er meget små.

Det ble registrert liten eller ingen temperaturvariasjoner på nord- og sørsiden av brua i vintermånedene. I denne perioden er temperaturen på kasseveggene tilnærmet lik lufttemperaturen.

I måneder med solstråling ble det registrert en hurtig oppvarming av sørveggen, typisk 5-10 °C høyere enn lufttemperaturen. Kassevegg nordside viser ingen tilsvarende økning i temperaturen fordi effekten av solstråling her er betydelig mindre. På dager uten solstråling følger også temperaturen på kasseveggene lufttemperaturen også i sommermånedene.

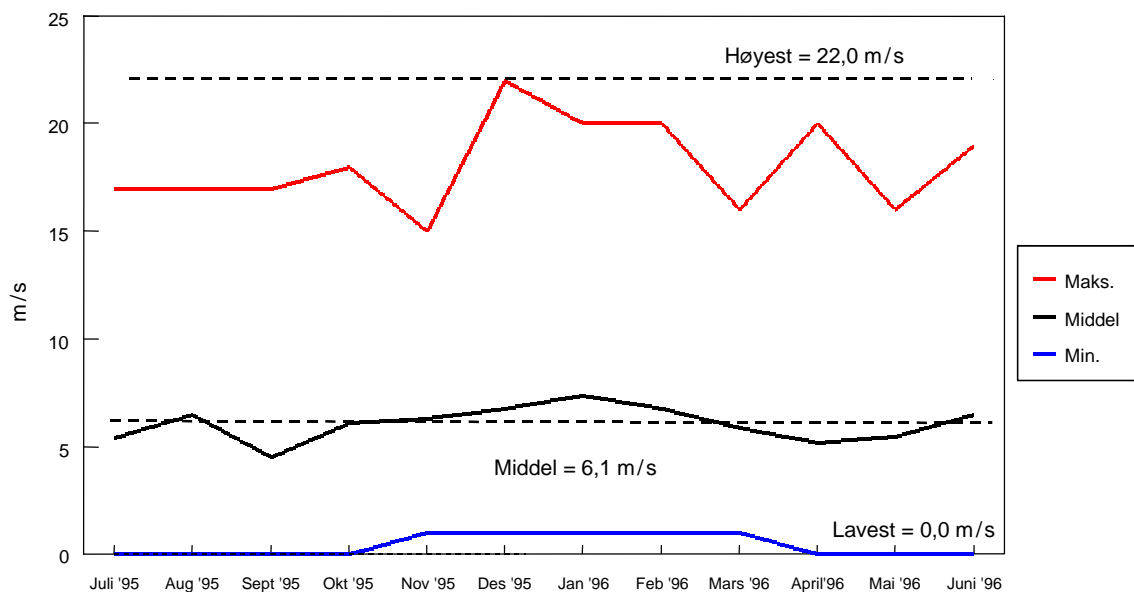


Figur 6.1-1: Temperaturvariasjoner i luft og betongvegg nord/sør.

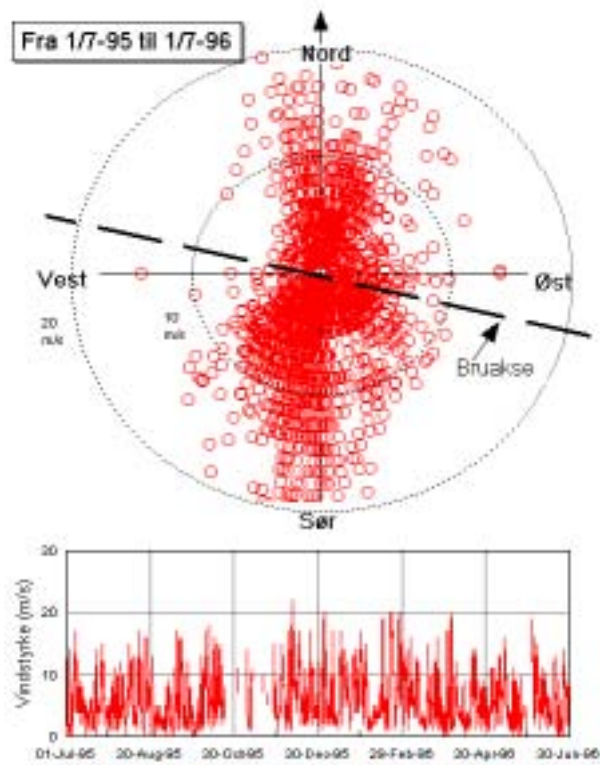
6.1.2 Vindstyrke

Middelverdien for vindhastighet er ca. 6,1 m/s, som vist i figur 6.1-2. Her er ikke vindkastene medregnet. Det er en liten økning av vindhastighet i høstmånedene fra oktober ut i februar.

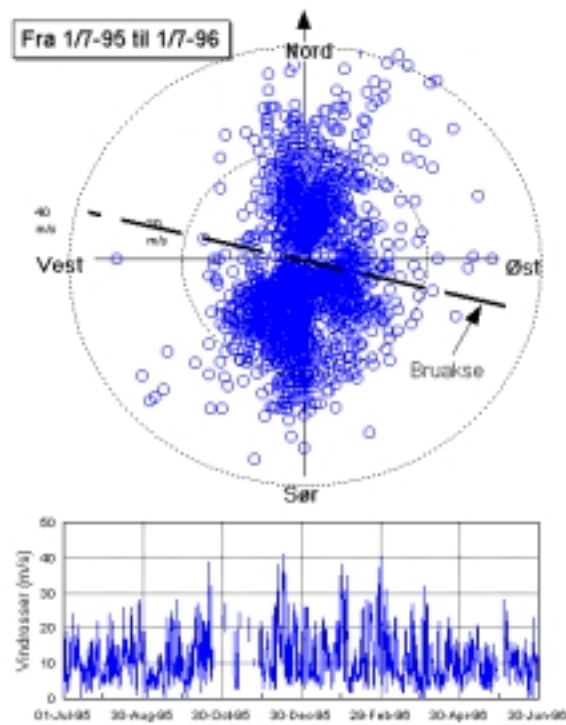
Figur 6.1-2 viser gjennomsnittlig vindhastighet for en 3-timers periode. Maksverdien i kastene ligger gjerne på det dobbelte av gjennomsnittsverdiene. Vindkast blir målt ved maksimumsverdien over en 2 sekunders periode i løpet av 3 timers intervaller, se figur 6.1-3. Sterkeste vindkast er målt til 46 m/s 14. oktober 1994 med vindretning fra nord.



Figur 6.1-2: Vindrosser, gjennomsnitt for 3-timers perioder.



Figur 6.1-3: Vindrosser, gjennomsnitt for 3-timers perioder.



Figur 6.1-4: Vindrosser, maksimal kastevind.

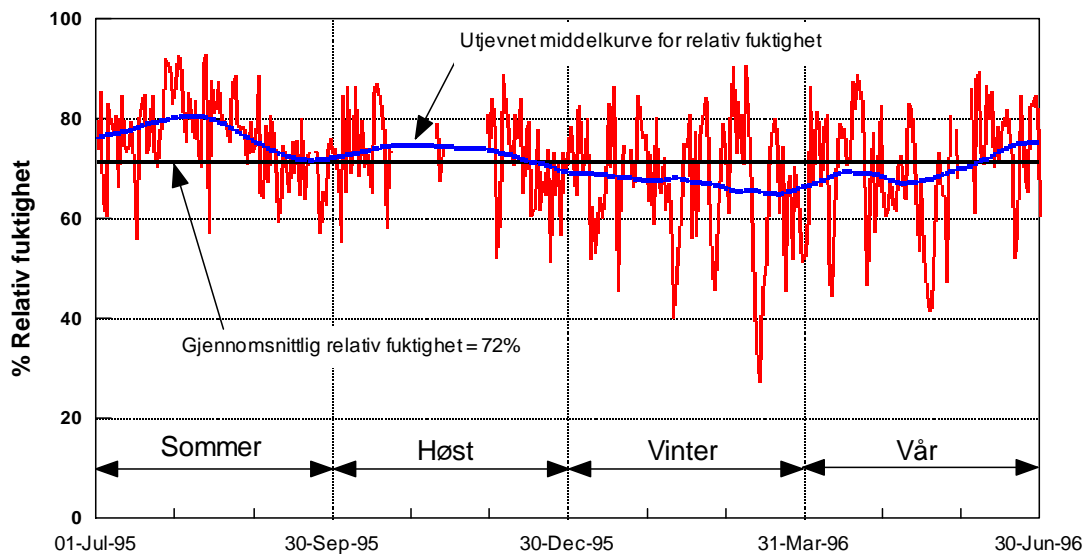
6.1.3 Vindretning

Måling av vindretning blir utført som momentan registrering. Fremtredende vindretninger er nord/sør med dominerende vind fra sør, se vindrosser i figurene 6.1-3 og 6.1-4. Dette vil si at vinden treffer tilnærmet vinkelrett på sørflaten av brua. Det er ved disse retningene at de sterkeste vindhastigheter opptrer. Brua ligger orientert tilnærmet øst - vest, og det er en markert le/lo effekt på brua med nordsiden som le-side.

6.1.4 Relativ fuktighet

Det er utført måling av relativ fuktighet som momentane registreringer innenfor hver 3 timers periode. Disse målingene viste store og raske variasjoner innenfor området 55-85 %. Kontinuerlige målinger av relativ fuktighet er gjengitt i figur 6.1-5 og viser noe større og raske variasjoner.

Gjennomsnittlig relativ fuktighet for perioden 1. juli 1995 til 30. juni 1996 er 72 %, mens en utjevnet middelkurve over året viser årstidsvariasjoner.



Figur 6.1-5: Relativ fuktighet.

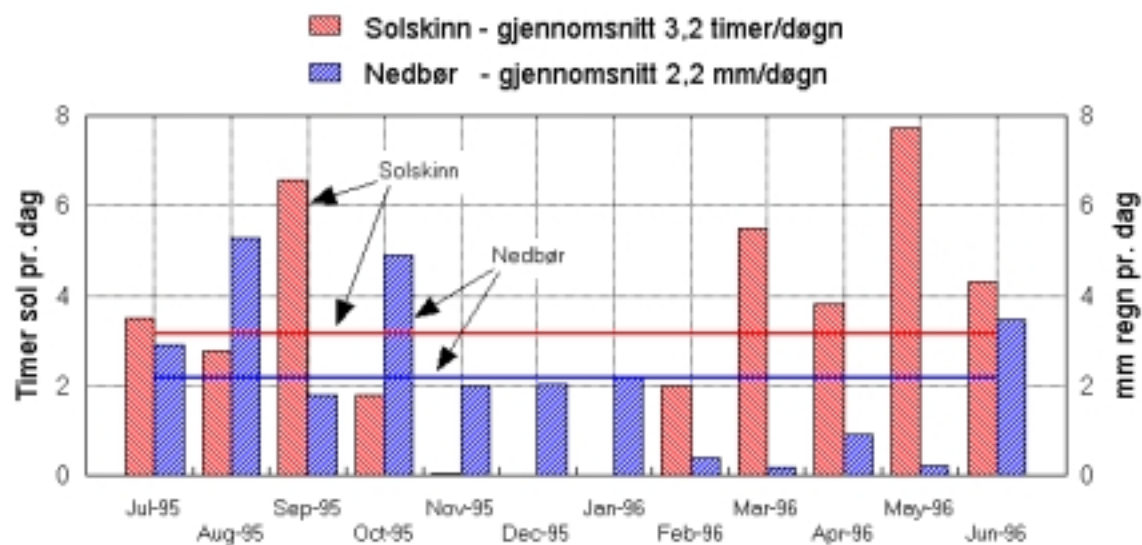
6.1.5 Soltimer

Værstasjonen registrerer antall minutter med sol innenfor hvert måleintervall. Ved mye solstråling blir sørflatene raskere oppvarmet enn nordside. Registrerte soltimer i perioden 1. juli 1995 til 30. juni 1996 var 1158 timer, se figur 6.1-6.

6.1.6 Nedbør

Sørvestlig vindretning gir mest nedbørsaktivitet. Nedbøren varierer lite gjennom året, se figur 6.1-6. Imidlertid er det generelt mer nedbør somme/høst enn vinter/vår. Gjennomsnittlig nedbørsmengde ligger under 5 mm målt over 3 timers perioder. Våren, fra mars til mai, skiller seg ut som mest nedbørfattig. Gjennomsnittlig nedbørsmengde på Gimsøystraumen bru er 2,2 mm pr. dag.

Når en sammenligner nedbør og vindretning, fremgår det klart at vind fra sørvest gir mest nedbør på brustedet.



Figur 6.1-6: Solskinn og nedbør.

6.1.7 Saltinnhold i sjøvannet

I følge Havforskningsinstituttet i Bergen /10/ er saltinnholdet ved Gimsøystraumbua i området fra 32 - 34,5 ‰. Dette er oppløst salt pr. liter oppløsning målt på overflatevann.

Fordelingen av klorider i sjøvann ved saltinnhold på 35 ‰ er som følger:

NaCl: 28,0 ‰

MgCl₂: 3,8 ‰.

Det resterende er andre salter. Sjøvannet ved Gimsøystraumen er klassifisert som kyststrømvann.

6.2 Betongens fukttilstand/ fuktighetsmålinger

Formålet med undersøkelsene var å kartlegge betongens fukttilstand over tid og lokalitet i bua. Betongens fukttilstand omfatter både porevanninnholdet (fuktinnholdet) på vektbasis og den relative fuktighet (RF) som porevannet utøver. De to kvantiteter er relatert via sorpsjonsisotermene for betongen som diskutert i kapittel 6.2.3. Både overflatebehandlede felt og ubehandlede referansefelt ble undersøkt over tid, både for Prøvereparasjon 1 (1993) og Prøvereparasjon 2 (1994). Undersøkelsene besto av instrumentert overvåking på bua (RF-sonder) og laboratoriemålinger på uttatte betongprøver.

6.2.1 Instrumentering på bua

RF-sondene måler den relative luftfuktigheten i et avgrenset rom i betong (borhull). RF måles med sensorer av type Rotronic. Måleprinsippet for den relative fuktighet i dette instrumentet er å måle endring av konduktans i sonden. I tillegg til RF blir temperaturen i det avgrensede luftrommet målt.

