



# Tilstandsutvikling for nyere betongbruer

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 579



**Tittel**

Tilstandsutvikling for nyere betongbruer

**Undertittel**

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

**Forfatter**

Stig H. Helgestad

**Avdeling**

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

**Seksjon**

Tunnel og betong

**Prosjektnummer**

603242

**Rapportnummer**

Nr. 579

**Prosjektleder**

Synnøve A. Myren/Bård Pedersen

**Godkjent av**

Øyvind Bjøntegaard

**Emneord**

Varige konstruksjoner, tilstandsutvikling bruer, betong, bestandighet, kloridinntrengning, levetid

**Sammendrag**

Rapporten gir et sammendrag av resultater fra felt- og laboratorieundersøkelser som har blitt utført som en del av etatsprogrammet Varige konstruksjoner under aktiviteten – Tilstandsutvikling nyere betongbruer (TB1). Hovedmålet har vært å verifisere hvilken effekt innføringen av betong med masseforhold mindre eller lik 0,40 som kom i 1988 og etter hvert betongspesifikasjonene "SV-30" og "SV-40" fra 1997, samt innføringen av krav til økt overdekning for utsatte konstruksjonsdeler i håndbok 185, har hatt for betongbruers levetid.

Det ble gjennomført undersøkelser av et lite utvalg 10 – 15 år gamle betongkonstruksjoner for å dokumentere kloridinntrengning og andre relevante egenskaper. For de to bruene i undersøkelsen ble det estimert en forventet levetid rundt 100 år, noe avhengig av hvilken modell som ble benyttet. Aktiviteten har bekreftet at innføring av nye betongtyper fra 1988 har hatt stor effekt og samtidig at det økte kravet til prosjektet armeringsoverdekning har vært nødvendig.

**Antall sider** 54

**Dato** Oktober 2016

**Title**

Condition assessment of young concrete bridges

**Subtitle**

Durable structures 2012-2015

**Author**

Stig H. Helgestad

**Department**

Traffic Safety, Environment and Technology Department

**Section**

Tunnel and concrete

**Project number**

603242

**Report number**

No. 579

**Project manager**

Synnøve A. Myren/Bård Pedersen

**Approved by**

Øyvind Bjøntegaard

**Key words**

Durable structures, existing bridges, concrete, durability, chloride ion ingress

**Summary**

The report summarizes results obtained from field survey and laboratory testing, done in the activity State development of younger concrete bridges (TB1), in the R&D programme Durable structures. The main objective has been to verify the effect on durability by the introduction of the requirement of water/binder ratio less or equal to 0.40 from 1988 and later the introduction of concrete specifications "SV-30" and "SV-40" in 1997, but also the introduction of greater required coverage for chloride exposed concrete structures, in handbook 185.

A minor survey on 10 to 15 years old concrete structures was conducted to document chloride ion ingress and other relevant properties. In the study, the two bridges investigated showed an expected lifetime about 100 years, depending of the model used. It was confirmed that the introduction of new concrete specifications in 1988 had a great effect, but at the same time it was confirmed that also an increase in the concrete cover was necessary.

**Pages** 54

**Date** October 2016



## Forord

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra **etatsprogrammet Varige konstruksjoner**. Programmet hører til under Trafikksikkerhet-, miljø- og teknologiavdelingen i Statens vegvesen, Vegdirektoratet, og foregår i perioden 2012-2015. Hensikten med programmet er å legge til rette for at riktige materialer og produkter brukes på riktig måte i Statens vegvesen sine konstruksjoner, med hovedvekt på bruer og tunneler.

Formålet med programmet er å bidra til mer forutsigbarhet i drift- og vedlikeholdsfasen for konstruksjonene. Dette vil igjen føre til lavere kostnader. Programmet vil også bidra til å øke bevisstheten og kunnskapen om materialer og løsninger, både i Statens vegvesen og i bransjen for øvrig.

For å realisere dette formålet skal programmet bidra til at aktuelle håndbøker i Statens vegvesen oppdateres med tanke på riktig bruk av materialer, sørge for økt kunnskap om miljøpåkjenninger og nedbrytningsmekanismer for bruer og tunneler, og gi konkrete forslag til valg av materialer og løsninger for bruer og tunneler.

Varige konstruksjoner består, i tillegg til et overordnet implementeringsprosjekt, av fire prosjekter:

- Prosjekt 1: Tilstandsutvikling bruer
- Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler
- Prosjekt 3: Fremtidens bruer
- Prosjekt 4: Fremtidens tunneler

Varige konstruksjoner ledes av Synnøve A. Myren. Mer informasjon om prosjektet finnes på [vegvesen.no/varigekonstruksjoner](http://vegvesen.no/varigekonstruksjoner)

Denne rapporten tilhører **Prosjekt 1: Tilstandsutvikling bruer** som ledes av Bård Pedersen. Prosjektet vil generere informasjon om tilstanden for bruer av betong, stål og tre, og gi økt forståelse for de bakenforliggende nedbrytningsmekanismene. Dette vil gi grunnlag for bedre levetidsvurderinger og reparasjonsmetoder. Innenfor områdene hvor det er nødvendig vil det etableres forbedrede rutiner og verktøy for tilstandskontroll- og analyse. Prosjektet vil også frembringe kunnskap om konstruktive konsekvenser av skader, samt konstruktive effekter av forsterkningstiltak. Prosjektet vil gi viktig input i forhold til design av material- og konstruksjonsløsninger for nyere bruer, og vil således ha leveranser av stor betydning til Prosjekt 3: Fremtidige bruer.

Rapporten er utarbeidet av Stig Henning Helgestad, Statens vegvesen.

## Innhold

1	Innledning.....	3
2	Beskrivelse av prøvingsopplegg.....	4
3	Beregning av kloridprofil.....	5
3.1	Beregning av nå-tilstand, modell/forutsetninger.....	5
3.2	Aldringsfaktor .....	6
3.3	Beregning av profil etter 50 og 100 år, forutsetninger .....	7
4	Utvalgte objekter i prosjektet.....	8
4.1	Bakkasundet bru.....	8
4.2	Solavågen fergekai .....	10
4.3	Stokkøybrua .....	11
5	Resultater.....	12
5.1	Bakkasundbrua.....	12
5.1.1	Kloridinnhold .....	12
5.1.2	Akselerert kloridinntrenging .....	14
5.1.3	Kalsiuminnhold .....	16
5.1.4	Spesifikk elektrisk motstand .....	18
5.1.5	Vannmetningsgrad.....	19
5.1.6	Porøsitet .....	20
5.1.7	Snudd kjerne.....	20
5.2	Solavågen fergekai .....	23
5.2.1	Kloridinnhold .....	23
5.2.2	Akselerert kloridinntrengning .....	25
5.2.3	Kalsiuminnhold .....	26
5.2.4	Spesifikk elektrisk motstand .....	28
5.2.5	Vannmetningsgrad.....	29
5.2.6	Porøsitet .....	29
5.2.7	Snudd kjerne.....	30
5.3	Stokkøybrua .....	32
5.3.1	Kloridinnhold .....	32
5.3.2	Akselerert kloridinntrengning .....	33
5.3.3	Kalsiuminnhold .....	34
5.3.4	Spesifikk elektrisk motstand .....	37

5.3.5	Vannmetningsgrad.....	38
5.3.6	Porøsitet .....	38
6	Tidligere erfaringer .....	39
7	Diskusjon – hovedfunn.....	42
8	Konklusjoner.....	45
9	Referanser.....	46
	Vedlegg 1 – Rapport fra NBTL.....	47
	Vedlegg 2 – Rapport fra SINTEF Byggforsk.....	48
	Vedlegg 3 – Rapport fra Mannvit.....	49
	Vedlegg 4 – Beskrivelse av laboratorieoppdrag.....	50

## 1 Innledning

Rapporten gir et sammendrag av resultater fra laboratorieundersøkelser som har blitt utført som en del av etatsprogrammet Varige konstruksjoner under aktiviteten – Tilstandsutvikling nyere betongbruer (TB1).

Statens vegvesen har et stort antall bruer utsatt for meget høy kloridbelastning som følge av plassering langs kysten og dermed utsatt for værhardt marint klima. Kloridinntrengning inn til armeringen fører til korrosjonsskader som nedsetter bæreevnen, øker vedlikeholdskostnadene og forkorter bruens levetid.

Kravene til ny betongspesifikasjon med masseforhold  $< 0,40$  (klasse MA) som kom i den reviderte *håndbok 026 Prosesskode 2* i 1988, med ytterligere modifisering og innføring av spesifikasjonene SV-30 og SV-40 fra 1997 var et viktig tiltak for å øke betongbruers motstand mot kloridinntrengning og tilhørende skadeutvikling. I tillegg kom endringer i HB185 Bruprosjektering med krav til økt overdekning for utsatte konstruksjonsdeler. Hovedmålet med aktiviteten i TB1 har vært å verifisere hvilken effekt disse tiltakene har hatt for betongbruers levetid. I 2015 endret Statens Vegvesen nummereringen for håndbøkene, og HB185 heter nå N400, mens HB026 er endret til R762.

Betongspesifikasjonene «SV-30» og «SV-40» oppfyller begge bestandighetsklasse MF40 etter NS-EN 206. Felles for begge var også at nedre grenseverdi for sementinnhold var  $350 \text{ kg/m}^3$ . Ved bruk av sement av type CEM 1 skulle andelen silikastøv for «SV-40» ligge mellom 4 til 6 prosent av sementmengden. Tilsvarende for «SV-30» skulle andelen silikastøv ligge mellom 8 til 11 prosent av sementmengden.

Det har blitt gjennomført undersøkelser av et lite utvalg av 10–15 år gamle kloridutsatte betongkonstruksjoner for å dokumentere betongens generelle egenskaper og tilstand. Det var en forutsetning at ingen av de aktuelle betongene hadde blitt påført noen form for impregnering eller hydrofoberingsmidler, men at betongen hadde stått ubehandlet siden byggingen.

Sommeren 2013 ble det utført uttak av prøver fra Bakkasundbrua, som ligger i Austevoll kommune i Hordaland. Senere samme år ble det også tatt prøver fra Solavågen fergekai som ligger i Sula kommune i Møre og Romsdal. I 2014 ble det tatt prøver fra Stokkøybrua. Stokkøybrua ligger i Åfjord kommune i Sør-Trøndelag.

## 2 Beskrivelse av prøvingsopplegg

For de utvalgte objektene skulle det hentes ut betongprøver ved kjerneboring. For disse skulle det gjennomføres et fast utvalg av analyser. Følgende analyser skulle utføres:

- Måling av kloridinntrengning: Denne analysen var forventet å gi mest informasjon vedrørende tilstanden til konstruksjonen. Verdiene fra analysene skulle benyttes til å vurdere når en kan forvente at armeringskorrosjon vil oppstå.
- Måling av betongens elektriske motstand: Analysen kan gi verdifull informasjon om betongens motstand mot kloridinntrengning. Litteratur har vist en sammenheng både med motstand mot kloridinntrengning samt for korrosjonshastighet.
- Måling av betongens porøsitet: Som ved måling av elektrisk motstand, forteller betongens porøsitet noe om hvor åpen eller tett betongen er. Dette kan være med på å fortelle om betongens bestandighet.
- Måling av akselerert kloridinntrengning: resultatene fra analysen benyttes til å lage et estimat på levetiden for den aktuelle betongen i forhold til når armeringskorrosjon vil oppstå.
- Måling av kalsiuminnhold: Analysen ble utført for å kunne beregne mengde sement i betongen. Med denne informasjonen kan kloridprofilen uttrykkes som funksjon av sementmengde.
- Måling av vannmetningsgrad: Analysen kan fortelle om hvordan fuktbelastningen er på konstruksjonen, og spesielt gi informasjon om LO/LE soner.

Analysemetodene er beskrevet mer detaljert i Vedlegg 4 – Beskrivelse av laboratorieoppdrag. Under prøveuttakene ble det laget noen prøver fra kjernene hvor innerste del av kjernen ble kappet av og montert tilbake i prøvehullet, slik at denne flaten hadde vært upåvirket av kloridioner fra sjøvann. Etter omtrent 2 år ble prøvestykkene hentet ut og tatt inn til fresing for å kunne bedømme kloridinntrengingen under disse forholdene.



## 3 Beregning av kloridprofil

### 3.1 Beregning av nå-tilstand, modell/forutsetninger

Beregninger av fremtidig kloridinntrengning er et viktig hjelpemiddel for å kunne anslå når det kan forventes at armeringen i betongkonstruksjonen begynner å korrodere. Levetiden til betongkonstruksjonen er noe lengre enn at armeringen begynner å korrodere, men dette avhenger igjen av forutsetningene som gjelder når korrosjonen har startet. Et godt eksempel på dette er armeringskorrosjon av karbonatisering, denne gir en langsom nedbrytning av armeringsjernet. I motsatt tilfelle er korrosjon forårsaket av kloridioner, hvor pitting korrosjon eller groptæring kan oppstå. Dette er et fenomen hvor kun en liten del av armeringen korroderer, og hvor prosessen forløper vesentlig raskere, med reduksjon av armeringstverrsnittet til brudd i jernet er en realitet. Det er flere mekanismer som er med å styrer korrosjonshastigheten, blant annet vil høy resistivitet av betongen være med å redusere korrosjonshastigheten, mens fukt, temperatur og tilgang til oksygen er andre parametere som har betydning.

Til å beregne hvordan kloridionene trenger inn i betongen benyttes Ficks 2 lov. Loven baserer seg på at transporten av ionene skyldes diffusjon. De målte kloridkonsentrasjonene plottes mot avstand fra den eksponerte flaten, og til målepunktene må en kurve tilpasses ved hjelp av regresjonsanalyse. Modell for beregning av kloridinntrengning er:

$$C_{Cl} = C_s - (C_s - C_{bkg}) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{0,001 \cdot d(\text{mm})}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t(s)}}\right)$$

Hvor:

$C_{Cl}$  – er kloridkonsentrasjon i sjiktet/dybden  $d$ , målt i % av betongvekt

$C_s$  – er overflatekonsentrasjonen av kloridionene, målt i % av betongvekt

$C_{bkg}$  – bakgrunnskonsentrasjonen av kloridioner i betongen, målt i % av betongvekt

$\operatorname{erf}$  – feilfunksjon

$d$  – dybde/inntrengningsdybde fra overflaten målt i millimeter

$D$  – diffusjonskonstant,  $\text{m}^2/\text{s}$

$t$  – tid, eksponeringstid, målt i sekunder

De fleste av disse verdiene er målte verdier, og av regresjonsanalysen finner en overflatekonsentrasjonen ( $C_s$ ) samt klorid diffusjonskoeffisienten ( $D$ ).



## 3.2 Aldringsfaktor

Når betongen prøves ved akselerert kloridinntrengning benyttes det betongprøver som ikke tidligere har blitt eksponert for klorider. Prøvestykkene i testen senkes ned i en NaCl-løsning med konsentrasjon på  $165 \pm 1$  g pr. liter destillert vann. Prøvestykkene skal ligge i NaCl-løsningen i minst 35 døgn og maksimalt 40 døgn. Som i 3.1 plottes måleresultatene som kloridkonsentrasjon av betongvekt som funksjon av inntrengningsdybde. På samme måte kan en også da beregne overflatekonsentrasjon ( $C_s$ ) og den tilhørende klorid-diffusjonskoeffisienten ( $D$ ). Disse verdiene kan ikke uten videre benyttes til å beregne den fremtidige kloridinntrengningen. Kloriddiffusjonskoeffisienten er en parameter som utvikler seg over tid. Hellan (2001) viser til forsøk der det er en lineær sammenheng mellom alder på betongen og diffusjonskoeffisienten når dette plottes i et dobbelt logaritmisk koordinatsystem. Ved akselererte forsøk er følgende modell angitt:

$$D(t) = D_0 \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha$$

Hvor:

$D(t)$  – potensiell klorid diffusjonskoeffisient

$D_0$  – kloriddiffusjonskoeffisient funnet ved akselererte forsøk

$t_0$  – alder ved akselerert prøving

$t$  – herdetid av betongen før den utsettes for akselerert forsøk

$\alpha$  – aldringsfaktor som avhenger av to faktorer; forbedring på grunn av økende hydratiseringsgrad av sementen og en dertil tettere betong, samt en gradvis blokkering av overflatesjiktet til betongen på grunn av ionebytte.

Fra tidligere forskningsprogram «Kloridbestandig betong fase II» på Anleggssement ble det funnet en alfaverdi på 0,52. Denne verdien har blitt benyttet til utregningene i rapporten.

I forsøkene der diffusjonskoeffisienten både fra akselererte forsøk, snudd kjerne og fra uttakene i felt ble funnet, var det mulig å utføre beregninger av aldringsfaktoren. Følgende beregninger ble benyttet til dette:

Sammenhengen  $(D^*_{akselerert} - D_{akselerert})^2 + (D^*_{snudd} - D_{snudd})^2 + (D^*_{felt} - D_{felt})^2$  skulle oppfylle lavest mulig verdi, for å finne best mulig kurvetilpasning til punktene. Forutsetningene i regresjonsanalysen var at alfa kunne være en verdi mellom 0,3 og 1,0,  $t_0$  kunne være mellom 28 og 90 døgn, og at  $D^*_{akselerert}$  kunne avvike 20% fra verdien funnet for  $D_{akselerert}$ .

$D_{snudd}$  var diffusjonskoeffisienten funnet etter felteksponeeringen i rundt 2 år, mens  $D_{felt}$  var diffusjonskoeffisienten funnet fra felteksponeeringen etter 7 år for Solavågen fergekai og 14 år for Bakkasundet bru.

### 3.3 Beregning av profil etter 50 og 100 år, forutsetninger

I beregningene må det gjøres en avveining om hvilke av målepunktene som tas med i beregningene og hvilke som utelukkes. Normalt vil enkelte av målepunktene i overflatesjiktene ikke kunne følge kurvetilpasningen, da flere forhold gjør at disse avviker. Avrenning på betongoverflaten på grunn av regnvann er typisk en av effektene som vil påvirke hvordan kloridioner vil kunne akkumuleres i yttersjiktet, eller om de vaskes vekk. For akselererte forsøk hvor prøvestykkene er konstant neddykket, vil man få en jevnere profil fra overflaten. Av kurvetilpasningen vil verdiene for overflatekonsentrasjon ( $C_s$ ) og diffusjonskoeffisienten ( $D$ ) bli beregnet. Verdiene benyttes videre, og ved å velge eksponeringstid/fremtidig eksponering kan kloridkonsentrasjonen i ulike dybder i betongen beregnes.

Tidspunktet når armeringskorrosjon oppstår avhenger av flere faktorer. I følge Angst et al. (2009) finnes det ingen absolutt verdi hvor en med sikkerhet kan si at korrosjonen har startet. I rapporten er det valgt å trekke en linje ved 0,07 % kloridkonsentrasjon av betongvekt. Denne verdien er valgt som kritisk kloridkonsentrasjon, da det av erfaring er høy sannsynlighet for at armeringskorrosjon vil ha oppstått ved dette nivået.

