



Kystbroprojektet



Rapport nr. 198



Vejdirektoratet
Niels Juels Gade 13
Postboks 1569
1020 København K
Tlf.: 33 93 33 38
Fax.: 33 15 63 35

Notat: Kystbroprojektet
Rapport nr. 198

Dato: 2000

Forfatter: Birit Buhr, COWI; Finn
Jensen, Asger Knudsen,
Rambøll; Ruth Sørensen,
COWI; Erik Stoltzner,
Vejdirektoratet.

Foto: Vejdirektoratet, COWI og
RAMBØLL

Montage: Fotografier på forside viser (fra
venstre mod højre)
Svendborgsundbroen,
Kalvebodløbberoen,
Vilsundbroen og
Vejlefjordbroen

Oplag: 100

Tryk: Nyhavns Lyntryk Aps.

Udgiver: Vejdirektoratet
Niels Juels Gade 13
Postboks 1569
1020 København K

Copyright: Vejdirektoratet

ISSN: 0909-4288

ISBN: 87-7923-026-1



Kystbroprosjektet

Rapport nr. 198

IRRD information

Title: Kystbroprojektet

English: The Coastal Bridge Project

Author: Erik Stoltzner, Birit Buhr, Finn Jensen, Asger Knudsen, Ruth Sørensen

Subject

Classification: Design of Bridges and Retaining Walls (24)

Key Words:	Bridge	3455
	Bridge Pier	3434
	Engineering Structure	3355
	Maintenance	3847
	Corrosion	4540
	Damage	1614
	Chloride	7314
	Test	6255
	Test method	6288
	Denmark	8028

Abstract Marine structures involve substantial investments for construction as well as repairs during their service life. Danish marine bridge structures were built in the period 1936-1985. Danish bridge piers in seawater are subject to a high risk of corrosion damage due to the high chloride content in the Danish seawater. The Danish Road Directorate has from 1995-1999 investigated their bridge structures in order to evaluate the probability of corrosion damage at the time of investigation and in future. This report includes a presentation of the investigation methodology and the results of the investigations. Furthermore the bridges are given a priority depending on their present condition and thus whether a special investigation or merely a basic investigation program would apply in future. Subsequently an overall basic investigation program have been suggested for future use, where details on number and location of tests are given together with specifications on test methods to be used.

ISBN: 87-7923-026-1

ISSN: 0909-4288

1 Indledning	1
1.1 Formål.....	2
1.2 Broer omfattet af undersøgelsen.....	3
1.3 Undersøgelsesomfang.....	4
2 Resumé.....	5
2.1 Kystbroprogrammet.....	5
2.2 Resultater	5
2.3 Prioritering af fremtidige tiltag	6
2.4 Forslag til fremtidigt basisundersøgelserprogram	7
2.5 Engelsk resumé.....	8
3 Undersøgelser.....	11
3.1 Undersøgelserprogram	11
3.2 Undersøgelsesmetoder.....	11
4 Nuværende tilstand af danske kystbroer.....	13
4.1 Undersøgelsesresultater og vurdering.....	13
4.1.1 Visuel besigtigelse.....	13
4.1.2 Dæklagsundersøgelse	14
4.1.3 Kloridindhold	15
4.1.4 Potentiale måling og ophugning	25
4.1.5 Karbonatiseringsbestemmelse	31
4.1.6 Strukturanalyse.....	31
4.2 Tilstandsbeskrivelse.....	33
4.2.1 Kronprins Frederiks Bro.....	33
4.2.2 Vilsundbroen	34
4.2.3 Kong Frederik d. IX's Bro.....	34
4.2.4 Langelandsbroen	35
4.2.5 Siøsbundbroen	35
4.2.6 Svendborgsbundbroen	35
4.2.7 Hadsundbroen.....	36
4.2.8 Sallingsundbroen	36
4.2.9 Vejlefjordbroen	37
4.2.10 Kalvebodløbbrøen	38
4.2.11 Sorterendebrøen.....	38
5 Fremskrivningsmodeller	39
5.1 Valg af analysegrundlag	41
5.2 Modeller	41
5.2.1 Generelt	41
5.2.2 Fick's 2. lov	42
5.3 Sammenfatning.....	43
6 Prioritering af fremtidige tiltag.....	45
7 Forslag til fremtidigt undersøgelsesprogram.....	47
7.1 Forslag til fremtidigt undersøgelsesprogram	47
7.2 Visuelle registreringer	49
7.3 Dæklagsmålinger	49
7.4 Potentiale målinger	49

7.5	Prøveudtagning og kloridindhold	49
7.6	Karbonatiseringsmålinger.....	50
7.7	Betonsammensætning.....	50
8	Referenceliste	51
	Bilag	54
	Bilag 1 Placering af broerne	54
	Bilag 2 Undersøgelsesomfang	54
	Bilag 3 Undersøgelsesmetoder	54
	Bilag 4 Visuel besigtigelse	54

Bilag

Bilag 1 Placering af broerne

- B1.1: Placering af undersøgte kystbroer i Danmark
- B1.2: Kortudsnit, fotografi samt plan- og snittegning

Bilag 2 Undersøgelsesomfang

Bilag 3 Undersøgelsesmetoder

Bilag 4 Visuel besigtigelse

- B4.1: Visuel registrering af skader
- B4.2: Fotografier af typiske skader fundet ved basiseftersynene

Bilag 5 Dæklagsmålinger

Bilag 6 Kloridindhold

- B6.1: Oversigtsskema for totalt syreopløseligt og vandopløseligt kloridindhold
- B6.2: Vurdering af indflydelsen af koten samt pillens orientering på kloridindholdet
- B6.3: Vurdering af vandopløseligt kloridindhold

Bilag 7 Potentialemålinger

- B7.1: Vurdering af de foretagne EKP-målinger
- B7.2: Oversigt over sammenhørende ophugningsresultater og EKP-målinger
- B7.3: Grafisk fremstilling af udvalgte EKP-målinger

Bilag 8 Strukturanalyser - defektdybder

Bilag 9 Beregninger på kloridprofiler

- B9.1: Analysegrundlag
- B9.2: Initialt kloridindhold
- B9.3: Fick-resultater

1 Indledning

Vejdirektoratet varetager i dag forvaltningen af 12 kystbroer, der er opført i perioden fra midten af 1930'erne til midten af 1980'erne. Fælles for broerne er, at de havvandspåvirkede piller, der understøtter broerne, er udført som armerede betonkonstruktioner.

Armerede betonkonstruktioner kan blandt andet blive nedbrudt som følge af korrosion af armeringen. På grund af det høje saltindhold i de danske farvande vil indtrængende saltvand i betonen kunne starte korrosion på armeringen. Bølge- og tidevandsområdet - "splashzonen" - på pillerne er specielt udsat på grund af den vekslende saltvandspåvirkning.

Armeringskorrosion skabt af klorider i tilnærmelsesvis vandmættede områder kan udvikles uden synlige tegn på betonoverfladen, hvilket kan medføre omfattende svækkelse af konstruktionerne og i yderste konsekvens bæreevnesvigt, såfremt der ikke gribes ind i korrosionsprocessen.

Vejdirektoratet iværksatte i 1995 et projekt med det overordnede formål at afdække tilstanden og behovet for reparation af kystbroernes betonpiller. Ved projektets start forvaltede Vejdirektoratet 18 kystbroer. 6 kystbroer er efterfølgende overgået til amterne på grund af den nye vejlov af 1998.

Projektet faldt i 2 faser. I første fase blev tilgængeligt materiale om kystbroerne indsamlet, og der blev udarbejdet et basisundersøgelserprogram, Ref. 1. Programmet blev efterfølgende efterprøvet ved undersøgelse af Kong Frederik d. IX's Bro og Kronprins Frederiks Bro, Ref. 3 og 6. I fase 2 er der udført basiseftersyn af yderligere 9 kystbroer, fulgt op af supplerende undersøgelser på 2 af broerne, Ref. 2, 4, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 25. Endvidere er resultaterne fra kloridundersøgelser udført på andre danske kystbroer i relevant omfang inddraget i denne undersøgelse, Ref. 5, 7, 12, 13, 18, 19, 20, 23, 24, 26, 27, 61.

Som afslutning på projektet er denne rapport udarbejdet. Den omfatter blandt andet en opsummering af undersøgelsesresultaterne fra basiseftersynene samt en anbefaling for videre tiltag.

1.1 Formål

Projektets formål har været at:

- opstille en systematik (et basisundersøgelserprogram) for vurdering af eventuelle korrosionsskader og korrosionsrisiko på de havvandspåvirkede piller på Vejdirektoratets kystbroer,
- udføre indledende undersøgelser (basisundersøgelser) af relevante broer, herunder vurdere den aktuelle tilstand af de havvandspåvirkede bropiller, det vil sige for at afdække, om der er igangværende korrosion, og/eller om korrosion kan forventes inden for en kortere årrække,
- opstille en strategi for og en prioritering af det fremtidige vedligehold af Vejdirektoratets kystbroer.

Da projektet er forløbet over en årrække, har erfaringerne indhøstet under projektforløbet medvirket til løbende justeringer af undersøgelsesprogrammet og prøvningsmetoder.

I forbindelse med sammenfatningen af delresultaterne er det forsøgt at opstille vurderingskriterier for de parametre, der har betydning for korrosion. Da undersøgelsesomfanget i statistisk henseende er utilstrækkeligt, er der stor usikkerhed i forbindelse med bestemmelsen af det kritiske kloridindhold og bestemmelsen af det kritiske potentiale svarende til igangværende korrosion. I forslag til fremtidige undersøgelser er det derfor forsøgt at opstille et undersøgelsesprogram og -omfang med fokus på den "faktiske tilstand" af den enkelte bro og med fokus på forskning med hensyn til nedbrydningsparametre og undersøgelsesmetoder.

Som basis for den fremtidige prioritering af broerne for eftersyn og reparation er der udført fremskrivninger af målte kloridprofiler sammenholdt med de øvrige undersøgelser. Det er på den måde forsøgt at forudsige, hvornår klorider i armeringsniveau når et kritisk indhold, så korrosion starter.

1.2 Broer omfattet af undersøgelsen

Tabel 1 giver en oversigt over kystbroerne der i 1995 indgik i undersøgelsen og hvilke undersøgelser og tiltag, der er udført på broerne.

Kystbro	Indviet år	Antal piller/ pillettepe	Undersøgelse/ kommentar
Kronprins Frederiks Bro	1936	3*	Basiseftersyn 1995
Vilsundbroen	1936	5*	Særeftersyn 1994 Basiseftersyn 1997
Mønbroen	1939	10*	Ikke undersøgt i forbindelse med Kystbroprojektet
Aggersundbroen	1942	2*	Særeftersyn 1989 Katodisk beskyttelse etableret i 1989
Kong Frederik d. IX's Bro	1962	24*	Basiseftersyn 1995 Særeftersyn 1998
Langelandsbroen	1962	20*	Basiseftersyn 1998 Supplerende undersøgelser 1998
Siøundbroen	1964	19*	Basiseftersyn 1996
Svendborgsundbroen	1966	22 (26)	Basiseftersyn 1996 Supplerende undersøgelser i 1998
Egersundbroen	1968	2 (52)	Ikke undersøgt i forbindelse med kystbroprojektet
Ny Lillebæltsbro	1970	2 (17)*	Betonundersøgelser i 1996 (ikke særeftersyn)
Hadsundbroen	1976	7*	Basiseftersyn 1996. Særeftersyn 1997 Katodisk beskyttelse etableret i 1998
Sallingsundbroen	1978	18	Basiseftersyn 1996 Supplerende undersøgelser i 1998
Stege Store Bro	1980	2	Ikke tidligere undersøgt
Vejlefjordbroen	1980	13 (3)	Betonundersøgelser i 1988, 1989, 1996. Basiseftersyn 1997
Alssundbroen	1981	4 (4)	Betonundersøgelser i 1998 (ikke basiseftersyn)
Kalvebodløbbrøen	1984	6 (2)	Basiseftersyn 1996
Sorterendebroen	1984	6 (2)	Basiseftersyn 1996
Farøbroerne	1985	36	Undersøgt i perioden 1989-97

Tabel 1 Oversigt over kystbroer forvaltet af Vejdirektoratet i 1995.

”Antal piller” er inklusiv eventuelle klappille®. Tal i parentes angiver antal piller på land. En * angiver, at pillerne er udført med parentent.

I 1998 overgik Kronprins Frederiks Bro og Hadsundbroen til amterne.

Undersøgelsesresultater fra Kronprins Frederiks Bro og Hadsundbroen indgår dog i analyserne og i vurderingerne foretaget i denne rapport, da undersøgelserne er udført, mens Vejdirektoratet endnu forvaltede disse broer. Det var oprindeligt også planen at Mønsbroen, Aggersundbroen, Egersundbroen, Stege Store Bro og Alssundbroen skulle indgå i undersøgelsen, men disse broer overgik til amterne før undersøgelserne blev udført.

Placeringen af broerne fremgår af oversigtskortet i Bilag 1. I samme bilag ses et kortudsnit, en snit- og plantegning af pilletypen for hver enkelt bro samt et fotografi af pillerne.

På de efterfølgende sider ses oversigtsbilleder af de undersøgte broer (tal i parentes angiver indvielsesår).

1.3 Undersøgelsesomfang

En oversigt over de udførte undersøgelser fremgår af Bilag 2.

Oversigtsfotografi af broerne



Kronprins Frederiks Bro (1936)



Vilsundbroen (1936)



Kong Frederik d. IX's bro (1962)



Langlandsbroen (1962)



Siøsundbroen (1964)



Svendborgsundbroen (1966)



Ny Lillebæltsbro (1970)



Hadsundbroen (1976)



Sallingsundbroen (1978)



Vejlefjordbroen (1980)



Kalvebodløbbrøen (1984)



Sorterendebroen (1984)



Farøbroerne (1985)

2 Resumé

2.1 Kystbroprogrammet

Vejdirektoratet iværksatte i 1995 ”Kystbroprojektet” med det formål at vurdere korrosionsskader og korrosionsrisiko på de havvandspåvirkede piller på Vejdirektoratets kystbroer.

I første fase blev tilgængeligt materiale om kystbroer forvaltet af Vejdirektoratet indsamlet, og et basisundersøgelserprogram blev udarbejdet. Basiseftersynet omfatter visuelle inspektioner af pillerne, potentialemålinger inkl. undersøgelser af armeringens aktuelle tilstand, kloridmålinger, dæklagsmålinger og bestemmelse af karbonatiseringsdybden. Formålet med basisundersøgelserprogrammet har været at kortlægge om der er risiko for armeringskorrosion indenfor en kortere årrække, så der er behov for at iværksætte et teknisk og økonomisk særeftersyn.

Basisundersøgelserprogrammet blev afprøvet på Kong Frederik d. IX's Bro og Kronprins Frederiks Bro. I fase 2 blev der udført basiseftersyn på yderligere ni kystbroer, fulgt op af supplerende undersøgelser på to af broerne. I det omfang der foreligger resultater fra basiseftersyn af de nuværende amtsbroer, er de inkluderet i denne rapport. I 1996 blev undersøgelsesprogrammet suppleret med målinger af betonens pH-værdi (til vurdering af karbonatisering) og måling af vandopløseligt kloridindhold samt udførelse af strukturanalyser for de broer, hvor betonsammensætningen ikke var kendt. Endelig er der udført undersøgelser af kloridindholdets variation med den geografiske orientering af pillefladerne og variation med koten.