RF-instrumenteringen i Prøvereparasjon 1 (1993) var montert i prøve- og referansefelt 2 (prøvefelt 2 var behandlet med Rescon Cem-Elastic) og prøve- og referansefelt 4 (prøvefelt 4 var behandlet med Rescon CI-brems), begge steder i 40 mm dybde fra overflaten. Prøve- og referansefelt 2 er i bruas felt 2 (mellom akse 2-3) nær akse 2 (X=28-37), mens prøve- og referansefelt 4 er i bruas felt 2 nær akse 3 (X=110,5-119,5). X er avstand fra akse 2, se figur 5.3-1.

RF-sondene i 1994-reparasjonen var montert på søylen i akse 3. Både på østflaten (behandlet med Rescon CI-brems) og vestflaten (referansefelt) av søylen ble 4 RF-

sonder montert ca 2,7 m over fundamenttopp. På begge flatene ble 2 sonder montert i 15 og 30 mm dybde fra overflaten.

6.2.2 Prøveuttak og laboratorieprøving

10 prøveuttak ble foretatt i perioden juni 1994 til september 1996. Prøvene var utsagde prizmer med bredde 20 mm, lengde 150-200 mm og dybde inn fra overflaten fra 30-50 mm. Etter uttak ble prøvene umiddelbart pakket i flere lag plast for å sikre at fuktinnholdet ikke endret seg. De 10 prøveuttakene varierte i omfang fra 11 til 30 enkeltprøver. Totalt ble 206 prøver («fuktprøver») undersøkt i laboratoriet. Prøvene ble tatt fra prøve- og referansefelt 2 og prøve- og referansefelt 4 i brukassa, fra søyle 3 og i mindre omfang fra søyler i akse 4, 5, 6, 8 og 9.

De undersøkte områdene er altså konsentrert om enkelte posisjoner: På brukassa underkant (UK) og nordsiden (N) i felt 2 nær henholdsvis akse 2 og 3. På søylene ble prøvene tatt nær toppen av fundamentet for samtlige flater. Noen enkeltresultater foreligger også for andre posisjoner. Dette er: innsiden av brukassa i felt 1, alle ytterflater (N, UK, S) av brukassen i felt 1 og høyere opp på søylene. Disse resultatene er nærmere beskrevet i prosjektrapport OFU gimsøystraumen bru: Betongens fukttilstand /17/.

Laboratorieforsøkene på de uttatte «fuktprøvene» ga følgende informasjon:

- In situ fuktinnhold i % av tørr betongvekt
- In situ fuktinnhold uttrykt som vannmetningsgrad DS (Degree of Saturation)
- In situ fuktinnhold uttrykt som relativ fuktighet (RF).

I tillegg ble det utført full PF-prøving av prøvestykkene. PF-metoden karakteriserer betongens homogenitet og porøsitet i form av vannsugporøsitet, luftporøsitet og densitet.

I tillegg til fuktprøvene ble det tatt ut et antall borekjerner fra brukassa og søyler. Disse ble brukt til å bestemme sorpsjonsisotermene for betongen, dvs. forholdet mellom fuktinnholdet (vektprosent) og RF under uttørking (desorpsjon) og oppfukning (adsorpsjon).

6.2.3 Resultater og diskusjon

Hovedresultatet er at fukttilstanden i brubetongen varierer lite over tid og posisjon, og at overflatebehandlingen ikke har noen registrerbar innflytelse. Det bør igjen poengteres at samtlige målinger enten er foretatt minst 15 mm inn fra overflaten eller representerer gjennomsnittsverdier for dybder fra 0 til 30-50 mm fra overflaten. Fukttilstanden i de ytterste få mm varierer selvfølgelig med værforholdene, men de brukte metodene er ikke i stand til å registrere denne variasjonen. At variasjonen faktisk bare finner sted i et tynt

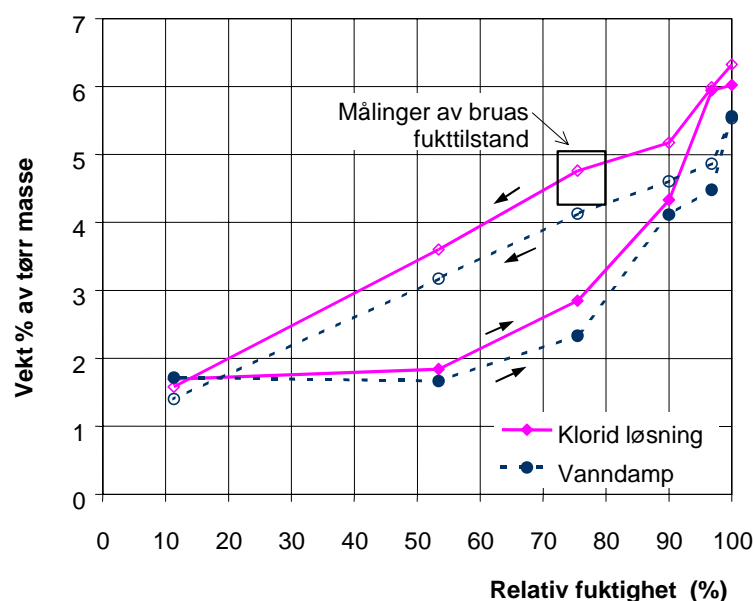
overflatesjikt bekreftes av karboniseringsmålingene, som viser generelt mindre enn 5 mm dybder. Fuktvariasjonene i det tynne sjiktet er imidlertid av stor praktisk betydning, særlig med hensyn til kloridakkumulering ved oppfukning/tørke sykler.

Resultatene fra feltmålingene viser at RF-nivået generelt ligger i området 65-80 % RF. Endringer utover dette for enkeltsonder skyldes manglende kalibrering av sondene. Korttidsvariasjonene er større under raske temperaturendringer, men dette skyldes måletekniske forhold. Laboratoriemålingene gir også stabile RF-verdier i området 70-80 % RF. RF-nivået i betongen samsvarer med gjennomsnittsverdien i luften (72 % RF), som naturlig nok er den «styrende» parameter.

Fuktinnholdet i betongen er tilsvarende stabilt innenfor området 4,4–5 % av tørr betongvekt, tilsvarende vannmetningsgrader i området 80-90 % DS. Dette er middelverdier for de enkelte prøvesettene. Variasjonen mellom enkeltprøver er selvfølgelig større. DS-verdien ansees som den beste måte å uttrykke fuktinnholdet på fordi hver enkelt prøves fuktinnhold da er satt i forhold til prøvens vannsugporøsitet, dvs. at variasjoner i tilslag/bindemiddel-forhold elimineres. Dette bekreftes ved at variasjonskoeffisienten for DS i et prøvesett alltid er mindre enn variasjonskoeffisienten for fuktinnholdet i vektprosent.

Vannmetningsgraden (DS) i betongen betraktes også som en mer relevant fukttilstandsparameter enn RF med hensyn til bestandighetsegenskaper. Dette fordi RF også er influert av porevannskjemien (klorider, alkalier osv.) ved en gitt DS-verdi. Man kan si at DS-verdien **bare** uttrykker vanninnholdet i betongen, mens RF-verdien reflekterer **både** vanninnholdet og porevannskjemien.

Figur 6.2-1 viser forholdet mellom vanninnholdet og RF (sorpsjonsisotermer) for betongprøver tatt fra brua. Firkanten i figuren indikerer området som middelverdiene av prøvesettene tatt fra brua og målt i laboratoriet faller innenfor.



Figur 6.2-1: Sorpsjonsisoterm for brubetongen.

Kurvene merket «Vanndamp» er for betong oppbevart fuktig før prøving, mens «Klorid løsning» indikerer at betongprøvene ble neddykket ca. 7 måneder i 6 % NaCl løsning før prøving, hvilket resulterte i et totalt kloridinnhold på 0,44 % av tørr betongvekt. Dette er et nivå som tilsvarer et ganske kloridbelastet yttersjikt i brua.

Som det fremgår av figuren, leder kloridinnholdet til en lavere RF for et gitt vanninnhold, dvs. RF er en funksjon både av vanninnhold og porevannskjemi. In-situ prøvene stemmer rimelig godt med desorpsjonsisotermen, dvs. en bekreftelse på at betongen er i en stabil desorpsjonstilstand, dvs. at den ikke har vært utsatt for kraftigere uttørking i konstruksjonens levetid.

Resultatene fra Gimsøystraumen bru er sammenlignet med tilsvarende undersøkelser (men langt mer begrensede i omfang) fra andre kystbruer. Disse varierte endel i betongkvalitet, men hadde in situ vannmetningsgrader (DS) i området 75-90 %, dvs. noe lavere i snitt enn Gimsøystraumen bru som hadde 85 % DS i snitt. Konklusjonen er altså at kystbruer generelt har en høy og stabil gjennomsnittlig vannmetningsgrad, og at Gimsøystraumen bru ikke er atypisk.

I tillegg til denne overordnede konklusjonen, ga måleresultatene også basis for mer detaljerte enkeltobservasjoner:

- Betongen inne i brukassa er klart tørrere (DS = 70-76 %) enn ute (ca. DS = 85 %). Til tross for fukttilstandens stabilitet over tid er det altså fuktgradienter gjennom betongveggen. Det foreligger imidlertid svært få målinger fra innsiden av kassa.

- Underkant av brukassa er tørrere enn nord-veggen av brukassa nær søylene 2 og 3 (henholdsvis DS = 80 og 86 %). Resultatene i sluttrapport «Prøvereparasjon 3 (1995)» indikerer også variasjon i fuktinnholdet i underkant av brukassa, med lavere verdier mot midtspenn /18/.
- Økt høyde over havet reduserer ikke DS. Nord-veggen av brukassa nær søyle 3 er våtere (DS = 87 %) enn nord-veggen nær søyle 2 (DS = 81 %), til tross for at søyle 3 er høyere enn søyle 2.
- Fuktinnholdet i søyle 3 var ikke signifikant forskjellig i høydene 1 m, 6,6 m og 24,4 m over fundamenttopp.
- Det var ingen signifikant forskjell i fuktinnholdet på de fire sideflatene av søylene i nivå ca. 1 m over fundamenttopp.

PF-resultatene viste god homogenitet i betongen. Middelerverdiene var noe over 12 volumprosent i vannsugporøsitet, som gir et estimat av effektivt masseforhold på ca. 0,45. Det er rimelig for så gammel betong. Det var ingen signifikant forskjell på prøver fra brukassa og søylene, dvs. at det ikke foreligger tegn på at ulike betongkvaliteter ble benyttet som foreskrevet i spesifikasjonene. Luftporeinnholdet var nær ca. 3 volumprosent.

6.3 Motstandsmålinger

Formålet med undersøkelsene var å kartlegge endringer i brubetongens elektriske motstand over tid og posisjon i overflatebehandlede felt og referansefelt. Elektrisk motstand i betong er meget følsom overfor variasjon i betongens fuktinnhold. En viktig målsetting var derfor å undersøke om kontinuerlig registrering av elektrisk motstand var egnet som metode til overvåking av betongens fuktinnhold over tid. Resultatene beskrevet nedenfor er mer utførlig behandlet i prosjektrapport OFU Gimsøystraumen bru: Elektrisk motstand i betongen /19/.

6.3.1 Instrumentering på brua

Instrumenteringen ved Prøvereparasjon 1 (1993) besto av boltpar innmørtlet i borehull. Tilsammen ble 15 boltpar installert i overbygningen av brua. Boltparene installert i 1993 er av rustfritt stål, med diameter 16 mm. Eksponert lengde på boltene er 40 mm (10-50 mm) og avstanden mellom boltene (lysåpning) er 50 mm.

Ved Prøvereparasjon 2 (1994) ble 18 såkalte multiboltelement benyttet. Det består av 4 bolter montert i et kvadrat med senteravstand 50 mm. De to diagonalt motstående

boltparene er eksponert i dybde 10-30 mm og 30-50 mm. Lysåpningen for motstandsmålingene er 63 mm. Boltene med diameter 16 mm er av rustfritt stål.

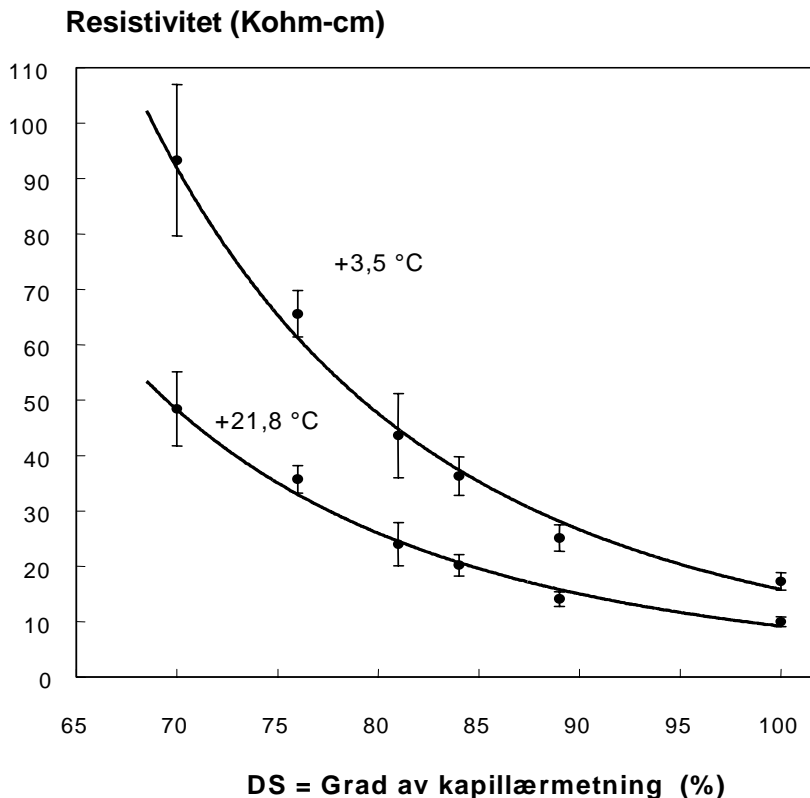
Ved Prøvere-parasjon 3 (1995) ble 8 sett à 4 bolter benyttet for å utføre målingene ved hjelp av Wenner-prinsippet. Boltene er plassert etter hverandre på linje med lysåpning 50 mm. Boltene har diameter 8 mm og er av vanlig karbonstål. Boltene er eksponert enten i dybde 10-30 mm eller 30-50 mm. Wenner-målinger reduserer problemet med overgangsmotstand bolt-mørtel-betong. Alle motstandsmålinger ble utført med vekselstrøm (108 Hz).