## 4 Utvalgte objekter i prosjektet

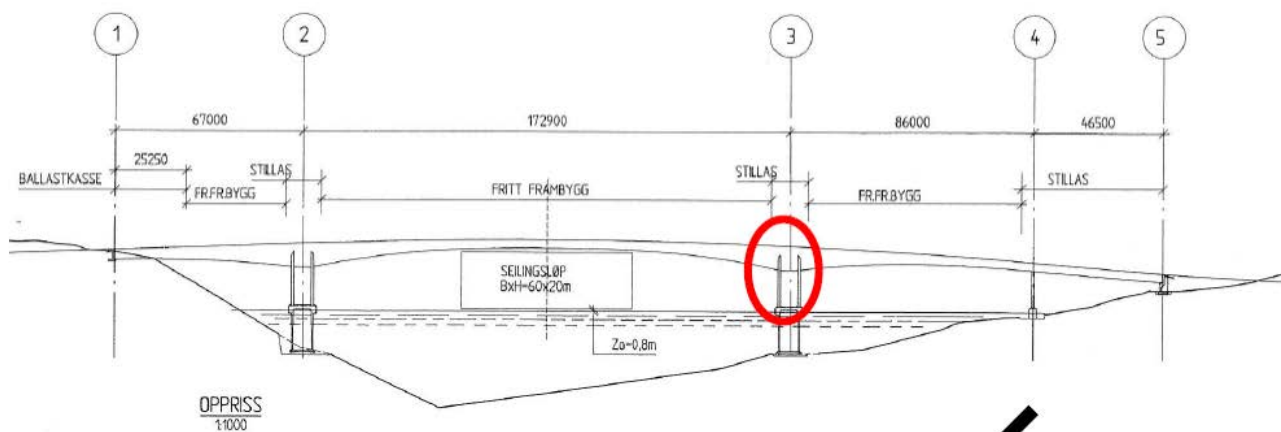
### 4.1 Bakkasundet bru

Bakkasundet bru ble bygget i 1997–98 og ble åpnet for trafikk 01.01.1999. Brua ligger i et værhardt kyststrøk og danner forbindelsen mellom Navøya og Spissøya i Austevoll kommune i Hordaland. Brua er ei fritt-frembygg bru på totalt 373,4 meter hvor lengste spenn er 172,9 meter. De fleste støpeoperasjonene ble utført i 1998. NCC Eeg Henriksen var entreprenør og betongleverandør. Entreprenøren rigget et mobilt blandeverk for all produksjon til Spissøy-, Nautøy- og Bakkasund bru. Blandeverket hadde godkjenning klasse A1 av Kontrollrådet for Betongprodukter. Blanderer på blandeverket hadde en kapasitet på 1 m<sup>3</sup>, tvangsblender med automatisk styringssystem for innveiling av alle delmaterialer. Tilslag ble lagret utendørs i binger. Det var ikke tak over tilslaget, men støpt plate under. I siloene på blandeverket kunne tilslaget varmes opp, dette ble gjort etter behov. Det ble benyttet tre betongresepter, hhv. C45 SV40, C55 SV40 og C65 SV40. Disse ble benyttet som følger:

C45 SV40: Landkarene på hver side. (landkar akse 5 er i C55 ifl kontrollplan, det samme gjelder vognene rundt akse 2)

C55 SV40: Hele brua, med unntak av landkar og de første seks vognene til hver side på akse 2 og 3.

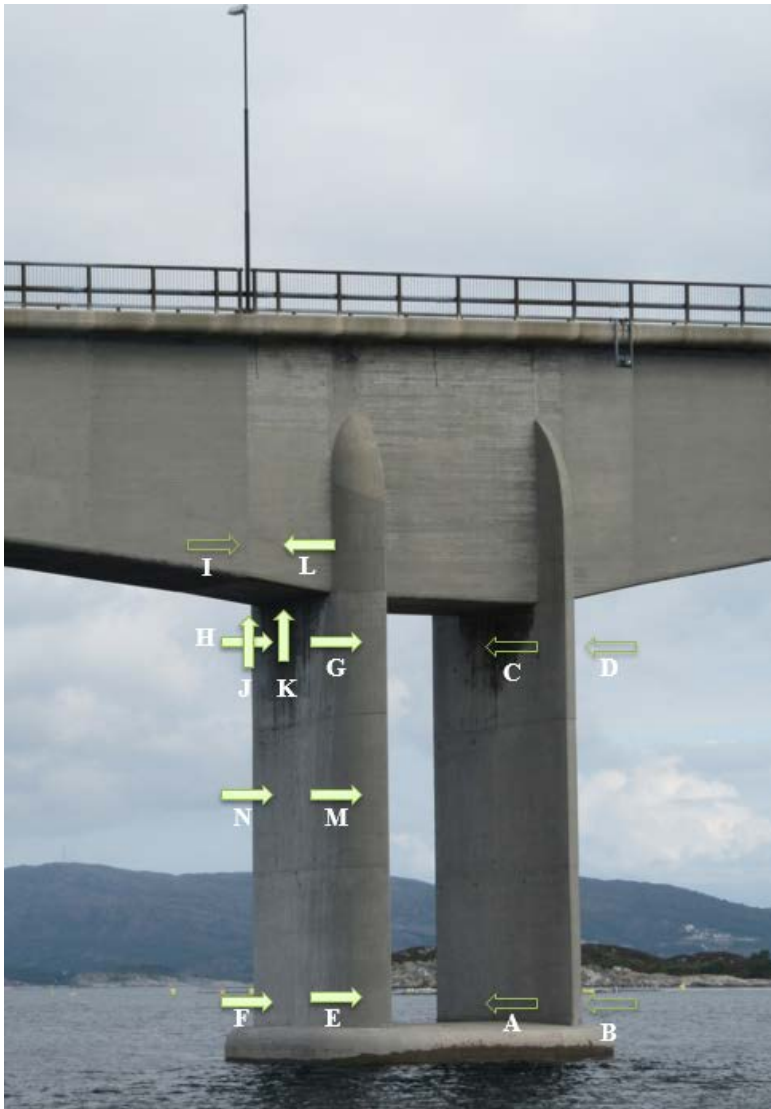
C65 SV40: De første seks vognene til hver side på akse 2 og 3 på brua.



Figur 4-1: Profil av Bakkasundbrua.

Informasjon fra betongblanderiet viser at Norcem Anleggssement ble benyttet som sement i alle reseptene.

Prøveuttakene fra brua ble konsentrert i området rundt den doble «skive-pilaren» i akse 3 – både på pilarene og brukassen. Dette ble gjort for å forenkle prøveuttak (lift). Prøver fra følgende 12 lokaliteter var planlagt tatt ut:



Figur 4-2: Grov plassering av prøveuttak – akse 3, sett mot nord.

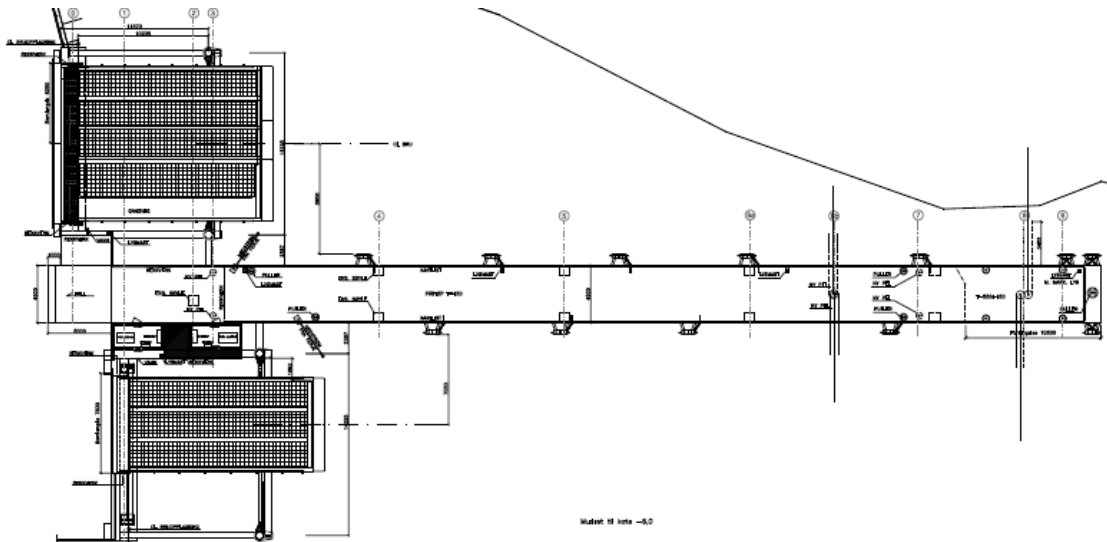
Tabell 4-1: Planlagte prøveuttak for Bakkasundbrua.

Lavt på pilar vest, lo side - <b>E</b>	Lavt på pilar øst, lo side - <b>B</b>	Brukasse, steg lo side - <b>L</b>
Lavt på pilar vest, le side - <b>F</b>	Lavt på pilar øst, le side - <b>A</b>	Brukasse, steg le side - <b>I</b>
Høyt på pilar vest, lo side - <b>G</b>	Høyt på pilar øst, lo side - <b>D</b>	Brukasse, underside mot lo - <b>K</b>
Høyt på pilar vest, le side - <b>H</b>	Høyt på pilar øst, le side - <b>C</b>	Brukasse, underside mot le - <b>J</b>

På grunn av utfordringer ved uttakene ble uttak i lokalitet D, J og K ikke utført.

## 4.2 Solavågen fergekai

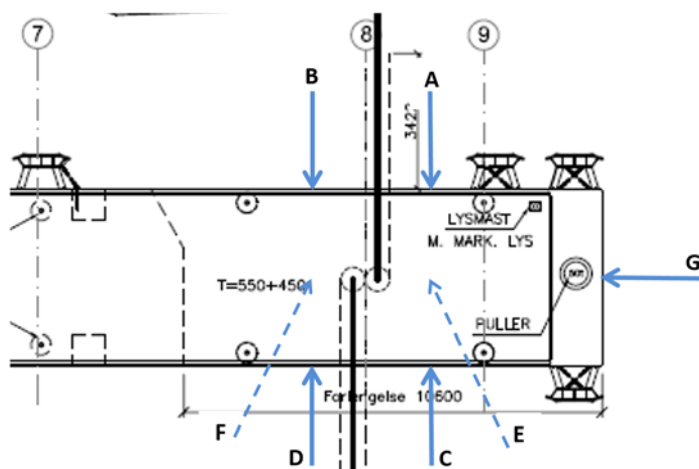
Solavågen fergekai ligger i Sula kommune i Møre og Romsdal. Fergekaia ble tatt i bruk allerede i 1977, men ble utvidet i 2006. Kaia ble forlenget 10.6 meter, og det ble i tillegg støpt et nytt dekke på 450 mm oppå eksisterende dekke. Betongstøpingen ble inndelt i fire operasjoner. 09.03.06, 85m<sup>3</sup>, de første 35 meter av nytt dekke på pir. 21.03.06, 69m<sup>3</sup>, mellomparti pir. 18.05.06, 40m<sup>3</sup>, bunnlag ytterst på pir (forlengelsen) og 24.05.06, 48m<sup>3</sup>, topplaget ytterst på pir. Det ble benyttet SV40 - C55 betong med Norcem Anleggssement i alle støpene.



Figur 4-3: Tegning av Solavågen fergekai.

Utførende for betongstøp var A. Våge AS, Bygg og Anleggsentreprenør.

Uttakene ble konsentrert fra den ytre del av kaia og første/nederste støp, støpt 18.05.06. Det ble tatt prøver fra 7 lokaliteter, en i front av kai (G, sentrert), to uttak under (sentrert, 4(E) og 7(F) meter fra front), samt to uttak på hhv LO(A,B) og LE(C,D) side, omtrent 4 og 7 meter fra front av kai.

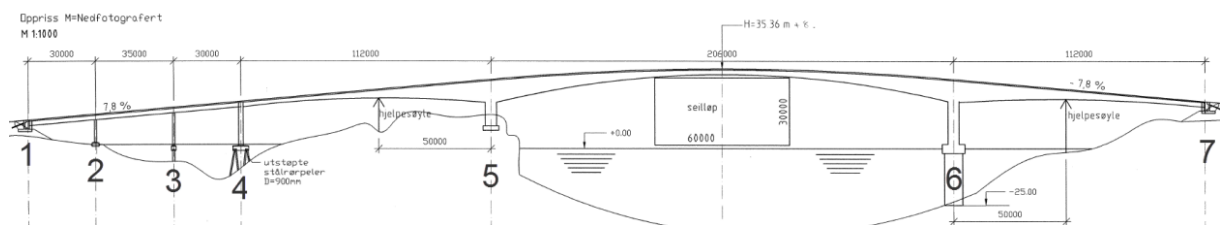


Figur 4-4: Skisse av prøveuttak.

### 4.3 Stokkøybrua

Stokkøybrua ble bygd i 2000 og ligger på Rv723 som eneste fastlandsforbindelse for Stokkøya. Brua ligger i værhardt kyststrøk i Åfjord kommune. Brua er kontinuerlig over 6 spenn fra akse 1 til akse 7. Fra akse 1 til akse 4 er brua bygd som kassebru med konstant høyde og vertikale vegger. Fra akse 4 til akse 7 er det fritt-frembygg bru med vertikale vegger. Spennviddene i kassebrua fra akse 1 til 4 er 30 m – 35 m – 30 m, mens spennene for fritt-frembygg delen fra akse 4 til 7 hhv 112 m – 206 m – 112 m. Total brulengde er 525 m og bredden er 9,1 m. Seilløp mellom akse 5 og akse 6 er 60 m bredt og 30 m høyt.

Landkar, pilarer og overbygning er utført i betong. Kasse og fritt-frembygg-bru er spennarmert. Fundamenter er støpt på fjell med unntak av fundament i akse 4 og akse 6. Fundament i akse 4 står på utstøpte stålørspeler, mens fundament i akse 6 er senkekasse i betong som står på fjell på kote 25,0 m.



Figur 4-5: Profiltegning av Stokkøybrua.

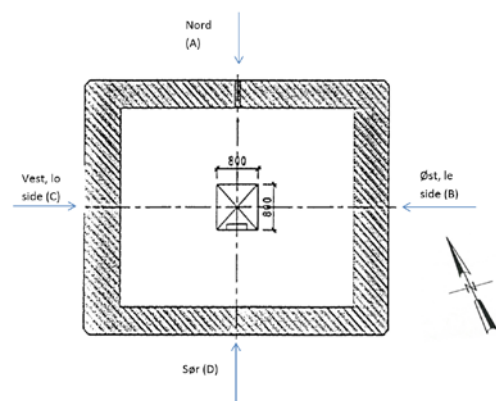
Det ble benyttet tre betongresepter, hhv. C45 SV40, C55 SV40 og C55 SV30, som var fordelt som følger:

C45 SV40: Landkarene i akse 1 og 7, fundament og søylene i akse 2, 3 og 4, fundament akse 5

C55 SV40: Overbygning viadukt og overbygning FFB-bru

C55 SV30: Fendertopp akse 6, søyle i akse 5, søylevegger i akse 6

Betongen ble levert av Anleggsbetong AS, som hadde et mobilt blandeverk satt opp for prosjektet. Til prosjektet ble det benyttet Norcem Anleggssement. Prøveuttakene er tatt 1,5 meter opp fra fendertopp i akse 6, sentrert på hver av sidekantene til søylen.



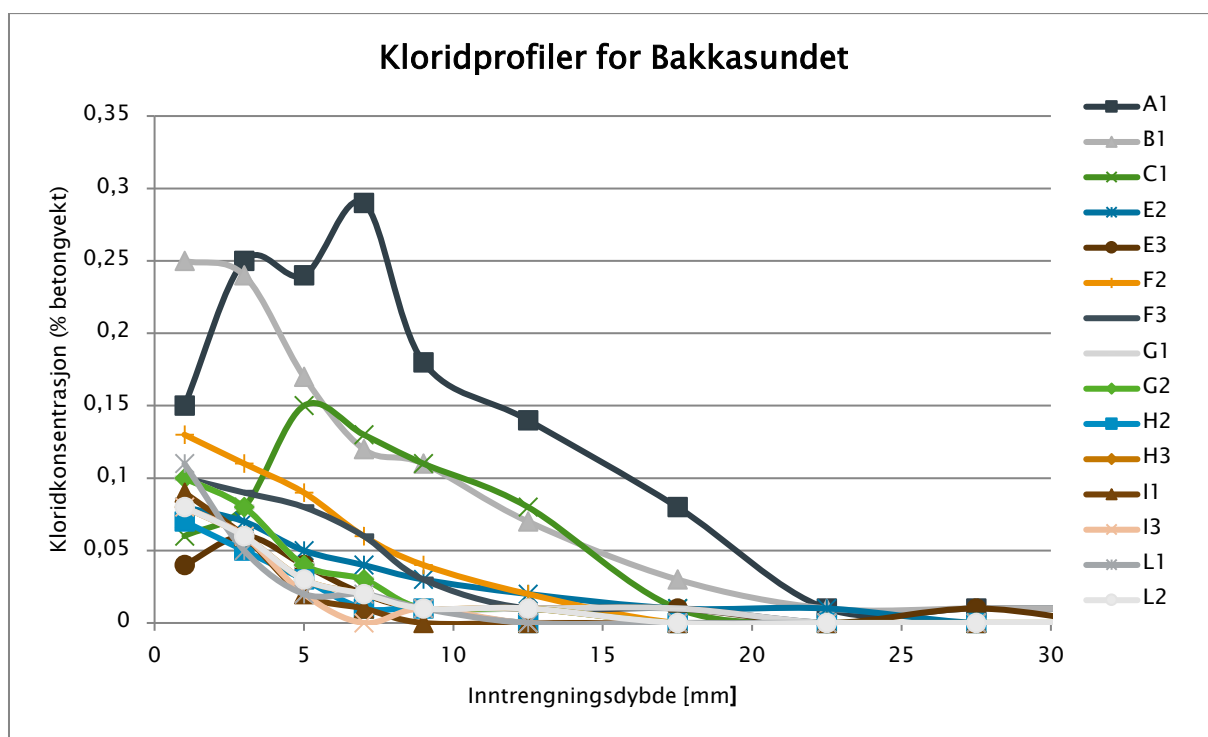
Figur 4-6: Prøveuttak for søyle i akse 6.

## 5 Resultater

### 5.1 Bakkasundbrua

For analysene av kjerneprøvene fra Bakkasundbrua ble det utlyst en tilbudskonkurranse på rammeavtalen: «laboratorietjenester innen betong, betongkonstruksjoner, tunnel og bruvedlikehold med FoU», avrop 14. Valgt tilbyder ble NBTL (Norsk betong- og tilslagslaboratorium AS), hvor COWI utførte selve analysene. Sentrallaboratoriet i Statens vegvesen freste støvet for kloridanalysene grunnet fremdriftshensyn. Rapporten er gitt i Vedlegg 1 - Rapport fra NBTL.

#### 5.1.1 Kloridinnhold



Figur 5-1: Målte kloridprofiler fra Bakkasundbrua. A - lavt på pilar øst, le side. B - lavt på pilar øst, lo side. C - høyt på pilar øst, le side. E - lavt på pilar vest, lo side. F - lavt på pilar vest, le side. G - høyt på pilar vest, lo side. H - høyt på pilar vest, le side. I - brukasse, steg le side. L - brukasse, steg lo side.

Av grafene kommer det frem at inntrengningen av kloridioner har vært størst i områdene A, B og C. Dette tilsvarer «lavt på pilar mot øst - le side (A)», «lavt på pilar øst - lo side (B)» og «høyt på pilar øst - le side (C)»

Basert på kloridprofilene er diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjoner beregnet, se Tabell 5-1.

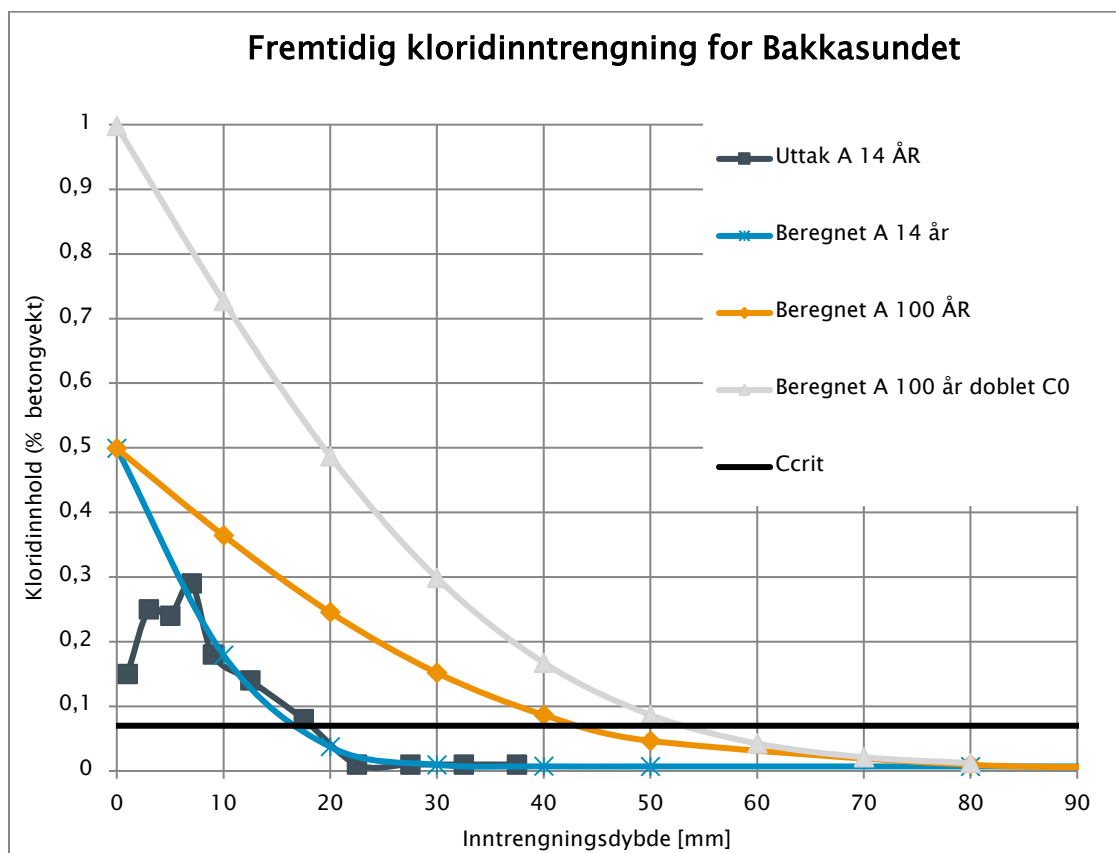


Tabell 5-1: Beregnede diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjoner fra kloridprofilene.