Denne rapport er udarbejdet som afslutning på projektet. Rapporten samler resultaterne fra de udførte undersøgelser og giver en vurdering af korrosionstilstanden nu og risikoen for at korrosion starter indenfor en 10-årig periode for de enkelte kystbroer forvaltet af Vejdirektoratet. Endelig er der opstillet forslag til revideret basisundersøgelserprogram, der indeholder såvel undersøgelser for at vurdere den aktuelle tilstand som undersøgelser med fokus på vidensamling og forskning.

2.2 Resultater

Det er fundet, at de yngste af broerne (Sallingsundbroen, Vejlefjordbroen, Kalvebodløbbrøen og Sorterendebrøen) har et begrænset visuelt skadeomfang på nuværende tidspunkt.

For de ældre broer er skadeomfanget noget større. Kronprins Frederiks Bro og Vilssundbroen er overfladebehandlede, hvilket kan have beskyttet betonen mod kloridindtrængning; dog vil malingen formentlig i større eller mindre grad kunne have kamufleret rustpletter og fine revner.

For Langelandsbroen, Siøundbroen og Svendborgsundbroen er mange tidligere skader udbedret, men der ses nu revner med og uden rustudfældninger samt rustpletter i forbindelse med de tidligere reparationer.

Skadeomfanget er som forventet størst for den lavere del af pillerne. De ældste af broerne har alle parement, hvilket betyder, at betonen på den nederste ca. 1-1,5 m (lige over vandoverfladen) ikke er besigtiget. Granitparementet er etableret for at beskytte pillerne for skader ved ispåvirkning og ved påsejling. Dertil kommer, at parementet må forventes at begrænse kloridindtrængningen, afhængig af fugekvalitet og effektiv bagstøbning omkring de enkelte parementsten. Endelig giver tilstedeværelsen af parementet muligvis en større grad af fugtmætning med tilhørende mindre risiko for korrosionsstart.

Det er fundet, at kloridindholdet falder med stigende kote indtil kote ca. 1,5-2 m, hvorefter det bliver tilnærmelsesvis konstant.

Orienterende undersøgelser af kloridindholdets variation omkring pillerne indikerer, at kloridindholdet er størst på vest-sydvestvendte flader og øst-nordøstvendte flader, svarende til de fremherskende vindretninger i Danmark. Da datagrundlaget på nuværende tidspunkt er begrænset, skal denne sammenhæng verificeres, før en egentlig sammenhæng mellem kloridindhold og orientering af pilleflader kan etableres.

Indtil et større datagrundlag foreligger, foreslås 0,10 % Cl⁻ af betonvægten anvendt som det kritiske kloridindhold for start af armeringskorrosion for bropiller eksponeret for havvand. Dette kriterium er sandsynligvis konservativt for de dele, der er vandmættede (tidevandszonen i kote ca. +/- 0,5 m), men rimeligt for områder over tidevandszonen.

Endvidere giver datagrundlaget ikke anledning til at lægge absolutte potentialekriterier til grund for vurderingen af korrosionsrisiko. Korrosionsrisikoen og -omfanget bør (som hidtil) fastlægges ud fra de målte potentialer kombineret med ophugninger til kalibrering af den faktiske korrosionstilstand.

Beregninger af diffusionsparametre viser, at indtrængningen af klorid i de danske kystbroer er foregået med omtrent samme hastighed (diffusionskoefficienter op til ca. $65 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$) som for norske kystbroer (diffusionskoefficienter op til $30 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$). Indtrængningshastigheden falder med stigende kote, hvilket vurderes at kunne hænge sammen med et større fugtindhold ved de lave koter af pillerne end højere oppe.

2.3 Prioritering af fremtidige tiltag

På baggrund af de udførte undersøgelser og en vurdering af den fremtidige risiko for at korrosion starter, er Vejdirektoratets kystbroer prioriteret med hensyn til fremtidige basiseftersyn/særeftersyn.

Det er således fundet, at der bør udføres et teknisk/økonomisk særeftersyn på Kong Frederik d. IX's Bro, Langelandsbroen, Svendborgsundbroen og Siø Sundbroen. Vilsundbroen foreslås der udført basiseftersyn på inden år 2002. Sallingsundbroen, Ny Lillebæltsbro, Kalvebodløb- og Sorterendebroerne foreslås der udført basiseftersyn på i perioden år 2001-2006 og Vejle fjordbroen foreslås der udført basiseftersyn på i perioden år 2002-2007. Undersøgelserne foreslås koordineret med andre undersøgelser på broerne.

For Kong Frederik d. IX's Bro blev et særeftersyn udført i 1998. For Farøbroerne er der i perioden 1987-97 udført betonundersøgelser og et teknisk/økonomisk særeftersyn blev udført i 1997.

Såvel særeftersyn som basiseftersyn bør følges op af nye basiseftersyn med 5-10 års mellemrum.

2.4 Forslag til fremtidigt basisundersøgelserprogram

Der er udarbejdet et overordnet fremtidigt undersøgelsesprogram til brug for de broer, hvor der er anbefalet fremtidige basiseftersyn, jævnfør afsnit 2.3.

Undersøgelsesprogrammet skal tilpasses eventuelle særlige forhold for den enkelte bro.

Undersøgelsesprogrammet indeholder i princippet de samme undersøgelsesmetoder, som basisundersøgelserprogrammet fra 1995, dog i et lidt andet omfang end tidligere. Der er således i det reviderede undersøgelsesprogram inkluderet forslag om visuel besigtigelse af parementsfuger kombineret med undersøgelser af beton og armeringstilstand bag granitparement, hvor et sådant findes. Til trods for at en vis beskyttelse mod kloridindtrængning er forventet som følge af de tætte parementsten, vil utætte fuger og en eventuelt manglende bagstøbning af parementstenene kunne give anledning til en væsentlig kloridindtrængning med risiko for armeringskorrosion.

Undersøgelsesmetoderne er søgt ensrettet, således at prøveudtagningsmetoder og analyser fremover udføres standardiseret. Dette vil give et bedre sammenligningsgrundlag mellem forskellige undersøgelser og reducere usikkerheden på de opnåede resultater. Sammenfatningen af kloridresultaterne har gjort det klart, at det ikke er kendt, hvor stor en del af variationen i målte kloridindhold der kan tilskrives forskelle i betonens homogenitet, og hvor stor en del af variationen der kan tilskrives unøjagtigheder i prøveudtagningsmetoden (specielt borestøvsprøver). Prøvningsprogrammet er sat sammen så dette forhold sammen med lokale defekters indflydelse på størrelsen af kloridindtrængningen, og kloridindtrængningens variation med koten kan belyses. Når disse forhold bliver belyst vil det være muligt at optimere undersøgelsesprogrammet fremover og begrænse undersøgelsesomfanget og hermed undersøgelsesomkostningerne.

2.5 Engelsk resumé

In 1995 the Danish Road Directorate started the "Coastal Bridge Project" with the object of evaluating corrosion damage and corrosion risk to the piers of the Road Directorate's coastal bridges that are exposed to seawater.

In the first phase, the available data on the Road Directorate's coastal bridges were collected, and a basic investigation programme prepared. The basic inspection of a bridge includes visual inspection of the piers, potential mapping (including investigations of the condition of the reinforcement), chloride measurements, concrete cover measurements, and determinations of carbonation depth. The object of the basic investigation programme was to assess the risk of reinforcement corrosion within a period of a few years, which in turn would show whether there is a need for technical/financial special inspection.

The basic investigation programme was tested on the King Frederik IX Bridge and the Crown Prince Frederik Bridge. In Phase 2, a basic inspection was carried out on an additional nine coastal bridges, followed by supplementary investigations on two of the bridges. Available inspection data for bridges administered by the Counties are included in this report. In 1996 the investigation programme was supplemented by measurements of the pH-value of the concrete (to evaluate the degree of carbonation) and measurements of the water-soluble chloride content, together with petrographic analyses of the bridges in which the concrete composition was unknown. Finally, the variation of chloride content with the geographical orientation of the pier surfaces and the height above sea-level was investigated.

This report is the conclusion of the programme. It summarizes the results of the investigations and evaluates the present corrosion situation as well as the risk of corrosion arising within a period of ten years for the coastal bridges administered by the Danish Road Directorate. In addition, a proposal is made for a revised basic investigation programme, covering investigations to evaluate the present condition as well as investigations that focus on data collection for research purposes.

Visual inspection of the most recent bridges (Sallingsund Bridge, Vejle fjord Bridge, Kalvebodløb Bridge and Sorterende Bridge) revealed little damage. The older bridges showed somewhat more damage. The Crown Prince Frederik Bridge and the Vilssund Bridge are surface-treated, which may have protected the concrete against chloride penetration, but, on the other hand, the paintwork probably camouflaged rust spots and fine cracks to some extent. On the Langeland Bridge, Siøsund Bridge and Svendborgsund Bridge, much previous damage had been repaired, but rust spots and cracks with and without rust deposits are visible where the repairs were carried out.

As expected, the extent of the damage is greatest on the lower parts of the piers. The piers of the oldest bridges have been provided with a facing, which means that the lowest 1 - 1.5 m above the water-line was not inspected. The granite facing protects the piers against damage from ice forces and ship impact. Furthermore, the facing is presumed to limit chloride penetration, depending on the quality of the joints between the facing blocks and the mortar behind them. The facing may also give a higher degree of moisture saturation and thus reduce the risk of corrosion.

It was found that the chloride content declines with increasing height above sea-level up to approx. 1.5 - 2 m, and thereafter remains close to constant. Preliminary investigations of the variation in chloride content around the piers indicate that the chloride content is highest on the west-southwest and east-northeast faces, corresponding to the prevalent wind direction in Denmark. As the database is still limited, this correlation should be confirmed by further investigations. Until more data are available, it is suggested that 0.10% Cl by weight be adopted as the critical content for the start of reinforcement corrosion in bridge piers exposed to seawater. This criterion is probably conservative for the water-saturated parts (i.e. the tidal zone 0.5 m above and below mean sea-level), but reasonable for the parts above the tidal zone.

The data do not indicate criteria for the absolute potential as a basis for evaluating corrosion risk. The risk and extent of corrosion should (as hitherto) be determined on the basis of the measured potentials combined with the breaking-up of concrete to the depth of reinforcement in order to calibrate the corrosion condition.

Calculations of the diffusion parameters show that chloride penetration in Danish coastal bridges has progressed at about the same rate (diffusion coefficients up to approx. $65 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$) as in Norwegian coastal bridges (diffusion coefficients up to $30 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$). The penetration rate falls as the height above sea-level increases; this could be related to the higher moisture content in the lower parts of the piers.

On the basis of the investigations carried out and an evaluation of the risk of corrosion, the Danish Road Directorate's coastal bridges have been priority-ranked for future general and special inspections. It has thus been found that technical/economic special inspection should be carried out on King Frederik IX Bridge, Langeland Bridge, Svendborgsund Bridge and Siøsund Bridge. A basic inspection of the Vilssund Bridge should be carried out by the year 2002. Basic inspection of Sallingsund Bridge, the New Little Belt Bridge, Kalvebodløb Bridge and Sorterende Bridge should be carried out in the period 2001-2006, and Vejlefjord Bridge in the period 2002-2007. It is suggested that these investigations be coordinated with other investigations on the bridges.

A special inspection of King Frederik IX Bridge was carried out in 1998. Investigations on the concrete of the Farø Bridges were carried out in 1987-97, and a technical/economic special inspection in 1997.

Both special and basic inspections should be followed up by general inspections at intervals of 5 - 10 years.

An overall investigation programme has been prepared for the bridges for which a basic inspection has been recommended. The investigation programme shall take into account any special conditions that apply to specific bridges.

The investigation programme is based on the same methods that were used in the 1995 programme, though the extent of the investigation will be somewhat wider. For example, the revised programme includes a proposal for the visual inspection of facing joints combined with investigation of the concrete and reinforcement behind

the granite facing, where such exists. Although the facing blocks are expected to give a certain amount of protection against chloride penetration, defective joints and inadequate mortar filling behind the blocks could give rise to chloride penetration and a risk of reinforcement corrosion.

The aim is to standardize the methods of taking samples and analysing them. This would make various investigations comparable and reduce the uncertainty attaching to the results. The results obtained up to the present are insufficient to indicate how much of the variation in measured chloride content is due to differences in the homogeneity of the concrete and how much to differences in the methods of taking samples (especially of drilled concrete dust).

The programme is designed to elucidate this problem, and also to throw light on the influence of local defects on the magnitude of chloride penetration and the variation of chloride penetration with height above sea-level. When answers have been found it will be possible to optimize the investigation programme and thereby reduce the extent and cost of future investigations.

3 Undersøgelser

3.1 Undersøgellesprogram

Der er på de undersøgte kystbroer udført et såkaldt basiseftersyn af pillerne. Basiseftersynet er tænkt som en indledende undersøgelse, der overordnet afdækker tilstanden - risikoen for armeringskorrosion - og dermed godtgør behovet for at igangsætte et egentligt særefersyn. Grundlaget for basiseftersynet er beskrevet i Ref. 1. Basiseftersynet omfatter følgende undersøgelser:

- Visuel besigtigelse
- Dæklagsmåling
- Kloridbestemmelse og karbonatiseringsmåling
- Potentialemåling inklusiv ophugninger

Der er på flere af broerne udført supplerende undersøgelser, idet der i projektforløbet opstod et behov for yderligere informationer for mere præcist at kunne beskrive broernes aktuelle tilstand. De supplerende undersøgelser omfatter:

- Kortlægning af prøveudtagningsmetodens indflydelse på kloridindholdet
- Kloridindtrængningens afhængighed i forhold til pillefladernes orientering
- Strukturanalyse
- Vandopløseligt kloridindhold og pH-værdi

Der er redegjort for de supplerende kloridundersøgelser i Ref. 2.

Undersøgelsesomfanget for de enkelte broer er fastlagt ud fra retningslinierne angivet i Ref. 1, dog er omfanget tilpasset et overordnet krav om minimale omkostninger.

Det faktiske undersøgelsesomfang for de enkelte kystbroer fremgår af Bilag 2.

Den indledende prioritering af broerne er foretaget alene på grundlag af risikoen for kloridindtrængning og korrosion. Der er redegjort for prioriteringen i Ref. 1.

3.2 Undersøgelsesmetoder

I det nedenstående er kort beskrevet hvilke undersøgelsesmetoder, der er anvendt. For en præcisering af metoder inklusiv en vurdering af usikkerheden på anvendelsen af metoderne henvises til Bilag 3.

Visuel besigtigelse

Den visuelle besigtigelse er generelt udført med det blotte øje, undtagelsesvis er der anvendt kikkert. Den overordnede orienterende besigtigelse er udført fra båd, mens felterne udvalgt til de mere detaljerede undersøgelser er besigtiget tæt på.

I forbindelse med den visuelle besigtigelse er der stikprøvevis udført delamineringundersøgelser ved hammertest.

Dæklagsbestemmelse

Dæklaget er bestemt ved hjælp af covermetermålinger.

Kloridbestemmelse

Der er gennem projektførelsen anvendt prøveudtagningsmetoder baseret på udtagning af støvprøver med en håndboremaskine eller på udtagning af borekerner med et kerneboreudstyr.