6.3.2 Laboratorieforsøk

Laboratiormålinger ble utført på betongprøver tatt fra brua såvel som på laboratoriestøpte prøver. Formålet var å samle forsøksdata for den relevante betongkvaliteten under velkontrollerte laboratorieforhold som nødvendig bakgrunn og grunnlag for å kunne tolke resultatene av feltmålingene. Hovedprogrammet inkluderte bestemmelse av spesifikk motstand i betongen, og dennes avhengighet av betongens fukttilstand, kloridinnhold og temperatur. I tillegg ble det utført en serie forsøk i laboratoriet for å undersøke relasjonen mellom spesifikk motstand og motstand mellom innstøpte boltpar, eller boltpar innmørtlet i hull i betongblokker for å simulere brumålingene.

6.3.3 Resultater, laboratorieforsøk

Figur 6.3-1 viser resistiviteten av brubetongen som funksjon av vannmetningsgrad (DS) og temperatur. DS er forholdet mellom aktuelt vanninnhold og vanninnholdet etter lang tids neddykking (dvs. at poresystemet bortsett fra luftporene antas å være vannmettet).



Figur 6.3-1: Elektrisk motstand som funksjon av vannmetningsgrad (DS) ved 2 temperaturer. Spredning for prøvesett à 5 prøver er indikert.

Følgende konklusjoner kan trekkes på bakgrunn av figuren og andre forsøk hvor effekten av kloridholdig porevann ble undersøkt:

- Vannmetningsgraden (DS) har stor innflytelse på motstanden. Ved DS = 85 % (ca. brubetongens fukttilstand) er følsomheten ca. 6 % endring i motstand pr. 1 % endring i DS.
- Temperaturen innflytelse på motstanden følger Arrhenius' ligning med en aktiveringsenergi i området 20 000-25 000 J/mol. Det vil si at ved 5 °C (ca. brubetongens middeltemperatur over året) øker motstanden med ca. 3 % pr. °C senking av temperaturen.
- Kloridinnholdet har en signifikant innflytelse på motstanden. Ved å bytte ut porevannet med en 3 % NaCl-løsning (tilsvarende ca. 0,1 % Cl av betongvekten) ble motstanden redusert med 30-50 %.

Forsøkene med innstøpte kontra innmørtlede bolter viste at de innstøpte ga mer konsistente motstandsverdier med generelt lavere overgangsmotstand stål-(mørtel)-betong. Ved instrumentering av eksisterende bruer må nødvendigvis innmørtling benyttes, og Wenner-prinsippet anbefales for å redusere problemet med overgangsmotstand.

En vekselstrøm med frekvens i området 100-1000 Hz anbefales ved feltmålinger av motstand. Dette er erfaringsmessig et område hvor målinger av motstand i betong i «naturlig» fukttilstand vil ligge nær den resistive komponenten av impedansen, som er en hovedfaktor for korrosjonshastigheten av depassivert armeringsstål.

6.3.4 Resultater, in situ målinger

Målingene på brua startet høsten 1993, men i perioden før oktober 1995 var det mange problemer med motstandsregistreringen. Avbrudd i logging, nivåskift og diskontinuiteter i kurvene gjør tolkning umulig. Etter gjennomgangen av systemet i oktober 1995 ser det ut til at de måletekniske problemene ble løst. Resultatene viser en hovedforskjell mellom de 3 prøvereparasjonene:

- Resultatene fra Prøvereparasjon 1 (1993) og Prøvereparasjon 2 (1994) viser begge meget varierende absoluttnivå i motstand for forventet ekvivalente boltpar. Dette antas å skyldes at innmørtlingen i borehullene gir meget variabel motstand i overgangssonen stål-mørtel-betong.
- Resultatene fra Prøvereparasjon 3 (1995) viser langt mindre variasjoner i motstand (Wenner-målinger). Wenner-prinsippet anbefales derfor i feltmålinger, fordi nettopp innflytelsen av overgangssonen langt på vei elimineres.

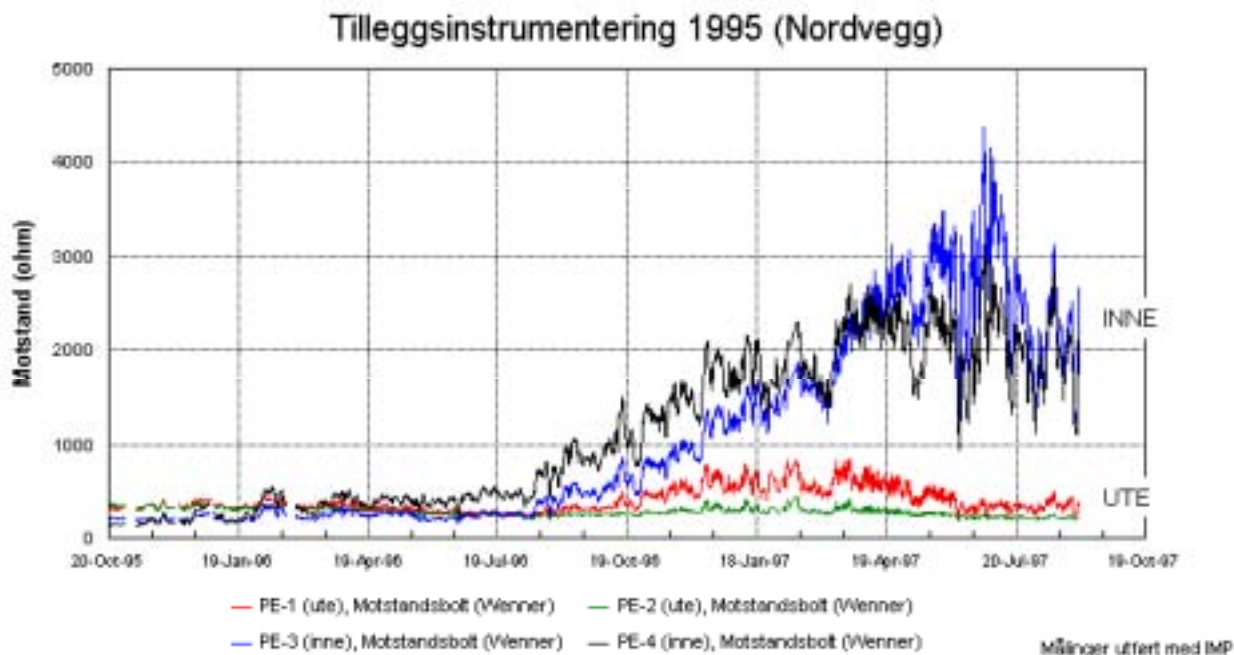
Relative endringer i motstand over tid for en gitt sonde (boltsett) skulle indikere endringer i betongens fukttilstand, under forutsetning av at temperaturkompensering kan foretas, og at kloridinnholdet er konstant. Erfaringene har imidlertid vist at det ikke er mulig å temperaturkompensere de målte motstandskurvene ved bruk av Arrhenius' ligning og en fast aktiveringsenergi basert på laboratoriemålingene med brubetongen, se figur 6.3-1. Dette impliserer at flere forskjellige prosesser er tilstede i variabel grad for forskjellige sonder. Vår kunnskap på dette området er klart mangelfull, og begrenser muligheten for å tolke motstandsdata på en meningsfylt måte.

Muligheten for å vurdere langtidstendenser direkte ut fra relative endringer i motstandsdata uten temperaturkompensering foreligger fra oktober 1995, når responsen har vært troverdig, dvs. kontinuerlige kurver uten avbrudd og umotiverte hopp. For 1993- og 1994-reparasjonene avspeiler motstandskurvene den årstidsbestemte temperaturutviklingen ved at motstanden øker i kalde årstider og avtar i varme. Denne temperaturbetingede variasjonen er imidlertid meget forskjellig for forskjellige sonder. Fra et «fugleperspektiv» over alle kurvene er det ingen indikasjon på at fukttilstanden endrer seg signifikant over tid. Dette er i tråd med resultatene av fuktundersøkelsene og ser ut til å gjelde uansett overflatebehandling av betongen.

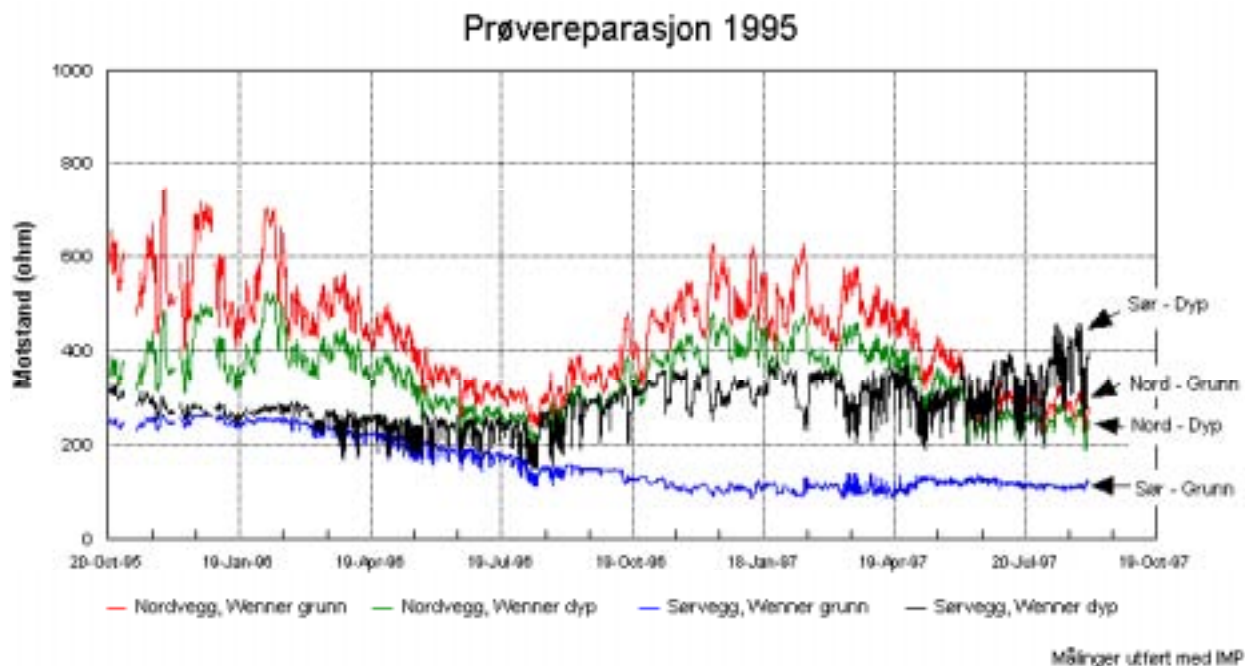
Wenner-resultatene fra 1995-reparasjonen er meget systematiske og bedre egnet til analyse enn resultatene fra boltparene, se figur 6.3-2, figur 6.3-3 og temperaturkurvene i figur 6.3-4.

Resultater fra motstandssonder plassert ute og inne

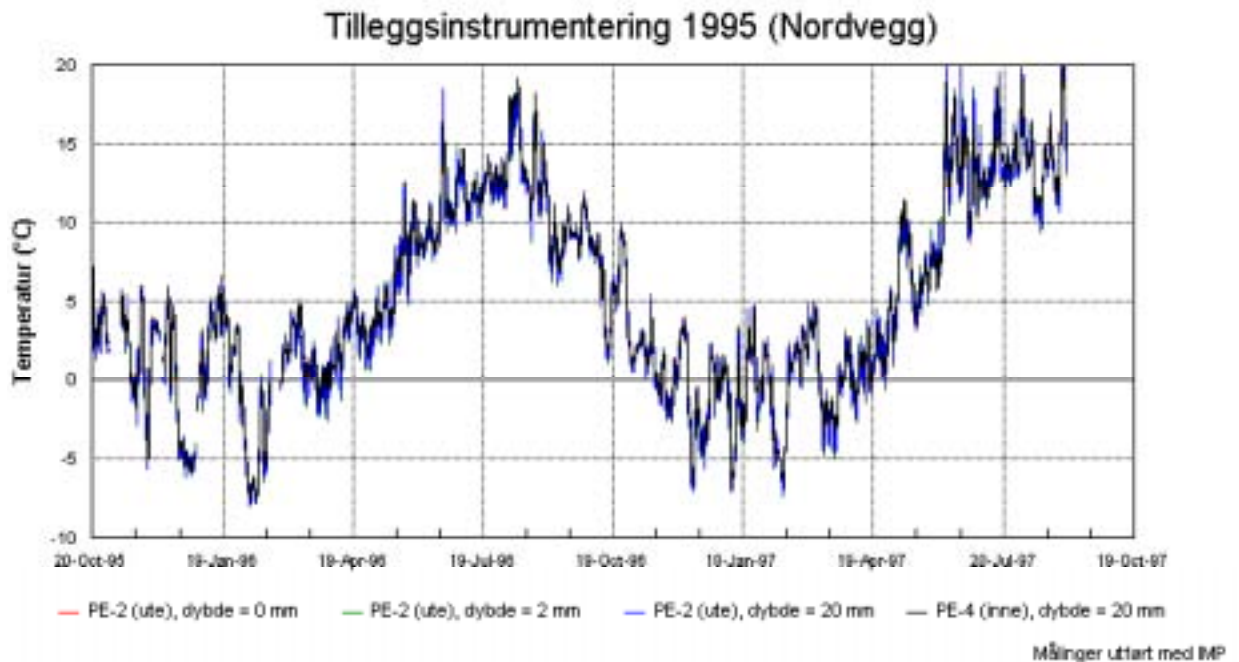
Ute- og inne-sondenes målinger i bruoverbygningen (figur 6.3-2) følges ad inntil sommeren 1996, men utover høsten øker inne-sondene markant og etablerer et nivå mange ganger (5-8) høyere enn ute-sondene. Noe av økningen kan skyldes uttørking rundt inne-sondene ved innmørtlingen (ble gjort sommeren 1995). Det er imidlertid overraskende at det skulle ta så lang tid. Høsten 1997 ble det tatt prøver til fukt- og kloridmålinger i de samme områdene. Kloridinnholdet i sondedybden (10-30 mm) var i snitt 0,32 % av betongvekt ute, og 0,02 % inne. Vannmetningsgraden DS var i snitt 87 % (ute) og 76 % (inne). Begge faktorer impliserer redusert motstand ute. Estimert fra laboratorieresultatene forventes en halvering pga. fukt (figur 6.3.1) og mer enn en halvering pga. klorider. Det vil si at det er forventet en motstandsreduksjon totalt ute i forhold til inne med en faktor på 5. Det er av samme størrelsesorden som resultatene vist i figur 6.3-2. Det forbausende er som nevnt at det tok så lang tid å etablere det lave fuktnivået inne etter innmørtlingen. RF-målinger i laboratoriet på de uttatte fuktprøvene viste ca. 73 % både ute og inne. Det ser altså ut til at det høyere fuktinnholdet og kloridinnholdet ute produserer samme RF som det lavere fukt- og kloridinnholdet inne. Resultatet bekrefter klart at hverken RF-målinger eller motstandsmåling alene er gode indikatorer for betongens fukttilstand; fukttilstanden må bestemmes direkte på uttatte prøver. Resultatene indikerer også at motstandsmålinger er meget følsomme ovenfor endringer i fukt- og kloridinnhold i betongen og derfor potensielt nyttige målinger. De to ute-sondene reagerer noe forskjellig over tid (figur 6.3-2). Dette kan være relatert til at PE-1 er meget nær et område reparert med mørtel hvilket har betydning for de lokale forholdene. Bemerk at veggen er belagt med Epoxy ute, dvs. at betongen er nærmest upåvirket av regn/tørke-perioder.