Serie	Overflatekonsentrasjon % av betongvekt	Diffusjonskoeffisient m <sup>2</sup> /s
A	0,499	0,130 · 10 <sup>-12</sup>
B	0,283	0,099 · 10 <sup>-12</sup>
C	0,207	0,194 · 10 <sup>-12</sup>
E	0,078	0,066 · 10 <sup>-12</sup>
F	0,141	0,062 · 10 <sup>-12</sup>
G	0,103	0,052 · 10 <sup>-12</sup>
H	0,073	0,051 · 10 <sup>-12</sup>
I	0,077	0,060 · 10 <sup>-12</sup>
L	0,082	0,055 · 10 <sup>-12</sup>

Disse verdiene har så blitt benyttet til å kunne beregne hvordan den fremtidige inntrengingen av kloridioner vil bli. Utgangspunktet er tatt i prøveuttaket hvor inntrengingen er størst, for å kunne estimere når en tidligst vil kunne forvente begynnende armeringskorrosjon. I dette tilfellet er uttaket i punkt A valgt. Kurvetilpassing til de målte verdiene ga overflatekonsentrasjon ( $C_s$ ) av klorider på 0,50 % av betongvekt. Klorid-diffusjonskoeffisienten ( $D$ ) beregnet i samme serie ble  $0,13 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Eksponeringstiden var fra juni 1998 til juni 2013, som tilsvarer ca. 5479 døgn. Beregnet fremtidig

kloridinntrenging er vist i Figur 5–2. Det er benyttet konstant D over hele tidsperioden, fra 14 til 100 år.



Figur 5–2: Beregnet fremtidig kloridinntrenging i uttak A for to ulike kloridkonsentrasjoner.

Etter 14 år har kloridnivået passert kritisk kloridnivå rundt 18 mm inn i konstruksjonen. Etter 100 år, viser beregningen at dette nivået har flyttet seg inn til vel 40 mm. Denne beregningen er basert på at kloridkonsentrasjonen er konstant over tiden. Av tidligere erfaring kan en forvente at kloridkonsentrasjonen i ytersjiktene øker med tiden (Skjølvold, 2011). En fordobling fra 14 til 100 år kan være en sannsynlig økning. Dersom en tar med en fordobling av overflatekonsentrasjonen etter 100 år, vil det kritiske kloridnivået ha kommet inn til nær 55 mm. Beregnede kloridprofiler for begge kloridkonsentrasjonene er vist i Figur 5–2. Overdekningen 1,5 meter opp fra fendertopp ble ved prøveuttak målt til å ligge mellom 70 – 80 mm. Prosjektert overdekning var  $60 + 15 = 75$  mm, altså en beregningsmessig minimumsoverdekning på 60 mm.

### 5.1.2 Akselerert kloridinntrenging

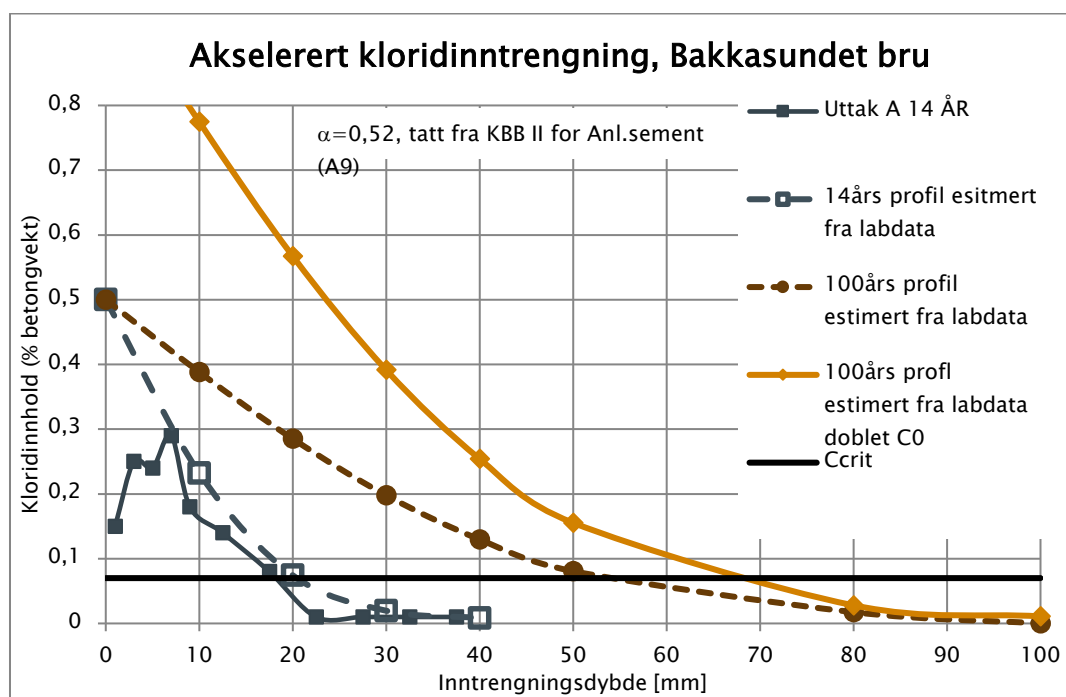
For tre prøvestykker fra hver utvalgte serie ble det gjennomført akselerert kloridinntrenging. I Tabell 5–2 er gjennomsnittsverdiene fra disse seriene oppsummert med

overflatekonsentrasjon, bakgrunnskonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for de ulike seriene.

Tabell 5-2: Gjennomsnittsverdier fra akselerert kloridinntrengning.

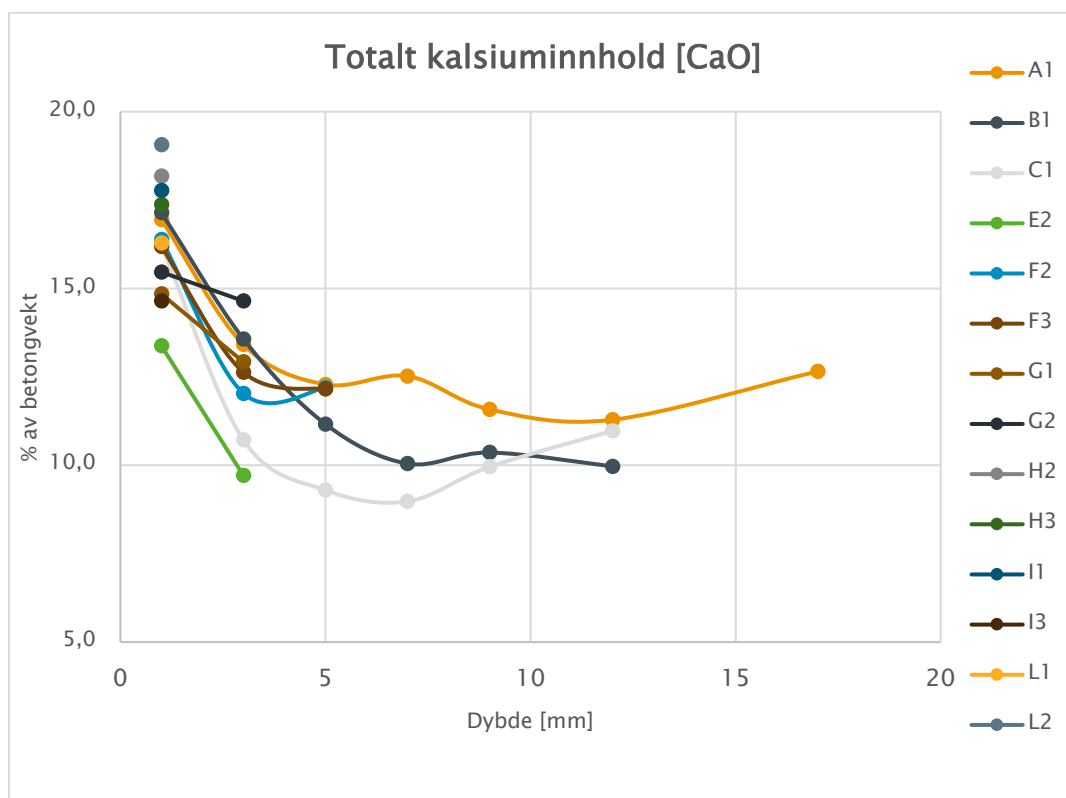
	Overflatekonsentrasjon	Bakgrunnskonsentrasjon	Diffusjonskoeffisient
Serie	% av betongvekt	% av betongvekt	m <sup>2</sup> /s
E	0,780	0,006	$3,39 \cdot 10^{-12}$
F	0,865	0,003	$2,15 \cdot 10^{-12}$
G	0,821	0,006	$2,08 \cdot 10^{-12}$
I	0,890	0,006	$2,43 \cdot 10^{-12}$
L	0,832	0,005	$4,25 \cdot 10^{-12}$

Resultatene fra akselerert prøving er vist sammen med data fra uttak A fra felt. Beregnet profil ligger i dette tilfellet noe høyere enn målt verdi. Dersom vi benytter samme fremgangsmåte som tidligere for å estimere kloridinntrengning etter 100 år, vil en ved doubling av overflatekonsentrasjonen gi et kloridinnhold over antatt kritisk nivå helt inn til 70 mm dybde.



Figur 5-3: Beregnet fremtidig kloridinntrengning basert på måledata fra akselerert prøving.

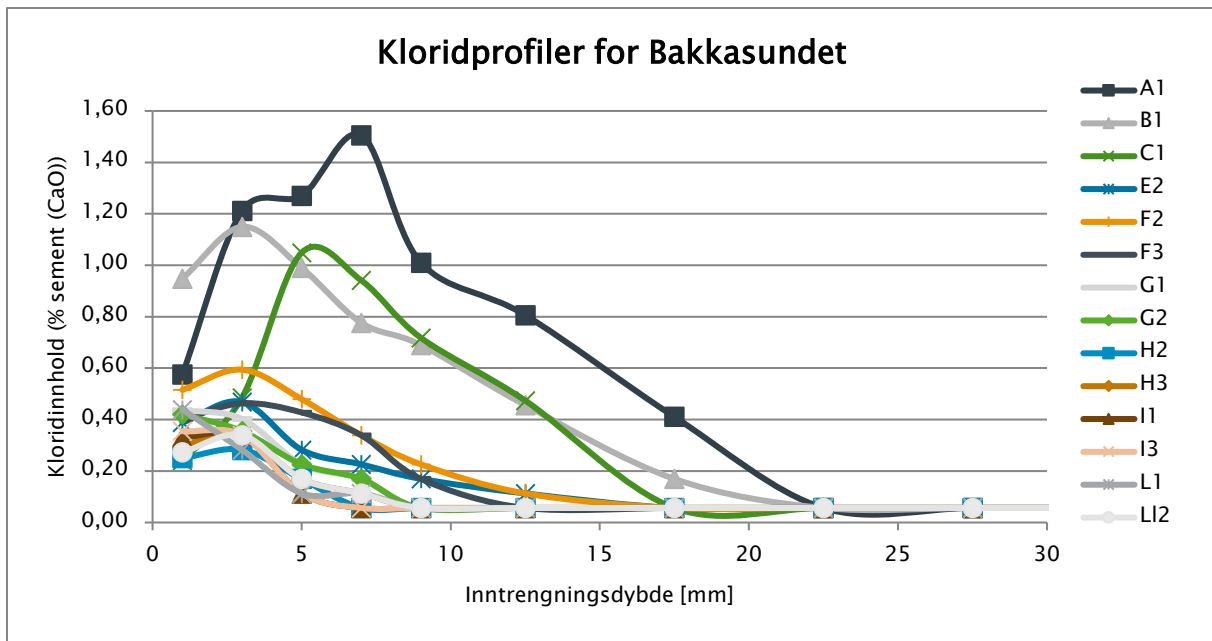
### 5.1.3 Kalsiuminnhold



Figur 5-4: Målt kalsiuminnhold i betongen i forhold til avstand fra overflate.

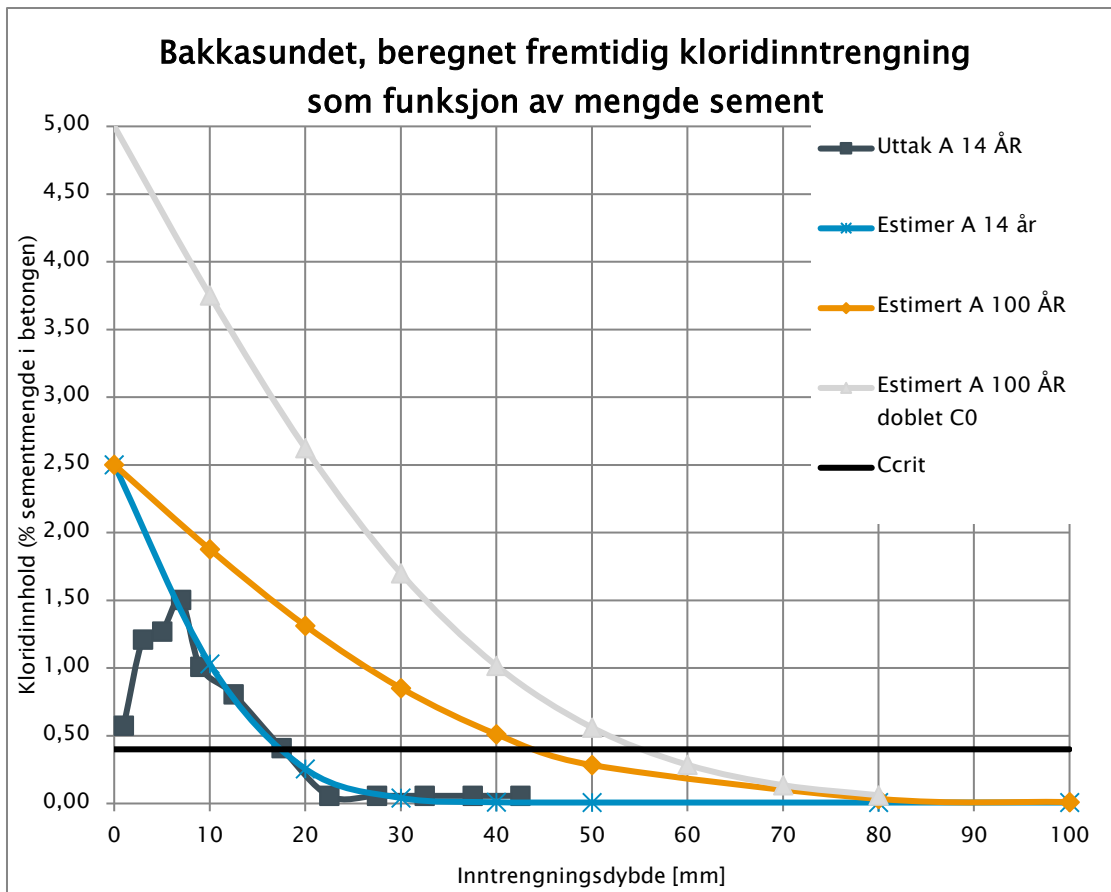
Analysen viser en større andel kalsium i yttersjiktet. Støpe huden som dannes mot forskalingen er normalt noe mer pastarik. Gjennomsnittet for de ytterste to millimeterne er på 16,4 %, mens en snittverdi for målingene innenfor dette er på 11,5 %.

For å beregne andelen sement i betongen/sjiktene, ble det benyttet informasjon fra sementleverandør. Siden det i alle prosjektene var benyttet Norcem anleggssement, skal innholdet av CaO for denne være på rundt 65%. Prosentandel sement i betongen kan da anslås til ca. 17,7 %. Målt gjennomsnittlig egenvekt til betongen var oppgitt til 2365 kg/m<sup>3</sup>, som tilsvarer 418 kg sement per kubikk betong. I resept var det oppgitt en sementandel på 409 kg pr kubikk betong.



Figur 5-5: Målt kloridinntrengning plottet som kloridinnhold i prosent av beregnet sementmengde.

Beregning av kloridinntrengning kan også utføres der en i stedet for prosent av total betongvekt plottes kloridinnholdet som prosent av sementen mot inntrengningsdybden. På samme måte benyttes beregningen med Ficks 2. lov og regresjonsanalyse for å finne best mulig kurvetilpasning. I Figur 5-6 vises beregnede inntrengningsprofiler for område A. Kritisk kloridkonsentrasjon tilsvarer nå 0,4 % av bindemiddelet. Med en overflatekonsentrasjon på 2,5 % vil nivået med kloridmengde over kritisk kloridkonsentrasjon etter 100 år bli 43 mm. Dersom overflatekonsentrasjonen dobles, vil dette nivået strekke seg helt inn til 55 mm.



Figur 5-6: Beregnet fremtidig kloridinntrengning i område A, i forhold til mengde sement, estimert fra målt kalsiuminnhold.

#### 5.1.4 Spesifikk elektrisk motstand

I forbindelse med akselerert kloridinntrengning, ble det tildannet et antall prøvestykker med høyde 50 mm. Disse ble også målt for elektrisk motstand.

Spesifikk elektrisk motstand (resistivitet) ble deretter beregnet etter følgende formel:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l}$$

Hvor:

R = målt elektrisk motstand i  $\Omega$

A = prøvestykkets tverrsnittsareal i  $m^2$

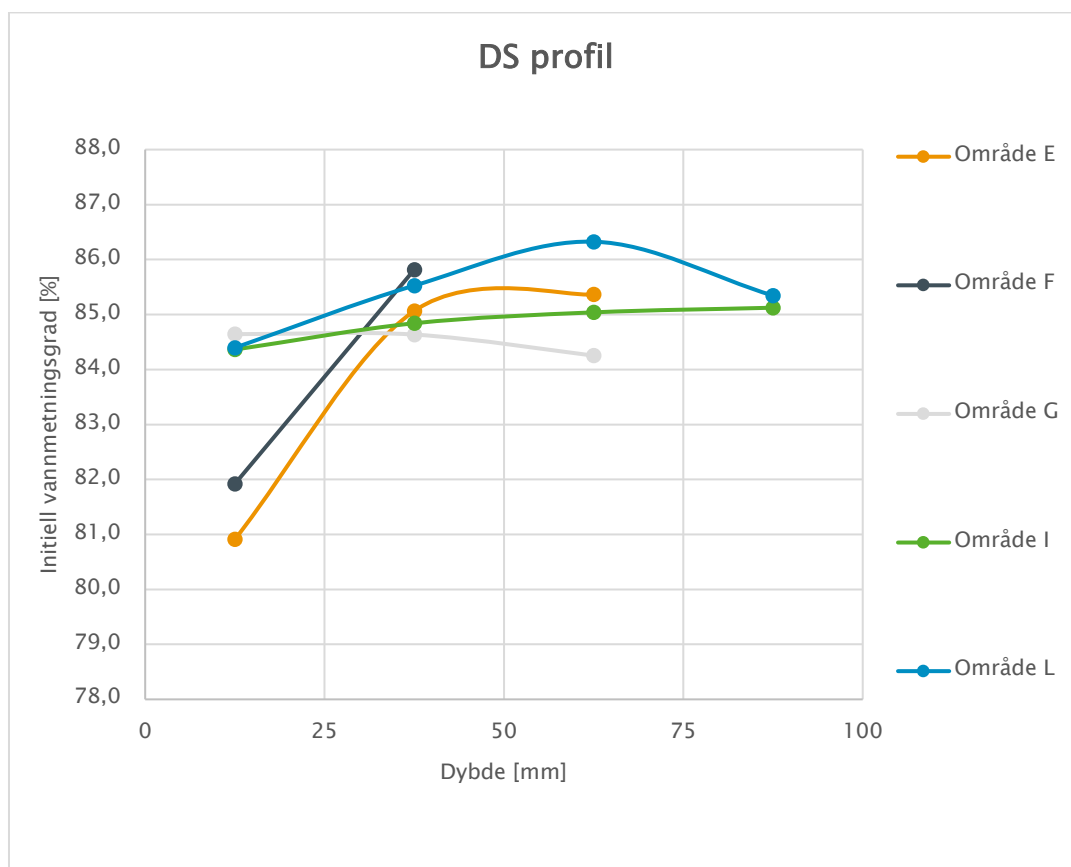
l = avstanden mellom prøvestykkets måleflater i m

Tabell 5-3: Beregnede verdier av resistivitet.