Støvprøver er generelt udtaget i intervaldybder af 15 mm. Borekernerne er neddelt ved savning og knusning eller ved profilfræsning. Ved savningen er kernen typisk neddelt i 15 mm tykke skiver, mens profilfræsningen er udført med et mere detaljeret profil med dybder af typisk 2-4 mm.

Kloridindholdet er bestemt som det syreopløselige eller det vandopløselige kloridindhold. Det syreopløselige kloridindhold betegnes det totale kloridindhold. I forbindelse med bestemmelsen af det vandopløselige kloridindhold er pH-værdien bestemt for flere af prøverne.

Potentialemåling og ophugning

De elektrokemiske potentialemålinger (betegnes i det efterfølgende med potentialemåling eller EKP-måling) er udført som målinger mellem en håndholdt elektrode på betonoverfladen og en armeringskontakt. Sammen med måling af potentialet måles ofte betonens elektriske modstand. I forbindelse med potentialemålingerne er der udført ophugninger til kalibrering af måleresultaterne mod armeringens faktiske korrosionsmæssige tilstand.

Karbonatiseringsbestemmelse

Karboniseringsdybden er bestemt ved hjælp af en pH-indikator (phenolphthalein). Karboniseringsdybden er endvidere bestemt som et led i strukturanalysen udført på tyndslib, der indeholder eksponerede betonoverflader.

Strukturanalyse

Strukturanalysen er udført på Ø75 eller Ø100 mm borekerner. Analysen omfatter såvel makro- som mikroanalyse af borekernerne. Ved makroanalysen beskrives betonens bestanddele, homogenitet og defekter synlige for det blotte øje. Ved mikroanalysen betragtes et tyndslib (størrelse 45 mm x 35 mm x 0,02 mm) af betonen under et mikroskop, og betonens karakteristika, herunder v/c forhold, cementtype, defekter med videre observeres.

4 Nuværende tilstand af danske kystbroer

På det tidspunkt, hvor revner og afskalninger er synlige på betonoverfladen af marine konstruktioner har kloridskabt korrosion ofte fået en udbredelse og et omfang, så et større reparationsprojekt er påkrævet. Reparation vil som oftest være nødvendig over et væsentligt større areal, end hvor der er synlige skader på betonoverfladen.

Opdages korrosionen tidligt i nedbrydningsforløbet, kan skadeomfanget og dermed omkostningerne til reparation imidlertid minimeres.

I vurderingen af korrosionsomfanget, -årsagen, -udbredelsen og -hastigheden er der en række parametre, der bør medtages. Ikke alle parametre har samme vægt. Visuelle registreringer kan vise korrosion som allerede optræder, hvorimod flere målemetoder, for eksempel bestemmelse af kloridindhold og potentialemåling, kun med en vis sandsynlighed kan indikere, om der er korrosion eller ej. De enkelte typer af informationer giver varierende grad af overblik i forhold til indblik i konstruktionens tilstand. Visuelle registreringer og for eksempel potentialemålinger giver et godt overblik, hvorimod bestemmelse af kloridindhold samt ophugninger giver et godt indblik i betonens og armeringens tilstand.

Dette afsnit opsummerer resultaterne af de enkelte basiseftersyn samt resultater fra eftersyn af de øvrige kystbroer, hvor sådanne foreligger, og hvor det er relevant at medtage resultaterne. På baggrund af resultaterne og opstillede vurderingskriterier er den aktuelle korrosionsmæssige tilstand af Vejdirektoratets kystbroer vurderet. Basiseftersyn og øvrige eftersyn er givet i Ref. 3 til Ref. 27 samt Ref. 61.

4.1 Undersøgelsesresultater og vurdering

4.1.1 Visuel besigtigelse

Der er ved den visuelle besigtigelse fundet følgende typiske skader:

- Korroderet armering med afskallet betondækklag
- ”Rustpletter”, udfældning af korrosionsprodukter (urevnet)
- Revner med/uden udfældning af korrosionsprodukter eller hvide udfældninger
- Netrevner med/uden hvide udfældninger
- Delamineret/løstsiddende beton
- Overfladeforvitring/erosion
- Springere/afskalning
- Alge/mos/begroning

En del af broerne har tidligere fået foretaget lokale betonreparationer. Skader ses ofte i forbindelse med disse reparationer.

I tabellen i Bilag 4 er for hver bro angivet de registrerede skadetyper, skadegrader og -omfang jævnfør definitioner i Bilag 4 (B4.1). Endvidere ses i Bilag 4 (B4.2) fotografier med eksempler på typiske skader fundet ved basiseftersynene.

Det ses, at for de yngre broer (Sallingsundbroen, Vejlefjordbroen, Kalvebodløbbrøen og Sorterendebrøen) er skadeomfanget meget begrænset på nuværende tidspunkt, og der ses ikke signifikant forskel på skadebilledet på de forskellige piller.

For de ældre broer er skadeomfanget noget større. Kronprins Frederiks Bro og Vilsundbroen er overfladebehandlede, hvilket kan have beskyttet betonen mod kloridindtrængning; dog vil malingen formentlig i større eller mindre grad kunne have kamufleret rustpletter og fine revner. Dette kan forklare det forholdsvis begrænsede omfang af visuelt registrerede skader. For Langelandsbroen, Siøundbroen og Svendborgsundbroen er mange tidligere skader udbedret, men der ses nu revner med/uden rustudfældninger samt rustpletter i forbindelse med disse reparationer.

Skadeomfanget er som forventet størst på de lavere dele af pillerne. De ældre broer har dog alle parent, hvilket betyder, at betonen på den nederste 1-1,5 m (lige over vandoverfladen) ikke er besigtiget. De tætte parentsten må dog forventes at beskytte betonen mod kloridindtrængning, såfremt parentfugerne er tætte og intakte.

Det er ikke muligt på tværs af alle broer at finde en systematik i områder, der er hårdest belastede. Inden for den enkelte bro ses der dog ofte, at de samme en til to sider på alle piller er mere skadede end de øvrige sider.

4.1.2 Dæklagsundersøgelse

I forbindelse med basisundersøgelsen er der målt og registreret dæklag på et eller flere større områder på de undersøgte piller. Bilag 5 opsummerer resultaterne af dæklagsmålingerne. I Tabel 2 ses minimums- og middeldæklag sammen med det specificerede dæklag.

Af resultaterne fremgår det generelt, at for alle broer er middeldæklaget, når pillernes sider betragtes som et hele, lig med eller større end det specificerede dæklag. Af måleresultaterne ses der dog afvigelser i begge retninger - det vil sige målte dæklag på hele sider af enkelte piller, som generelt er større eller mindre end det specificerede dæklag. Ligeledes kan der på den enkelte side på individuelle piller være en betydelig forskel på de målte dæklag.

I Afsnit 5 opstilles fremskrivningsmodeller til brug for estimering af tidspunktet for en fremtidig korrosionsinitiering. Et betydende parameter i alle disse fremskrivningsmodeller er dæklaget på armeringen.

Bro	Kote angivet ved konstruktionsdel	Dæklag i mm		
		Minimum	Middel	ifølge tegning
Kronprins Frederik Bro 1936	Parement (1,0 m)	- 30	- -	- 30
Vilsundbroen 1936	Parement (1,5 m)	- 30	- 40	- 30
Kong Frederik d. IX's Bro 1962	Parement (1,0 m)	- 22*	- -	- 50
Langelandsbroen 1962	Fundament (1,5-3,0 m) Pille (over 3,0 m)	14 26	37 39	30
Sjøsundbroen 1964	Fundament (1,0-1,5 m) Pille (over 1,5 m)) Pilletop (ca. 3,0 m)	- - -	- - -	(25) > 100 ca. 25 (aflæst)
Svendborgsundbroen 1966	Fundament (1,5-4,0 m) Pille (over 4,0 m)	24 27	41 42	30
Hadsundbroen 1976		35	35	40
Sallingsundbroen 1978	Isbryderskal (0,0-2,5 m) Pille (over 2,5 m)	35 35	40 40	30 30
Vejle fjordbroen 1980	Fundament (0,0-2,0 m) Pille (over 2,0 m)	35 35	55 60	50 30
Kalvebodløb broen 1984		32	35	40
Sorterendebroen 1984		32	35	40

Tabel 2 Dæklagsværdier.

* dæklaget er meget varierende. Den angivne værdi er dæklaget umiddelbart over parement. Højere oppe ad pillerne er minimumsdæklaget generelt større.

4.1.3 Kloridindhold

Resultaterne fra bestemmelsen af det syreopløselige og det vandopløselige kloridindhold er sammenfattet i Bilag 6 (B6.1).

Resultaterne fra de vandopløselige klorider er diskuteret i Bilag 6 (B6.3).

Der er i projektet udført en række målinger med det formål at bestemme kloridindholdets variation med koten. Tilsvarende er det undersøgt, om der eksisterer en systematisk variation af kloridindholdet på de forskellige sider af en bropille (det vil sige betydningen af broens orientering), jævnfør Bilag 6 (B6.2).

For mange af de målte kloridprofiler er diffusionsparametrene beregnet. Beregningerne af diffusionsparametrene ses i Bilag 9. Forudsætningerne for beregningerne fremgår af afsnit 5.

Kritisk kloridindhold

I litteraturen refereres ofte til det kritiske kloridindhold, der er det kloridindhold ved hvilket, armeringskorrosion starter. Det antages, at kun kloridioner, der er frit tilgængelige i porevandet, vil medvirke til nedbrydningen af armeringens passivitet. En del af de indtrængende klorider vil bindes i cementpastaen afhængig af betonsammensætningen, herunder cementtype, cementindhold og v/c-forhold.

Som oftest er det det syreopløselige kloridindhold, der bestemmes. Dette skyldes, at der endnu ikke er en generel anerkendt metode til bestemmelse af det frie kloridindhold.

Tidspunktet for start af armeringskorrosion er ikke alene bestemt af kloridindholdet, men også af armeringspotentialet (der blandt andet afhænger af det omgivende miljø - pH-værdi, fugtpåvirkning og iltadgang).

Det er således vanskeligt at fastlægge en entydig værdi for det kritiske kloridindhold. Mange har dog gennem tiden forsøgt at fastlægge det kritiske kloridindhold. I Ref. 45 ses en opsummering af kritiske kloridindhold gennem tiden begyndende med Hausmann i 1967. Der er stor spredning i de angivne værdier, og et endegyldig kritisk kloridindhold for start af armeringskorrosion er således ikke fundet.

I Ref. 44 er som almindelig dansk praksis angivet et kritisk kloridindhold på 0,05 til 0,10 % Cl⁻ af betonvægten, hvor værdien 0,10 % Cl⁻ af betonvægten ofte anvendes for marine konstruktioner.

En nyere undersøgelse, Ref. 46, tyder dog på, at et kritisk kloridindhold på 0,10 % Cl⁻ af betonvægten for marine konstruktioner er et konservativt skøn, for så vidt angår de lavere dele af pillerne (tidevandszonen). Der er ved denne undersøgelse fundet et kritisk kloridindhold i intervallet 1,0-1,4 % Cl⁻ af cementindholdet (svarende til ca. 0,16-0,26 % Cl⁻ af betonvægten) for v/c-forhold på mellem 0,4 og 0,5 med en sulfatbestandig cement. Prøveemnerne var her eksponeret i, hvad der i Kystbroprojektet benævnes tidevandszonen (i Ref. 46 benævnes det splashzonen), så de høje kloridtærskelværdier kan alene tilskrives et højere fugtindhold i betonen.

I Bilag 7 fremgår sammenhørende værdier af kloridindhold og korrosionstilstand af armeringen registreret i ophugningerne i forbindelse med potentialemålingerne. Antallet af datasæt er begrænset. I de ophugninger, hvor der er registreret armeringskorrosion, overstiger kloridindholdet i mange tilfælde et kloridindhold på 0,10% Cl⁻ af betonvægten afhængig af broens alder og inspektionstidspunktet. Der er tilsvarende i ophugninger, hvor armeringen er intakt, fundet kloridindhold, der overstiger et kloridindhold på 0,10% Cl⁻ af betonvægten (op til for eksempel 0,19 % Cl⁻ på Sallingsundbroen og 0,29 % Cl⁻ på Hadsundbroen). Der kan på det foreliggende grundlag ikke udtrages en entydig værdi for det kritiske kloridindhold gældende specielt for kystbroerne, og det kan således heller ikke afvises, at 0,10 % Cl⁻ af betonvægten svarer til det kritiske indhold, omend 0,10 % Cl⁻ tyder på at være et konservativt skøn særligt for de nederste dele af pillerne.

Ved de efterfølgende vurderinger og beregninger er 0,10 % Cl⁻ af betonvægten anvendt som det kritiske kloridindhold. Idet værdien muligvis er et konservativt skøn,

er fremskrivningerne i afsnit 5 suppleret med beregninger med 0,15 % Cl⁻ af betonvægten som kritisk værdi.

Vurdering af kloridindhold

Korrosionsrisikoen er for alle broerne vurderet ud fra kloridindholdene i Bilag 6 (B6.1) samt dæklagene i Bilag 5.

Det ses, at kloriderne som forventet er trængt længere ind på de ældste af broerne, idet risikoen for korrosion aftager med broens alder på undersøgelsestidspunktet.

Kronprins Frederiks bro og Vilsundbroen (henholdsvis 59 og 61 år gammel):

Det vurderes, at der generelt er risiko for korrosion i pillerne. For Vilsundbroen hovedsageligt på øst- og vestvendte sider.

Kong Frederik d. IX's bro og Langelandsbroen (35/38 og 36 år gammel):

Det vurderes, at der generelt er risiko for korrosion i fundamentet umiddelbart over parement (placeret i kote 1,0 m og 1,5 m). Endvidere viser flere af målingerne risiko for korrosion i højere koter.

Siø Sundbroen og Svendborgsundbroen (32 og 30/32 år gammel):

Det vurderes, at der generelt er risiko for korrosion i fundamentet umiddelbart over parement (placeret i kote 1,0 m og 1,5 m), henholdsvis ved kote 1,1 m og 1,6 m.

Hadsundbroen og Sallingsundbroen (20 og 18/20 år gammel):

Det vurderes, at der generelt er risiko for korrosion i de laveste dele (fra kote 0,0 m til +1,0 m) af pillerne på begge broer. Broerne har ikke parement. Ved de supplerende undersøgelser i 1998 på Sallingsundbroen vurderes der også at være risiko for korrosion over kote 1,0 m, (prøverne er her taget på en anden pille end i 1996).

Vejleffjordbroen, Kalvebodløbboen og Sorterendebroen (henholdsvis 17, 12 og 12 år gammel):

Det ses, at for de yngre broer er der ingen risiko for korrosion på nuværende tidspunkt.