Figur 6.3-2: Motstandsmålinger med Wennerelektroder ute og inne i brukasseveggen mellom akse 1 og 2. Ute-veggen er belagt med epoxy.



Figur 6.3-3: Motstandsmålinger med Wennerelektroder på nord- og sørvegg i brukassa mellom akse 1 og 2. Veggene er belagt med Rescon Cem-Elastic.



Figur 6.3-4: Temperaturutviklingen i forskjellige dybder på nord-veggen av brukassa mellom akse 1 og 2.

Resultater fra motstandssonder på nord- og sørvegg

Motstandsresultatene for nord- og sørveggene av bruoverbygningen, figur 6.3-3, begge belagt med Rescon Cem-Elastic, gir et uklart bilde pga. stor forskjell i resultatene på sørvegg mellom grunn sonde (10-30 mm) og dyp sonde (30-50 mm).

Resultatene fra de uttatt prøvene viser kloridinnhold i vektprosent av betongvekt i dybde 10-30 mm (grunn) på 0,23 % på nordvegg og 0,08 % på sørvegg. Vannmetningsgraden (DS) 90 % på nordvegg og 88 % på sørvegg. Relativ fuktighet (RF) var ca. 72 % på både nord- og sørvegg.

Kloridinnholdet i dybde 30-50 mm (dyp) var vesentlig lavere enn i dybde 10-30 mm (grunn), henholdsvis 0,09 % på nordvegg og 0,03 % på sørvegg.

Med bakgrunn i disse resultatene forventes lavere motstand på nordvegg enn på sørvegg og lavere motstand i dybde 10-30 (grunn) enn i dybde 30-50 (dyp). Som figur 6.3-3 viser oppfylles ikke forventningene; dette fordi sør-sondene synes å være inkonsekvente. Den grunne sonden (10-30 mm) på sørvegg ligger lavt med små korttids fluktvariasjoner i hele perioden, med den dype sonden (30-50 mm) endrer karakter til «nord-oppførsel» underveis.

Temperaturinnflytelsen er også meget forskjellig som nevnt. Figur 6.3-4 viser for eksempel en sterk kuldeperiode i februar 1996. Begge nord-sondene viser da en sterk motstandsøkning, mens sør-sondene ikke viser noen endring. Langsiktige temperatur-effekter (sommer-vinter) er også fraværende for sør-sondene men til stede for nord-sondene. Til tross for den tilsynelatende troverdige responsen av motstandssondene er det altså meget vanskelig å tyde dataene på en fornuftig måte. Mer basiskunnskap og respons over lengre tid koblet med periodevis prøveuttak er nødvendig for å realisere motstandsmålingenes muligheter.

Fukttilstanden i betongens overflatesjikt varierer utvilsomt i takt med været helt lokalt. Overflatebehandlingen er påvist å ha en markant effekt på denne variasjonen ved andre undersøkelser. Effekten kan ha stor praktisk betydning både med hensyn til klorid-akkumulering og oksygentilgang til armering. Måling av overflatemotstand mellom påmalte striper av ledende belegg er derfor potensielt nyttig for å etablere at en slik effekt er tilstede i feltbetong. Det er forsøkt her i begrenset omfang. Resultatene er imidlertid noe inkonsekvente, men bør følges opp.

6.4 Elektrokjemiske tilstandskontrollmålinger

6.4.1 Innledning

Plassering av prøve- og reparasjonsfeltene var basert på resultatene fra inspeksjoner og forhåndskartlegging av korrosjonstilstanden, blant annet ved hjelp av EKP-måling med Bloodhound-utstyr. Etter at prøve- og referansefeltene var definert ble et begrenset område innen hvert av feltene valgt som instrumenteringsområder. Instrumenteringslokaliteten ble lagt til områder med laveste EKP, det vil si i områder med høyest sannsynlighet for pågående korrosjon.

Det har imidlertid vist seg at armeringen i disse områdene, med svært få unntak, var i en bedre korrosjonsmessig tilstand enn forventet ut fra tolkninger av EKP-data basert på måleinstrumentets innebygde tolkningskriterier. Dette er bekreftet ved oppmåling og ved sammenlikning med korrosjonspotensialer målt med innstøpte referanseelektroder. Generelt kan man si at Gimsøystraumen bru korrosjonsmessig er i en bedre forfatning enn det man forventet ut fra de ferdigtolkede Bloodhound målingene.

I tillegg til systematiske målinger med Bloodhound ble det i noen tilfeller foretatt målinger med Gecor 6, et instrument som i tillegg til EKP angivelig også måler korrosjonshastigheten til armeringen lokalt.

Dette kapitlet oppsummerer noen av de problemer og muligheter som er knyttet til slike målinger.

6.4.2 EKP-målinger

Metoden er velprøvd internasjonalt. Utførelse og tolkning av måleresultater er beskrevet i en egen standard, ASTM C-876 /5/. Det eksisterer flere kommersielle varianter av måleutstyr for kartlegging av EKP på betongkonstruksjoner. I Norge benyttes vanligvis Bloodhound. Instrumentet har vært benyttet ved samtlige EKP-målinger på Gimsøystraumen bru. Viktige erfaringer fra studiene av disse målingene er:

- EKP-måling gir et godt grunnlag for bedømming av sannsynligheten for korrosjon i betong. Målingene kvalitetssikres best ved at international standard ASTM C-876 /5/ følges. Dersom standarden fravikes, bør dette begrunnes særskilt.
- Tolkning av rådata må utføres av personell med kjennskap til de fenomener som kan komplisere tolkning. Det eksisterer ingen generelle og allmenngyldige tolkningskriterier. Det bør utarbeides egne kriterier for hver konstruksjon, ofte også for hver konstruksjonsdel. Både potensialgradienter og absoluttverdier bør benyttes ved tolkning.

Det er tre hovedårsaker til feiltolkning:

- Fenomener knyttet til stålets elektrokjemi, først og fremst forskjell i oksygeninnhold og det at potensialet fra sted til sted kan variere pga. variasjon i betongmiljøet
- Forskjeller i elektrisk motstand som medfører variasjoner i ohmsk spenningsfall
- Fenomener knyttet til betongegenskapene, som drift pga. forvanning og potensialbidrag fra «liquid junctions» eller grenseområder med konsentrasjonsforskjeller av ioner i porevannet eller lignende. Sistnevnte kan resultere i store potensialforskjeller fra en konstruksjonsdel til en annen.

Disse mulige årsakene til feiltolkning er nærmere behandlet i dr. grads-avhandlingen til R. Myrdal /20/ som er gjennomført innenfor prosjektet OFU Gimsøystraumen bru.

6.4.3 Mangelen på samsvar mellom EKP-måling og potensialer målt med innstøpte referanseelektroder

Det er observert relativt store forskjeller mellom potensialer målt med Bloodhound på betongoverflaten og med innstøpte referanseelektroder nær armeringen på samme sted. Mer enn 100 mV er ikke uvanlig. I lokaliteter med lave (negative) EKP-verdier fra Bloodhound viser de innstøpte referanseelektrodenes gjennomgående mer positive verdier,

mens i lokaliteter der Bloodhound viser svært positive potensialer er potensialene målt med innstøpte elektroder mer negative. Undersøkelsen viste at variasjonsområdet for potensialer målt med Bloodhound var ca. 300 mV mot ca. 150 mV for de innstøpte referanseelektrodene i samme målepunkter. Dersom vi forutsetter at de innstøpte referanseelektrodene gir det riktige bildet av korrosjonstilstanden, er den generelle tendensen at Bloodhound viser for høye (positive) potensialer på kasseveggene og for lave potensialer under kasse og på søyler. Tendensen til for lave Bloodhound potensialer er mest utbredt på søyler. Dette betyr ikke at Bloodhound måler feil. Annet måleutstyr ville sannsynligvis gitt det samme resultatet.

Hovedårsaken er å finne i den elektrolyttiske beskaffenheten i overgangen mellom referanseelektrode og betongoverflate og i ytterste sjikt av betongoverdekningen. Det måles gjennom en svært variabel elektrolytt. Variasjonen i type ioner og konsentrasjonen av disse på «måleveien» fra referanseelektroden til armeringen kan skape ladningsseparasjoner som i verste fall kan gi «liquid junction» eller grensesnitt potensialer på mer enn 100 mV.

En annen årsak kan være bidrag fra ohmsk spenningsfall som skapes av elektriske strømmer, f.eks. fra korrosjon, i betongoverdekningen. Produktet av korrosjonsstrøm og betongmotstand under målepunktet gir et potensialbidrag (strøm x motstand = spenning).

Mangelen på samsvar mellom overflatepotensialer (EKP-målinger) og potensialer målt med innstøpte referanseelektroder er nærmere drøftet i Myrdals dr.-avhandling /20/.

6.4.4 Måling med Gecor 6

I en systematisk undersøkelse av 89 målepunkter på overbygningen i felt 1 og 2 på Gimsøystraumen bru viste det seg å være en dårlig overensstemmelse mellom målinger med Gecor 6 og korrosjon bestemt ved visuell observasjon etter oppmeisling. Det ble registrert en liten forskjell i målte korrosjons hastigheter i områder med stor forskjell i observert korrosjonstilstand.

Konklusjonen fra denne undersøkelsen er at vanlige EKP-målinger gir en sikrere beskrivelse enn Gecor 6 når formålet med målingene er å sannsynliggjøre armerings-tilstanden eller korrosjonsskadegraden i denne aktuelle konstruksjonsdelen. Dette gjelder sannsynligvis også for andre konstruksjonsdeler og andre lignende konstruksjoner.

6.5 Elektrokjemiske målinger med innstøpte sensorer

6.5.1 Generelt

Det er anvendt tre forskjellige typer målinger som er utprøvd etter forskjellige utførelse- og måleprosedyrer:

Potensialmålinger er utført med forskjellige innstøpte referanseelektroder, samt målt både ved automatisert datafangst og manuelt.

Polarisasjonsmotstand er målt både på avkappet, isolert del av armeringen og på armering som ikke er avkappet for å gi et definert areal. Det er også gjennomført forsøk med varierende polariseringshastighet og med/uten automatisk kompensering av det ohmske spenningsfallet.

Oksygentransport er målt som grensestrøm både etter den aksepterte metoden med å polarisere arbeidselektroden til et definert potensial mot en referanseelektrode og etter en forenklet metode med å påtrykke potensialet mellom arbeidselektroden og motelektroden. Det er også brukt to forskjellige typer motelektroder: inert elektrode og korroderende elektrode.

Prosjektet har klart demonstrert betydningen av kontinuerlige målinger. Det er såpass store variasjoner over tid i måleverdiene for flere parametre, spesielt på grunn av temperatureffekter, at det nærmest er tilfeldig om resultater fra sporadiske manuelle målinger lar seg sammenligne. Av de elektrokjemiske målingene gjelder dette spesielt oksygentransport. Diskusjoner av resultatene fra måling av oksygentransport er derfor basert på resultater fra Prøvereparasjon 2 (1994) og Prøvereparasjon 3 (1995).

6.5.2 Potensial og polarisasjonsmotstand

Potensialmålinger har foreløpig gitt få resultater som kan reflektere mulige effekter av de gjennomførte vedlikeholds- og reparasjonstiltakene. Det har neppe sammenheng med metoden, men at målingene ikke spenner over lang nok periode til at potensialene har endret seg vesentlig. Korrosjonssituasjonen på brua var slik – lite aktiv korrosjon - at det nødvendigvis må ta tid før det oppstår endringer i korrosjonstilstand som kan tilbakeføres til de vedlikeholds- og reparasjonstiltak som er gjennomført.

Referanseelektroden fungerer generelt bra. Eksempelvis for Prøvereparasjon 1 (1993) var to ERE-elektroder, tre blyelektroder og en Rover-elektrode ute av funksjon av totalt

16 ERE-elektroder, 11 blyelektroder og 11 Rover-elektroder. Høyst sannsynlig, men ikke dokumentert, skyldes det hovedsakelig kontaktproblemer mellom elektroden og betongen.

Målinger av polarisasjonsmotstand har heller ikke gitt entydig informasjon om en mulig korrosjonsutvikling på brua. Som beskrevet i kapittel 5.2.3, er denne type målinger på stål i betong beheftet med store usikkerheter, både av metodisk og måleteknisk karakter. Forventningen til målingene må derfor ikke overvurderes. I beste fall vil måleresultatene kunne skille mellom aktivt korroderende armering og armering som fortsatt er i passiv tilstand.

På tross av at en under målingene på Gimsøystraumen bru prøvde å kartlegge innflytelsen av ulike parametre, var det vanskelig å finne en systematikk i registrerte variasjoner i polarisasjonsmotstand. Eksempelvis ble sveipehastigheten variert under målingene /23/. Polarisasjonsmotstanden ble målt med sveipehastigheter på 0,5 mV/s og 0,1 mV/s. Som ventet ble det registrert noe høyere polarisasjonsmotstand med den laveste sveipehastigheten fordi strømmen blir noe redusert når polarisasjonshastigheten senkes. Innenfor den utprøvde variasjonen av sveipehastigheter ble det ikke observert signifikante effekter på de registrerte polarisasjonsmotstandsverdiene. Dersom en utfører målingene med betydelig langsommere polarisasjonshastighet enn nevnt ovenfor, ville trolig den økte «stabiliseringstiden» for reaksjonene på ståloverflaten gitt generelt lavere strømmer enn det som ble registrert ved raskere endringer. Dette ville spesielt ha en effekt på registrert polarisasjonsmotstand på passivt eller ikke-korroderende armering. Det var også vanskelig å etablere noen sammenheng mellom polarisasjonsmotstandsverdier og potensialer registrert lokalt på brua.