	Initiell resistivitet	Resistivitet etter lagring i $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Resistivitet etter 35 døgn i NaCl løsning
Serie	Ohm x m	Ohm x m	Ohm x m
E	482	196	319
F	427	180	216
G	453	195	232
I	434	207	275
L	335	130	197

Høyere vannmetning i betongen vil gi en høy ledningsevne og derav lav elektrisk motstand. Unntakene vil være dersom betongen blir utvasket og mister oppløste ioner.

### 5.1.5 Vannmetningsgrad



Figur 5-7: Vannmetningsgraden (DS = Degree of saturation) i betongen målt fra overflaten i 25 mm sjikt innover.

Figuren viser hvordan vannmetningsgraden varierer fra ytterflaten og innover. Hvert sjikt tilsvarer en dybde på ca. 25 mm. Prøveuttakene er både fra søylene (E, F og G), og brukassen (L og I). Til tross for et begrenset prøveuttak er verdiene relativt sammenfallende rundt 85 -



86 %. Det forventes en mer lik vannmetningsgrad innover i betongen. Lavest vannmetningsgrad finnes i yttersjiktene på søylen (E og F), nederst mot fendertopp. En forklaring på disse lavere verdiene kan være at områdene er mer utsatt for vind og derav uttørking.

### 5.1.6 Porøsitet

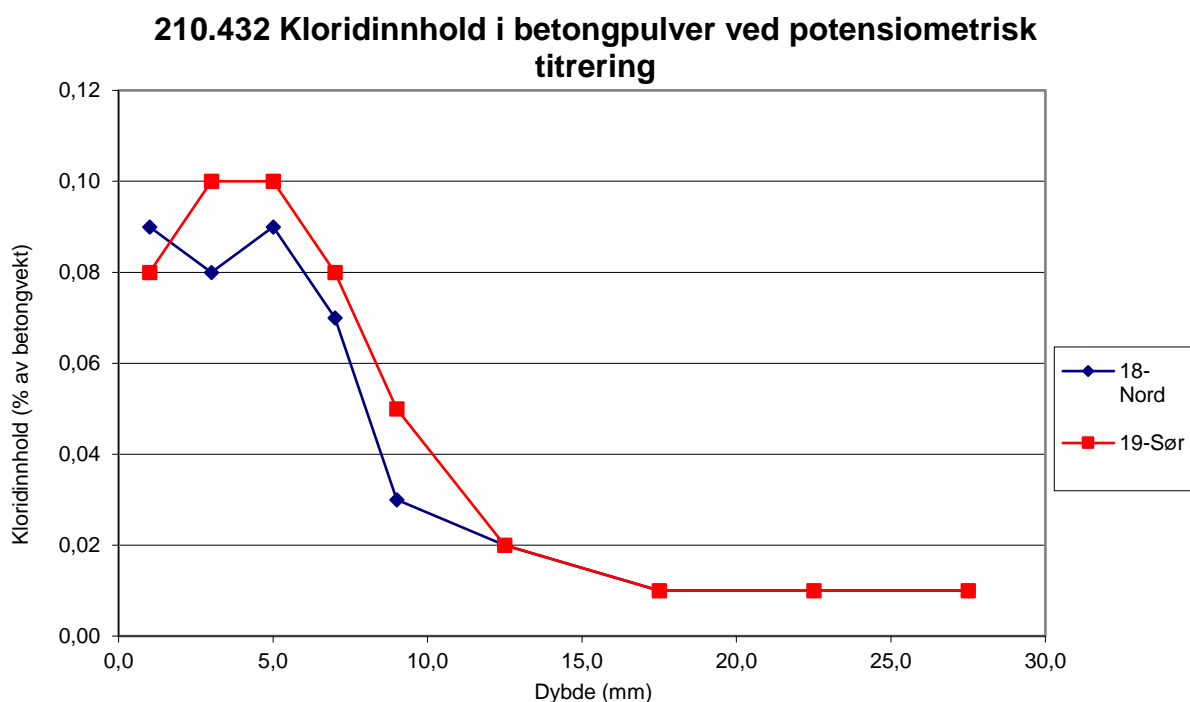
Tabell 5-4: Målte verdier av densitet og porøsitet.

	Tørrdensitet	Faststoffdensitet	Sug porøsitet	Makro porøsitet	Total porøsitet
Prøveserie	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	Vol %	Vol %	Vol %
E	2230	2659	14,3	1,8	16,1
F	2187	2658	15,4	2,4	17,7
G	2227	2660	14,6	1,7	16,3
I	2251	2663	13,1	2,4	15,5
L	2329	2700	12,3	1,5	13,7

Betongen fra brukassen har en noe høyere densitet enn for søylene. Sugporøsiteten er også noe lavere for betongen fra brukassen, dette kan ha en sammenheng med at betongkvaliteten var høyere. Den lave makroporøsiteten skulle tyde på at betongen ikke har vært luftinnført. Likevel er dette lite sannsynlig og antakeligvis er det prøvetekniske forhold som spiller inn.

### 5.1.7 Snudd kjerne

Etter omtrent 2 år, ble to prøvestykker hentet ut og tatt inn til fresing for å kunne bedømme kloridinntrengingen. Prøvestykket merket «18-nord» ble tatt ut fra område F, mens prøvestykket merket «19-sør» ble hentet ut fra område E.



Figur 5-8: Grafisk fremstilling av kloridinntrengning for snudde kjerner fra Bakkasundet bru.

I motsetning til prøvestykkene hentet fra felt til bestemmelse av kloridprofiler, har de snudde kjernene ikke blitt utsatt for klorideksponering i tidlig alder. Diffusjonskoeffisientene ligger her mellom det som ble funnet fra prøvestykkene eksponert i 14 år og fra prøvestykkene fra akselerert testing.

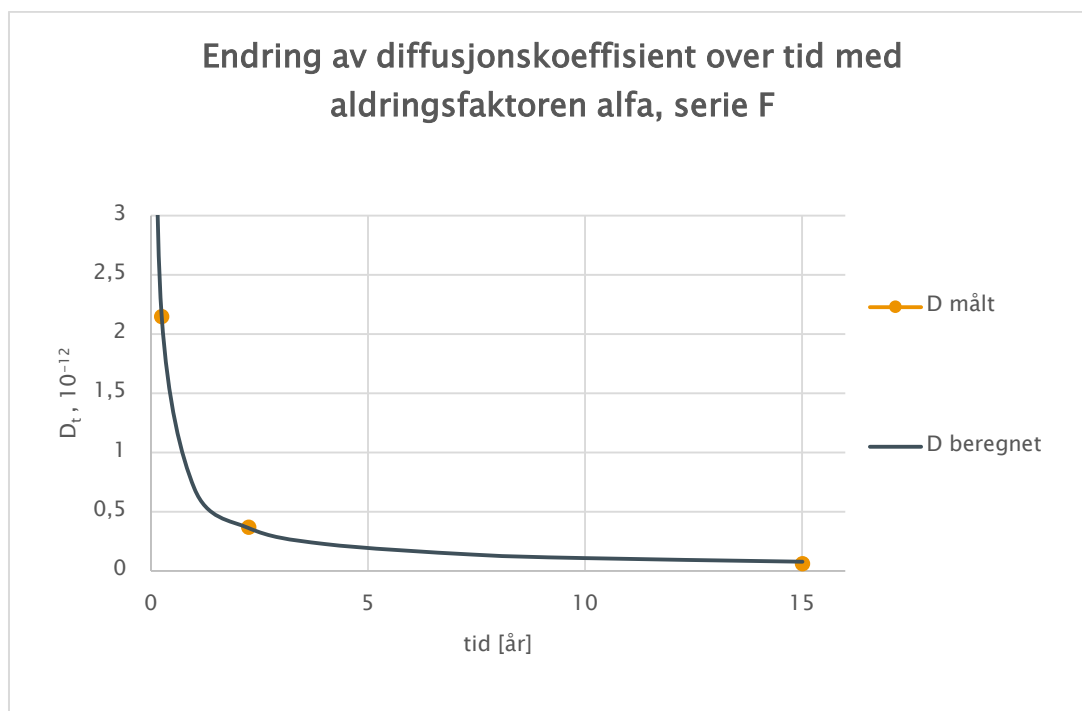
Tabell 5-5: Beregnede verdier av overflatekonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for snudde kjerner.

Prøve	Overflatekonsentrasjon, % av betongvekt	Diffusjonskoeffisient, D, $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s
«18-nord»	0,17	0,37
«19-sør»	0,19	0,40

Av dette kan en så beregne reell  $\alpha$ -verdi (ren aldring).

Tabell 5-6: Verdier benyttet til beregning av  $\alpha$ -verdi.

Parameter	Enhet	Serie E	Serie F
$D_0$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	3,39	2,15
$D^*_0$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	3,39	2,15
$t_0$	Døgn	86	90
$D_2$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	0,40	0,37
$D^*_2$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	0,40	0,363
$t_2$	Døgn	820	820
$D_{14}$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	0,066	0,062
$D^*_{14}$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	0,066	0,079
$t_{14}$	Døgn	5479	5479
alfa		0,95	0,80

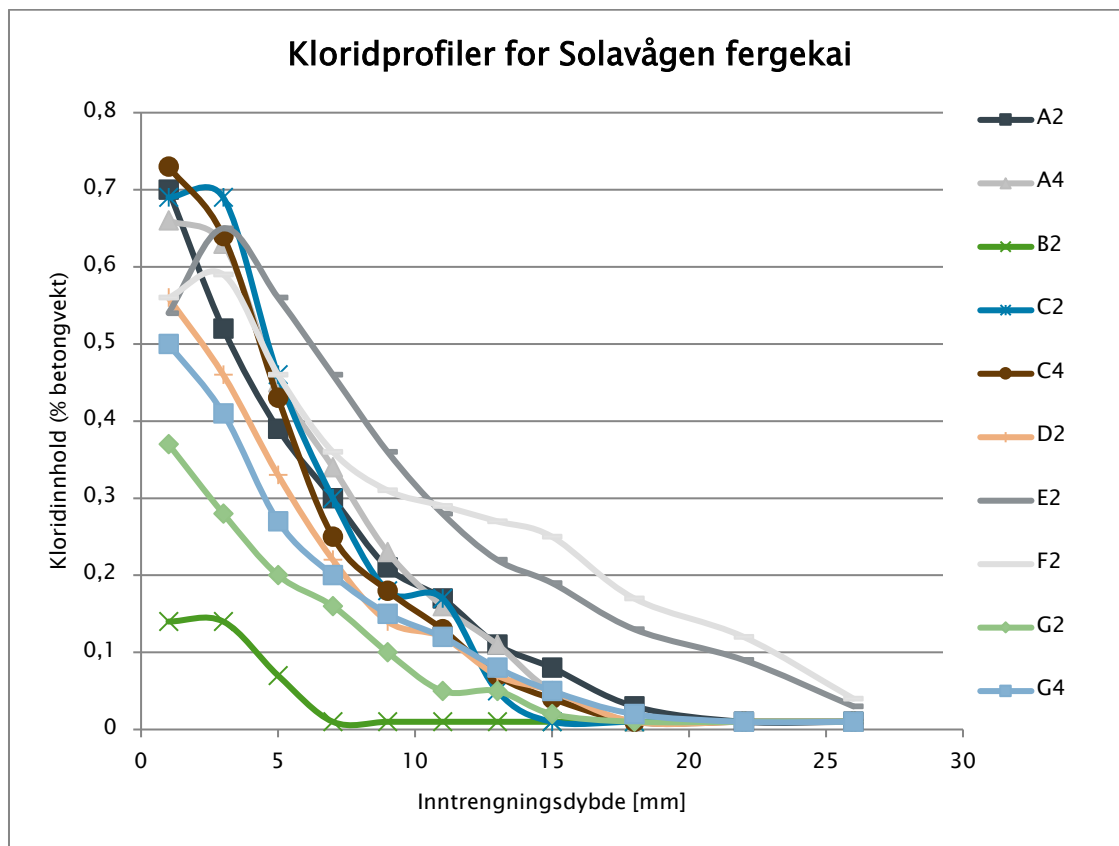


Figur 5-9: Endring av diffusjonskoeffisient over tid, beregnet med alfa-verdi på 0,80 for serie F.

## 5.2 Solavågen fergekai

For analysene av kjerneprøvene fra Solavågen fergekai, ble det utlyst en tilbudskonkurranse på rammeavtale på laboratorietjenester innen betong, betongkonstruksjoner, tunnel og bruedlikehold med FoU, avrop 18. Valgt tilbyder ble SINTEF Byggforsk. Rapporten er gitt i Vedlegg 2 – Rapport fra SINTEF Byggforsk.

### 5.2.1 Kloridinnhold



Figur 5-10: Målte kloridprofiler fra Solavågen fergekai. A og B er fra sidekant LO side, C og D er fra sidekant LE side, E og F stammer fra underside, mens G er fra fronten av kaia.

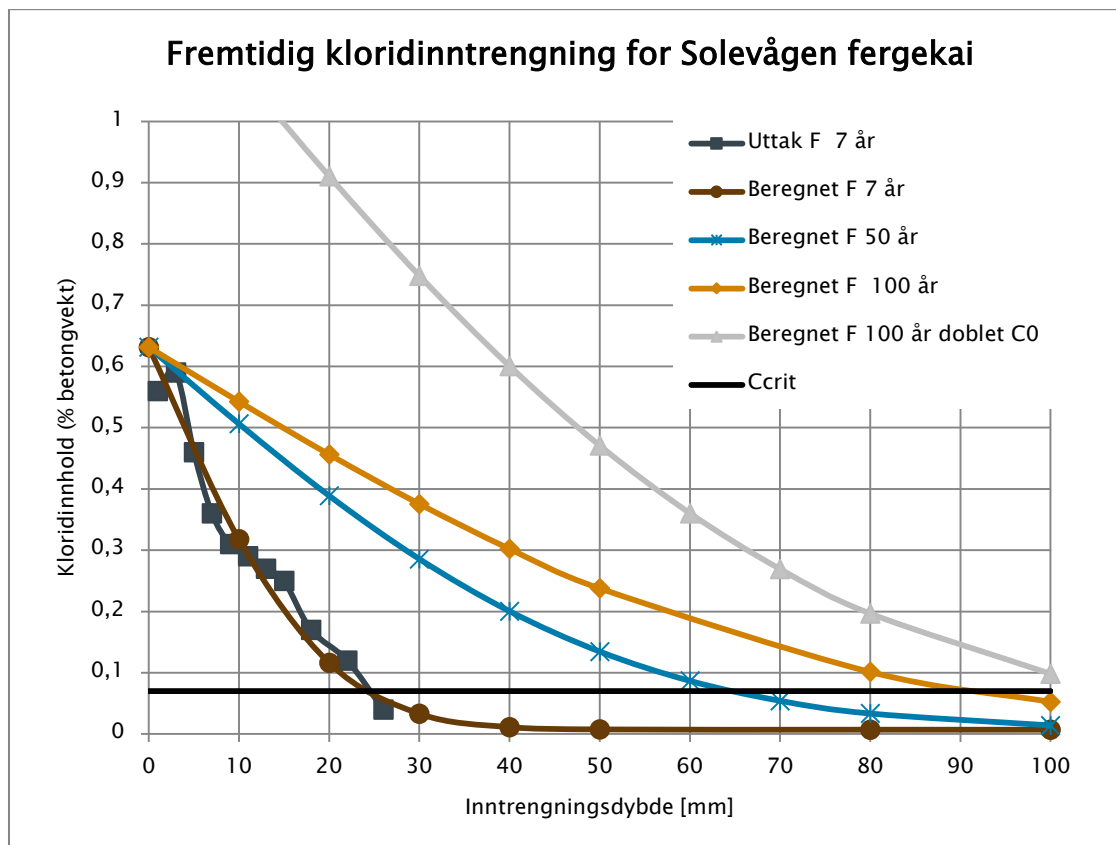
Undersiden av kaia blir kun utsatt for sjøsprøyt og overflaten vaskes ikke av regnvann, og kloridbelastningen blir derfor høy. Dette er sannsynligvis årsaken til høyere registrert inntrengning i disse seriene. Med unntak av B2 som viser en noe avvikende kloridprofil i alle målinger, er kloridinntrengingen lavest i uttakene nær fronten av fergekaia (serie G er helt i front).

Basert på kloridprofilene er diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjoner beregnet, se Tabell 5-7.

Tabell 5-7: Beregnede diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjoner fra kloridprofilene.

Serie	Overflatekonsentrasjon % av betongvekt	Diffusjonskoeffisient m <sup>2</sup> /s
A	0,81	0,142 · 10 <sup>-12</sup>
B	0,24	0,05 · 10 <sup>-12</sup>
C	0,99	0,095 · 10 <sup>-12</sup>
D	0,63	0,12 · 10 <sup>-12</sup>
E	0,80	0,31 · 10 <sup>-12</sup>
F	0,63	0,49 · 10 <sup>-12</sup>
G	0,47	0,135 · 10 <sup>-12</sup>

Verdiene fra disse undersøkelsene har videre blitt benyttet for å beregne fremtidig kloridinntrengning som for Bakkasundbrua. I Figur 5-11 er de beregnede resultatene fra uttak F presentert. Det er benyttet konstant D over hele tidsperioden.



Figur 5-11: Beregnet fremtidig kloridinntrengning basert på feltdata.

Ved å benytte Ficks 2. lov og regresjonsanalyse, ble det funnet en overflatekonsentrasjon ( $C_s$ ) lik 0,63 % og diffusjonskoeffisient på  $0,49 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Siden beregnet levetid for fergekaier normalt er satt til 50 år, er beregnet kloridinntrengning vist for både 50 og 100 års eksponering. I tillegg er situasjonen etter 100 år og en forventet

dobling av overflatekonsentrasjonen av klorider vist i samme diagram. Estimaten viser at etter 50 år eksponering i dette miljøet vil kloridkonsentrasjonen være over antatt kritisk nivå drøyt 60 mm inn i konstruksjonen og etter 100 år nær 90 mm. Hvis en i tillegg antar en dobling av kloridkonsentrasjonen i overflaten vil inntrengning over kritisk nivå etter 100 år være 110 mm inn. Ved prøveuttak ble armeringsjern målt 70 – 80 mm fra overflaten på undersiden (E og F). Prosjektert overdekning har vært 75 mm, altså minimumsoverdekning 60 mm pluss 15 mm toleranse.