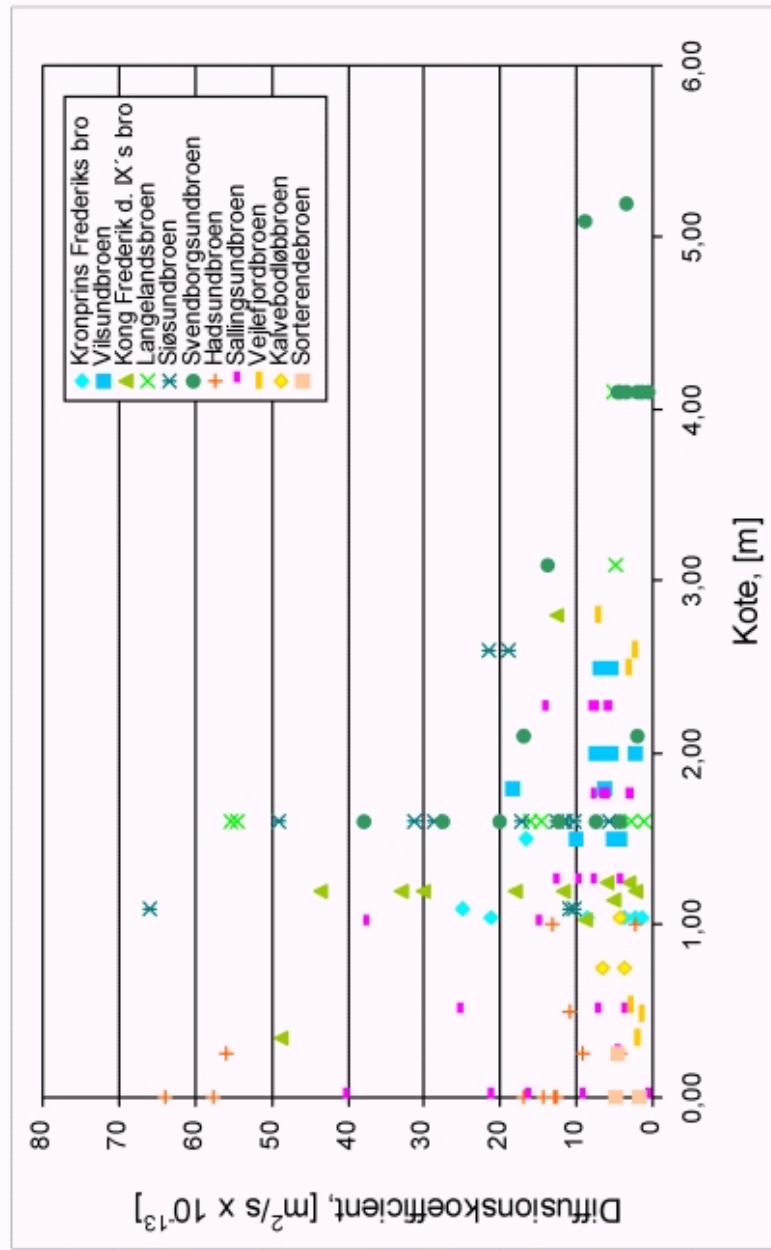
Vurdering af diffusionsparametre

Der er beregnet effektive diffusionsparametre ved brug af Fick's 2. lov.

Forudsætninger for beregninger er givet i afsnit 5. Resultaterne er vedlagt i Bilag 9.

I Figur 1 ses de beregnede diffusionskoefficienter som funktion af koten. I Figur 2 ses de beregnede overfladekoncentrationer som funktion af koten.

Det fremgår, at diffusionskoefficienten falder med stigende kote. Den beregnede diffusionskoefficient skulle i princippet være uafhængig af overfladekoncentrationen, som jævnfør Figur 2 falder med stigende kote. Det kan derfor ikke udelukkes, at diffusionskoefficienten og overfladekoncentrationen er afhængige parametre, hvilket der ikke tages højde for i Fick's 2. lov. Det vurderes dog for sandsynligt, at diffusionskoefficienten reelt falder med stigende kote som følge af et reduceret fugtindhold.



Figur 1 → Beregnede diffusionskoefficienter i 10¹³ m²/s som funktion af koten.

I Tabel 3 ses beregnede diffusionsparametre for norske kystbroer, Ref 48. Det fremgår, at de beregnede diffusionsparametre for de danske kystbroer ligger i omtrent samme interval som for de norske kystbroer.

Bro	Alder [år]	v/c	C ₀ [% Cl af betonvægten]	C _s [% Cl af betonvægten]	D [m ² /s x 10 ⁻¹³]
Vestnes Bru	37	0,45-0,50	0,04	0,24 ±0,07	5,1 ±0,3
Runde Bru	11	0,50-0,55	0,01	0,68 ±0,15	13,4 ±1,7
Nærlandsøy Bru	25	0,35-0,50	0,01	0,45 ±0,12	16,6 ±5,4
Hadsel Bru	15	0,40	0,02	0,53 ±0,20	30,3 ±3,4
Henningsvær Bru	11	0,35-0,40	0,02	0,31 ±0,05	8,7 ±2,2
Gimsøystraumen Bru	12	0,35-0,40	0,00	0,52 ±0,12	9,2 ±2,5

Tabel 3 Tabellen angiver diffusionsparametrene bestemt for udvalgte norske kystbroer, Ref. 48.

Kloridindholdets variation med koten

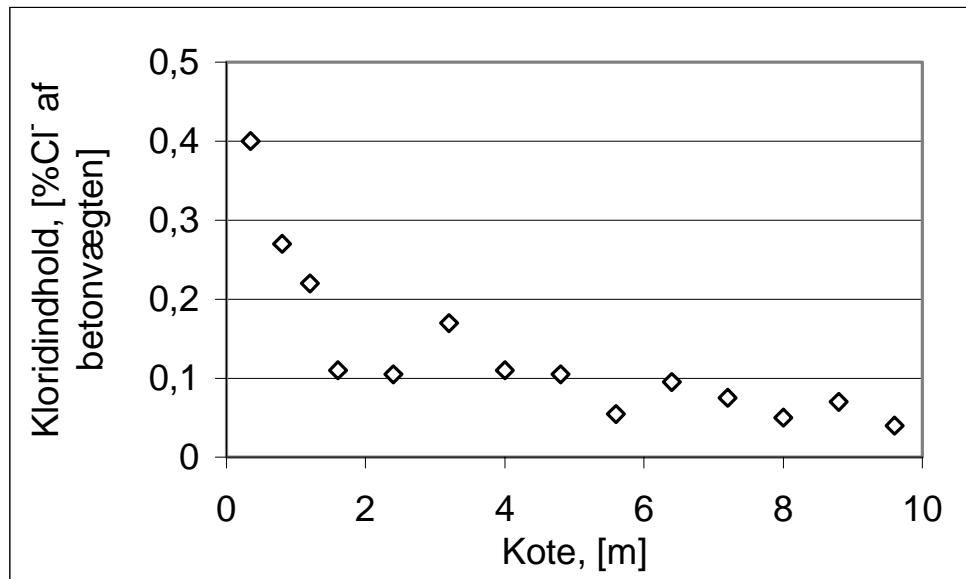
Kloridkoncentrationens variation med koten er undersøgt for Langelandsbroen, Sallingsundbroen, Svendborgsundbroen og Vilsundbroen ved udtagning af borestøprøver i forskellige koter. Resultaterne fremgår af Bilag 6 (B6.2).

På Langelandsbroen og Svendborgsundbroen er der udtaget prøver på fire sider af en pille i 3 koter mellem kote 1,6 m og 4,1 m. Resultaterne viser, at der i dette interval ikke er nogen systematisk variation i kloridkoncentrationen. På Vilsundbroen er der på to piller udtaget prøver i 3 koter mellem kote 1,5 m og 2,5 m. Kun for den sydvendte side af pillerne viser resultaterne fra de to forskellige piller samme tendens, det vil sige, at kloridindholdet falder med tiltagende kote. For de øvrige prøver synes der ikke at være nogen systematisk sammenhæng mellem kloridindholdet og koten.

Sammenholdt med resultaterne fra Langelandsbroen og Svendborgsundbroen, der også dækker dette interval, synes konklusionen at være, at der fra kote 1,5 m til kote 4,1 m ikke er nogen påviselig variation af kloridindholdet i forhold til koten.

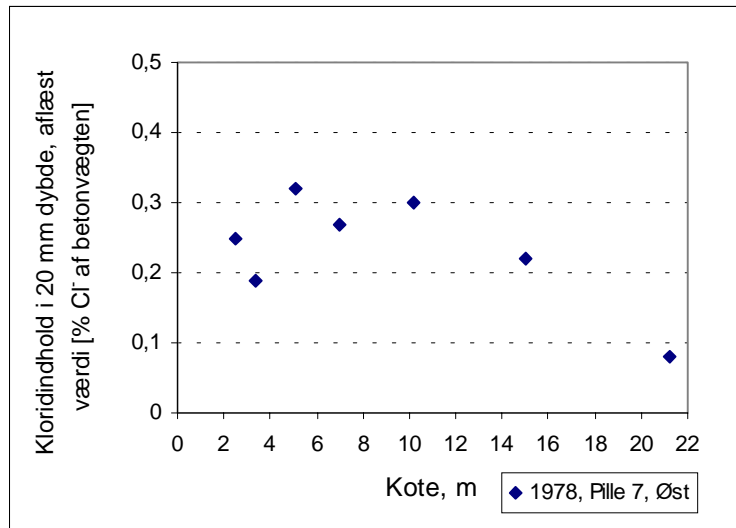
På Sallingsundbroen er der på en pille udtaget prøver på fire forskellige sider i 3 koter mellem kote 1,0 m og 2,3 m. Resultaterne viser, at der sker en formindskelse af kloridindholdet med tiltagende kote. Kun på den nordøstvendte side er der ikke nogen systematisk reduktion af kloridindholdet med tiltagende kote. Målingerne fra Sallingsundbroen indikerer altså, at kloridindholdet aftager med stigende kote indtil kote ca. 1,5 m.

Tidligere undersøgelser på Farøbroerne har tilsvarende vist, at kloridindholdet er aftagende med stigende kote indtil kote 1,5 m, se Figur 3. Af figuren ses tillige en tendens til, at kloridindholdet er svagt aftagende op til kote ca. 10 m.



Figur 3 Sjælland-Farøbroen.
 Kloridindholdets variation med koten ud fra 1994 målinger i 0-30 mm dybde. Det skal bemærkes, at der er et støbeskel i kote 2,85 m. Ref. 23

Tidligere undersøgelser af Langelandsbroen, Ref. 50, hvor der er udtaget prøver i væsentligt højere koter end i forbindelse med Kystbroprojektet, viser, at der ved koter større end 10-15 m sker et yderligere fald i kloridindholdet, se Figur 4. Området imellem splashzonen (defineret i dette projekt som kote 3 m hvortil bølgesprøjt kan nå) og kote 10-15 m er således muligvis området hvor havgus giver anledning til et vist kloridindhold i betonen, svarende til sprayzonen. Kloridindholdet er tilnærmelsesvist konstant op til kote 10-15 m, hvilket muligvis hænger sammen med en inhomogen beton med en lavere eller mere varierende betonkvalitet end Farøbroernes beton.



Figur 4 Langelandsbroen. Kloridindholdets variation med koten ud fra målinger udført i 1978, Ref. 50.

Opsummeret er der således en indikation af, at kloridindholdet aftager med stigende kote. Kloridindholdet aftager markant op til kote ca. 1,5 m, herefter er det svagt aftagende indtil kote ca. 10-15 m, hvorefter det falder yderligere. Beregninger af den effektive overfladekoncentration i forbindelse med diffusionsberegninger understøtter det kraftige fald i kloridkoncentration op til kote ca. 1,5 m, se Figur 2.

Vurdering af orienteringens indflydelse på kloridindholdet

Analyseresultaterne, der er benyttet til at vurdere kloridindholdets variation i forhold til koten, er også benyttet til at vurdere variationen af kloridindholdet mellem pillernes forskellige sider (kloridindholdet som en funktion af orienteringen af pilleoverfladen), da der på flere piller er udtaget prøver på fire forskellige sider.

Variationen i kloridindholdet mellem pillesiderne er vurderet på grundlag af sidernes orientering i forhold til:

- Verdenshjørnerne
- Broens længdeakse
- Strømretningen
- Den dominerende vindretning

Alle kystbroerne er tildelt grader for deres geografiske placering, hvor nord svarer til 0 grader, øst svarer til 90 grader og syd svarer til 180 grader. Efterfølgende er prøveudtagningsstedet på de enkelte bropiller tildelt grader for placering således, at pilleorienteringens indflydelse på kloridindholdet kan sammenlignes på et tilnærmelsesvist ens grundlag. Denne inddeling har naturligvis ikke mulighed for at tage højde for eventuelle læeffekter af kantede piller mod runde/ovale piller, eller forskellig konstruktiv udformning med stigende kote.

Strømretningen er generelt vinkelret på broens længdeakse, hvorfor en vurdering af kloridindholdets variation omkring en pille i forhold til broens længdeakse også bliver en vurdering af kloridindholdets variation omkring en pille i forhold til strømretningen.

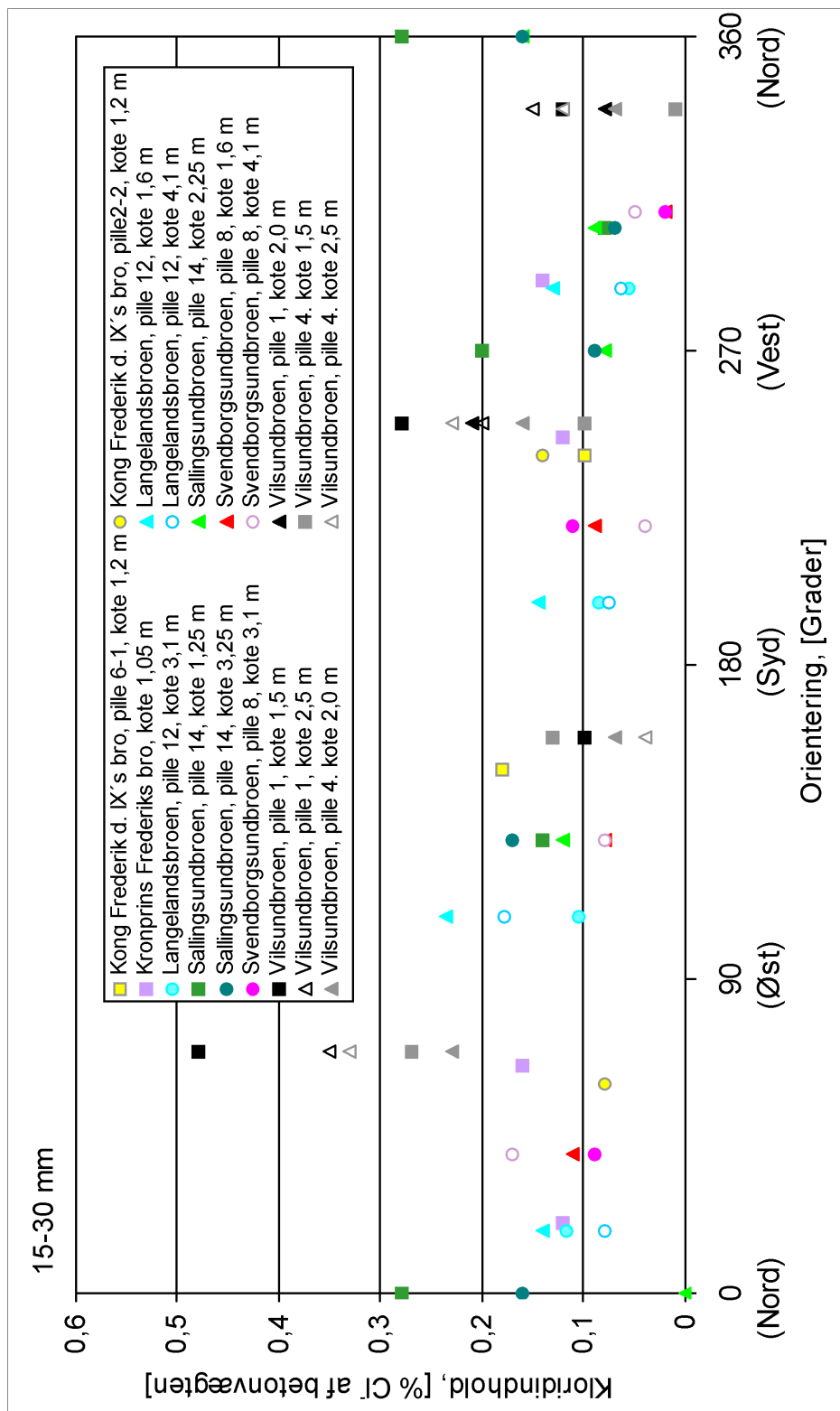
Der er sammenhørende værdier af pilleorientering og kloridindhold for broerne Langelandsbroen, Sallingsundbroen, Vilsundbroen, Svendborgsundbroen samt Kong Frederik d. IX's Bro. Resultaterne er optegnet i Figur 5 for kloridindhold målt i dybden 15-30 mm, idet målinger i overfladen vurderes at være influeret af forskelle i betondefekter, herunder revner, varierende pastaindhold med videre, se endvidere Bilag 6 (B6.2).