En av årsakene til at polarisasjonsmotstandsverdiene er vanskelig tolkbare, kan være at de utført på ikke- eller lite korroderende armering. Under disse betingelsene vil polarisasjonsmotstanden generelt være høy med relativt stor relativ usikkerhet i måleverdiene. På aktivt korroderende armering vil polarisasjonsmotstanden være lavere og overflaten på det innstøpte stålet mer definert (aktiv). Dette vil kunne gi mer reproducerbare målinger. Polarisasjonsmotstandsmålinger kan derfor være et mer egnelig verktøy når tilstanden på brua er preget av mer fremskreden korrosjon enn tilfellet er idag.

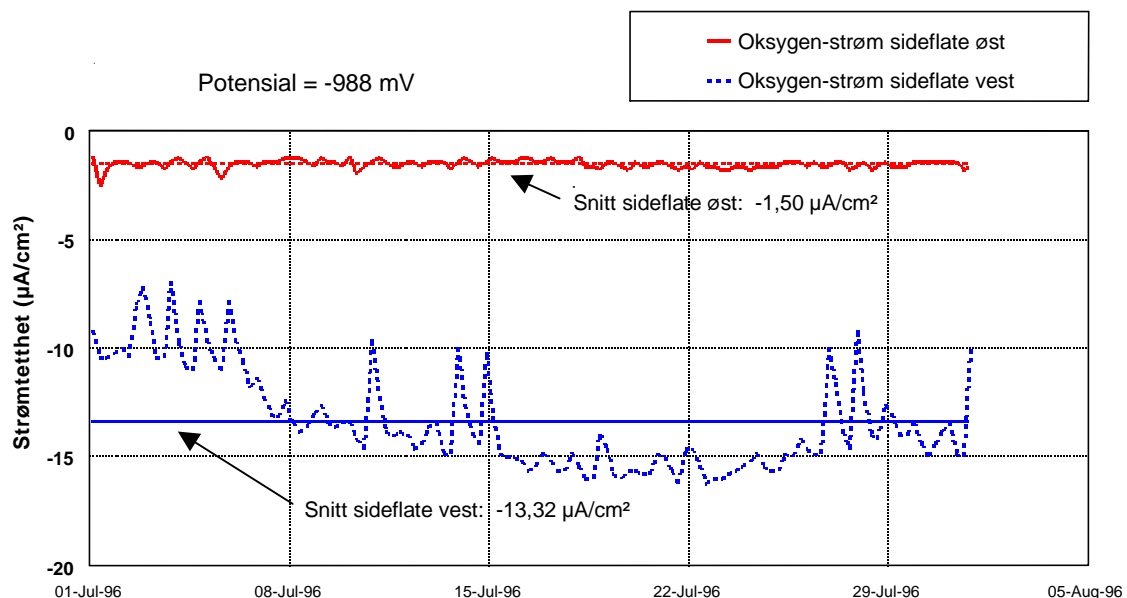
Som beskrevet ovenfor er generelt alle verdiene for polarisasjonsmotstand meget høye og kan i begrenset grad sannsynliggjøre korrosjon på armeringen. De laveste verdiene finnes for Prøvere-parasjon 1 (1993), og under forutsetning av uniform korrosjon vil f.eks. polarisasjonsmotstanden funnet i underkant av referansefelt 1 (måling foretatt 1994-11-29) tilsvare en korrosjonshastighet på $4,22 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ /23/.

6.5.3 Oksygentransport

Av de metoder som er anvendt på OFU Gimsøystraumen er måling av oksygentransport den metoden som gir mest entydige resultater. Målingene gir resultater etter kort tid og viser en markert effekt av enkelte midler for overflatebehandling. Det demonstreres både ved sammenligning mellom behandlede felt og referansefelt og ved sammenligning mellom felt med forskjellige former for overflatebehandling.

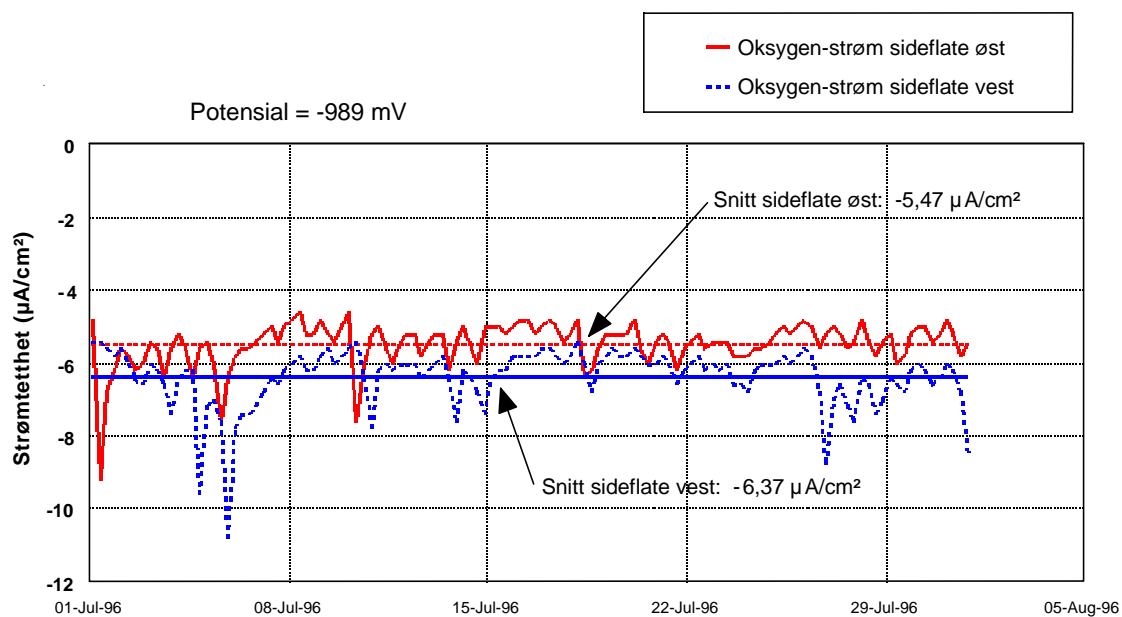
Verdiene for oksygentransport - representert ved strømmen for oksygenreduksjon på sonden i det aktuelle prøvelfeltet - varierer sterkt og synes spesielt å være sterkt påvirket av temperaturen; alle vinterverdiene er betydelig lavere enn sommerverdiene.

Figurene 6.5-1, 6.5-2 og 6.5-3 viser typiske kurver for reduksjonsstrømmene fra prøvelfeltene i alle søylene som inngikk i Prøvereoperasjon 2 (1994).



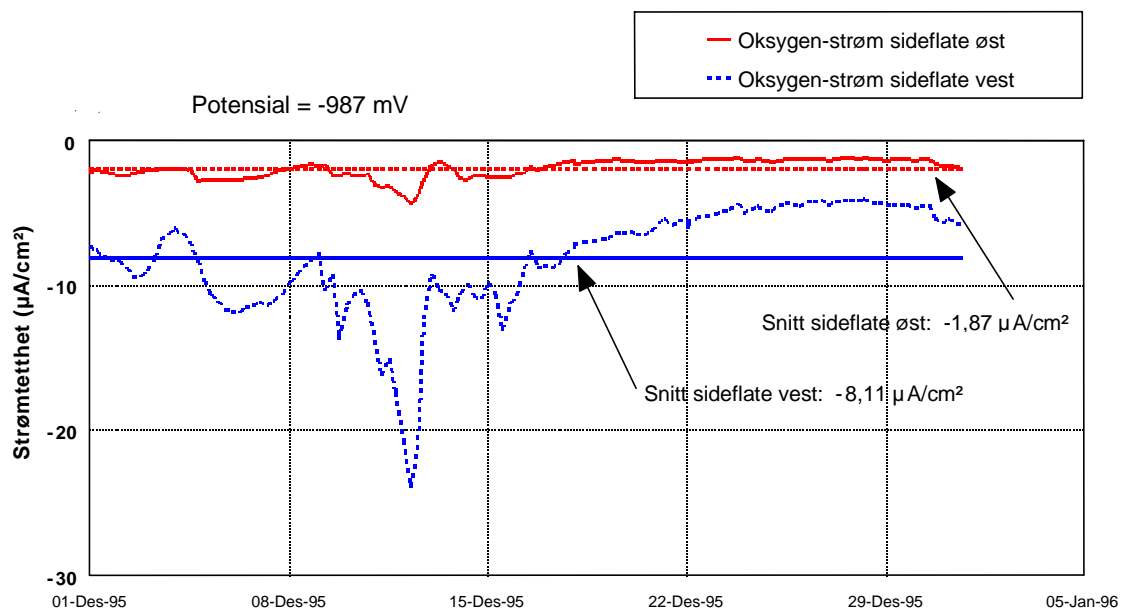
Vest: Referansefelt
Øst: 3 strøk Rescon CI-brems

Figur 6.5-1: Prøvereoperasjon 2 (1994) - oksygentransport målt på søyle 3 i juli 1996.



Vest: 1 lag Cem-S + 5 strøk Epoflex
Øst: 1 strøk CI-brems + 4 strøk Cem-Elastic.

Figur 6.5-2: Prøvereparasjon 2 (1994) - oksygentransport målt på søyle 4 i juli 1996.



Vest: 1 lag Cem-S + 5 strøk Epoflex
Øst: 1 strøk CI-brems + 4 strøk Cem-Elastic.

Figur 6.5-3: Prøvereparasjon 2 (1994) - oksygentransport målt på søyle 5 i desember 1995.

Tabell 6.5-1 viser middelverdiene for målesondene i de forskjellige feltene.

Tabell 6.5-1: Strømtettheter for oksygenreduksjon – Prøvereparasjon 2 (1994).

Type overflatebehandling	Midlere strømtetthet ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
	1995		1996	
	Juli	Desember	Juli	Desember
Referansefelt	11,49	7,29	13,32	5,64
3 strøk Rescon CI-brems	2,02	0,90	1,50	0,35
1 lag Cem-S + 5 strøk Epoflex	5,19	3,00	6,37	2,04
1 strøk CI-brems + 4 strøk Cem-Elastic	7,74	3,22	5,47	1,11
Referansefelt	12,32	8,11	10,51	5,03
1 strøk CI-brems + 1 strøk Protect Lasur	3,11	1,57	2,34	2,82

Det er tre markerte trekk:

- Det er en klar effekt av overflatebehandlingen på oksygentransporten
- Alle overflatebehandlingsmidler medfører en reduksjon i oksygenstrømmene sammenlignet med referansefeltene
- Juli-verdiene er betydelig høyere enn desember-verdiene.

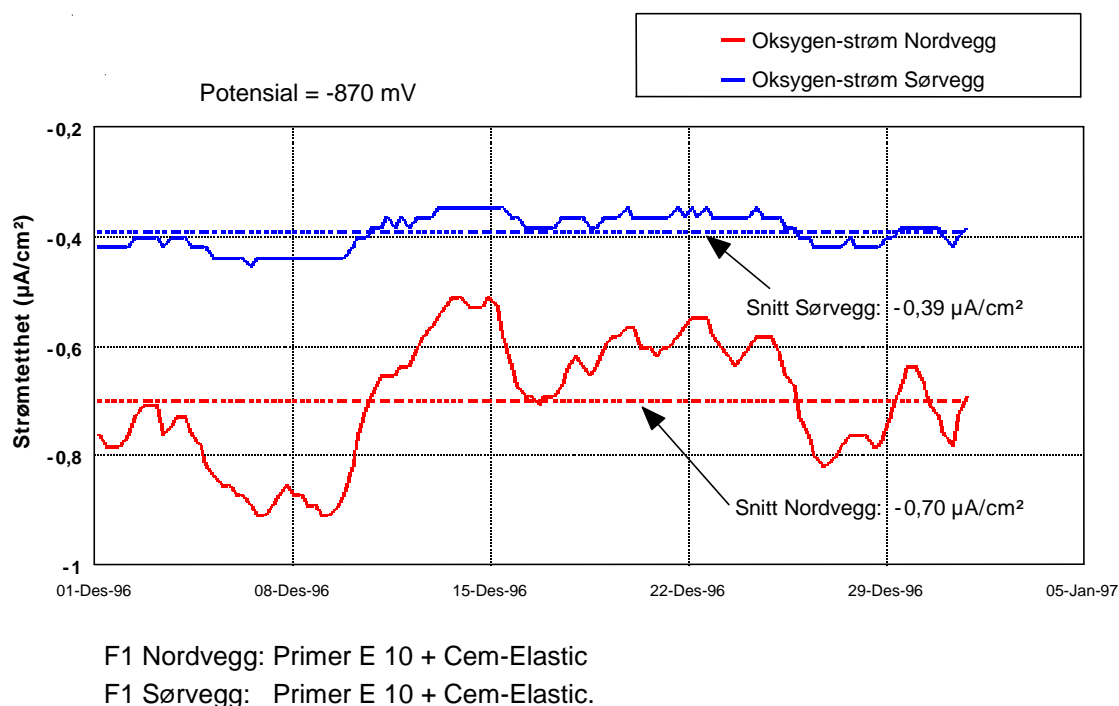
I søyle 3 er verdiene fra østsiden (overflatebehandlet med CI-brems) stort sett ca. 10 % av verdiene fra referansefeltet. I søyle 4 (uten referansefelt) er forskjellen mellom verdiene fra østsiden (1 strøk CI-brems + 4 strøk Cem-Elastic) og vestsiden (1 lag Cem-S + 5 strøk Epoflex) ca. 50 %. I søyle 5 er det varierende forskjell, men ved siste måling (desember 1996) er verdien fra det behandlede feltet ca. 50 % av verdien fra referansefeltet.