## 5.2.2 Akselerert kloridinntrengning

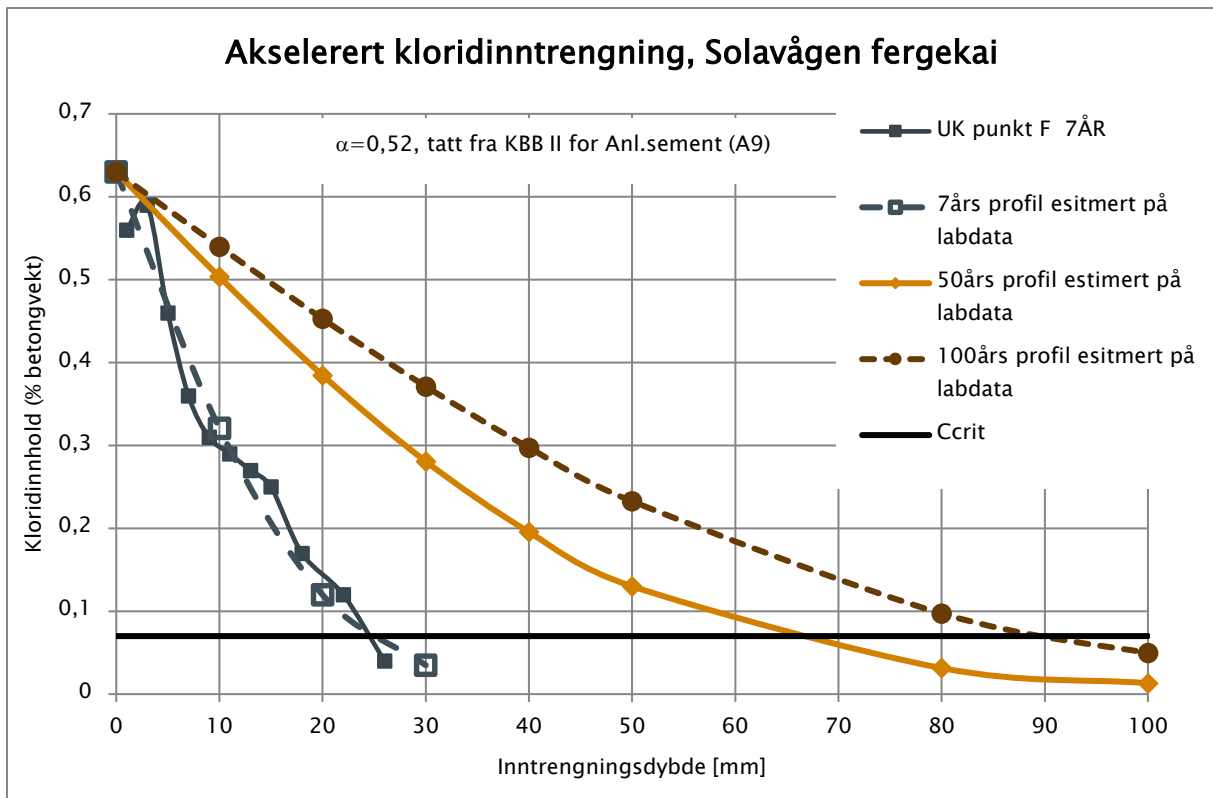
Til et utvalg av prøvestykker ble det utført akselerert kloridinntrengning. En oppsummering av resultatene fra denne prøvingen er gjengitt i Tabell 5–8.

*Tabell 5–8: Sammendrag av verdier funnet ved akselerert kloridinntrengning.*

Serie	Overflatekonsentrasjon	Diffusjonskoeffisient
	% av betongvekt	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
A	$1,12 \pm 0,19$	$2,60 \pm 0,17$
B	$0,95 \pm 0,05$	$2,97 \pm 0,26$
C	$0,96 \pm 0,12$	$2,55 \pm 0,60$
D	$0,96 \pm 0,08$	$2,87 \pm 0,40$
G	$1,05 \pm 0,05$	$2,60 \pm 0,53$

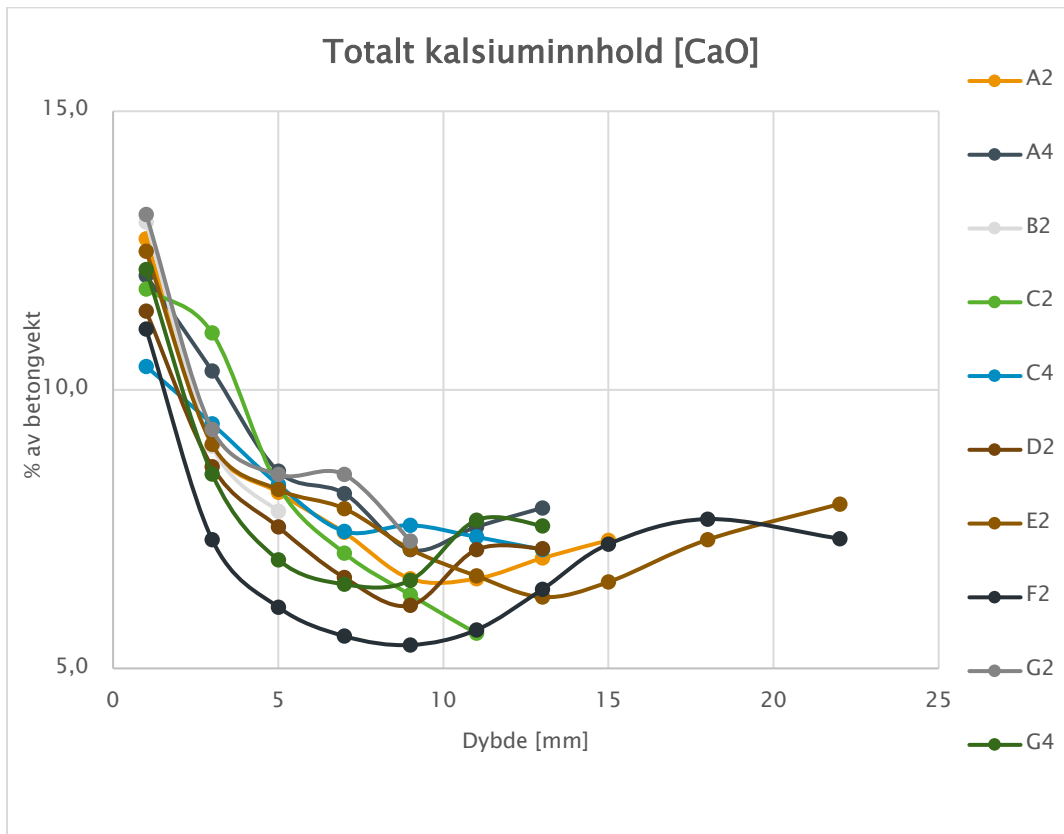
Resultatene viser stor jevnhet med overflatekonsentrasjoner på rundt 1% og diffusjonskoeffisienter på nær  $3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Det ble utført beregning av kloridinntrengning av verdiene funnet ved akselerert kloridinntrengning, samt ved å korrigere diffusjonskoeffisienten for aldring, som tidligere beskrevet. I Figur 5–12 ser en at beregnet kurve for 7 års eksponering sammenfaller meget bra med den reelle kurven for dette målepunktet. Beregning med 100 års eksponering viser også i dette tilfellet at inntrengning over antatt kritisk kloridnivå rekker helt inn til 90 mm dybde.



Figur 5-12: Beregnet fremtidig kloridinntrengning basert på verdier fra akselerert prøving.

### 5.2.3 Kalsiuminnhold

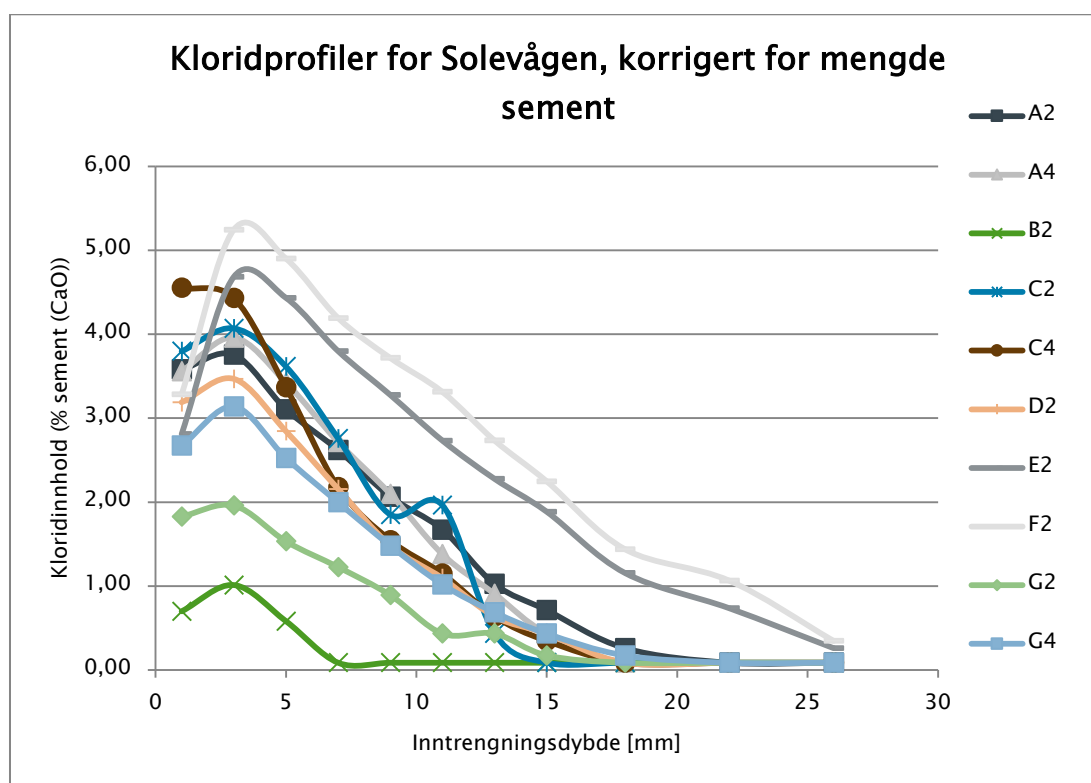


Figur 5-13: Målt kalsiuminnhold i betongen i forhold til avstand fra overflate.



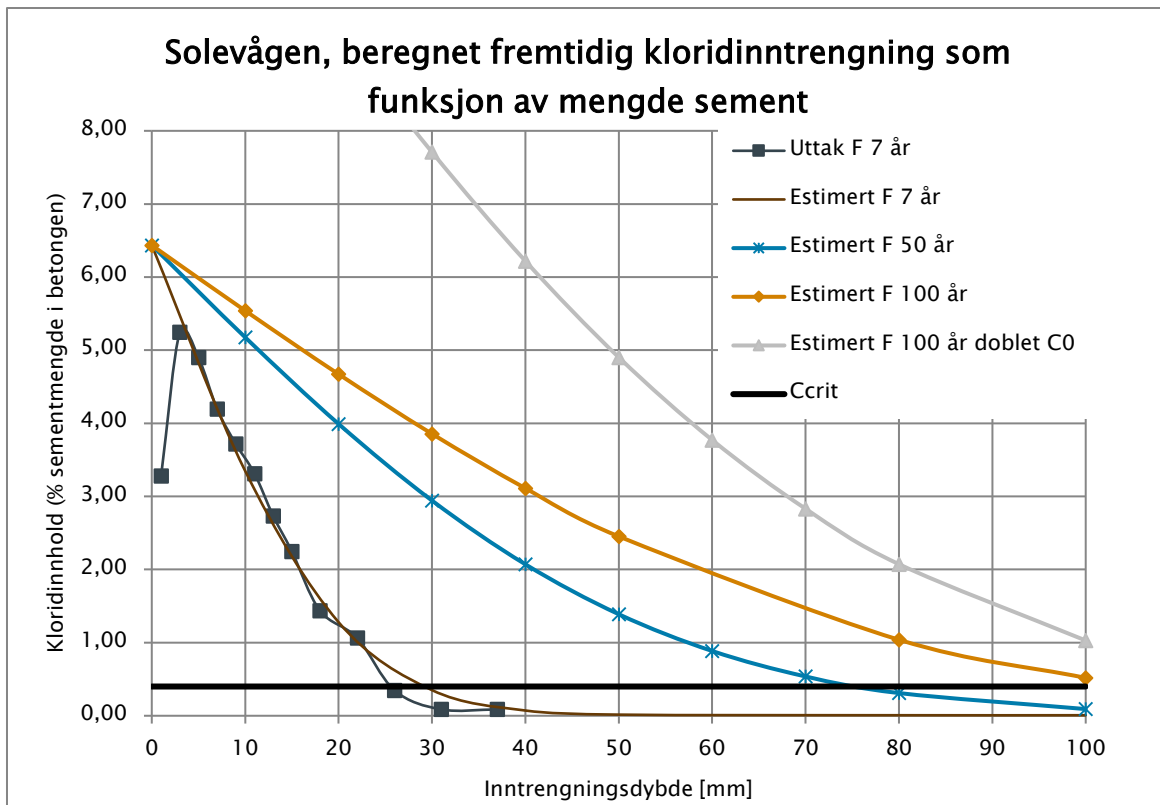
Prøvene av kalsiuminnhold viser også i dette tilfellet høyere sementandel ut mot overflaten, som forventet. De ytterste to millimeterne har et kalsiuminnhold på 12,0 %, mens innover i støpen faller andelen til en gjennomsnittverdi på 7,5 %.

For å beregne andelen sement i betongen/sjiktene, ble det benyttet informasjon fra sementleverandør. Siden det i alle prosjektene var benyttet Norcem anleggssement, skal innholdet av CaO for denne være på rundt 65%. Prosentandel sement i betongen kan da anslås til ca. 11,5 %. Med en antatt egenvekt til betongen på 2400 kg/m<sup>3</sup>, tilsvarer dette 277 kg sement per kubikk betong. Dette er et lavere resultat enn forventet. En forklaring kan være at det har blitt benyttet for lite sement, eller det kan ha blitt benyttet en annen type sement. Dersom Anlegg FA hadde vært benyttet ville andelen sement økt til rundt 350 kg per kubikk betong, som er en mer forventet verdi.



Figur 5-14: Målt kloridinntrengning plottet som kloridinnhold i prosent av beregnet sementmengde.

I Figur 5-15 er kloridinnholdet som andel av sement mot inntrengningsdybden vist, sammen med beregnede kloridprofiler for ulike eksponeringstider. Etter 50 år vil kritisk kloridinnhold være 75 mm inn i konstruksjonen, etter 100 år vil samme nivå befinne seg rundt 110 mm inn. I dette tilfellet viser den estimerte inntrengningen at levetiden til konstruksjonen blir noe lavere når det benyttes kloridprofiler der kloridinnholdet uttrykkes som % av sementmengde.



Figur 5-15: Beregnet fremtidig kloridinntrengning i område F, korrigert for mengde sement, estimert fra målt kalsiuminnhold.

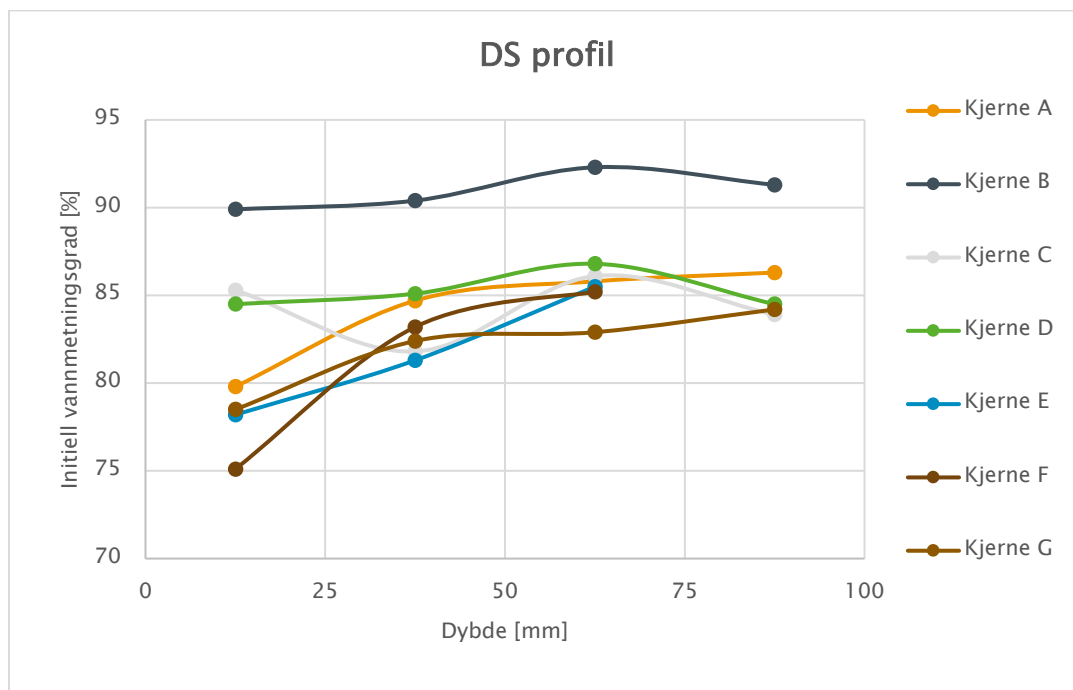
#### 5.2.4 Spesifikk elektrisk motstand

Prøvestykkene tillaget for måling av bulkdiffusjon / akselerert kloridinntrengning, ble målt for elektrisk motstand på overflatetørre prøvestykker direkte etter saging. Prøvestykkene hadde alle en høyde på rundt 50 mm. Prøvestykkene til kapillær sugeevne ble også undersøkt for elektrisk motstand, høyden for disse var 45 mm ved uttak og 20 mm etter tillaging.

Tabell 5-9: Beregnet resistivitet for betong benyttet til akselerert kloridinntrengning og kapillær sugeevne.

	Akselerert kloridinntrengning	Kapillær sugeevne	
		Overflatetørre (45mm)	Overflatetørre (20 mm)
Serie	Ohm x m	Ohm x m	Ohm x m
A	281,7 ± 12,8	269,9 ± 0,1	255,4 ± 12,2
B	282,3 ± 8,3		
C	415,8 ± 10,6	391,2 ± 9,5	343,0 ± 20,1
D	303,4 ± 31,8		
G	302,5 ± 18,2	278,1 ± 27,3	257,6 ± 18,7

## 5.2.5 Vannmetningsgrad



Figur 5-16: Vannmetningsgraden (DS = Degree of saturation) i betongen målt fra overflaten i 25 mm sjikt.

Fuktforholdene målt i fergekaia har som forventet størst spredning i overflaten, med laveste verdier for uttakene fra undersiden (E og F). Sjiktene lenger inn i konstruksjonene samles mot rundt 85 % vannmetningsgrad. Unntaket i serien er uttak B som ligger noe høyere.

## 5.2.6 Porøsitet

Tabell 5-10: Målte verdier av densitet og porøsitet.

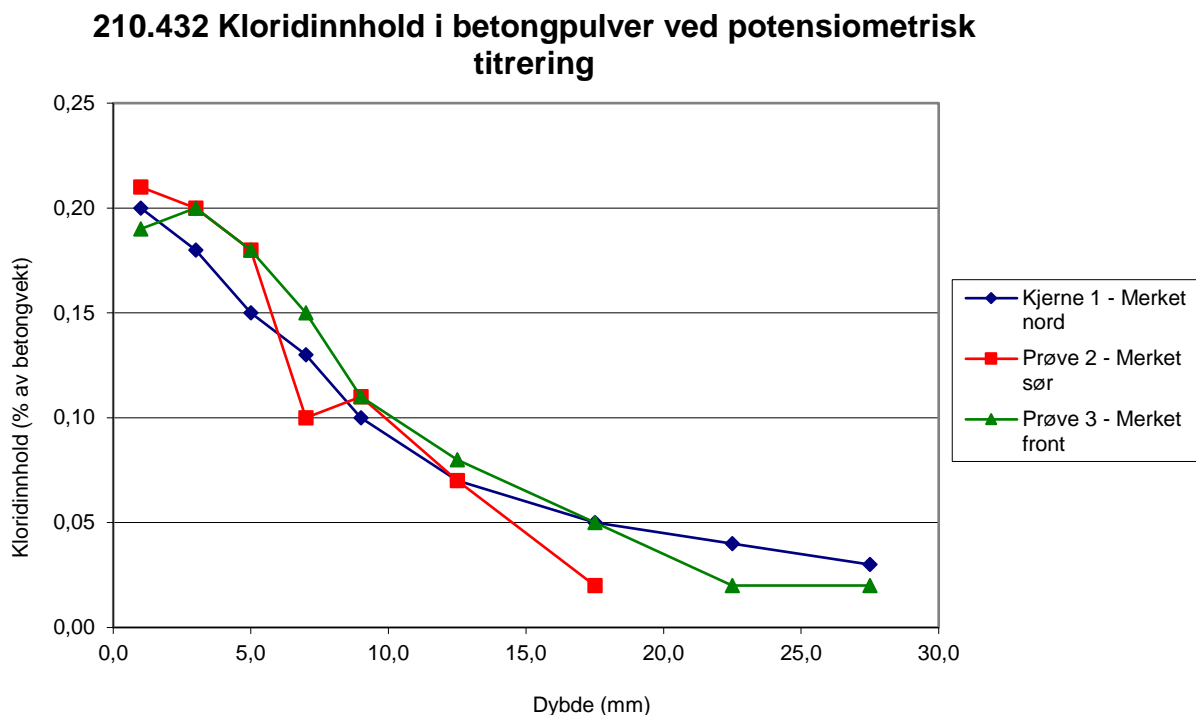
Prøveserie	Tørredensitet	Faststoffdensitet	Sug porøsitet	Makro porøsitet	Total porøsitet
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	Vol %	Vol %	Vol %
A	2301	2736	13,9	2,0	15,9
B	2258	2710	15,1	1,5	16,7
C	2236	2653	13,7	2,0	15,7
D	2306	2735	13,7	2,0	15,7
E	2296	2721	13,3	2,3	15,6
F	2320	2737	13,4	1,9	15,2
G	2271	2723	13,8	2,8	16,6

Serie B som tidligere har vist avvikende resultater i forhold til kloridprofil og vannmetningsgrad, har også i dette forsøket avvikende resultat, her med høyere verdi i

sugporøsitet. For alle prøveseriene er makroporøsiteten lavere enn det som ville vært normalt når betongen er luftinnført.