Resultaterne fra Langelandsbroen, Sallingsundbroen og Vilsundbroen viser generelt, at kloridindholdet er størst på piller, hvis orientering er vinkelret på broens længdeakse og parallelt med strømretningen. For Svendborgsundbroen er kloridindholdet i kote 1,6 m og 3,1 m størst på piller, der er parallelle med broens længdeakse. I kote 4,1 m er kloridindholdet størst på en pille vinkelret på broens længdeakse.

Figur 5 indikerer, at der er et større kloridindhold svarende til orienteringen øst-sydøst (ca. 70 grader) og vest-sydvest (ca. 250 grader), hvilket svarer til de fremherskende vindretninger i Danmark, Ref. 57. Datagrundlaget er spinkelt og i alle tilfælde ikke stort nok til, at en egentlig orienteringsmodel kan opstilles, hvilket ville have været hensigtsmæssigt, idet et vilkårligt kloridprofil fra en vilkårlig bro i givet fald ville kunne omregnes til et kloridindhold svarende til pillens værste eksponering. Formålet med en sådan omregning eller normalisering af kloridprofiler fra forskellige broer ville være, at beregninger af diffusionsparametre og videre fremskrivning ville ske med tilnærmelsesvis samme forudsætninger.

Et fortsat arbejde med opstilling af en egentlig orienteringsmodel for de danske kystbroer kræver, at de indtil nu udførte undersøgelser indikerer, at en afhængighed af orienteringen eksisterer. På Vilsundbroen er udført kloridmålinger på alle 4 sider af pille 1 og pille 4. Kloridprofilerne (5 dybder) i 3 forskellige koter for samme sider på de 2 undersøgte piller viser en god overensstemmelse. Disse undersøgelser indikerer, at der er stor forskel på kloridindtrængningen på forskellige sider, og forskellen er den samme for de 2 undersøgte piller.

I afsnittet vedrørende forslag til fremtidigt undersøgelsesprogram for de danske kystbroer er undersøgelsesprogrammet tilrettelagt således, at ovenstående datagrundlag udbygges med henblik på en senere bearbejdning af data samtidig med, at den korrosionsmæssige tilstand af den aktuelle kystbro overvåges.



Figur 5 Kloridindhold som funktion af pilleorienteringen.
Kloridindholdene er angivet for dybden 15-30 mm.

Vandopløselige klorider

Det vandopløselige kloridindhold er bestemt ved brug af RCTW-metoden, Ref. 35. Resultaterne er givet i Bilag 6.3.

Det er fundet, at den anvendte ekstraktionstid har en stor indflydelse på størrelsen på det målte vandopløselige kloridindhold, specielt indenfor de første 5-10 minutter. Det er tillige fundet, at andelen af vandopløselige klorider for mange af de undersøgte broer er faldende med stigende dybde, hvilket kan skyldes en lavere pH-værdi nær betonoverfladen. Det ses endvidere, at pH-værdien stiger med stigende dybde for målinger af Vejlefjordbroens beton, mens pH-værdien for Langelandsbroen tilsyneladende er konstant med stigende dybde. Målingerne bekræfter de forholdsvis beskedne karboniseringsdybder, der er bestemt i Kystbroprojektet som helhed.

Det kan ikke udelukkes, at RCTW-metoden, Ref. 35, der bruges til bestemmelse af det vandopløselige kloridindhold, kan bruges som et relativt mål for, hvilken kloridbinding de enkelte betoner har. Det har dog vist sig overmåde vigtigt, at der anvendes præcis samme ekstraktionstid for undersøgelsen, hvilket i metodebeskrivelsen fra 1998 er givet, idet opløsningerne foreskrives filtreret efter 1 minut. Der mangler dog en korrelation mellem det bestemte vandopløselige kloridindhold og det frie kloridindhold. Endelig reterer der den mulighed, at dele af kloriderne er bundet så løst, at de ved en vilkårlig metode vil blive målt som frie klorider til trods for, at de måske ikke er det i praksis. Ref. 49 anfører (på et begrænset grundlag), at klorider bindes af såvel cementpastaens indhold af aluminater som af silikater. Eventuelle supplerende fremtidige undersøgelser vil kunne vise om dette er i overensstemmelse med de faktiske forhold.

Som følge af de nævnte usikkerheder har indholdet af de vandopløselige klorider ikke været brugt i den samlede vurdering af armeringens aktuelle som fremtidige tilstand.

4.1.4 Potentialemåling og ophugning

I forbindelse med basisundersøgelsen er der udført potentialemålinger på 10 af de undersøgte broer med tilhørende ophugninger på 8 af broerne. Bilag 7 opsummerer resultaterne mellem de målte potentialer og den aktuelle korrosionstilstand af armeringen fundet i forbindelse med ophugningerne. I bilaget er angivet sammenhørende registreringer af potentialeverdier og -gradienter, elektriske modstande, kote, kloridindhold i armeringsniveau, karboniseringsdybde og armeringens korrosionstilstand.

Det har ikke været et mål under Kystbroprojektet at opstille særskilte vurderingskriterier for de danske kystbroer til vurdering af korrosionsrisikoen ud fra potentialemålinger. Dette ville have krævet et langt større datagrundlag end det foreliggende, det vil sige et væsentlig større antal potentialemålinger med tilhørende kloridmålinger og ophugninger.

Retningslinier for vurdering af potentialemålinger

Der findes ingen entydige retningslinier for vurderingen af korrosionsrisikoen ud fra potentialemålinger. Potentialet alene kan ikke direkte give oplysning, om korrosionen

er startet, eller hvor udbredt den er. Udover selve potentialet er der en række parametre, der har betydning for vurdering af korrosionsudbredelsen.

Tidligere har kriterierne i ASTM C876-91, se Ref. 41, været anvendt som udgangspunkt for vurdering af korrosionsrisikoen. ASTM-kriterierne er opstillet i Tabel 4. Tidligt i Kystbroprojektet blev det konstateret, at disse kriterier baseret på de absolutte potentialeverdier ikke kan anvendes til vurdering af korrosionsrisikoen for marine konstruktioner. Kriterierne er baseret på målinger og erfaringer fra tørsaltede brodæk, det vil sige relativt tørre konstruktioner.

Potentiale (mV CSE)	Tolkning
... > 0 mV	Ingen korrosion.
0 mV > ... > -200 mV	90% sandsynlighed for, at der ikke er aktiv korrosion.
-200 mV > ... > -350 mV	Overgangsområde – ikke muligt at angive sandsynlighed.
-350 mV > ...	90% sandsynlighed for, at der er aktiv korrosion.

Tabel 4 Vurderingskriterier i henhold til ASTM, Ref. 41.

De i tabellen angivne værdier er opstillet ud fra potentiale data fundet for brodæk.

For marine konstruktioner kan lavere potentialeverdier forventes ved den samme korrosionsgrad som i brodæk på grund af en væsentlig mindre iltadgang til armeringen. Undersøgelser tyder på, at potentialeverdierne for piller i havvand generelt ligger ca. 200 mV lavere end ASTM-kriterierne, Ref. 42. Dette forhold skyldes betonens højere fugtindhold, der virker hæmmende på iltadgangen til armeringen. De korrigerede kriterier ses af Tabel 5. Dæklaget og betonens elektriske ledningsevne vil dog også have betydning for potentialeniveauet, jævnfør Ref. 42.

Potentiale (mV CSE)	Tolkning
... > -200 mV	Ingen korrosion.
-200 mV > ... > -400 mV	90% sandsynlighed for, at der ikke er aktiv korrosion.
-400 mV > ... > -550 mV	Overgangsområde – ikke muligt at angive sandsynlighed.
-550 mV > ...	90% sandsynlighed for, at der er aktiv korrosion.

Tabel 5 Korrigerede ASTM vurderingskriterier i henhold til Elsener, Ref. 42.

Uanset hvilken skala der benyttes, bør vurderingerne baseres på såvel de absolutte potentialeverdier, potentialegraderne og de elektriske modstande. Udførte potentialemaalinger bør dog i alle tilfælde på den enkelte konstruktion kalibreres mod ophugninger, hvor potentialeverdierne (inklusive grader og modstande) sammenholdes med armeringens aktuelle korrosionstilstand.

Tilstedeværelsen af ilt er nødvendig for, at korrosionsprocessen kan forløbe. I flere områder med piller i havvand kan manglende tilførsel af ilt være en begrænsende faktor for korrosionsprocessen, herunder spiller betonens kvalitet en betydelig rolle. Fugtforhold og dermed iltadgang bør vurderes individuelt i hvert enkelt tilfælde.

Vurdering

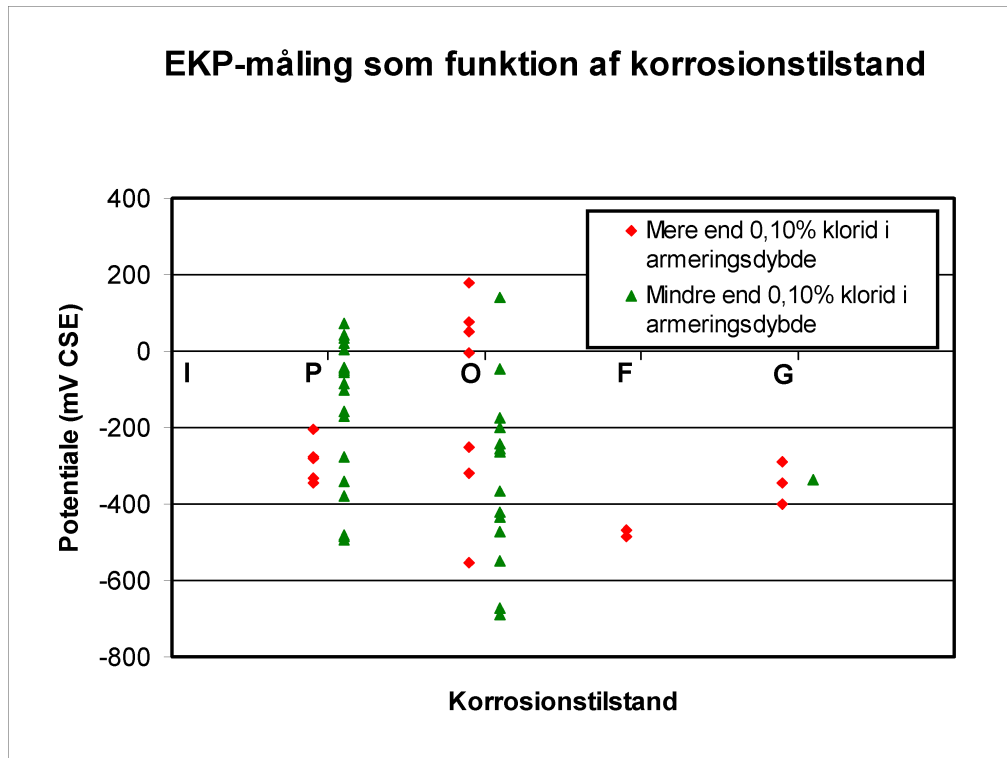
I Bilag 7 er alle sammenhørende EKP-målinger og visuelle registreringer af armeringens korrosionstilstand i ophugninger sammenlignet og analyseret. Der er i alt 50 datasæt. For hver ophugning er kloridindholdet i armeringsniveau ligeledes registreret. Da potentialemåling, kloridmåling og ophugning ofte er foretaget med en afstand på 0,1 til 0,5 m har det for flere datasæt været nødvendigt at foretage interpolation for estimering af kloridindholdet. Forudsætninger og afrundinger i forbindelse med dette er givet i Bilag 7. Oftest er kloridindholdet forudsat konstant i samme kote og i en afstand på maksimalt 0,5 m til hver side. Det vil sige, sammenhørende værdier af potentialer, kloridindhold og armeringstilstand fundet ved ophugning er derfor ofte udført inden for et område på 0,5 x 0,5 m.

Der kan gøres følgende generelle observationer ud fra resultaterne af potentialemålingerne:

Den relative variation i potentialet med koten er sammenlignelig for de fleste broer. Det vil sige, potentialet er lavest (mest negativt) omkring vandoverfladen og generelt stigende opad. Vilsundbroen er afvigende, idet potentialeværdierne på flere sider er faldende opad. Dette kan skyldes udformning af de overfladebehandlede piller med pillehat, se Bilag B1.2, hvor en eventuel utæt pillehat uden overfladebehandling kan bevirke, at den øverste del af de undersøgte områder har større tilgang af ilt end den øvrige del af de undersøgte områder. De målte modstandsværdier bekræfter dette.

For Sallingsundbroen er der på en enkelt pille med generelt høje potentialer et område øverst i det målte område med lave potentialer. Dette kan skyldes en lokal defekt (revne) med underliggende korrosion af armeringen.

For de øvrige broer er der generelt fundet en stærk afhængighed mellem potentialet og koten med de laveste potentialer (mest negative) i kote 0,0 m og mindre negative potentialer med stigende kote. Dette ses for eksempel for Langelandsbroen, Hadsundbroen, Vejlefyordbroen, Kalvebodløbboen og Sorterendebroen, jævnfør Bilag B7.3.



Figur 6 Sammenhørende værdier af potentiale (mV vs. CSE) og visuelt registreret korrosionstilstand af armeringen i ophugningerne.
 I=immunt, P=passivt, O=overfladerust, F=fladekorrosion, G=grubetæring

Figur 6 viser sammenhørende værdier for visuelt registreret korrosionstilstand af armeringen fundet i ophugningerne og de tilhørende målte potentialer. Korrosionstilstanden er vurderet efter nedenstående skala:

- I = Immunt: Der ses blankt stål
- P = Passiv: Armeringsoverfladen er mat hvid/grå
- O = Overfladerust: Armeringsoverfladen er anløben eventuelt med spredte mindre rustprikker, men der er ingen tværsnitsreduktion
- F = Fladekorrosion: Der er udbredt korrosion på armeringsoverfladen generelt med begyndende til alvorlig tværsnitsreduktion
- G = Grubetæring "Pitting": Der ses gruber lokalt til udbredt på armeringsoverfladen. I alvorlige tilfælde kan armeringsstangen være tæret over/væk

Der er på Figur 6 skelnet mellem de ophugninger, hvor kloridindholdet i armeringsniveau er over 0,10% Cl⁻ af betonvægten (røde punkter) henholdsvis under 0,10 % Cl⁻ af betonvægten (grønne punkter).