Spesielt resultatene fra søyle 3 er bemerkelsesverdige, først og fremst pga. den ekstremt lave oksygentransporten som er registrert i sideflate øst (behandlet med tre lag CI-brems) sammenlignet med referansen. Det er også forbausende at epoksybehandling gir mindre effekt enn hydrofobering. Dette reiser to spørsmål:

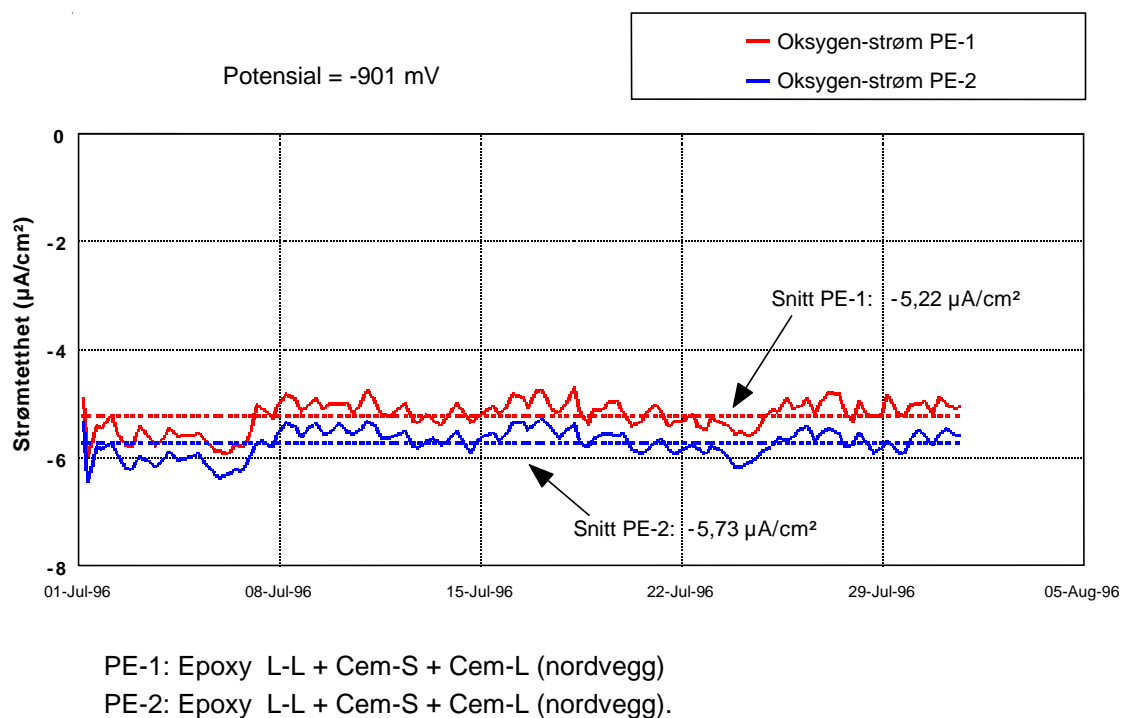
- Hva er mekanismen for oksygentransport i betong?
- Hvordan kan oksygentransporten en sideflate på søylen bli så lav når en av sideflatene er ubehandlet?

Om resultatene er bemerkelsesverdige, så er de desto mer interessante mht. muligheter til å påvirke korrosjonsprosessen i betongkonstruksjoner og mht. mekanismer for oksygeninntrenging og transport i betong.

I figurene 6.5-4 og 6.5-5 vises kurver for reduksjonsstrømmene fra prøvefeltene som inngikk i Prøvereparasjon 3 (1995).



Figur 6.5-4: Prøvereparasjon 3 (1995) - oksygentransport målt i desember 1996.



Figur 6.5-5: Prøvereparasjon 3 (1995) - oksygentransport målt i juli 1996.

Tabell 6.5-2 viser middelveiene for målesondene i de forskjellige prøvefeldene.

Tabell 6.5-2: Strømtettheter for oksygenreduksjon - Prøvereapasjon 3 (1995).

Behandling	Midlere strømtetthet ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)		
	1995	1996	
	Desember	Juli	Desember
Primer E 10 + Cem-Elastic (F1 Nord)	1,40	1,92	0,70
Primer E 10 + Cem-Elastic (F1 Sør)	0,72	0,89	0,39
Epoxy L-L + Cem-S + Cem-L (PE1 Nord)	3,24	5,22	1,20
Epoxy L-L + Cem-S + Cem-L (PE2 Nord) (Skal belegges innvendig)	7,15	5,73	1,69

Det er ikke referansefelt ved Prøvereapasjon 3 (1995).

Det var to hovedmålsettinger ved installasjonen av sondene i Prøvereapasjon 3 (1995) i tillegg til å få data fra de aktuelle behandlingstypene:

- Måle forskjell mellom nord og sør på brukassa.
- Måle effekt av innvendig overflatebehandling i brukassa (men pr. 1998 er det bare utsiden som er behandlet).

Også for Prøvereapasjon 3 (1995) er hovedtrekkene at oksygentransporten, representert ved den målte strømtettheten, varierer mye og at det er en markert forskjell mellom somrerverdier og vinterverdier. Ettersom det ikke er referansefelt ved Prøvereapasjon 3 (1995), er det vanskelig vurdere effektiviteten av overflatebehandlingen. Sammenlignet med resultatene fra Prøvereapasjon 2 (1994) fra søylene synes overflatebehandlingen i feltene F1 - både nord og sør - å ha medført en betydelig reduksjon i oksygentransporten mens denne effekten er mindre tydelig i både PE1 og PE2 (begge på nordsiden). Spesielt er verdiene fra feltene F1 bemerkelsesverdig lave med tanke på at brukassa ikke er behandlet innvendig. Igjen viser epoksy seg mindre effektiv enn en antatt ved at måling av oksygenstrøm indikerer et relativt diffusjonsåpent belegg.

Det er fremkommet svært interessante - og til dels bemerkelsesverdige - resultater fra målingene av oksygentransport på Gimsøystraumen bru. Noen av resultatene er såpass spesielle at de foreløpig må vurderes med forsiktighet. Det synes imidlertid sikkert at overflatebehandling av betong - med effektive midler - kan være en meget interessant metode til å redusere korrosjonshastigheten ved armeringskorrosjon.

6.6 Tilleggsmålinger

6.6.1 Generelt

Dette avsnittet beskriver målinger og forsøk som opprinnelig ikke var planlagt, men som ble besluttet utført fordi en relativt beskjeden innsats kunne gi verdifull informasjon om andre måleteknikker.

6.6.2 Forenklet måling av oksygentransport

Som nevnt i avsnitt 6.5, ble det gjort forsøk på å måle oksyngengrensestrømmen på en forenklet måte ved at en potensiostat styrte potensialet til flere arbeidselektroder samtidig. På noen av feltene ble målingene i en viss periode utført på denne måten. Etterhvert viste det seg at denne måleprosedyren ikke fungerte. Hovedårsaken er sannsynligvis at uten en referanseelektrode og en potensiostat til hvert målepunkt vil potensialet variere. Den målte strømmen blir derfor i stor grad bestemt av potensialvariasjoner og **ikke** av oksygenreduksjonen ved et definert potensial (se kapittel 6.5).

6.6.3 Måling av polarisasjonsmotstand

Polarisasjonsmotstanden ble målt på forskjellige måter både på kappet armering med definert areal, Prøvere-parasjon 1 (1993), og på sammenhengende armering, Prøvere-parasjon 2 (1994), med følgende metoder:

- Potensiodynamisk uten IR-kompensering, dvs. kompensering for det ohmske spenningsfallet i betongen
- Potensiostatisk uten IR-kompensering
- Potensiostatisk med IR-kompensering.

På kappet armering ble det dessuten gjort galvanostatiske målinger.

De mest pålitelige resultatene ble oppnådd med potensiostatisk målinger med IR-kompensering og med galvanostatiske målinger.

Ingen av målingene på sammenhengende armering gav pålitelige resultater. Det var tydelig at når arealet er udefinert kan en målt verdi for polarisasjonsmotstand ikke tolkes med hensyn til utviklingen av korrosjon.

7 Oppsummering og konklusjoner

7.1 Sensortyper og målemetoder

På Gimsøystraumen bru er det installert sensorer av forskjellige typer for å kunne undersøke følgende parametre:

- Korrosjonstilstand
- Katodeeffektivitet (oksygentransport)
- Korrosjonshastighet
- Relativ fuktighet (fuktnivå)
- Elektrisk motstand
- Temperatur.

Alle sensorene med unntak av elektrisk ledende maling for måling av motstand er installert ved å bore hull fra overflaten, i størst mulig grad fra innsiden, og installere sensoren i ønsket dybde ved hjelp av en innstøpingsmørtel.

Tabell 7.1-1 viser hvilke typer sensorer som er installert for å gjennomføre målingene, hvilken type måling som er gjort og hvilke parametre som var planlagt undersøkt for de forskjellige sondetyperne og målingene.

Tabell 7.1-1: Gimsøystraumen bru – sondetyper og målinger ved instrumentert overvåking.

Sensortype	Måling	Evaluering
Referanseelektroder	Potensial	Korrosjonstilstand
Stålbolt	Polarisasjonsmotstand	Korrosjonshastighet/korrosjonstilstand
Stålbolter (Par)	Elektrisk motstand	Elektrisk motstand
Stålbolter (Wenner)	Elektrisk motstand	Elektrisk motstand
Ledende maling	Elektrisk motstand	Elektrisk motstand i yttersjikt
Multiring	Elektrisk motstand	Fuktvariasjoner i dybden
Stålbolt	Katodestrøm	Katodeeffektivitet/oksygentransport
Termoelement	Temperatur	Temperatur

I det etterfølgende gis det en vurdering av målemetodene og sensortypene som er benyttet ved instrumenteringen på Gimsøystraumen bru. Vurderingen er selvsagt basert på måleresultatene fra instrumenteringsopplegget; ikke direkte på sammenligning av forskjellige måledata, men mer på diskusjonen i IDV-gruppa vedrørende tolking av resultatene.

Instrumenteringsopplegget har gitt meget interessante data og verdifull informasjon. Det har imidlertid vært vanskelig å tolke en del av de data som er målt, samlet og presentert i det instrumenteringsopplegget som har vært benyttet. Det skyldes delvis at det har vært måletekniske problemer. Det skyldes også mekaniske problemer med selve sensorene og kontakten sensor/betong og det skyldes at det for noen målemetoders vedkommende er så lite praktisk erfaring med feltmålinger at det ikke har vært grunnlag for å sammenligne med tidligere erfaringer. Det påpekes også at det er kompleks interferens mellom prosesser og mekanismer for de forskjellige typen målinger.

7.1.1 Vurdering av klimapåkjenning

Klimaet på brustedet er behandlet i kapittel 4 og i egen rapport /2/. Det gjøres oppmerksom på at klimadataene gjelder for ett år (fra og med juli 1995 til og med juni 1996).

Temperaturdataene viser at det er forholdsvis små temperatur variasjoner over året. I perioden juli 1995 til juni 1996 var riktignok minimum og maksimum temperaturene henholdsvis $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $+21\text{ }^{\circ}\text{C}$, men gjennomsnittlige månedsmiddel varierte bare fra $-2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $+9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, dvs. i underkant av $13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

I vintermånedene er det liten eller ingen variasjon av temperatur mellom nord- og sørside. I sommerhalvåret og spesielt på våren og høsten registreres det temperaturøkninger på sørsiden som kan være $5\text{-}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ høyere enn lufttemperaturen. Kasseveggen på nordsiden følger lufttemperaturen.

Det er også verd å merke seg at frostpåkjenningen på betongen er liten. Det forekommer ikke spesielt lave vintertemperaturer, og antall perioder med temperatur under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ er få. I måleperioden var det 36 perioder med temperatur under $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Midlere vindhastighet for den nevnte måleperioden var $5,3\text{ m/s}$. Denne verdien sier imidlertid lite om vindforholdene på stedet. Maksimum middelvindhastigheter over 3 timer på $14\text{-}19\text{ m/s}$ gjennom hele året og registrerte kastevinder på opptil 40 m/s gir et riktigere bilde av brustedet.

De dominerende vindretningene er fra sør og nord, mens brua er orientert ca. øst-vest. Det er imidlertid mest nedbør ved sørvestlig vind. Dette er sannsynlig årsaken til den

karakteristiske I_o/I_e-effekten med høyest kloridinnhold på nordsiden og den ru betongflaten på sørsiden.

7.1.2 Potensialmålinger

Referanseelektroder

Referanseelektrodene har generelt fungert bra. Eksempelvis er det for Prøvere-parasjon 1 (1993) to ERE-elektroder, tre blyelektroder og en grafitt-elektrode som er ute av funksjon av totalt 16 ERE-elektroder, 11 blyelektroder og 11 grafitt-elektroder. Ved prøve-reparasjoner 1995 ble det benyttet noen Ag/AgCl-elektroder med dårlig resultat. Høyst sannsynlig, men ikke dokumentert, skyldes dette hovedsakelig kontaktproblemer mellom elektroden og betongen.

Elektrodevalget vil være avhengig av formålet med elektroden. Hvis elektroden skal brukes til måling av potensialendringer over lang tid, må det brukes mest mulig stabile elektroder. Hvis det skal registreres relativt kortvarige potensialendringer, som f. eks. ved måling av polarisasjonsmotstand, kan enklere elektroder brukes.

Ved en totalvurdering av antall referanseelektroder/kostnad mot driftssikkerhet anbefales (kostbare) ERE-elektroder kombinert med flere (billige) bly eller grafitt-elektroder. Målingene er stabile og pålitelige, og spesielt synes ERE-elektrodene å fungere godt over tid.

Korrosjonstilstand ved potensialmålinger

Potensialmålinger har foreløpig gitt få resultater med hensyn til effekten av de gjennomførte vedlikeholds- og reparasjonstiltak. Det har neppe sammenheng med metoden men snarere at målingene ennå ikke er gjennomført over lang nok periode til at potensialene har endret seg vesentlig. Korrosjonssituasjonen på brua (lite aktiv korrosjon) var slik at det nødvendigvis må ta tid før det oppstår endringer i korrosjonstilstand som kan tilbakeføres til de vedlikeholds- og reparasjonstiltak som er gjennomført. Det pekes også på at referanseelektrodene generelt sett ikke er plassert i områder der miljøpåkjenningen er størst.

Samsvar mellom EKP-måling og potensialer målt med innstøpte referanse-elektroder

Det er observert forskjeller på mer enn 100 mV mellom potensialer målt på betongoverflaten og med innstøpte referanseelektroder på samme sted. I lokaliteter med lave (negative) verdier målt på overflaten viser de innstøpte referanseelektrodene gjennomgående mer positive verdier. I lokaliteter der overflatepotensialene er svært

positive er potensialene målt med innstøpte elektroder mer negative. Undersøkelsen viste at variasjonsområdet for overflatepotensialer var større enn for de innstøpte referanseelektrodene i samme målepunkter. Dersom vi forutsetter at de innstøpte referanseelektrodene gir det riktige bildet av korrosjonstilstanden, er den generelle tendensen at overflatepotensialene er for positive på kasseveggene og for negative under kasse og på søyler.