### 5.2.7 Snudd kjerne

Det ble valgt ut tre områder i fergekaia hvor en kjerne fra hvert felt ble benyttet til «snudd kjerne-forsøk». Innerste del av kjernen ble kappet til og montert tilbake i prøvehullet, slik at sagflaten fluktet med den omkringliggende betongen. Etter omtrent to år, ble prøvestykkene hentet ut og tatt inn til fresing og kloridanalyser. Resultatene fra dette forsøket er vist i Figur 5-17.



Figur 5-17: Grafisk fremstilling av kloridinntrengning for snudde kjerner fra Solavågen fergekai.

Som for de snudde kjernene på Bakkasundet bru, har også de snudde kjernene på Solavågen fergekai hatt en lengre herdetid, før de ble eksponert for salter fra et værhardt kystmiljø. Resultatene fra feltprøvingen er gitt i Tabell 5-11.

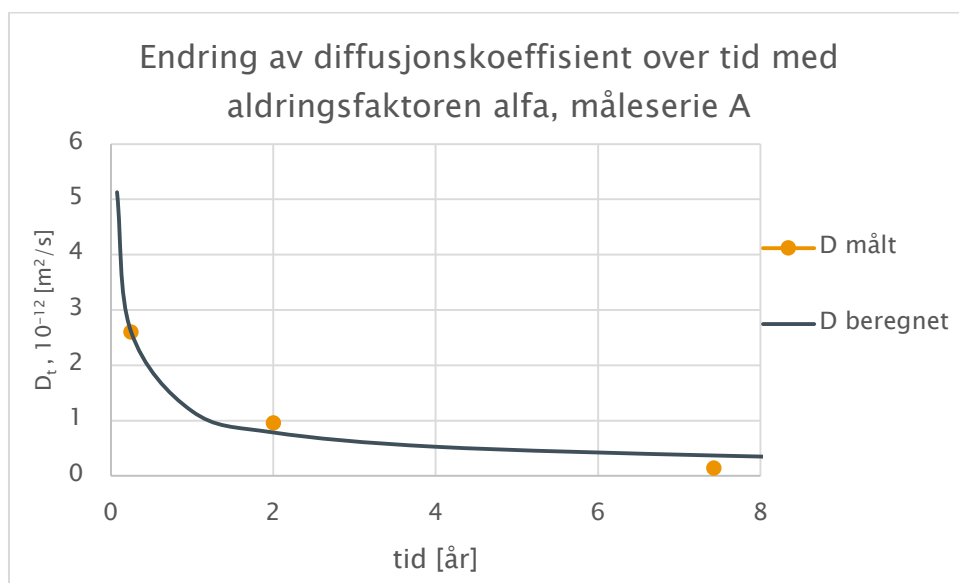
Tabell 5-11: Beregnede verdier av overflatekonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for snudde kjerner.

Prøve	Overflatekonsentrasjon, % av betongvekt	Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s
«nord» - C	0,21	1,25
«sør» - A	0,24	0,96
«front» - G	0,25	1,14

Av dette kan en så beregne reell  $\alpha$ -verdi (ren aldring).

Tabell 5-12: Verdier benyttet til beregning av  $\alpha$ -verdi.

Parameter	Enhet	Serie A	Serie C	Serie G
$D_0$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	2,60	2,55	2,60
$D^*_0$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	2,62	2,59	2,63
$t_0$	Døgn	90	90	90
$D_2$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	0,96	1,25	1,14
$D^*_2$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	0,79	0,92	0,88
$t_2$	Døgn	730	730	730
$D_7$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	0,14	0,095	0,135
$D^*_7$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	0,37	0,482	0,446
$t_7$	Døgn	2710	2710	2710
alfa		0,58	0,49	0,52

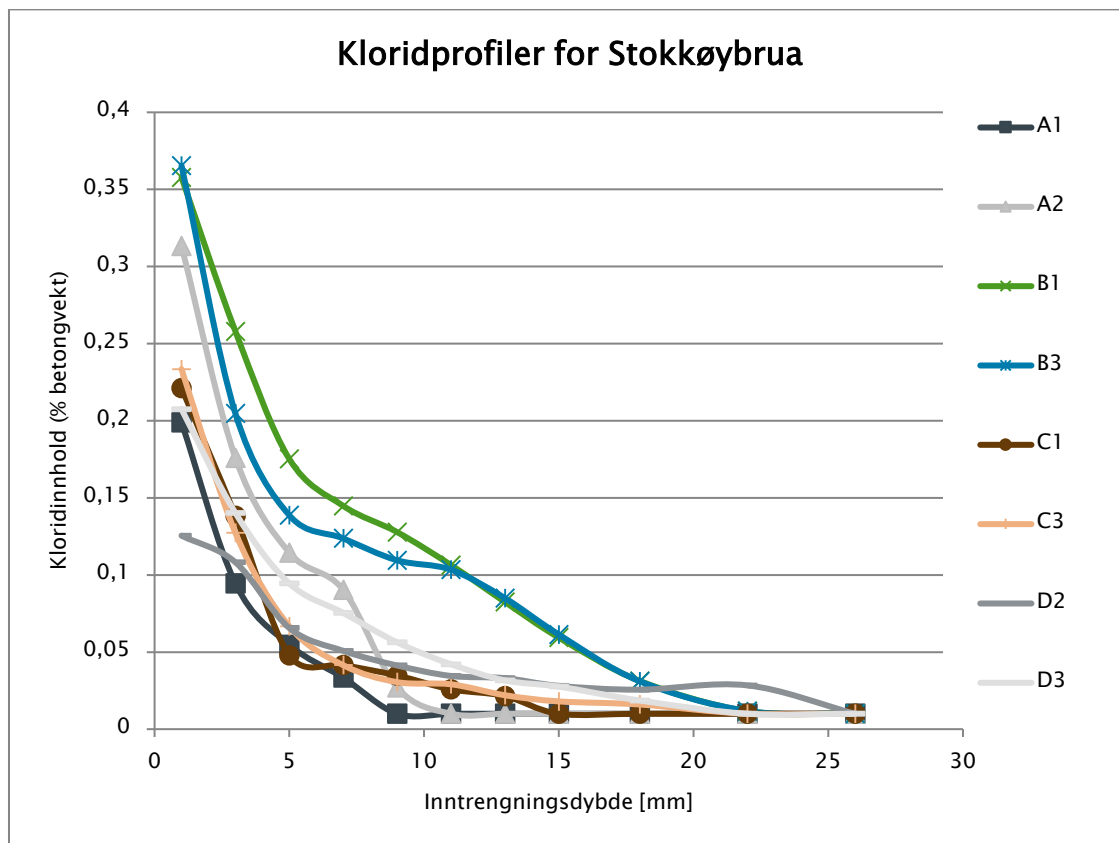


Figur 5-18: Endring av diffusjonskoeffisient over tid, beregnet med alfa-verdi på 0,58 for serie A.

## 5.3 Stokkøybrua

For analysene av kjerneprøvene fra Stokkøybrua, ble det utlyst en tilbudskonkurranse på rammeavtale på laboratorietjenester innen betong, betongkonstruksjoner, tunnel og bruvedlikehold med FoU, avrop 21. Valgt tilbyder ble Mannvit, fra Island. Rapporten er gitt i Vedlegg 3 – Rapport fra Mannvit.

### 5.3.1 Kloridinnhold



Figur 5-19: Kloridprofiler av prøveuttak fra Stokkøybrua. A – nord, B – øst, C – sør og D – vest.

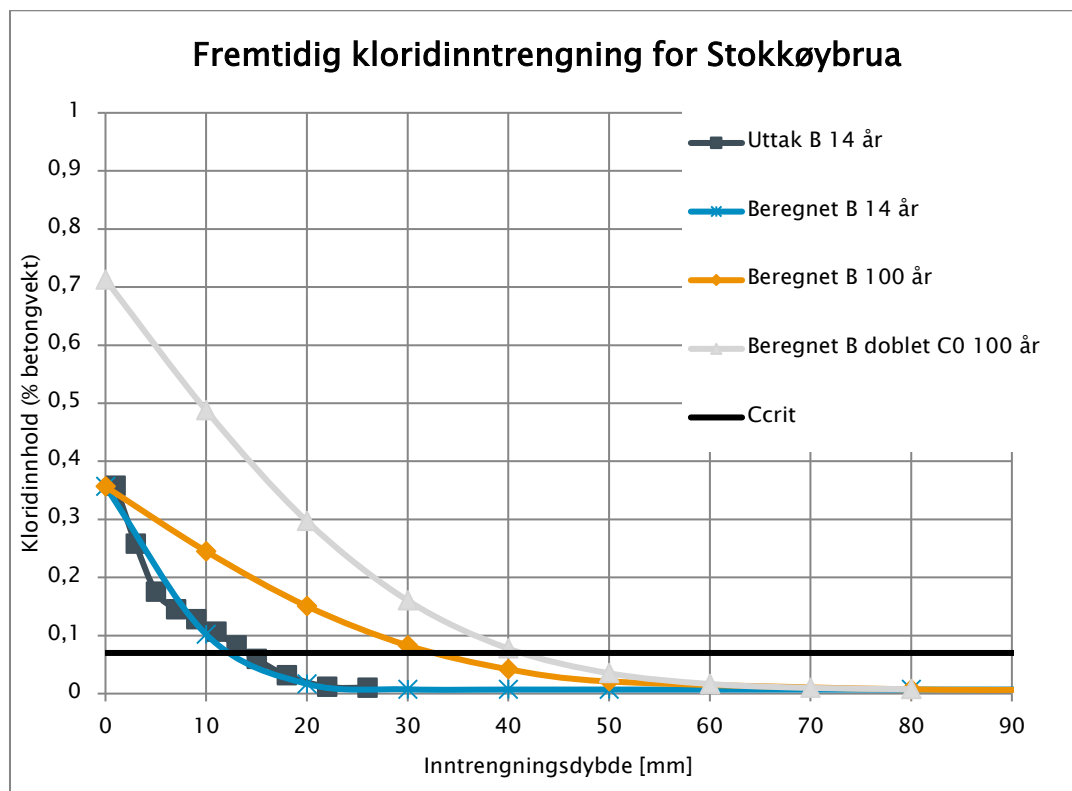
Av figuren kommer det frem at prøveuttakene i serie B har den største kloridinntrengingen. Prøvene i serie B er tatt fra søylevegg, retning øst/sør-øst, i le-side.

Basert på kloridprofilene er diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjoner beregnet, se Tabell 5-13.

Tabell 5-13: Beregnede diffusjonskoeffisienter og overflatekonsentrasjoner fra kloridprofilene.

	Overflatekonsentrasjon	Diffusjonskoeffisient
Serie	% av betongvekt	m <sup>2</sup> /s
A	0,279	0,028 · 10 <sup>-12</sup>
B	0,345	0,088 · 10 <sup>-12</sup>
C	0,264	0,022 · 10 <sup>-12</sup>
D	0,176	0,066 · 10 <sup>-12</sup>

Beregning av fremtidig kloridinntrengning er vist for resultatene fra prøveuttakene i serie B1, se Figur 5-20. Ved bruk av Ficks 2. lov og kurvetilpasning ble det funnet en overflatekonsentrasjon ( $C_s$ ) på 0,36 % og diffusjonskoeffisient,  $D$ , lik  $0,094 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Prøvealder var 14 år (5212 døgn). Etter 100 års eksponeringstid vil kritisk kloridkonsentrasjon være 30 mm inn i konstruksjonen og med en dobling av overflatekonsentrasjonen vil kritisk kloridkonsentrasjon ha kommet vel 40 mm inn. Overdekningen ble ved prøveuttak målt til 75 – 80 mm. Prosjektert overdekning har vært 75 mm, altså minimumsoverdekning 60 mm plus 15 mm toleranse.



Figur 5-20: Beregnet fremtidig kloridinntrengning på Stokkøybrua basert på feltdata.

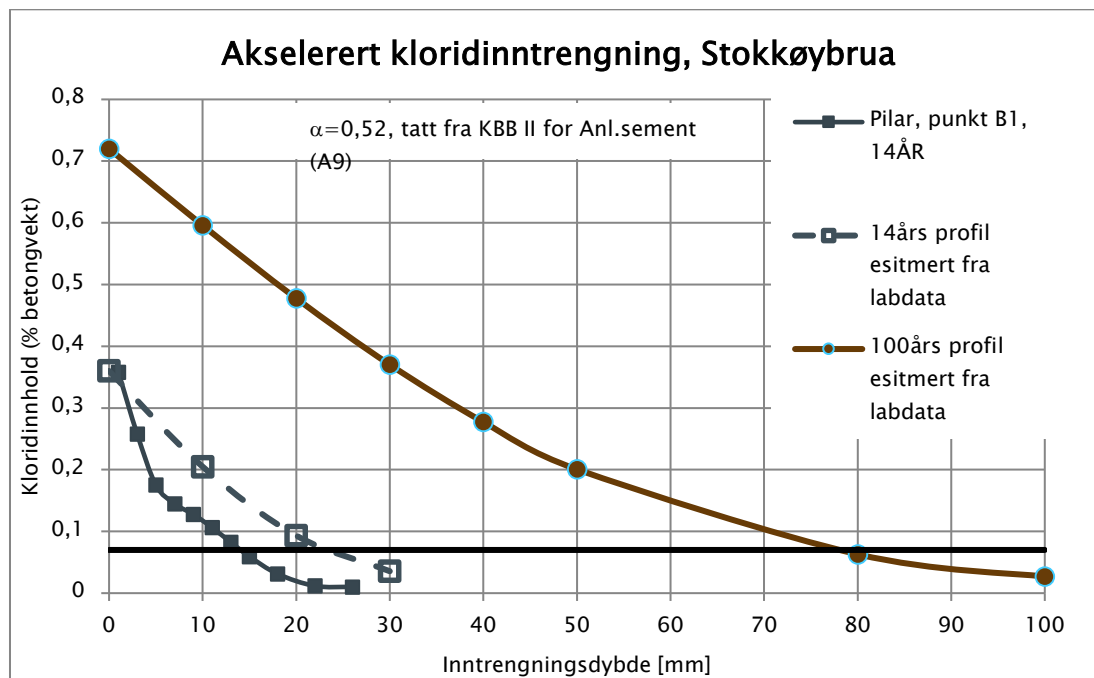
### 5.3.2 Akselerert kloridinntrengning

Det ble benyttet prøvestykker fra alle feltene til denne prøvingen. Resultatene er oppsummert i Tabell 5-14.

Tabell 5-14: Resultater fra akselerert kloridinntrengning.

Prøveserie	Overflatekonsentrasjon ( $C_s$ %)	Diffusjonskoeffisient ( $D$ , $\text{m}^2/\text{s}$ )
A	0,72	$3,87 \cdot 10^{-12}$
B	0,86	$4,65 \cdot 10^{-12}$
C	0,89	$4,09 \cdot 10^{-12}$
D	0,76	$4,72 \cdot 10^{-12}$
Snitt	0,80	$4,38 \cdot 10^{-12}$

Verdiene ble videre benyttet til beregning av kloridinntrengning. Beregnet kloridinntrengning ved doblet overflatekonsentrasjon av klorider etter 100 år, viser kritisk kloridnivå ved rundt 80 mm inntrengning.

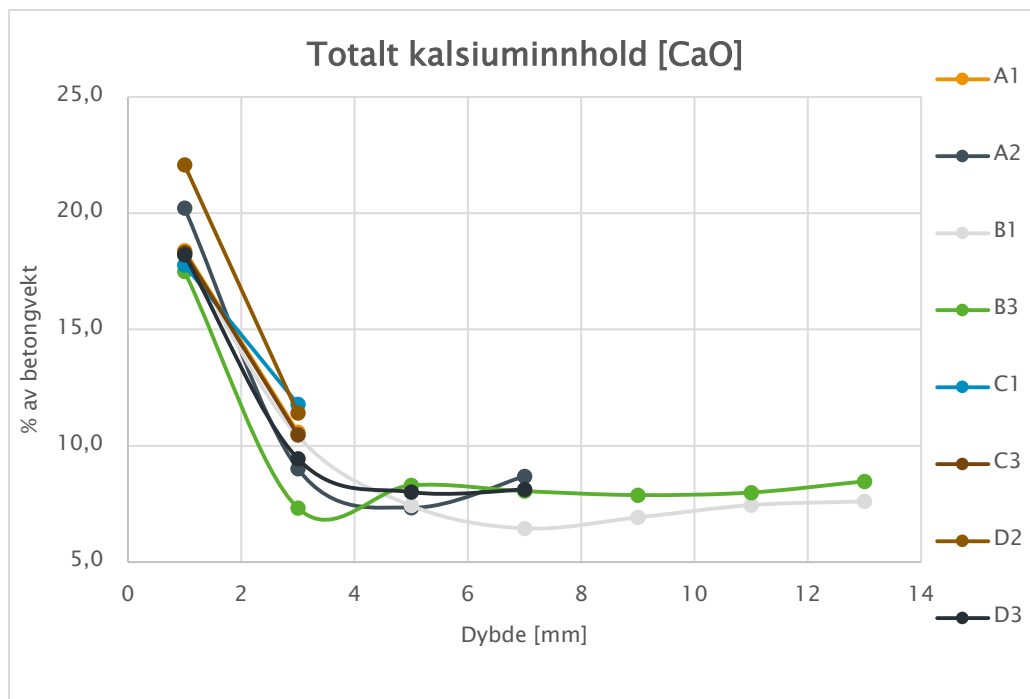


Figur 5-21: Beregnet fremtidig kloridinntrengning basert på akselerert prøving i laboratoriet.

### 5.3.3 Kalsiuminnhold

Analyse av kalsiuminnhold ble utført med flammefotometer, og ikke ved titrering som først avtalt, på grunn av problem med analyseutstyret. Dette kan ha hatt en betydning for bestemmelse av faktisk innhold av kalsium, mens for kurveutjevningen får det en mindre betydning siden målepunktene som sammenstilles er målt med samme utstyr.

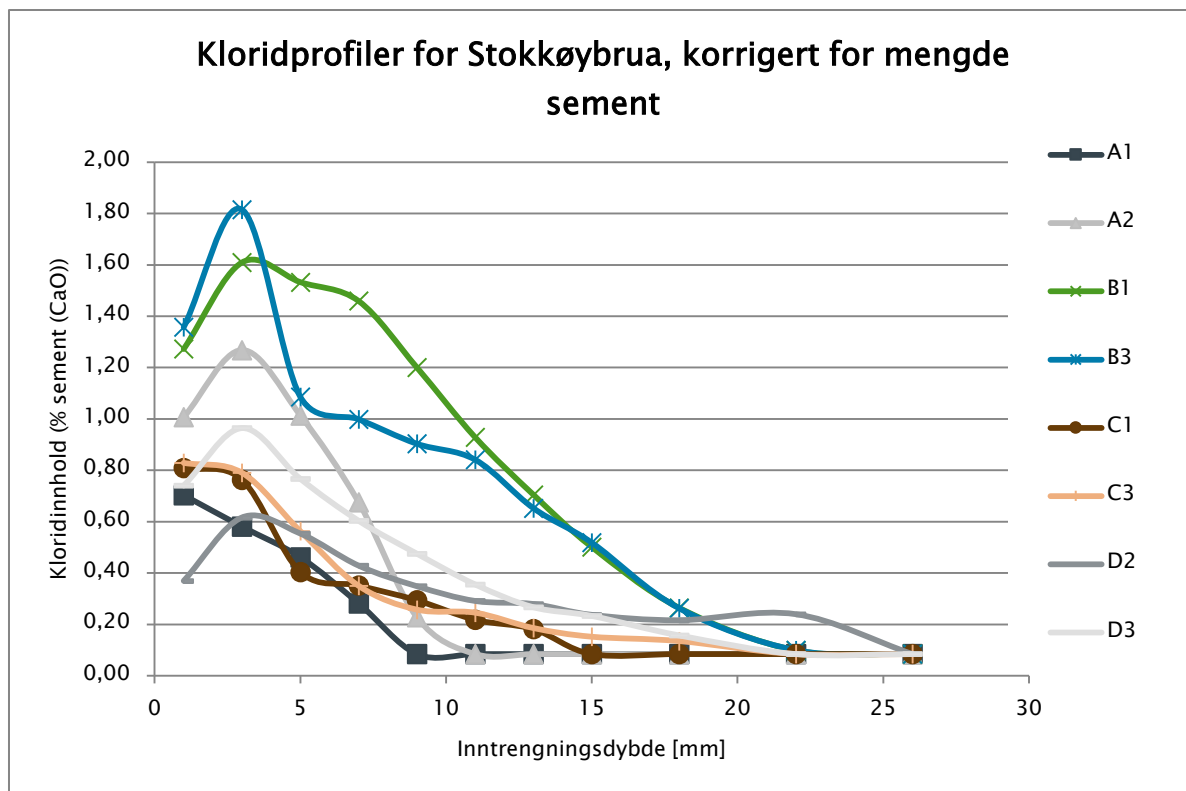




Figur 5-22: Målt kalsiuminnhold i betongen i avstand fra overflaten.