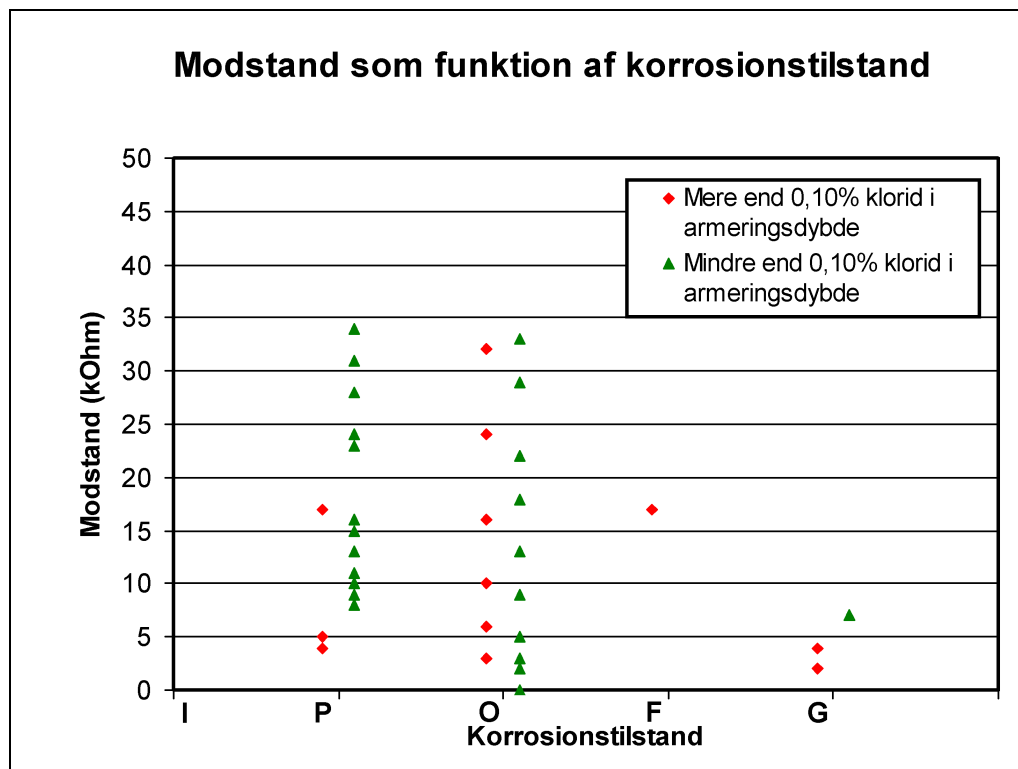
Der er for korrosionstilstand O = overfladerust 4 "røde" ophugninger med positiv potentiale, det vil sige punkter med et kloridindhold over 0,10% Cl⁻ af betonvægten i

armeringsniveau, og hvor risikoen for korrosion er stor, forudsat at de øvrige forhold (fugt og ilt) for korrosion er tilstede. De 4 punkter er fra Vilsundbroen. Pillerne er overfladebehandlet med en tykfilmsmaling fra overside parement (parement i kote 1,5 m). Det er derfor muligt, at forholdene på stedet bevirker de meget høje - positive - potentialeverdier.

Vurderingerne er baseret på meget få punkter (16 "røde" ophugninger). For korrosionskarakter O = Overfladerust er der en meget stor spredning på de målte værdier.

Det kritiske kloridindhold er ved vurderingen sat til 0,10% Cl⁻ af betonvægten. Det må antages, at en værdi på 0,05% Cl⁻ af betonvægten flere steder, særligt ved målinger udført ved de højeste koter, også vil kunne starte korrosion, der ses som overfladekorrosion. Ligeledes forventes en værdi på 0,10% Cl⁻ af betonvægten nær vandoverfladen ikke at kunne starte korrosion, her er 0,15% Cl⁻ af betonvægten formentlig tættere på det kritiske kloridindhold. Det store antal "grønne" ophugninger med vurdering O = Overfladerust med EKP-værdier -200 mv til -700 mv kan indikere dette. Endelig er ophugningerne udført i varierende afstand fra havoverfladen, hvilket på grund af ændrede fugtforhold må formodes at ændre potentialet med en bibeholdt korrosionstilstand, såfremt overfladerusten stammer fra indstøbningstidspunktet.

Det er i statistisk sammenhæng få punkter til at lave en vurdering af sammenhæng mellem korrosionssandsynligheder og korrosionsgrader og potentialer, hvilket vanskeliggør udledningen af en sammenhæng mellem armeringens korrosionstilstand og potentialerne for danske kystbroer.



Figur 7 Sammenhørende værdier af modstand (kOhm) og visuelt registreret korrosionstilstand af armeringen i ophugningerne.

I Tabel 6 er givet en vurdering af korrosionsrisiko og korrosionsomfang alene ud fra potentialerne. Vurderingen er foretaget med udgangspunkt i de korrigerede ASTM-kriterier. Der er i vurderingen til dels taget hensyn til den elektriske modstand, se Figur 7, men ikke til armeringens faktiske korrosionstilstand fundet i ophugningerne.

Ved vurdering af om der er risiko for korrosion, er kriteriet om en eller flere potentialeverdier er under -400 mV CSE, anvendt, (det vil sige området imellem 90% sandsynlighed for, at der er aktiv korrosion og 90% sandsynlighed for, at der ikke er aktiv korrosion) i henholdsvis tidevandsområdet og splashzonen. Ved fastsættelse af korrosionsomfanget er der taget udgangspunkt i alle de foretagne potentialemaalinger på hver enkelt bro og derefter foretaget et skøn på omfanget af området med mulig korrosion.

Bro	Vurdering af korrosionsrisiko	
	Potentialer mere negative end -400 mV CSE Ja/Nej	Korrosionsomfang: 0 : Ingen udbredelse L : Mindre end 25% af arealet M : 25-50% af arealet S: Større end 50% af arealet
Kronprins Frederiks Bro	Tidevandszone: Parent Splashzone: Nej	Tidevandszone: Parent Splashzone: 0
Vilsundbroen	Tidevandszone: Parent Splashzone: Ja	Tidevandszone: Parent Splashzone: M
Frederik d. IX's Bro	Tidevandszone: Parent Splashzone: Nej	Tidevandszone: Parent Splashzone: 0
Langelandsbroen	Tidevandszone: Parent Splashzone: Ja	Tidevandszone: Parent Splashzone: L
Svendborgsundbroen	Tidevandszone: Parent Splashzone: Nej	Tidevandszone: Parent Splashzone: 0
Hadsundbroen	Tidevandszone: Ja Splashzone: Nej	Tidevandszone: M Splashzone: 0
Sallingsundbroen	Tidevandszone: Ja Splashzone: Ja	Tidevandszone: L Splashzone: L
Vejlefjordbroen	Tidevandszone: Ja Splashzone: Nej	Tidevandszone: L Splashzone: 0
Kalvebodløbbrøen	Tidevandszone: Ja Splashzone: Nej	Tidevandszone: L Splashzone: 0
Sorterendebrøen	Tidevandszone: Ja Splashzone: Nej	Tidevandszone: L Splashzone: 0

Tabel 6 Korrosionsrisiko vurderet ud fra potentialerne ved hjælp af de korrigerede ASTM-kriterier.

Hvor der er parent, er der ikke udført potentialemålinger.

Tidevandszonen er defineret som kote +/- 0,5 m, splashzonen er defineret som kote +0,5 m til 3 m.

I de fremtidige undersøgelser af kystbroer vil der med fordel kunne foretages flere ophugninger for at skabe et bedre statistisk grundlag for sammenhængen mellem armeringstilstanden, målte potentialer, kloridindholdet og koter.

4.1.5 Karboniseringsbestemmelse

Som forventet er der generelt fundet beskedne karboniseringsdybder (få mm), hvilket skyldes det høje fugtindhold i betonen.

Det vurderes generelt, at karbonisering af betonen ikke har væsentlig indflydelse på nedbrydningen af de danske kystbroer.

4.1.6 Strukturanalyse

Formålet med udførelsen af strukturanalyser på kystbetonerne har været at fastlægge de overordnede materialeparametre, det vil sige vand/cementforhold

og cementtype. Strukturanalyser har derfor overvejende været udført på de ældre kystbroer, hvor oplysninger om betonsammensætningen ikke har været tilgængelige. I flere tilfælde har der dog tillige været udført strukturanalyser af de yngre betoner.

En oversigt over resultater fra strukturanalyserne er givet i Tabel 7.

Bro	Pille nr.	Indviet år	v/c-forhold variation	v/c-forhold middel	Cement-type note 1)	Luft (0-3) note2)	Karbona-tiserings dybde mm
Vilsundbroen	4	1936	0,30-0,60	0,40	PC-fin	1	3
	1	1936	0,30-0,60	0,40	PC-fin	1	3,5
Kong Frederik d. IX's Bro	8.1/5	1962	0,35-0,65	0,50	PC-grov	1	4
	8.1/4	1962	0,35-0,65	0,50	PC-grov	1	1,5
	12.1/1	1962	0,35-0,65	0,50	PC-grov	1	4
	12.1/2	1962	0,35-0,70	0,50	PC-grov	1	10
Langelandsbroen	13Ø	1962		0,50	PC-grov	1	4
	13F	1962		0,35	PC-grov	1	2
Svendborgsundbroen	8P	1966	0,40-0,6	0,50	PC-mellem/ fin	3	2
	8.2	1966	0,40-0,65	0,55	PC-fin	1	0,5
Hadsundbroen	2	1976	0,35-0,50	0,45	PC-grov	2	10
Sallingsundbroen	14N	1978	0,40-0,55	0,45	PC-fin	2	1
	14V	1978	0,40-0,55	0,45	PC-fin	2	0,5
Vejlefjordbroen	8	1980	0,30-0,45	?	Slagge (til kote 2 m)	2	-
	8	1980	0,35-0,60	0,45	PC (fra kote 2 m)	2	3

Tabel 7 Hovedresultaterne fundet ved strukturanalysen.

Note 1): PC=Portland cement, fin=finkornet, mellem=mellemkornet, grov=grovkornet.

Note 2): Luft = relativt luftindhold, hvor 0=ingen, 1=lavt og 3=højt.

Det fremgår af Tabel 7, at vand/cementforholdet for kystbrobetonerne kun falder lidt i perioden 1962-1980. Bemærkelsesværdigt er det, at betonen fra Vilsund har et lavere middel vand/cementforhold (0,40) end de øvrige broer (0,45-0,50). Der ses dog i alle

tilfælde registreringer af store variationer i pastapørøsiteten (udtrykt ved vand/cementforholdet).

Betonerne frem til midten af 60'erne har et lavt luftindhold, hvilket sandsynligvis hænger sammen med, at der ingen luftblanding er sket. Karbonatiseringsdybderne er i alle tilfælde beskedne.

Defektdybde og kloridindtrængning

Begrebet ”defektdybde” er en vurdering af, til hvilken dybde den pågældende beton har overfladerelaterede defekter, se endvidere Bilag 8. De defekter, der typisk er tale om, er revner (pasta- og vedhæftningsrevner), vedhæftningsdefekter, ansamlinger af luftindeslutninger og områder med høj eller stærkt forhøjet kapillarporøsitet, og kun i det omfang disse er lokaliseret umiddelbart ved/under den klorideksponerede betonoverflade.

Ved et større statistisk materiale har det for andre betonkonstruktioner erfaringsmæssigt været muligt at fastlægge en sammenhæng mellem ”defektdybde” og kloridindtrængning.

De aktuelle betoner i de undersøgte broer repræsenterer vidt forskellige miljøer (saltbelastning, koter med videre), aldre, sammensætninger med hensyn til for eksempel cementtype, v/c-forhold og luft. Hertil kommer, at antallet af prøver er stærkt begrænset, typisk 2 per bro. Det statistiske grundlag for kystbroens betoner kan således med fordel udbygges ved fremtidige undersøgelser, således at en sammenhæng mellem ”defektdybde” og kloridindtrængning kan søges etableret. I Bilag 8 er givet en oversigt over en indledende sammenstilling mellem kloridindhold og defektdybde.

4.2 Tilstandsbeskrivelse

I det efterfølgende gives en samlet vurdering af de enkelte broers tilstand på inspektionstidspunktet baseret på de visuelle registreringer sammen med en vurdering af korrosionsrisikoen ud fra de opstillede vurderingskriterier for potentialemålingerne (korrigerede ASTM-kriterier) og et kritisk kloridindhold på 0,1 % Cl⁻ af betonavægt.

4.2.1 Kronprins Frederiks Bro

(Indviet 1936, basiseftersyn 1995)

Alle tre piller er overfladebehandlede og skjuler muligvis mindre revner, udfældninger og overfladedefekter. Pillerne er generelt i god stand, dog ses stedvis umiddelbart over parementet små områder med korroderende armering, hvilket falder sammen med beskedne dækklag i samme områder. Der er konstateret en vandret revne i forbindelse med en reparation. Der er tillige konstateret enkelte formentlig statisk betingede revner med rustudfældninger.

De udførte potentialemålinger (udført fra overkant af parementet) viser risiko for korrosion på den vestlige klappille og lokalt på den østlige klappille. Dækklaget varierer mellem 30 og 50 mm.

De udførte kloridmålinger viser risiko for igangværende korrosion for de to klappiller, hvor dækklaget er under ca. 40 mm. Kloridmålingerne på mellempillen viser beskeden risiko for korrosion.

4.2.2 Vilsundbroen

(Indviet 1936, basiseftersyn 1997)

Den visuelle besigtigelse viser, at broens 5 piller generelt er uden tegn på væsentlige skader. På alle betonfladerne over parement er der påført en tykfilmsoverfladebeskyttelse, som er intakt og med god vedhæftning. Betonen er generelt hård og klingende, dog ikke ved de tidligere udførte reparationer. Der ses få lokale rustfældninger. Pillerne har mange fine, mellemfine og grove revner fra oversiden af parementet til top af pillerne. Flere af disse revner er tidligere repareret.

Kloridprofilerne viser, at orienteringen har væsentlig betydning for kloridindholdet. På de østlige og vestlige sider er der en betydelig risiko for korrosion, mens risikoen er lille på de nordlige og sydlige sider.

EKP-målingerne viser, at der er risiko for korrosion på 3 af siderne. Det skal dog bemærkes, at målingerne kan være influeret af tykfilmsoverfladebeskyttelsen. Ophugninger til armeringen viser ingen væsentlige tegn på korrosion.

Dæklagsmålingerne viser, at minimumsdæklag er ca. 30 mm, mens det gennemsnitlige dæklag er ca. 40-45 mm. Tegningerne angiver 30 mm.

Samlet set er pillerne i god stand med kun få væsentlige skader. Det forventes ikke at der inden for den nærmeste fremtid udvikles flere betydelige skader, dog forventes udviklingen af revner i overfladen forårsaget af alkalikisel-reaktioner at fortsætte i et mindre omfang.