Denne forskjellen skyldes den elektrolyttiske beskaffenheten i overgangen mellom referanseelektrode og betongoverflate og i ytterste sjikt av betong-overdekningen. Det måles gjennom en svært variabel elektrolytt, og variasjonen i type ioner og konsentrasjonen av disse kan skape ladningsseparasjoner som i verste fall kan gi «liquid junction» potensialer på mer enn 100 mV. En annen årsak kan være bidrag fra ohmsk spenningsfall som skapes av elektriske strømmer, f.eks. fra korrosjon, i betongoverdekningen.

7.1.3 Polarisasjonsmotstand

Målingene ga ustabile og usystematisk data og er svært følsom for prosedyre. Når det gjelder måling av polarisasjonsmotstand med innstøpte motelektroder, må det dokumenteres en sammenheng mellom den målte verdi og en korrosjonshastighet. Det må også arbeides for å finne fram til mer egnede relasjoner mellom motelektrodens plassering og areal. Når det gjelder endringer i potensialverdiene og for polarisasjonsmotstand behøver det for så vidt heller ikke å være en sammenheng; et korrosjonspotensial sier ingenting om korrosjonshastighet, men bare om armeringen er passiv eller aktivt korroderende. Det var imidlertid forventet at endringer i korrosjonstilstanden for noen av målepunktene ville enten reflekteres i endringer i potensial, endringer i polarisasjonsmotstand eller i endringer i sammenhengen mellom potensial og polarisasjonsmotstand for det enkelte målepunkt. Denne sammenhengen har ikke vært tilstede.

Det er ikke mulig å trekke konklusjoner ut fra polarisasjonsmotstandsmåling med hensyn på effekt av de vedlikeholds- og reparasjonstiltak som er gjennomført på Gimsøystraumen bru. Generelt er alle verdiene for polarisasjonsmotstand meget høye og understøtter potensialverdiene; det kan i begrenset grad sannsynliggjøres korrosjon på armeringen.

Omregning av verdier for polarisasjonsmotstand til korrosjonshastighet er høyst usikker. *Eksempel:* De laveste verdiene for polarisasjonsmotstand finnes for Prøvereparasjon 1 (1993). Under forutsetning av uniform korrosjon vil f. eks. polarisasjonsmotstanden funnet i underkant av brukassen i referansefelt 1, høsten 1994 /23/, tilsvare en korrosjonshastighet på $4,20 \cdot 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Verdien er meget lav og betyr egentlig at den målte armeringsbiten ikke korroderer.

7.1.4 Elektrisk motstand

Til tross for den tilsynelatende troverdige responsen av motstandssondene er det meget vanskelig å tyde dataene på en fornuftig måte. Mer basiskunnskap og respons over lengre tid koblet med periodevis prøveuttak er nødvendig for å realisere motstands-målingenes muligheter.

Fukttilstanden i betongens overflatesjikt varierer utvilsomt i takt med været helt lokalt. Effekten kan ha stor praktisk betydning både med hensyn til kloridakkumulering og oksygentilgang til armering. Måling av overflatemotstand mellom påmalte striper av ledende belegg er derfor potensielt nyttig for å etablere at en slik effekt er tilstede i feltbetong. Det er forsøkt her i begrenset omfang. Resultatene er imidlertid noe inkonsekvente, men bør følges opp.

Arbeidet i dette prosjektet som helhet viser at det er mulig å løse de tekniske problemer med instrumentert overvåking av elektrisk motstand i feltbetong. Bruk av Wenner prinsippet anbefales for å redusere effekten av stor variasjon i overgangsmotstand stål-mørtel-betong. Måleprinsippet er sannsynligvis enklere og mer stabil enn andre metoder til fuktovervåking, for eksempel RF-sonder. Nytteverdien i dag begrenses først og fremst av følgende faktorer:

- Problemet med å etablere stabil kontakt i overgangssonene stål-mørtel-betong
- Manglende kunnskap om prosessene som gjør temperaturinnflytelsen på motstand så varierende i feltbetong.

Multiringelektroden er følsom for innstøpingsprosedyre. Den krever en tung instrumentering med mange målekanaler. Dessuten registrerer multiringelektroden motstanden i innstøpingsmørtelen (altså ikke i betongen direkte). Med bakgrunn i dette anbefales ikke denne sensoren.

7.1.5 Relativ fuktighet

Formålet med undersøkelsen var å kartlegge betongens fukttilstand i overflatebehandlede felt og referansefelt over tid for 1993 og 1994 reparasjonene. Undersøkelsene besto av både instrumentert overvåking (RF-sonder) og laboratoriemålinger på uttatte prøver. I tillegg ble likevektforholdet mellom relativ fuktighet og betongens fuktinnhold bestemt under adsorpsjon og desorpsjon på tynne betongskiver saget fra borkjerner med og uten klorider.

Hovedresultatet er at fukttilstanden i brubetongen varierer lite over tid og posisjon, og at overflatebehandlingen ikke har noen registrerbar innflytelse. Det bør igjen poengteres at samtlige målinger enten er foretatt minst 15 mm inn fra overflaten eller representerer

gjennomsnittsverdier for dybder fra 0 til 30-50 mm fra overflaten. Fukttilstanden i de ytterste få mm varierer selvfølgelig med værforholdene, men de brukte metodene er ikke i stand til å registrere denne variasjonen. At variasjonene faktisk bare finner sted i et tynt overflatesjikt, bekreftes av karbonatiseringsmålingene som viser generelt mindre enn 5 mm dybder. Fuktvariasjonene i det tynne sjiktet er imidlertid av stor praktisk betydning, særlig med hensyn til kloridakkumulering ved oppfukning/tørke sykler.

Resultatene fra feltmålingene viser at RF-nivået ligger i området 65-80 % RF. Endringer utover dette for enkeltsonder kan også skyldes manglende kalibrering av sondene. Korttidsvariasjonene er større under raske temperaturendringer, men dette skyldes måletekniske forhold. Laboratoriemålingene gir også stabile RF-verdier i området 70-80 % RF. RF-nivået i betongen tilsvarer godt gjennomsnittsverdien i luften, som naturlig nok er den «styrende» parameter.

Fuktinnholdet i betongen er tilsvarende stabilt innenfor området 4,4-5 vektprosent av tørr betong, tilsvarende vannmetningsgrader i området 80-90 % DS. Dette er middelveier for de enkelte prøvesettene, variasjonen mellom enkeltprøver er selvfølgelig større. DS-verdien anbefales som den beste måte å uttrykke fuktinnholdet på fordi hver enkelt prøves fuktinnhold da er satt i forhold til prøvens vannsugporøsitet, dvs variasjoner i tilslag/bindemiddel-forhold elimineres. Dette bekreftes ved at variasjonskoeffisienten for DS i et prøvesett alltid er mindre enn for fuktinnholdet i vektprosent. Vannmetningsgraden (DS) i betongen betraktes som en mer relevant fukttilstands-parameter enn RF med hensyn til bestandighetsegenskaper. Dette bl.a. fordi RF også er influert av porevannskjemien (klorider, alkalier osv.) ved en gitt DS-verdi.

Resultatene fra Gimsøystraumen bru er sammenlignet med tilsvarende undersøkelser (men langt mer begrensede i omfang) fra andre kystbruer. Disse varierte en del i betongkvalitet, men hadde in-situ vannmetningsgrader (DS) i området 75-90 %, dvs. noe lavere i snitt enn Gimsøystraumen bru med 85 % DS i snitt. Konklusjonen er altså at kystbruer generelt har en høy gjennomsnittlig vannmetningsgrad, og at Gimsøystraumen bru ikke er atypisk.

PF-resultatene (bestemmelse av densitet og porøsitet) viste god homogenitet i betongen. Middelveiene var noe over 12 volumprosent i vannsugporøsitet, hvilket gir et estimat av effektivt masseforhold på ca. 0,45. Dette er rimelig for brubetong fra 1980. Det var ingen signifikant forskjell på prøver fra brukassa og søylene, dvs. at det ikke foreligger tegn på at ulike betongkvaliteter ble benyttet som foreskrevet i spesifikasjonene. Luftporeinnholdet var nær ca. 3 volumprosent.

Kontinuerlig in-situ RF-målinger krever periodevis fjerning av sondene og kalibrering i laboratoriet. Det anbefales 2 måneders intervaller i startfasen med lengre intervaller etter hvert som stabilitet dokumenteres. Det er selvfølgelig en forutsetning at loggesystemet er stabilt over tid. Dette må sjekkes ved in-situ «håndmålinger».

Prøveuttak til fuktbestemmelser i laboratoriet bør baseres på 3 parallelle prøver pr. posisjon. Hver prøve bør være minst 200 g. Detaljert prosedyre er gitt i håndbok 015 /12/. Prosedyrer for gjennomføring av laboratorieforsøk er gitt i Publikasjon nr. 87 /13/.

Betongens fukttilstand karakteriseres best ved å beskrive vannmetningsgraden på uttatte prøver. In-situ RF måling kan fungere som løpende kontroll, men må suppleres med periodevise prøveuttak og laboratoriemålinger av DS og RF.

7.1.6 Hovederfaring med tilstandskontrollmålingen

EKP-måling i henhold til ASTM C-876 er en god metode for å sannsynliggjøre korrosjon i betongkonstruksjoner. Metoden krever personell med korrosjonsteknisk og betongteknologisk kompetanse, både til å utføre målingene og særlig til tolkning av måldata.

Gecor 6 og liknende instrumenter må foreløpig betraktes med stor skepsis når det gjelder å måle korrosjonshastigheten på innstøpt stål pålitelig.

7.1.7 Oksygentransport

Av de metoder som er anvendt på OFU Gimsøystraumen er opplagt måling av oksygentransport den metoden som gir mest entydige resultater. Målingene gir resultater etter kort tid og viser en markert effekt av enkelte midler for overflatebehandling. Det demonstreres både ved sammenligning mellom behandlede felt og referansefelt og ved sammenligning mellom felt med forskjellige former for overflatebehandling.

Verdiene for oksygentransport, representert ved strømmen for oksyngengreduksjon på sonden i det aktuelle prøvemarket, varierer sterkt og synes spesielt å være sterkt påvirket av temperaturen; alle vinterverdiene er betydelig lavere enn sommerverdiene.

Det er tre markerte trekk:

- Det er en klar effekt av overflatebehandlingen på oksygentransporten
- Alle overflatebehandlingsmidler medfører en reduksjon i oksygenstrømmene sammenlignet med referansefeltene
- Juli-verdiene er betydelig høyere enn desemberverdiene.

Betong overflatebehandlet med vannavvisende impregnering (Rescon CI-brems) har størst effekt med verdier på ca. 10 % av verdiene fra referansefeltet. Det er forbausende at epoksybehandling gir mindre effekt enn vannavstøtende impregnering.

Hvorvidt begrensninger i katodeprosessen begrenser korrosjonshastigheten er normalt avhengig av vannmetningsgraden (fuktinnholdet) i betongen. I vannmettet tilstand er

reduksjon av oksygen den begrensende faktor for korrosjonsprosessen og enhver reduksjon i transporthastigheten for oksygen vil redusere korrosjonshastigheten. I tørr betong er det vanligvis anodeprosessen som er den hastighetsbestemmende prosess og endring i oksygentransporten betyr derfor lite. Anodeprosessen vil ikke påvirkes av endring i oksygentransporten og en eventuell endring i korrosjonshastigheten må derfor skyldes at oksygentransporten blir så liten at den overtar som hastighetskontrollerende reaksjon. Ved hvilket fuktnivå korrosjonsprosessen går fra å være katodisk kontrollert til å bli anodisk kontrollert er ikke kjent. Resultatene gir derfor ikke grunnlag for å trekke konklusjoner om hvorvidt overflatebehandlingen medfører så nedsatt oksygentransport at korrosjonshastigheten påvirkes. Resultatene gir heller ikke svar på spørsmålet om mekanismen for oksygentransport i betong: Er det er ren diffusjon av oksygen gjennom mer eller mindre vannfylte porer eller er det transport av mer eller mindre oksygenmettet vann gjennom poresystemet?

Noen av resultatene for oksygentransport er såpass spesielle at de foreløpig må vurderes med forsiktighet. Det synes imidlertid sikkert at overflatebehandling av betong med effektive midler kan være en meget interessant metode til å redusere korrosjonshastigheten ved armeringskorrosjon.

7.1.8 Temperatur

De benyttede termoelementene fungerte uten problemer når termotrådene ble sveiset og ikke tvinnet.

7.2 Instrumentering

Det er en klar anbefaling at planprosessen ved instrumentering for automatisert overvåking ivaretar alle elementer fra målsetning med instrumenteringen til sluttbruk av måleverdier.

I prosjektet var det til å begynne med betydelig usikkerhet i signaloverføringen. Etterhvert ble det gjennomført en verifikasjon og kvalitetssikring av resultatene som gjorde at denne delen stort sett ble eliminert. Det bør imidlertid påpekes at det er en enorm datamengde som samles inn og at det er vanskelig å unngå at noen resultater avviker.

Det er nødvendig å foreta hyppige målinger, minst fire målinger pr. dag. Det betyr at manuelle målinger bare kan brukes i nødsfall og i spesielle tilfeller det målingen ikke kan utføres som et ledd i et automatisk loggingsopplegg.

7.3 Innstøping av sensorer

Dette er et kritisk punkt og har sannsynligvis vært en årsak til noen av de problemene som har vist seg. Det er helt avgjørende for funksjonen til flere av sensorene at det er god kontakt i fasene betongen/innstøpingsmørtel/sensor. Spesielt påpekes multiring-elektroden der resultatene var mer eller mindre meningsløse. Det er stor sannsynlighet for at den motstanden som ble målt mellom de individuelle elektrodene var en mer eller mindre systematisk effekt av god eller dårlig kontakt mørtel/sensor eller mørtel/betong. Det må brukes en innstøpingsmørtel som har minimalt svinn og god ledningsevne.

7.4 Måloppnåelse

Målene er langt på vei oppnådd. Riktignok har det i perioder vært en betydelig usikkerhet omkring tolking av måledataene. Det skyldes først og fremst tre forhold:

- Det var ganske mye måletekniske problemer som gav til dels betydelige feil i måleverdiene
- Nødvendig stabiliseringsperiode for de innstøpte sonder ble undervurdert
- Enkelte av metodene og prosedyrene var nye og dermed stemte ikke resultatene med forventningene.