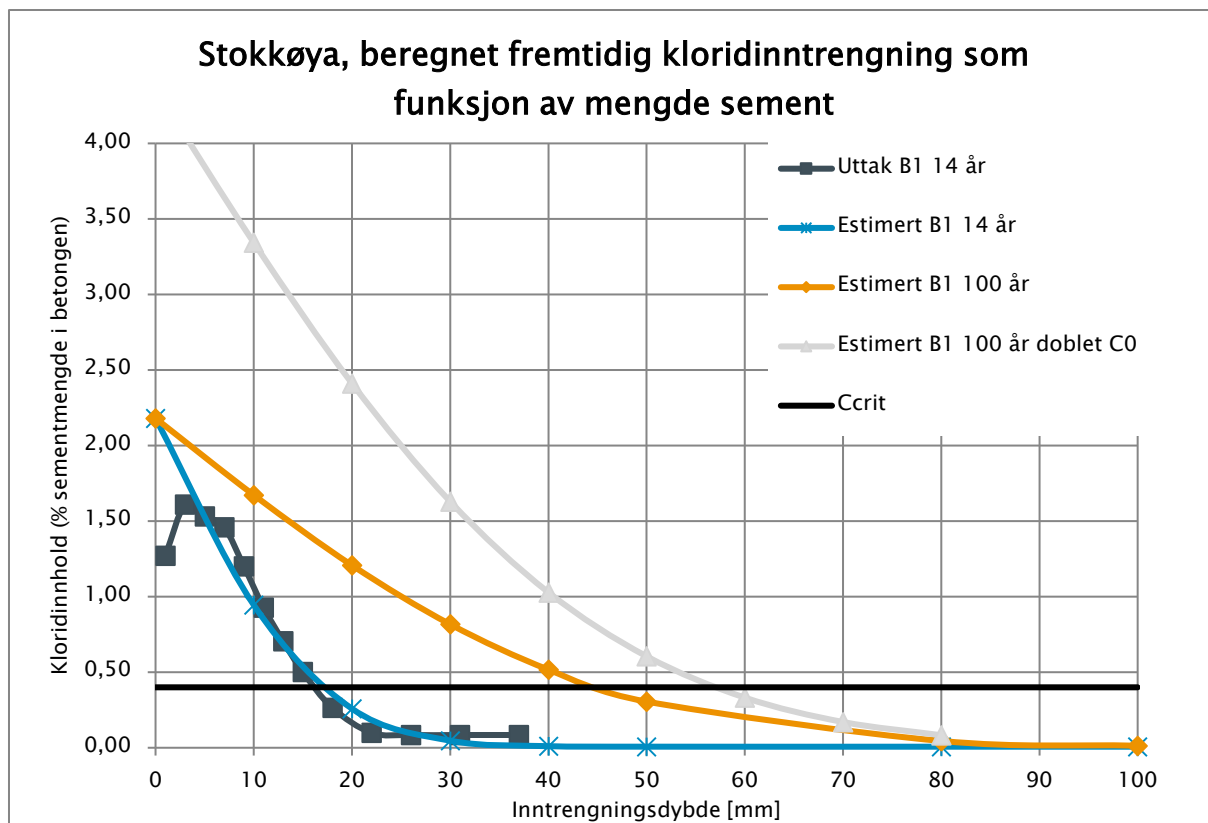
Det målte innholdet av kalsium i de ytterste 2 millimeterne er i snitt på hele 18,4 %. I sjiktene innenfor faller denne snittverdien til 8,6 %. Som i målingene fra både Bakkasundet bru og Solavågen fergekai er det også her en stor forskjell på andelen kalsium i yttersjiktet og innover i konstruksjonen.

For å beregne andelen sement i betongen/sjiktene, ble det benyttet informasjon fra sementleverandør. Siden det i alle prosjektene var benyttet Norcem anleggssement, skal innholdet av CaO for denne være på rundt 65%. Prosentandel sement i betongen kan da anslås til ca. 11,9 %. Med en antatt egenvekt til betongen på 2400 kg/m<sup>3</sup>, tilsvarer dette 284 kg sement per kubikk betong.



Figur 5-23: Målt kloridinntrengning plottet som kloridinnhold som prosent av beregnet sementmengde.

I Figur 5-24 er kloridinnholdet som andel av bindemiddelet mot inntrengningsdybden vist, sammen med beregnede kloridprofiler for ulike eksponeringstider. Etter 100 år vil kloridinnhold over antatt kritisk nivå være på 44 mm dybde, mens dersom overflatekonsentrasjonen av klorider dobles, vil samme nivå befinne seg ved rundt 58 mm dybde.



Figur 5-24: Beregnet fremtidig kloridinntrengning i område B1, korrigert for mengde sement, estimert fra målt kalsiuminnhold.

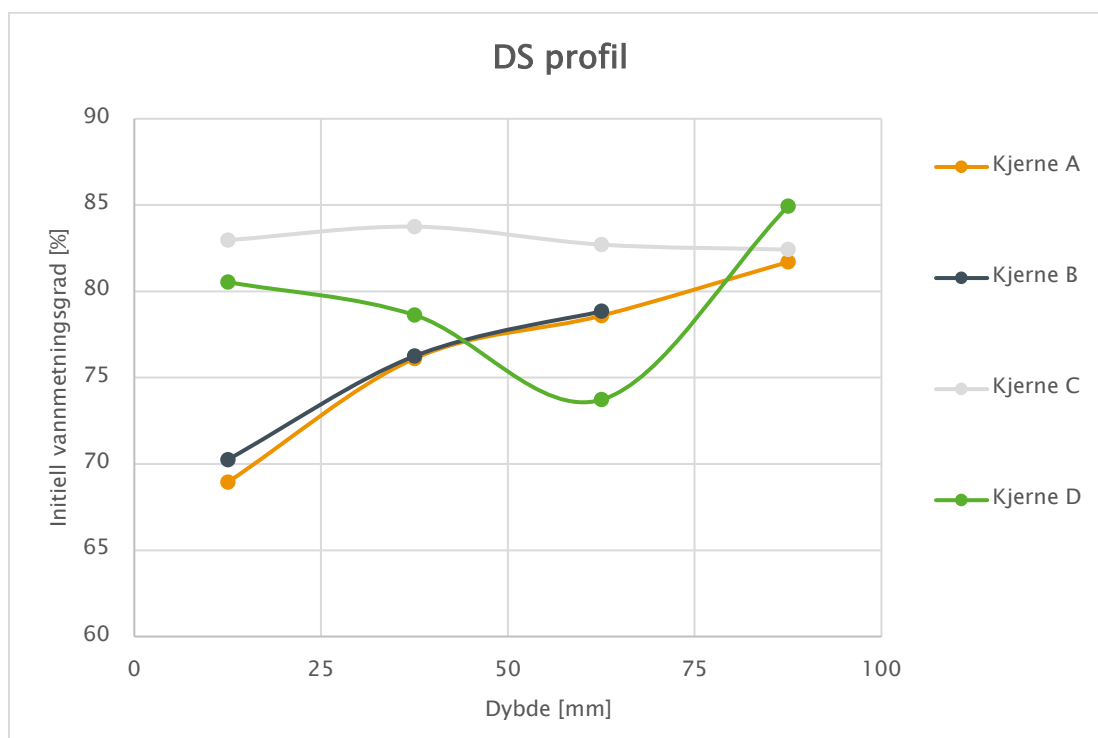
### 5.3.4 Spesifikk elektrisk motstand

I forbindelse med måling av kapillær absorpsjon, ble det målt elektrisk motstand på tillagede prøvestykker. Disse hadde en høyde på 50 mm. Resultatene er oppsummert i Tabell 5-15.

Tabell 5-15: Beregnede verdier av resistivitet i forbindelse med måling av kapillær absorpsjon.

	Initiell	Vannmettet
Serie	Ohm x m	Ohm x m
A	641 ± 42	413 ± 39
B	707	317
C	737 ± 104	472 ± 65
D	675 ± 41	430 ± 23

### 5.3.5 Vanmetningsgrad



Figur 5-25: Vanmetningsgraden (DS = Degree of saturation) i betongen målt fra overflaten i 25 mm sjikt innover. A og B i le sone, C og D i lo sone.

Det er en stor forskjell i fuktforholdene i ytterste sjikt, der prøvene fra kjerne A og B har de laveste verdiene (rundt 70%), mens for kjerne C og D er vanmetningsgraden like over 80%. Dette kan ha en sammenheng med LO/LE forhold på søylen. A er vegg mot nord, mens B er tatt fra søylevegg mot øst. C er fra vegg mot vest og D fra søylevegg mot sør. LE sonen er i retning øst/nord-øst, mens LO er her i retning vest/sør-vest.

### 5.3.6 Porøsitet

Tabell 5-16: Målte verdier av densitet og porøsitet.

Prøveserie	Tørrdensitet	Faststoffdensitet	Sug porøsitet	Makro porøsitet	Total porøsitet
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	Vol %	Vol %	Vol %
A	2331	2717	12,3	2,0	14,2
B	2343	2718	12,0	1,8	13,8
C	2287	2711	13,9	1,8	15,7
D	2384	2724	11,2	1,2	12,5

For alle prøveseriene er makroporøsiteten lavere enn det som ville vært normalt når betongen er luftinnført.

## 6 Tidligere erfaringer

For å kunne si noe om hvordan levetiden til betongbruer har utviklet seg, er det viktig å se tilbake på vesentlige krav som ble stilt i standardverk og Prosesskode 2. En oppsummering av dette ble presentert av Reidar Kompen i 2014 på fagdag for etatsprogrammet Varige konstruksjoner, se Figur 6-1. I et bestandighetsperspektiv er det flere viktige parametere hvor kravene har blitt endret gjennom tiden. I tillegg til både endringer i betongkvalitet og overdekning har også andel tilsatte klorider vært en faktor, hvor tidligere praksis tillot både sjøvann, grus fra sjø og klorider i form av akselerator.

Dette prosjektet har fokusert på endringene som kom i 1989. I perioden fra 1988 til 1997 ble det stilt krav til betong i klasse C45 MA, hvor blant annet introduksjon av silikastøv var et av tiltakene som skulle øke bestandigheten. Samtidig med dette kravet, ble også krav til overdekning til konstruktiv armering økt til 40 mm. I 1997 kom en ytterligere skjerping, hvor betongklassene SV-30 og SV-40 ble introdusert. I denne tiden ble krav til overdekning ytterligere skjerpet og kravet økt til 60 mm.

### Viktige Norske Standarder. Hvor lenge er det siden de ble utgitt ?

	100	88	75	52	41	28	25	16	11	6	I dag
	1914	1926	1939	1963	1973	1986	1989	1998	2003	2008	2014
CaCl <sub>2</sub> %				< 2	< 1	?			0,4		
Od.		50	40	30-50	25		40	40		60	

### Statens vegvesen fulgte Norske Standarder med minimale avvik helt inntil 1988

Prosesskode-2	1981	1988	1997	2007	2014
CaCl <sub>2</sub> %	Spes till.	Spes till.	0,1	0,1	
Betongkvalitet	B350/C35	C45 MA (SVV)	C55/B45 SV-40, SV-30		
Overdekning	30 mm	40 mm	55, 75, 120 mm	1994/1997	

Figur 6-1: Oversikt over krav stilt i standarder og Prosesskode 2.

Et dokument som også hadde stor betydning for kvaliteten i byggeprosessen var Intern rapport nr. 1731, fra 1994. Denne publikasjonen gikk i dybden med forklaring og tolkning av toleransene ved overdekning. Variasjonen som naturlig fulgte tidligere byggeskikk, kunne med denne veiledningen reduseres i stor grad.

Av tidligere prosjekter hvor spesifikasjonene i tidsrommet før 1988 ble benyttet, finnes det enkelte hvor det har blitt utført større uttak for innsamling av data til vurdering av tilstand. Prosjektet «OFU Gimsøystraumen bru» (offentlig forsknings- og utviklingskontrakt) er et særdeles godt dokumentert prosjekt. Gimsøystraumen bru ble trafikkert i 1981. Betongen som er benyttet skal være typisk for betongkvaliteten på den tiden, noe som skal tilsvare B350/C35. Fra Intern rapport 2196, «Gimsøystraumen bru – Spesialinspeksjon 1992 – kloridprofiler» presenteres både kloridprofiler og diffusjonskoeffisienter fra da brua var 11 år. Et lite utdrag er vist i Tabell 6-1. Ved en senere spesialinspeksjon ble overdekningen i overbygningen målt til 29 mm, i pilar i akse 7, 45 mm og i fundament i samme akse, 59 mm. Alle verdier er gjennomsnittsmålinger.

*Tabell 6-1: Overflatekonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for pilarene 2-5 på Gimsøystraumen bru.*

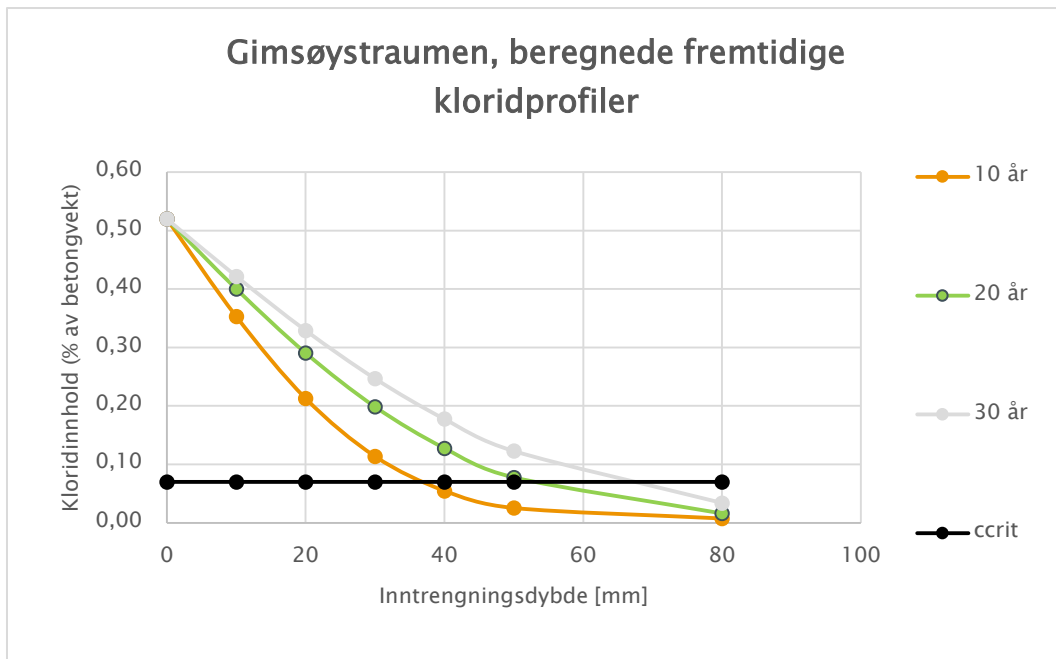
Side		Nord (le)	Vest	Sør (lo)	Øst
Antall prøver		32	48	32	48
Overflatekonsentrasjon, C <sub>0</sub> , % av betongvekt	Middel	0,52	0,58	0,26	0,59
	Std.avvik	0,27	0,37	0,22	0,30
	Var.koeffisient	52	64	85	51
Diffusjonskoeffisient, D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	Middel	0,9	0,9	0,9	0,9
	Std.avvik	0,38	0,44	0,42	0,42
	Var.koeffisient	40	50	46	45

Dersom verdiene for Gimsøystraumen i Tabell 6-1 benyttes til å lage fremtidige kloridprofiler, vil kritisk kloridinnhold ha kommet 50 mm inn i konstruksjonen etter 20 år, se Figur 6-2.

I samme rapport er det gitt en oversikt for andre tilsvarende konstruksjoner hvor det har blitt utført spesialinspeksjoner. Resultatene er gjengitt i Tabell 6-2.

*Tabell 6-2: Midlere overflatekonsentrasjon og diffusjonskoeffisient for kystbruer.*

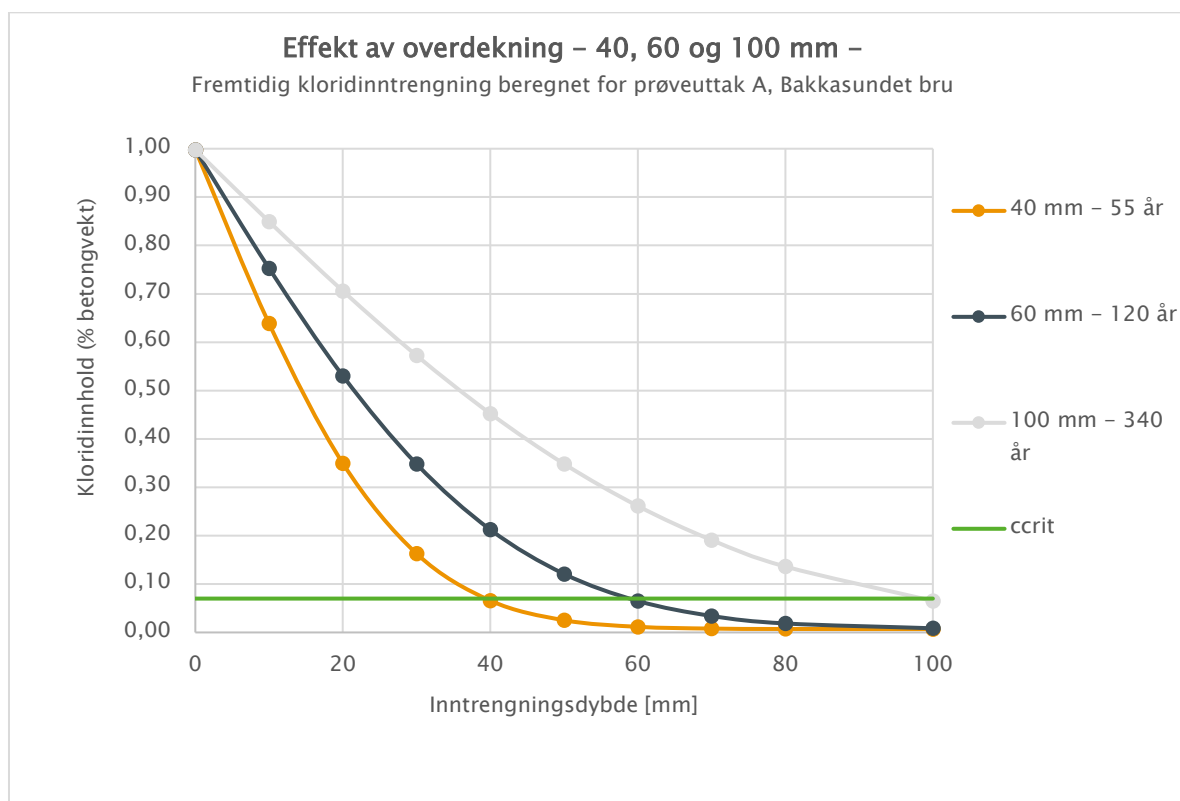
Konstruksjon	Alder	Antall verdier	C <sub>0</sub> , % av betongvekt		D, 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	
			Middel	Std.avvik	Middel	Std.avvik
Hadsel bru	13	101	0,60	0,22	2,85	1,50
Stokksund Bru (1992)	16	68	0,37	0,20	1,46	0,95
Stokksund Bru (1993)	17	45	0,19	0,16	0,97	0,67
Ulvesundet Bru	19	42	0,14	0,07	0,86	0,56
Nore Straumsundet Bru	16	37	0,24	0,19	0,79	0,56
Søre Straumsundet Bru	20	26	0,19	0,13	0,55	0,39
Herøy Bru	16	63	0,26	0,15	1,22	0,79
Torsetsund Bru	16	28	0,31	0,11	2,19	1,34



Figur 6-2: Beregnede kloridprofiler for Gimsøystraumen.