4.2.3 Kong Frederik d. IX's Bro

(Indviet 1962, basiseftersyn 1995, særefeftersyn 1998)

Ud af broens 24 piller er der konstateret kraftig og udbredt korrosion på to piller, nogen korrosion på yderligere to piller og tegn på lokale korrosionsangreb og enkelte mindre afskalninger på enkelte af de resterende piller.

De områder, hvor der er konstateret kraftig korrosion, er samtidig de områder, hvor dæklaget er mindst (mindre end det specificerede minimumsdæklag). Dæklaget er i gennemsnit omkring det specificerede på 50 mm, men der er konstateret stor spredning fra 25 mm til 100 mm. Skaderne er overvejende lokaliseret fra tidevandszonen til kote ca. 3 m (splashzonen).

Klorid i kritiske mængder vurderes overvejende at være trængt ind til armeringen op til kote 2 m. I områder med lavt dæklag og områder med høj pastaporøsitet (v/c forhold varierer mellem 0,35-0,70) vil risikoen for igangværende korrosion være størst.

De målte potentialer indikerer risiko for igangværende korrosion specielt på en af to undersøgte piller. Synlige skader og ophugninger ind til armeringen viser, at korrosion er i gang visse steder, mest umiddelbart over parementet og aftagende opad, men muligvis fortsættende ned bag parementet til under vandlinjen og aftagende derfra til samlingen mellem sænkekassedelene i kote -1,3 m.

4.2.4 Langelandsbroen

(Indviet 1962, basiseftersyn med videre 1998)

Der er konstateret igangværende korrosion på de fleste fundamenter (op til kote 3,0 m) og på enkelte ovenliggende piller (20 piller i alt). Der er parement til kote 1,5 m. Fundamenter og piller er tidligere blevet repareret, og der ses korrosionsskader i tilknytning til disse reparationer. Skaderne er hovedsageligt konstateret på øst- og sydøstvendte flader af fundamenterne, og på østvendte flader af pillerne. Flere af reparationerne og mindre områder af den oprindelige konstruktionsbeton er delaminerede.

Målinger af dæklagene er i middel større end det specificerede minimumsdæklag.

Potentialemålingerne viser, at armeringen generelt er intakt undtagen i forbindelse med reparationer, hvor der flere steder er igangværende korrosion med synlige skader til følge.

Kloridindholdet i den laveste målte kote (1,6 m) overstiger 0,1% Cl⁻ af betonvægten i armeringsniveau. I kote 3,1 m overstiger kloridindholdet stedvist 0,1% Cl⁻ af betonvægten i armeringsniveau. Variationer i kloridindholdet indikerer en varierende betonkvalitet.

4.2.5 Siø Sundbroen

(Indviet 1964, basiseftersyn 1996)

Der er på broens 19 piller konstateret lokale korrosionsangreb (revner og udfældninger af korrosionsprodukter) på samtlige fundamenter (parement til kote 1,0 m, fundament til kote 1,5 m), lokale korrosionsangreb nær pilletop (under brodæk) samt udfældning af korrosionsprodukter i forbindelse med tidligere reparationer.

Klorid i kritisk koncentration er trængt ind til armeringen i fundamenterne men ej i pillerne, hvor disse er armeret med skinner (dæklag over 100 mm). For fundamenterne samt toppen af pillerne (normalt armeret) er en videre skadeudvikling sandsynlig.

Pillerne har lodrette revner med størst revnevidde nederst, hvilket må forventes at øge kloridindtrængningen. Revnebilledet tyder på, at der enten er tale om belastningsrevner eller svindrevner, der begge vil kunne fremmes af, at pillerne generelt kun er armeret lodret.

4.2.6 Svendborgsundbroen

(Indviet 1966, basiseftersyn 1996)

Der er konstateret korrosionsangreb på 8 ud af broens 22 havvandspåvirkede piller overvejende omkring kote 3,0 m, hvor der konstruktionsmæssigt er et knækpunkt. En stor del af korrosionsangrebene ses i forbindelse med tidligere reparationer.

De målte middeldæklag er 30-40 mm og er i stort set alle tilfælde over det specificerede dæklag på 30 mm.

Kloridindholdet i armeringsniveau nærmer sig flere steder det kritiske kloridindhold, og hvor dæklaget er i den nedre ende, overstiger indholdet muligvis det kritiske kloridindhold.

De udførte EKP-målinger indikerer generelt kun beskeden risiko for korrosion. I et enkelt område, hvor der er konstateret en revne, viser målingerne, at der er risiko for korrosion, og en ophugning viser på stedet igangværende korrosion i form af grubetæring.

Der er ikke udtaget prøver til kloridbestemmelse og foretaget ophugninger i kote 3,0 m, da vejrforholdene på undersøgelsestidspunktet ikke tillod dette. Rustudfældninger viser dog, at der er igangværende korrosion i området, muligvis på grund af et beskedent dæklag fremkommet ved at armeringsjernene på konstruktionstidspunktet er bukket lokalt.

4.2.7 Hadsundbroen (Indviet 1976, basisundersøgt 1996)

I tidevandszonen er der på de fleste piller (7 i alt) udvaskning af mørtel, hvorved tilslag er blotlagt i de yderste mm. Ligeledes er der spor efter isskruninger. På de buede pilleender er der nogle få afskalninger specielt ved vandspejlet. Skader er mest udbredte på de østlige sider af pillerne. Der er udført undersøgelser på to piller, en med relativt mange skader i form af afskalninger og rustudfældninger og en pille generelt uden skader.

Måling af kloridindholdet i armeringsniveau viste ved undersøgelserne i 1996 risiko for korrosion på armeringsjern fra kote 0 m til 0,5 m (tidevandszonen). Over kote 0,5 m (splashzonen) var kloridindholdet under det kritiske indhold i armeringsniveau.

EKP-målingerne viste usikker korrosionstilstand i såvel tidevands- som splashzonen med størst sandsynlighed for korrosion i tidevandszonen. Gradienterne på potentialemålingerne er relativt små, hvilket indikerer en begrænset korrosionsaktivitet. Ophugninger til armeringen i tidevandszonen viste kraftig overfladerust og/eller grubetæring. Over tidevandszonen viste ophugningerne kun let overfladerust eller ingen tegn på korrosion. Samlet var der god overensstemmelse mellem det visuelle indtryk, EKP-målingerne og ophugningerne.

4.2.8 Sallingsundbroen (Indviet 1978, basiseftersyn 1996)

Den visuelle besigtigelse viser, at broens 18 piller generelt fremstår uden tegn på væsentlige skader. Betonen er generelt hård og klingende, dog ikke ved de tidligere udførte reparationer. På og over isbryderskal er der observeret få mellemfne, lodrette revner med tørre røde og hvide udfældninger.

Kloridprofilerne viser, at der er stor risiko for korrosion fra vandoverfladen og op til ca. kote 1,0 m.

EKP-målingerne viser, at der generelt er risiko for korrosion, specielt for to ud af tre undersøgte piller og specielt ved revnerne. Dette stemmer med det visuelle skadebillede. Ophugninger til armeringen viser primært overfladekorrosion, dog grubetæring ved revnerne.

Dæklagsmålingerne viser, at minimumsdæklag er ca. 30 mm, mens det gennemsnitlige dæklag er ca. 40-45 mm. Tegningerne angiver 30 mm dæklag for isbryderskallen, (hvor undersøgelserne er foretaget).

Samlet set er pillerne i god stand med kun få væsentlige skader. Det kan dog indenfor den nærmeste fremtid forventes, at der udvikles flere betydelige skader, primært omkring revner og tidligere udførte reparationer, såfremt der ikke gøres tiltag for at forhindre det.

4.2.9 Vejlefjordbroen (Indviet 1980, basiseftersyn 1997)

Der er ved den visuelle besigtigelse generelt ikke konstateret igangværende korrosion. Der ses enkelte afskalninger med frilagt armering samt nogle reparationer af klampshuller med udsivende korrosionsprodukter.

Betonen under kote 2,0 m (slaggebeton) er eroderet i varierende grad, specielt er østvendte flader flere steder kraftigt eroderet (op til 10-20 mm fra overfladen).

EKP-målingerne viser meget lave potentialer på den nederste halve meter af pillerne omkring havniveau. Potentialeniveauet er her generelt lavere end -550 mV (grænse under hvilken korrosion regnes for sandsynlig). Ophugninger har dog vist, at der ikke er igangværende korrosion, og de lave potentialer skyldes antageligt den ringe iltadgang til armeringen (fugtmættet beton).

De specificerede dæklag på henholdsvis 50 mm og 30 mm under og over kote 2,0 m er generelt overholdt.

Med en enkelt undtagelse viser kloridprofilerne, at kloridkoncentrationen i armeringsniveau ikke overstiger et kritisk niveau (sat til 0,10% Cl⁻ af betonvægten).

Konklusionen er, at der på trods af de lave, målte potentialer ikke er igangværende korrosion, og at en eventuel skadeudvikling vil foregå langsomt, forudsat at overfladeerosionen ikke fortsætter i væsentlig grad.

4.2.10 Kalvebodløbbrøen

(Indviet 1984, basiseftersyn 1996)

Den visuelle besigtigelse viser, at alle 4 piller eksponeret direkte for vand har omtrent ens tilstand, og at betonen er hård og klingende. Omkring klampshuller og mandehuller er der få rustudfældninger.

Kloridprofiler viser, at risikoen for korrosion er lille.

EKP-målinger viser, at der er risiko for korrosion fra vandoverfladen til kote 0,3 m. Over kote 0,75 m er risikoen for korrosion minimal ifølge EKP-målingerne. Ophugninger til armeringen viser ingen tegn på korrosion.

Dæklagsmålingerne viser, at der er en mindre forskel på størrelsen af det målte dæklag mellem de to undersøgte piller. Det målte minimumsdæklag er ca. 32 mm, mens det målte gennemsnitlige dæklag er ca. 35 mm. Tegningerne angiver 40 mm.

Samlet set er pillerne i god stand uden væsentlige skader. Det forventes ikke, at der inden for den nærmeste fremtid udvikles betydelige skader.

4.2.11 Sorterendebrøen

(Indviet 1985, basiseftersyn 1996)

Den visuelle besigtigelse viser, at alle 4 piller eksponeret direkte for vand har omtrent ens tilstand, og at betonen er hård og klingende undtagen i vandoverfladen, hvor en hul lyd kan indikere delaminerede områder. Omkring klampshuller og mandehuller er der få rustudfældninger og omkring vandoverfladen få afskalninger samt lettere udvaskninger af overfladen.

Kloridprofiler viser, at risikoen for korrosion inden for en overskuelig fremtid overalt er minimal. EKP-målinger viser, at der er risiko for korrosion fra vandoverfladen til kote 0,25 m. Over kote 0,25 m er risikoen minimal. Ophugninger til armeringen viser ingen tegn på korrosion.

Dæklagsmålingerne viser, at der er en mindre forskel på størrelsen af det målte dæklag mellem de to undersøgte piller. Det målte minimumsdæklag er ca. 32 mm, mens gennemsnitligt dæklag er lidt over 35 mm. Tegningerne angiver 40 mm.

Samlet set er pillerne i god stand uden væsentlige skader. Det forventes ikke, at der inden for den nærmeste fremtid udvikles betydelige skader.

5 Fremskrivningsmodeller

Den fremtidige risiko for korrosion på armeringen i de undersøgte piller er vurderet ud fra en fremskrivning af de målte kloridprofiler. Der er foretaget en ”ren” vurdering af kloriddata uden hensyn til pillernes og armeringens aktuelle tilstande. Afsnittet tjener som input sammen med de øvrige måleresultater til de endelige vurderinger i afsnit 6.

Vurderingerne baseres på fremskrivning af de målte kloridprofiler i kloridindtrængningsmodeller kombineret med forskellige værdier af ”kritisk kloridindhold” samt variationer på dæklaget.

Fremskrivningerne er udført med baggrund i Fick’s 2. lov om diffusion. Fick’s 2. lov giver erfaringsmæssigt konservative skøn for, hvornår der er risiko for korrosion, idet kloridindtrængningshastigheden falder med betonens alder.

Kloridindtrængningshastigheden falder dog mest i betonens unge år. Hertil kommer, at variationer i betonhomogenitet formentlig har en større betydning for den beregnede tid til korrosionsstart end en faldende kloridindtrængningshastighed over tid, Ref. 57.

Alle de målte kloridprofiler er gennemgået, og der er foretaget en manuel udvælgelse af hvilke profiler der skal medtages i beregningerne samt, hvilke punkter i profilerne, der skal medtages i beregningerne. Sorteringen og beregningerne er foretaget ud fra følgende kriterier:

- Det yderste kloridindhold ved detaljerede kloridprofiler er ikke inkluderet i beregningerne, idet de kan være påvirket af overfladefænomener som karbonatisering, udvaskning, varierende pastaindhold med videre.
- Kloridprofiler, der afviger fra en diffusionsindtrængningsmodel, er frasorteret. Dog er enkelte punkter fjernet fra nogle profiler for at opnå et generelt faldende profil.
- Sorteringen er foretaget før fitning af diffusionsparametrene er udført. Det vil sige, profiler er ikke senere sorteret fra på grund af atypiske værdier af fitningsparametre.

På denne måde er der fremkommet en række kloridprofiler, der er medtaget i den videre analyse.

En stor del af kloridprofilerne er bestemt ud fra udboret støv. Dette vil give en større usikkerhed på bestemmelsen af kloridindholdet og hermed de beregnede diffusionsparametre i forhold til profiler fundet ud fra borekerner. Inhomogene prøvningsfelter, det vil sige variationer i kloridindhold som følge af variationer i pilleorientering, overfladedefekter og kote, vil dog også have en stor indflydelse på bestemmelsen af diffusionsparametrene. Der er i fremskrivningen ikke skelnet mellem

levetider beregnet på baggrund af kloridprofiler bestemt på borestøv og kloridprofiler bestemt på profilfræsestøv.

Definition af levetider

Der kan principielt opstilles to typer af fremskrivningsmodeller til vurdering af restlevetiden for armerede betonkonstruktioner. Estimering af tidspunktet for initiering af korrosion eller estimering af tidspunktet for initiering af korrosion (initieringsfasen) plus den ekstra tid som kræves, indtil der er sket en fastlagt nedbrydning af armeringen eller betonen (propageringsfasen). Dette kan samlet formuleres som:

$$T_{\text{levetid}} = T_{\text{initiering}} + T_{\text{skade}}$$

hvor levetiden T_{levetid} er opskrevet som summen af tiden til initiering $T_{\text{initiering}}$ tillagt tiden fra initiering til der er sket en given skade. $T_{\text{initiering}}$ afhænger af en række faktorer, blandt andet kloridpåvirkning, betontype, v/c-forhold, dæklag og så videre. T_{skade} afhænger af, hvilket skadeniveau der defineres som acceptgrænse. Dette kan være defineret som et tilbageværende armeringsareal, svigt af konstruktionsdel eller som det tidspunkt, hvor reparation er nødvendig på grund af betydelig skade på beton og armering. Det kan også være tidspunktet, hvor et særeftersyn er påkrævet.

Levetiden er i det efterfølgende defineret som initieringstiden til korrosion. Denne tilnærmelse gøres, idet propageringstiden sædvanligvis er kort i forhold til initieringstiden.