Etterhvert som de måletekniske problemene ble avklart og rettet ble det også et klarere bilde av situasjonen og det ble en tydelig tendens mhp hvilke resultater som skulle vektlegges i vurderingen.

Effekten av forskjellige vedlikeholds- eller reparasjonstiltak kommer klarest fram av målingene av oksygentransport. Resultatene viser en markert effekt av enkelte midler for overflatebehandling. Det vises både av sammenligning mellom behandlede felt og referansefelt og ved sammenligning mellom felt med forskjellige behandlinger.

Det understrekes at mye av det som er utført av instrumenteringsarbeid på Gimsøystraumen bru er pionerarbeid, spesielt gjelder dette måling av oksygentransport og motstand. Gjennom arbeidet er betongens virkelige fukttilstand (fuktnivå og endring over tid) blitt avklart. Dette var tidligere ukjent. Det siste understreker behovet for og verdien av manuell prøvetaking som supplement til instrumenteringen, og som fasit for en del målinger.

De andre målingene gir foreløpig få holdepunkter med hensyn til effekt av behandlingene. Dette skyldes i alle fall for noen metoders vedkommende at korrosjonssituasjonen på brua var slik at det nødvendigvis må ta tid før det oppstår endringer i

korrosjonstilstand som kan tilbakeføres til de vedlikeholds- og reparasjonstiltak som er gjennomført.

Noen av de utprøvde målemetodene var lite vellykket, mens andre gav resultater som viser at et tilsvarende, men modifisert instrumenteringsopplegg kunne gi verdifull informasjon om sentrale korrosjonsparametre for en armert betongkonstruksjon.

7.5 Forbedringer/modifikasjoner

Det er her tatt utgangspunkt i den samlede instrumenteringen som er gjennomført i OFU Gimsøystraumen bru. Som nevnt har noen av de utprøvde målemetodene vært lite vellykket, mens andre har gitt resultater som viser at et modifisert instrumenteringsopplegg vil kunne gi verdifull informasjon om sentrale korrosjonsparametre for en armert betongkonstruksjon. Det gjelder både utviklingen for en ubeskyttet konstruksjon, men kanskje først og fremst effekten av tiltak. Følgende metoder anses foreløpig ikke som egnet:

- Måling av lineærpolarisasjon
- Måling av fuktgradienter med «Multiringelektroden».

Når det gjelder måling av polarisasjonsmotstand med innstøpte motelektroder, må det dokumenteres en sammenheng mellom den målte verdi og en korrosjonshastighet. Det må også arbeides for å finne fram til mer egnede relasjoner mellom motelektrodens plassering og areal.

Det er mulig at selve installeringen av «Multiringelektroden» er årsak til at resultatene var forvirrende. Dette bør vurderes nærmere.

Forsøk på enkle målinger av oksygentransport med to elektroder uten referanseelektrode var ikke vellykket og de videre målinger må gjennomføres med tre elektroder. Det anbefales også at motstandsmålingen foretas med fire elektroder (Wenner-prinsippet).

7.6 Anbefalinger/videre arbeid

I prosjektet er det lagt ned et betydelig instrumenterings-arbeid for å samle inn data som kan beskrive korrosjonsoppførsel til innstøpt armering og bestandighetsutviklingen i behandlede og ubehandlede områder på brua. Selv om det periodevis har vært problemer knyttet til kvalitetssikringen av måledata, så har en i prosjektperioden

gjennomført nødvendig tilleggsarbeid for å sikre pålitelige måleverdier. Det innsamlede datagrunnlaget skulle derfor danne et godt grunnlag for å belyse de mekanismer og utviklingstrekk som var målsatt i prosjektprogrammet. Det vurderes derfor som helt avgjørende for å vurdere langtidseffekter (typisk over 5 år eller mer) at det igangsatte måleprogrammet videreføres i henhold til de anbefalinger som er gitt vedrørende kvalitetssikring, presentasjon av data samt periodisk tolkning av disse.

I prosjektperioden har flere ulike målemetoder for å registrere både korrosjonstilstand til innstøpt stål og relevante betongparametre vært utprøvd. Erfaringene har som tidligere diskutert vært blandede. I tillegg til at de ulike målemetodene kan være beheftet med eksperimentelle usikkerheter, som eks. vis lineærpolarisering, så må det også taes i betraktning at alle mekanismer og mulig gjensidig avhengighet til ulike parametre ennå ikke fullt ut er helt forstått.

For ytterligere å frembringe kunnskap om forhold som kan belyse målingene som er gjort på brua, så anbefales det å arbeide videre med følgende aktiviteter:

- Temperaturfølsomhet for ulike måleparametre
- Transportmekanisme(r) for oksygen i betong
- Fukttransport i betong - mekanismer og likevekter
- Fuktforholdenes betydning for andre måleparametre
- Utprøving av elektrokjemiske metoder for å registrere korrosjonshastigheten på innstøpt stål
- Utprøving og dokumentasjon av innstøpningsteknikker for ulike typer sonder – hvordan påvirkes måleresultatene.

I et oppfølgingsprogram bør det gis prioritet til å videreføre aktiviteter som er startet i prosjektet. Dette gjelder primært oppfølging av det igangsatte måleprogrammet.

Av mer grunnleggende arbeid vil det være av stor interesse å undersøke de markante temperatureffektene som er registrert for parametre som oksyngengrensestrøm og elektrisk motstand. For begge parametre er temperatureffektene større enn det som kan forventes ut fra beregning av aktivitetsenergien for disse prosessene. Det indikerer at flere forhold påvirkes samtidig som følge av temperaturendringer. Når det gjelder elektrisk motstand, kan temperaturvariasjoner også påvirke porevannskjemien i betongen og derved også den spesifikke motstand. Temperaturvariasjoner kan også påvirke fuktforholdene i poresystemet gjennom kondensasjon og fordampningseffekter. Slike lokale endringer i fukttilstanden vil kunne påvirke både konsentrasjon og transport av salter lokalt. Andrade et al. /21/ har også påvist at raske endringer i temperatur og regnpåkjenning av en betongkonstruksjon gir umiddelbar respons på den elektrokjemiske oppførselen til innstøpt stål. Det trenger ikke nødvendigvis avspeile økning eller senkning av korrosjons-

hastigheten men mulige transformasjoner av oksidskiktene på overflaten av det innstøpte stålet. Ovenstående betraktninger er imidlertid hypoteser, og derfor bør det igangsettes grunnleggende arbeid for å fremskaffe forståelse for prosesser som påvirkes av de miljøforhold som en betongkonstruksjon utsettes for.

Oksygenstrømmen påvirkes også sterkt av temperaturvariasjoner. Strømmen øker tilnærmet proporsjonalt med temperaturen. Om dette skyldes at transportmekanismen for oksygen til det innstøpte stålet påvirkes direkte av temperaturen, eller om det er en eksperimentell effekt ved at potensialet mellom referanse- og arbeidselektroden endres, er uklart. Når det gjelder transportmekanismen for oksygen til det innstøpte stålet, er det også ulike hypoteser hvordan denne foregår. Noen hevder at oksygen løst i porevann transporteres kapillært i betongen mens andre hevder at oksygenet primært transporteres i gassform. I alle tilfeller er det grunnlag for å studere oksygentransport i betong mer grunnleggende. Denne informasjonen er viktig for å kunne vurdere korrosjonsfaren lokalt bedre, samt som en viktig parameter ved prosjektering av et katodisk beskyttelsessystem for en betongkonstruksjon.

Som diskutert i tidligere kapitler, har prosjektet vist at overflatebehandling reduserer oksygentransporten til innstøpt stål. Imidlertid er det vanskelig å finne en naturlig forklaring på den varierende effekten av ulike belegg. En mulig funksjon av belegging av betongoverflaten kan være at det etableres en barriere mot oksygentilførsel til betongflater, enten dette skjer i form av oksygenholdig atmosfære eller oksygenrikt regnvann. En annen mulig effekt kan være at overflatebelegget stabiliserer fuktinnholdet og reduserer fuktvariasjonene i den belagte betongen. Det vil kunne føre til at oksygentransporten til det innstøpte stålet hemmes. For å kunne spesifisere riktig overflatebehandling av betong er det viktig å forstå hvordan belegget påvirker mulige nedbrytningsmekanismer. Innenfor dette feltet er kunnskapsnivået fortsatt begrenset, og resultatene fra prosjektet burde danne et godt utgangspunkt for videre arbeid.

Prosjektet har med all tydelighet demonstrert at det i dag ikke foreligger en tilstandskontroll eller målemetode som kan gi en pålitelig in-situ måling av korrosjonshastigheten til innstøpt stål. Innenfor dette feltet er det imidlertid en rivende utvikling både med hensyn på bruk av avansert utstyr og bruk av komplekse elektrokjemiske teknikker. Her er det imidlertid viktig at de ulike teknikker utprøves og kvalifiseres grundig under kontrollerte betingelser før de brukes i felt. Innenfor dette området er det et kontinuerlig behov for utprøving, og Gimsøystraumen bru burde være et veldokumentert objekt for å korrelere laboratoriemålinger mot felldata.

Innstøpingsteknikker

I løpet av de tre prøvereparasjonene ble ulike innstøpingsteknikker og -mørtler for sondene utprøvd. Effekten av de forskjellige prosedyrene er ikke vurdert spesielt, og det vil derfor være sterkt ønskelig med et laboratorieprogram hvor innstøpningsprosedyrer blir utprøvd og kartlagt systematisk under kontrollerte betingelser. I dette programmet bør

både sementbaserte mørtler og andre materialer vurderes, spesielt med hensyn på fuktproblematikk. Her bør det spesielt undersøkes hvor lang tid det tar før innstøpingsmaterialet avspeiler fuktforholdene i den omkringliggende betong; dvs. at måleresultatene ikke påvirkes av lokale oppvætings- eller tørkeprosesser.

Aktivitetene og behovet for videre arbeid diskutert ovenfor burde være et godt utgangspunkt både for videre forsknings- og utviklingsprosjekter, hovedfagsoppgaver og dr.ing.-arbeider.

8 Referanser

- /1/ OFU Gimsøystraumen bru: *Klimapåkjønning og tilstandsvurdering*. Sluttrapport S-96-040. OFU Gimsøystraumen bru. 11/97. Også utgitt som Publikasjon nr. 85. Veglaboratoriet, 11/97.
- /2/ Tor Berg, Statens Vegvesen Nordland: *Værdata for Gimsøystraumen bru*. Rapport nr. P-96-036. OFU Gimsøystraumen bru. 10/96.
- /3/ OFU Gimsøystraumen bru: *Sluttrapport OFU Gimsøystraumen bru: Prøvere-parasjon og produktutvikling*. Rapport S-96-041. OFU Gimsøystraumen bru. Også utgitt som Publikasjon nr. 84. Veglaboratoriet, 10/97.
- /4/ Claus K. Larsen, Vegdirektoratet, Veglaboratoriet: *Resultater fra forhåndskartlegging og laboratorieanalyser; Prøvere-parasjon 1 (1994)*. Arbeidsrapport A-94-015. OFU Gimsøystraumen bru. 05/94.
- /5/ ASTM C 876-91: *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. In: Annual book of ASTM standards, Vol. 03.02 + 04.02. ASTM, Philadelphia PA.
- /6/ R. D. Caton, Jr.: *Reference Electrodes*. In: Journal of Chemical Education, Vol. 50, no. 12, 1973, pp A571-A578.
- /7/ ASTM G 3-89: *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing*. In: Annual book of ASTM standards, Vol. 03.02. ASTM, Philadelphia PA.
- /8/ *ERE 10; Embeddable Reference Electrodes for Use in Concrete*. Booklet. FORCE Institutes, Brøndby, Denmark. Sept. 1993.
- /9/ R. Myrdal og K. Videm: *Evaluation of Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete From Potential Measurements of Embedded Reference Electrodes*. In: CORROSION/95, paper no. 512. NACE, Houston, TX, USA. 1995.
- /10/ Lars Midttun, Havforskningsinstituttet: *Observasjonsserier av overflatetemperatur og saltholdighet i norske kystfarvann i perioden 1936–1970*. Bergen, 1975.
- /11/ F. Mansfield: *Advances in Corrosion Science and Technology*, Vol. 6, p. 76, 1979.
- /12/ *Feltundersøkelser*. Håndbok 015. Statens Vegvesen, Vegdirektoratet. 1997.
- /13/ OFU Gimsøystraumen bru: *Anbefalinger for inspeksjon, reparasjon og overflatebehandling av kystbruer i betong*. Publikasjon nr. 87. Veglaboratoriet, 1998.
- /14/ Norges vassdrags- og energidirektorat: *Forskrifter for elektriske anlegg. Maritime installasjoner, FEA-M*. Oslo, 1990.

-
- /15/ Produkt- og Elektrisitetstilsynet: *Retningslinjer for jording i maritime anlegg*. Oslo, 1993.
- /16/ M. Stern and A.L. Geary: Electrochemical Polarization, *J. Electrochemical Soc.*, Vol. 104, p. 56, 1957.
- /17/ E. J. Sellevold: *OFU Gimsøystraumen bru - betongens fukttilstand*. Rapport nr. P-96-043. OFU Gimsøystraumen bru, 01/97.
- /18/ S. Hognestad, B. Kristiansen og R. Myrdal: *Sluttrapport Prøvereparasjon 3 (1995)*, Rapport nr. A-95-032. OFU Gimsøystraumen bru, 01/96.
- /19/ E. J. Sellevold og G. I. Sletten: *OFU Gimsøystraumen bru – elektrisk motstand i betongen*. Rapport nr. P-96-038. OFU Gimsøystraumen bru, 10/96.
- /20/ R. Myrdal: *Evaluation of Electrochemical Techniques for Assessing Corrosion of Steel in Concrete*. Dr.grad UiO, 1998.
- /21/ C. Andrade et al.: *Natural Weathering Influence on the Rebar Corrosion Rate*. Institute of Construction Science «Eduardo Tonoja», CSIC. Spain, 1998.
- /22/ K. B. Oldham and F. Mansfield: *Corrosion Rates From Polarization curves: A new Method*, *Corrosion Science*, Vol. 13, p. 813, 1973.
- /23/ Ø. Vennesland: *OFU Gimsøystraumen bru – Elektrokjemiske metoder*. Rapport nr. P-96-039. OFU Gimsøystraumen bru, 05/97.