## 7 Diskusjon – hovedfunn

Endringene av overdekningskrav får stor betydning ved beregning av levetid. Til dette er det minimumsoverdekningen som benyttes. I Figur 7-1 er det tatt utgangspunkt i målingene fra uttak A for Bakkasundet bru og vist hvordan effekten av overdekning vil spille inn. Kravene til overdekning har blitt endret fra 40 mm på 80 tallet, til 60 mm etter 1996, mens det per i dag er 100 mm overdekning som er gjeldende krav. Nivå for kritisk kloridkonsentrasjon vil etter 55 år ha kommet 40 mm inn i betongen. Etter 120 år vil nivå for kritisk kloridkonsentrasjon passere 60 mm, mens det med 100 mm minimumsoverdekning vil ta 340 år før den kritiske kloridkonsentrasjonen når inn til nivå med armeringen. Det er viktig å presisere at beregningene er ut fra ett prøveområde fra Bakkasundet bru og ikke kan overføres direkte til andre konstruksjoner og betonger.



Figur 7-1: Effekt av krav til minimumsoverdekning, 40 mm, 60 mm og 100 mm, der fremtidig kloridinntrengning er beregnet basert på data fra prøveuttakene fra felt A for Bakkasundet bru.

Endringene av krav til betongsammensetning har også hatt en viktig rolle ved beregning av levetid. En kan sammenligne Gimsøystraumen bru (Tabell 6-1) mot Bakkasundet bru, gitt en minimumsoverdekning på 60 mm. Med betongen fra Gimsøystraumen ville nivået for kritisk kloridinntrengning nå frem til armeringen etter 26 år. Tilsvarende vil det for Bakkasundet bru (prøveuttak A), ta hele 120 år før samme tilstand oppnås. Når det gjelder dagens brubetonger (SV-standard), har vi foreløpig ingen felldata av tilstrekkelig alder for å kunne



utføre tilsvarende levetidsberegninger. Derfor må en tilsvarende beregning baseres på verdier fra akselererte forsøk i laboratoriet. I forsøkene med akselerert prøving på betongen fra Bakkasundet bru, ble det funnet en diffusjonskoeffisient ( $D_0$ ) på  $2,86 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Fra Bjøntegaard (2015), ble det ved akselerert prøving funnet en diffusjonskoeffisient ( $D_0$ ) på  $1,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , for en betong tilsvarende dagens SV-standard. Som ved tidligere beregninger i 5.1.2 akselerert kloridinntrengning for Bakkasundet bru, vil nivå for kritisk kloridinntrengning komme 60 mm inn etter 85 år. For SV-normal vil samme nivå være oppnådd etter 180 år.

Tilstanden for Bakkasundet bru, må karakteriseres som meget god. Av beregningene kom det frem en forventet kloridinntrengning av kritisk kloridinnhold inn til 55 mm etter 100 år, i området hvor det ble påvist størst kloridinntrengning etter 14 år. I samme område var det mellom 70 – 80 mm inn til armering. Prøving med akselerert kloridinntrengning viste 70 mm beregnet inntrengning etter 100 år. Avviket mellom beregningene fra felteksponeringen og beregningene fra akselerert prøving kommer av eksponeringen. Ved den akselererte prøvingen er prøvestykkene konstant neddykket og eksponert for en vesentlig høyere kloridkonsentrasjon enn hva som er i sjøvann. Alle prøver hentet i felt har blitt utsatt for ulike kloridbelastninger. Med et større prøveuttak ville vi kunne finne prøver som hadde vært utsatt for større belastninger enn de som ble hentet inn og som da også ville hatt en forventet kloridinntrengning mer lik fra den akselererte prøvingen. Dette er en av årsakene til at en må legge inn en større sikkerhetsfaktor enn hva som kommer ut av de enkelte resultatene fra analysene.

Prøveuttakene fra Bakkasundet bru, viser at den største påkjenningen av klorider er å finne i le-siden ved pilarene. En videre oppfølging av kloridinntrengning, bør i all hovedsak ha størst fokus på et bredere prøveuttak i disse områdene. En kartlegging av armerings-overdekning og kloridprofiler fra disse områdene, vil gi en enda større sikkerhet i forhold til når det kan forventes korrosjon på armeringen.

Tilstanden for Solavågen fergekai, kan også karakteriseres som god. Selv om det ble målt høye kloridverdier etter kun 7 års levetid, viste beregningene likevel at det vil ta 50 år før det kritiske kloridnivået er vel 60 mm inne i konstruksjonen. Det var i tillegg en god korrelasjon mellom verdiene fra felt og den akselererte prøvingen. Armerings-overdekningen på undersiden av fergekaia hvor prøveuttakene ble foretatt var på rundt 70 mm.

Kloridbelastningen på Solavågen fergekai er klart størst på undersiden av dekket. Fremtidig oppfølging av kloridinntrengningen, bør være rettet inn på dette området. En større kartlegging av både overdekning samt kloridmålinger, vil kunne gi et enda bedre bilde på den forventede levetiden og når en kan forvente begynnende armeringskorrosjon.

Tilstanden for Stokkøya bru er den som peker seg ut mest i positiv retning. Selv med en dobling av overflatekonsentrasjonen, vil den kritiske kloridkonsentrasjonen kun ha kommet like over 40 mm inn i konstruksjonen etter 100 år! Noe av dette kan forklares med en høyere betongkvalitet i C55-SV30. Likevel er det en større forskjell tatt i betraktning resultatene fra akselerert prøving. Resultatene fra denne prøvingen tilsier en kloridinntrengning på 80 mm. Armeringsoverdekningen på Stokkøya bru var mellom 75 – 85 mm. Det ble montert «snudde kjerner» på Stokkøybrua. Disse er planlagt å hentes inn etter to år, selv om det blir etter

avslutningen på FoU-programmet. Resultatet fra disse kjernene vil gi verdifull informasjon i forhold til de avvikende resultatene.

En mulig forklaring på dette resultatet kan være at betongen har blitt utsatt for en overflatebehandling. Siden det ikke var mulig å se om dette var tilfelle, må dette eventuelt ha vært en type hydrofoberende impregnering, som motvirker fuktighet å trenge inn i konstruksjonen. Tidligere forsøk med denne type overflatebehandling viser ofte en klar reduksjon i kloridinntrengning de første årene etter behandlingen. Det har ikke vært mulig å få noen dokumentasjon på om det har eller ikke har blitt benyttet noen overflatebehandling på broen.

Analysene av kalsiuminnhold førte til mindre justeringer av kloridprofilene, når disse ble uttrykket som kloridinnhold som funksjon av bindemiddel. For Bakkasundet bru viste resultatene lik fremtidig inntrengningsdybde, mens for både Solavågen fergekai og Stokkøybrua viste beregningene rundt 10 mm høyere kloridinntrengning når kurvene ble justert i forhold til mengde bindemiddel. Dette er et interessant funn, som vil være verdt å vurdere videre når en skal utføre tilsvarende levetidsberegninger.

En faktor som også vil spille inn ved levetidsbetraktninger er at betongen i søyler og kasse vil være kortere tid hvor denne er eksponert for klorider, sammenlignet med betong som er neddykket. Det vil si at en kan regne med en lengre levetid for disse, sammenlignet med en neddykket betong.

## 8 Konklusjoner

Resultatene fra denne undersøkelsen antyder at bestandigheten for betongen spesifisert som «SV 30» og «SV 40» er god sammenlignet med tidligere betonger av type B350/C35.

Det er i rapporten antydning en dobling av levetid, der minimumsoverdekningen ble økt fra 40 mm til 60 mm.

Tilsvarende er det vist en markant økning i levetid i sammenligning av betongkvalitet mellom bruene Gimsøystraumen og Bakkasundet. Beregningene viste nær en femdobling av levetiden.

For Bakkasundet bru antyder beregningene en begynnende armeringskorrosjon etter rundt 100 år. Sannsynlig vis vil dette da gjelde for le-sonene på pilarene.

For Solavågen fergekai antyder beregningene at det vil gå mer enn 50 år før armeringskorrosjonen vil inntreffe. Sannsynlig vis vil dette først gjelde for undersiden av fergekaia.

Stokkøybrua viser minst kloridinntrengning og dermed lengst forventet levetid, sett ut fra tidspunkt for initiering av armeringskorrosjon.

Resultatene fra de ulike prøveuttakene antyder en forventet levetid som prosjektert. Da antall prøveuttak i prosjektet var begrenset, anbefales det å legge inn større sikkerhet i form av høyere betongkvalitet og økt overdekning, for å ta høyde for variasjoner som har betydning for levetiden.

## 9 Referanser

Helland, Steinar, The «Selmer» chloride ingress model, kap 2.3, Prediction models for chloride ingress and corrosion initiation in concrete structures, Nilsson, Lars-Olof, Publikation P-01:6, Chalmers Tekniska Högskola, 2001

Ueli Angst, Bernhard Elsner, Claus K. Larsen, Øystein Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete – A review, Cement and Concrete Research, 2009

Kompen, Reidar, Betongregelverk og betongbruer i historisk perspektiv, Fagdag  
Etatsprogrammet Varige konstruksjoner, 12 februar 2014, Felix konferansesenter, Oslo

Skjølvold, Ola, Intern rapport nr. 2196, Gimsøystraumen Bru, Spesialinspeksjon 1992 – kloridprofiler, Vegteknisk avdeling, april 2001

Bjøntegaard, Øyvind, Møllenberg betongtunnel – FoU bestandighet: Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012–2015, Vegdirektoratet, oktober 2015

Skjølvold, Ola, Kloriddiffusjon i betong. Vurdering av aldringseffekten ved felteksponeering, COIN, Project report 11, SINTEF, 2011

## Vedlegg 1 – Rapport fra NBTL

## Vedlegg 2 – Rapport fra SINTEF Byggforsk

## Vedlegg 3 – Rapport fra Mannvit

## Vedlegg 4 – Beskrivelse av laboratorieoppdrag

### Tillaging av prøvestykker fra kjerner

Det skulle tillages prøvestykker for bestemmelse av klorid-profil, fukt-profil, spesifikk elektrisk motstand, porøsitet/kapillær absorpsjon og neddykket kloriddiffusjon (bulkdifusjon). Før tillaging skulle alle kjerner dokumenteres med foto.

Følgende mal skulle benyttes ved tillaging av prøvestykkene:

<b>Utvendig overflate</b>	<b>Utvendig overflate</b>
<u>0-50mm</u> Kloridprofil	<u>0-25mm</u>
<u>50-100mm</u> Resistivitet DS, Porøsitet, kapillær abs.	<u>25-50mm</u>
<u>100-150mm</u> Resistivitet Bulkdifusjon	<u>50-75mm</u>
<u>150-200mm</u> Resistivitet Bulkdifusjon	<u>75-100mm</u>
	<u>100-150mm</u> Resistivitet Bulkdifusjon
	<u>150-200mm</u> Resistivitet Bulkdifusjon

} DS-profil  
m/porøsitet

**Kjernetype 1**                      **Kjernetype 2**

Figur 0-1: Mal for tillaging av prøvestykker

Der det var armering i kjernen skulle denne eventuelt inngå i et prøvestykke for porøsitet, slik at prøvestykker for neddykket kloriddifusjon og måling av spesifikk elektrisk motstand var uten armering. Armeringen skulle frigjøres fra betongen, og armeringens overflate (med kammer) samt armeringens avtrykk i betongen skulle dokumenteres med foto. Der det var mulig skulle den resterende betongen benyttes til porøsitetsbestemmelse (uten å måle resistivitet). I forhold til ønsket prøving, kunne det se ut til å være et overskudd av prøvebiter for måling av resistivitet og bulkdifusjon. Dette var helt avhengig av eventuelle prøver som inneholder armeringsjern.



## Kloridanalyser

For hver av prøvene skulle det fresas ut 13 sjikt, hvor de 8 ytterste sjikt var 2 mm, 3 sjikt på 4 mm og de 2 innerste sjiktene var 6 mm. Prøvene skulle analyseres for totalt kloridinnhold. Det skulle angis hvilken metode og hvilket utstyr som skulle benyttes.

<u>Avstand fra overflate:</u>	<u>Tykkelse på sjikt:</u>
0-2 mm	2 mm
2-4 mm	2 mm
4-6 mm	2 mm
6-8 mm	2 mm
8-10 mm	2 mm
10-12 mm	2 mm
12-14 mm	2 mm
14-16 mm	2 mm
16-20 mm	4 mm
20-24 mm	4 mm
24-28 mm	4 mm
28-34 mm	6 mm
34-40 mm	6 mm

## Analyse av kalsiuminnhold

Til to av objektene ble kalsiuminnholdet i betongen analysert. Fra hvert freste sjikt (til kloridanalyse) som inneholdt 0,07 % klorider av betongvekt eller mer, skulle bindemiddelmengden bestemmes ved Ca-analyse. Analysen kunne foretas i samme løsning som etter avsluttet kloridanalyse forutsatt at det da ble benyttet potensiometrisk titrering med  $\text{AgNO}_3$  som titrand. Metoden som da skulle følges var «Method 1» gitt i NORDTEST Project No. 1581-02 (SP report 2003:07, Tang Luping).

## Fuktinnhold i betong

Fuktinnhold i betongen, DS profil (degree of saturation) kan fortelle om klimaet konstruksjonen befinner seg i og om betongkvaliteten. Følgende fremgangsmåte ble benyttet ved disse undersøkelsene.

Det ble utarbeidet en profil over vannmetning fra hver av prøveseriene. Denne prøvingen ble tatt av kjerne som ikke ble benyttet til bestemmelse av kloridprofil. Følgende prosedyre ble fulgt:

- Tillagingen av prøveskiver ble utført ved at skivene ble splittet av, på en slik måte at skivene ikke ble tilført vann og slik at de mistet minimalt med fuktighet:
  - o ta kjernen ut av plastposen, men la plastfolien være på
  - o kappe tørt et snitt for rissanvisning rundt hele kjernens omkrets slik at det ved splitting kan dannes en skive med tykkelse 20–25mm
  - o splitt skiven umiddelbart etter snitting og deretter umiddelbar veiing i luft (vekt  $g_0$ ) eller umiddelbar innpakning i plast for senere veiing
  - o bruddflaten på den resterende kjernebiten skal pakkes i plastfolie umiddelbart etter splitting av skiven
  - o prosedyren gjentas til en har fire skiver med tykkelse 20–25 mm
  - o Det er sannsynlig at skivene ikke blir regulære, dvs tykkelsen vil variere og noen skiver vil kanskje ikke forbli hele, men det er viktig at alle biter benyttes som egne prøvestykker og veies separat. Merking av prøvebiter er derfor viktig, slik at en kan identifisere hvilke sjikt eller avstand fra overflaten bitene tilhører. Fotodokumentasjon ønskes av alle prøvebiter.
  - o Det er viktig at alle løse biter fjernes før den første veiingen ( $g_0$ ), for eksempel med en stiv børste el.l.
- 3 uker helt neddykket i vann, veiing i luft (vekt  $g_2$ ), og under vann (vekt  $g_3$ ). Dette forutsetter at prøven er opphengt i vekta.
- 2 døgn neddykket i vann i trykktank ved 50 atm. trykk, veiing i luft (vekt  $g_4$ ).
- 7 døgn tørking i ventilert ovn ved 105–110 °C, veiing i luft etter avkjøling i minimum 2 timer i eksikator (vekt  $g_1$ )
- Beregning av alle verdier som angitt under *Beregninger* i Håndbok 014, prosess 14.637, samt DS og prøvestykkets in-situ fuktinnhold etter følgende formler:
  - o  $DS = \frac{g_0 - g_1}{g_2 - g_1} (\%)$                       in-situ fuktinnhold:  $w_0 = \frac{g_0 - g_1}{g_1} (\%)$

Ved veiing skulle følgende prosedyre følges for hver skive:

- Det skulle benyttes vekt med minimum 0,01 g nøyaktighet
- Skiven ble tørket av med fuktig klut og veid (Unntatt etter ovnstørking)

## Akselerert kloridinntrengning – neddykket kloriddiffusjon og spesifikk elektrisk motstand

Prøvingen ble utført i henhold til Håndbok 014, prosess 14.651, og omfattet følgende deler utført i sekvens i henhold til beskrivelse i nevnte prosess med tillegg angitt i blått:

- Bestemmelse av betongens spesifikk elektrisk motstand på hvert prøvestykke før neddykking i mettet  $\text{Ca(OH)}_2$  (metode og utstyr skal angis)
- Preparering av prøvestykker
- Neddykking, 35 – 40 døgn i 16,5% NaCl løsning
- Fresing av betongstøv
- Kloridanalyser (det skal angis hvilken metode og hvilket utstyr som er tenkt benyttet)
- Beregning av kloriddiffusjonskoeffisienter, D, og overflatekonsentrasjon,  $C_s$
- Initielt kloridnivå, dvs «nullnivået» skal også bestemmes i henhold til beskrivelse. Fresing av støv kan benyttes som alternativ til nedknusing av betong

Bestemmelse av betongens resistivitet skulle utføres ved romtemperatur. Temperaturen i rommet der målingene utføres skulle måles og dokumenteres ved hver enkelt måling av resistivitet.

Eksponeringskarene skulle være helt fylt med NaCl-løsning og tett lukket med lokk. Forholdet mellom eksponert betongareal i  $\text{cm}^2$  og volum av eksponeringsvæsken i  $\text{dm}^3$  skulle være mellom 20 og 80. Eksponeringstid skulle være 35 døgn for alle serier.

Etter endt eksponering skulle det freses totalt 10 sjikt per prøvestykke, i henhold til følgende oppsett:

<u>Avstand fra eksp. overflate:</u>	<u>Tykkelse på sjikt:</u>
0-2 mm	2 mm
2-4 mm	2 mm
4-6 mm	2 mm
6-8 mm	2 mm
8-10 mm	2 mm
10-12 mm	2 mm
12-16 mm	4 mm
16-20 mm	4 mm
20-25 mm	5 mm
25-30 mm	5 mm

## Kapillær absorpsjon, porøsitet og spesifikk elektrisk motstand

Betongens resistivitet og porøsitet etter prinsipper gitt i Håndbok 014, prosess 14.637 (*full prosedyre*), skulle bestemmes med følgende prosedyre:

- Bestemmelse av betongens resistivitet på hvert store prøvestykke før tillaging av skiver (metode og utstyr skal angis)
- Tillaging av skiver med tykkelse  $20 \pm 1$  mm, der tykkelsen av hver enkelt skive måles med skyvelær
- Bestemmelse av betongens resistivitet på hver enkelt skive
- Maling av sideflatene med epoxy
- Tørking i ventilert varmeskap ved 105–110 °C inntil vekttapet er mindre enn 0,01 % pr. time (eventuelt 7 døgn dersom konstant tørketid er mer hensiktsmessig), og deretter minimum 2 timer avkjøling i luft ved romtemperatur, tildekket med plastfolie, veiing (vekt g1)
- 4 døgn suging fra vannspeil (hele sugeflaten skal være i kontakt med vann uten at vannspeilet står mer enn 1–2 mm opp på sideflaten, kassen skal være tildekket).  
Veiing etter:
  - o 10 og 30 minutter
  - o 1, 2, 3, 4 og 6 timer
  - o 1, 2, 3 og 4 døgn
- 3 døgn helt neddykket i vann, veiing i luft (vekt g2), og under vann (vekt g3). Dette forutsetter at prøven er opphengt i vekta
- 2 døgn neddykket i vann i trykktank ved 50 atm. trykk, veiing i luft (vekt g4)
- Beregning av alle verdier som angitt under *Beregninger* i Håndbok 014, prosess 14.637

Ved veiing skulle følgende prosedyre følges for hver skive:

- Det skulle benyttes vekt med 0,01 g nøyaktighet
- Skiven ble tørket av med fuktig klut og veid (Unntatt etter ovnstørking)

Bestemmelse av betongens resistivitet skulle utføres ved romtemperatur. Temperaturen i rommet der målingene ble utført skulle måles og dokumenteres ved hver enkelt måling av resistivitet.



Statens vegvesen  
Vegdirektoratet  
Publikasjonsekspedisjonen  
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO  
Tlf: (+47 915) 02030  
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

**Trygt fram sammen**