Piller på kystbroer kan opdeles i 4 zoner:

- a) Området under laveste tidevandsniveau som stort set altid er under vand (under kote ca. -0,5 m).
- b) Området mellem lav- og højvande ("tidevandszonen", kote -0,5 m til 0,5 m)
- c) "Splashzonen" er defineret som området, der ofte påvirkes direkte af havvand (0,5 m til 3,0 m).
- d) Området over "splashzonen", "sprayzonen" som primært påvirkes af luftbårne klorider (over kote 3,0 m).

Områderne b) og c) kan ofte slås sammen i en slags "udvidet splashzone" og er ligeledes det område, som typisk har den korteste levetid. I det følgende fokuseres udelukket på den "udvidede splashzone".

5.1 Valg af analysegrundlag

I det følgende specificeres, hvilket datagrundlag der for hver enkel bro anvendes i den følgende analyse:

- Det kritiske kloridindhold sættes til 0,10% Cl⁻ af betonvægten, jævnfør afsnit 4.1.3. Endvidere udføres analyserne også for et kritisk kloridindhold på 0,15% Cl⁻ af betonvægten, idet 0,10% Cl⁻ muligvis er et konservativt skøn for det kritiske kloridindhold i tidevandszonen.
- I analyserne inddrages kun kloridprofiler baseret på bestemmelse af det syreopløselige kloridindhold, (de vandopløselige kloridprofiler analyseres ikke).
- De to forskellige kloridniveauer, som anvendes ved fremskrivningen kombineres med tre forskellige dæklag (et vægtet middel dæklag +/- 5 mm, se endvidere Bilag 9).

For Sallingsundbroen og Svendborgsundbroen er der udtaget støvprøver med nogle få års mellemrum, men dette interval er ikke langt nok til at kunne se en udvikling i kloridprofiler, og endvidere er undersøgelserne ikke foretaget de samme steder. Profiler fra begge undersøgelsestidspunkter indgår derfor på lige fod i den samlede analyse.

5.2 Modeller

5.2.1 Generelt

Vurderingerne har indtil dette afsnit fokuseret på pillernes øjeblikkelige korrosionsmæssige tilstand. Ved at fremskrive kloridprofilerne er det målet, at behovet for nye basiseftersyn og særefeftersyn kan vurderes.

Der findes to former for mekanismer der beskriver kloridindtrængningen, og begge er baseret på tilstedeværelsen af fugt i betonen. Indenfor de to typer af mekanismer findes flere principper for, hvorledes kloriderne trænger ind i betonen. Nedenfor er udvalgte listet, se i øvrigt Ref. 51 til 55.

1. Ionvandring:

- Diffusion: Vandring af frie kloridioner på basis af koncentrationsgradienter. Gælder teoretisk for vandmættede (typisk neddykkede) konstruktioner.
- Migration (elektrodiffusion): Vandring af frie kloridioner på grund af spændingsforskelle.

2. Vandtransport

- Eksternt tryk: Kloridindtrængningen foregår på grund af et eksternt vandtryk.
- Kapillarvirkning: Kloridindtrængningen skyldes undertryk i kapillarporerne.

Der findes en række modeller, som i en eller anden form er i stand til at beskrive og fremskrive kloriddata, hvoraf udvalgte er listet nedenfor:

1. Perkolation: Vandtransportmodel. Kloridindtrængningen foregår igennem et sammenhængende poresystem, primært kapillarporer, hvor kloridindtrængningen følger vandindtrængningen.
2. Fick's 2. lov: Diffusionsmodel. Tager ikke hensyn til kloridbinding og forudsætter konstante diffusionsparametre.
3. Afledte af Fick's 2. lov:
 - HETEK modellen
 - Modeller, der indarbejder afhængighed af betontype, v/c-forhold, kloridbinding, tidsafhængighed af diffusionsparametre med videre

5.2.2 Fick's 2. lov

Modellen baserer sig på kloridindtrængning ved diffusion og forudsætter konstant overfladekoncentration (C_s) og diffusionskoefficient (D). Kloridindtrængningen beregnes ved hjælp af Fick's 2. lov. Funktionsudtrykket kan ses blandt andet i Ref. 51.

Fremskrivning

For hver bro er det initiale kloridindhold i betonen (C_0) fastsat til en konstant værdi, hvilket fremgår af Bilag 9.2. C_0 er bestemt ved at sammenligne alle de medtagne kloridprofiler for hver bro og skønne i hvilken dybde, de har vandret tangent. Der anvendes kun én værdi af C_0 for hver bro.

For hvert af de udvalgte kloridprofiler er der derefter foretaget en bestemmelse af de 2 diffusionsparametre (D og C_s) ved brug af Fick's 2. lov. Dette foregår ved at tilpasse de 2 diffusionsparametre til de målte værdier af kloridindholdet i forskellige dybder, det vil sige en fastlæggelse af parametrene D og C_s så fejlen mellem de målte kloridværdier og kloridværdier bestemt efter Fick's 2. lov er mindst mulig.

Dernæst foretages en fremskrivning, hvor de fundne værdier af D og C_s bruges til at bestemme initieringstidspunktet, det vil sige, tidspunktet svarende til at kloridindholdet når en kritisk værdi i armeringsdybden.

Analyseresultaterne for den enkelte bro fremgår af Bilag 9 (B9.3), hvor det ligeledes fremgår, hvilke kloridprofiler der er medtaget i analysen.

Vurdering af resultater

Baseret alene på resultaterne af analyserne med Fick's 2. lov vurderes for hver bro risikoen for initiering af korrosion på armeringen. I vurderingerne er følsomheden på dæklaget og det kritiske kloridniveau inddraget ved et subjektivt skøn. Følgende skala benyttes:

- **Ingen** risiko for korrosionsinitiering.
- **Lille** risiko for korrosionsinitiering.
- **Middel** risiko for korrosionsinitiering.
- **Stor** risiko for korrosionsinitiering.

Vurderingerne fremgår af Bilag 9 og er for hver bro baseret på det procentvise antal af resultater, der ligger i de enkelte intervaller (tidevandszonen, splashzonen og sprayzonen). Ved vurderingen af korrosionsrisiko for hver enkelt bro og for hver enkelt område er der taget udgangspunkt i de foretagne fremskrivninger, se bilag 9. Der er ikke foretaget en fremskrivning ud fra alle de udtagne kloridprofiler, jævnfør kriterierne i afsnit 5.1. Alle kloridprofiler er dog medtaget ved vurderingen af, om der er risiko for korrosion. Det vil sige, at profiler med et konstant enten højt eller lavt kloridindhold indgår i vurderingen sammen med de foretagne fremskrivninger. Det skal bemærkes, at dette er en meget grov inddeling af resultaterne, og det betyder at selv ved en samlet lille risiko for korrosion på et vilkårligt tidspunkt vil der være risiko for korrosion lokalt på broernes piller og omvendt.

HETEK-modellen, se Ref. 53, er et alternativ til fremskrivning af kloridprofiler og dermed til estimering af initieringstider (levetider) end Fick's 2. lov anvendt her. HETEK-modellen tager dels hensyn til, at overkoncentrationen og diffusionskoefficienten er tidsafhængige dels til sammensætningen af betonen. Desværre er der for størstedelen af broerne kun kloridprofiler fra et enkelt årstal, og betonsammensætningen er heller ikke kendt for alle broerne. Denne manglende information betyder, at fremskrivningerne fra HETEK-modellen - hvor man kun har kloridmålinger fra et enkelt årstal og har været nødt til at give et estimat på nogle af parametrene i modellen - ikke får betydelige afvigelser i forhold til fremskrivninger foretaget ud fra Fick's 2. lov.

På Farøbroerne er der i løbet af 10 år målt kloridprofiler. Erfaringen herfra viser at en eventuel formindskelse af diffusionskoefficienten og overfladekoncentrationen med tiden er mindre end den variation, der er som følge af forskelle i betonsammensætninger og/eller variationer i prøveplaceringen, Ref. 57. En antagelse om at diffusionskoefficienten og overfladekoncentrationen er konstante i tiden, giver således skønsmæssigt ikke anledning til en væsentlig fejl vurdering af tiden til korrosionsstart, med den alder de undersøgte kystbroer har på undersøgelsestidspunktet.

Når den næste række basiseftersyn (alternativt særeftersyn) er foretaget for kystbroerne vil HETEK-modellen kunne indrages i større omfang til brug i fremskrivningerne.

5.3 Sammenfatning

Tabel 8 viser risikoen for korrosionsinitiering i dag, inden for 10 år og inden for 20 år for de enkelte broer. Risikoen er taget som et middel af risikoen for de enkelte profiler i tidevandszonen, splashzonen og sprayzonen og har taget udgangspunkt i den matematiske fremskrivning af de valgte kloridprofiler sammenholdt med de kloridprofiler, der ikke er indeholdt i analysen. Den samlede risiko er baseret på den største risiko inden for tidevandszonen, splashzonen og sprayzonen.

Bro	Korrosionsrisiko			Faktisk observeret korrosionstilstand
	i dag	inden for 10 år	inden for 20 år	
Kronprins Frederiks bro	Middel	Middel	Middel	Visuelt få korrosionsskader. Ingen ophugninger
Vilsundbroen	Stor	Stor	Stor	Overfladerust
Kong Frederik d. IX's bro	Middel	Middel	Middel	Grubetæring
Langelandsbroen	Stor	Stor	Stor	Grubetæring
Siø Sundbroen	(Stor)	(Stor)	(Stor)	Grubetæring i fundamenter og nær pille top
note 1)	Ingen	Ingen	Ingen	Ingen tæring hvor skinne armering er placeret
Svendborgsundbroen note 2)	Middel	Middel	Stor	Grubetæring
Hadsundbroen	Stor	Stor	Stor	Grubetæring
Sallingsundbroen	Middel	Middel	Middel	Grubetæring
Vejlefjordbroen	Ingen	Ingen	Lille	Overfladekorrosion
Kalvebodløb broen	Ingen	Ingen	Lille	Intakt
Sorterende broen	Ingen	Ingen	Lille	Intakt

Tabel 8 Korrosionsrisiko vurderet alene ud fra fremskrevne kloridprofiler fra undersøgelsestidspunktet.

Note 1) At resultaterne angiver, at der ingen risiko er for korrosion, skyldes, at beregningerne er udført med dæklag på 100 mm svarende til dybden af skinnearmeringen. Fundamentet og top af pillerne er dog normalt armeret med et dæklag på 25 mm, hvilket beregningsmæssigt vil give ”stor” risiko for korrosion i dag og inden for såvel 10 som 20 år.

Note 2) At resultaterne angiver, at der er en middel risiko for korrosion, samtidig med at igangværende korrosion er observeret, skyldes, at prøver til kloridbestemmelse er udtaget udenfor områder, hvor igangværende korrosion er observeret, idet det på grund af vejrforholdene ikke var muligt at udtage prøver, hvor korrosion blev observeret.

6 Prioritering af fremtidige tiltag

Der er udført en prioritering af kystbroerne med hensyn til fremtidigt undersøgelsestidspunkt, og om der bør udføres et teknisk/økonomisk særeftersyn eller et nyt basiseftersyn. Prioriteringen er foretaget på baggrund af kystbroernes aktuelle korrosionsmæssige tilstand samt forventet udvikling i kloridindtrængning inden for en 10-årig periode baseret på fremskrivningerne, jævnfør afsnit 5.

Prioriteringen fremgår af Tabel 10 og omfatter kun de broer, som Vejdirektoratet varetager driften af i dag.

Vurderingen af korrosionsrisiko er baseret på den aktuelle kloridindtrængning i forhold til broens alder kombineret med de faktiske målte dæklag, det kritiske kloridindhold samt en fremskrivning af kloridindtrængningen.

Broerne, der er udmeldt til teknisk/økonomisk særeftersyn, skal selvfølgelig efter eventuelt reparation efterses med passende intervaller og kan, efter at reparationstiltag er udført, inddrages i eftersynet af de øvrige kystbroer.

Bro	Eftersyns- år	Korrosionsrisiko		Anbefalet aktion	Priori- tering
		På eftersyns- tidspunktet	Inden for 10 år		
Vilsundbroen	1997	Middel	Stor	Basisftersyn år 2002	2
Kong Frederik d. IX's Bro	1995, 1998	Stor	-	Særeftersyn af vejbroen udført i 1998	-
Langlandsbroen	1998	Stor	-	Teknisk økonomisk særeftersyn år 2000	1
Siø Sundbroen	1996	Stor	-	Teknisk økonomisk særeftersyn år 2000	1
Svendborgsundbroen	1996	Stor	-	Teknisk økonomisk særeftersyn år 2000	1
Ny Lillebæltsbro	1996	Ingen	Ingen	Basiseftersyn i perioden år 2001-2006	3
Sallingsundbroen	1996	Middel	Middel	Basiseftersyn i perioden år 2001-2006	2
Vejlefjordbroen	1997	Ingen	Ingen	Basiseftersyn i perioden år 2002-2007	3
Kalvebodløb broen	1996	Ingen	Lille	Basiseftersyn i perioden år 2001-2006	3
Sorterendebroen	1996	Lille	Ingen	Basiseftersyn i perioden år 2001-2006	3
Farøbroerne, note 1)	-	-	-	Teknisk/økonomisk særeftersyn udført i 1997	-

Note 1) Ø=øst, V=vest, N=nord, S=syd

Note 2) I hht. Ref. 1 bør der udføres målinger på 25% af brosjølerne. Hensynet til de maksimale undersøgelsesomkostninger og erfaringerne fra de øvrige eftersyn gør at det for de fleste broer vil være tilstrækkeligt at undersøge to bro piller, omfanget bør dog afstemmes i det enkelte tilfælde.

Tabel 10 Prioritering af Vejdirektoratets kystbroer.

Korrosionsrisikoen er angivet med "Ingen", "Lille", "Middel" eller "Stor". Vurderingen tager højde for de målte kloridindhold kombineret med den faktiske korrosionstilstand på eftersynstidspunktet. Korrosionsrisikoen inden for 10 år tager udgangspunkt i de fremskrevne kloridprofiler, jævnt før afsnit 5.

Note 1. Særskilt opfølgingsprogram pågår for disse broer

7 Forslag til fremtidigt undersøgelsesprogram

7.1 Forslag til fremtidigt undersøgelsesprogram

I forbindelse med basiseftersynet af de enkelte kystbroer er der jævnfør Tabel 10 anbefalet et særeftersyn for fire af broerne, hvoraf et særeftersyn af Kong Frederik d. IX's vejbro allerede er udført. For de øvrige broer anbefales det at udføre basiseftersyn i de angivne tidsrum. Basiseftersynene bør herefter udføres med 5-10 års mellemrum. Basiseftersynet modificeres i henhold til de ved projektet indhøstede erfaringer såvel generelt for broerne som for den enkelte bro.

Generelle retningslinier for udførelse af særeftersyn er angivet i "Eftersyn af bygværker" Ref. 28. Undersøgelsesprogrammet for særeftersynet skal tilpasses den enkelte bro. Det anbefales, at retningslinierne for undersøgelsesmetoderne, herunder prøveudtagningsmetode og -omfang, der angives for det modificerede basiseftersyn, indarbejdes i særeftersynet. Andre undersøgelser end de i basiseftersynet angivne kan være aktuelle.

Undersøgelsesomfanget for fremtidige basiseftersyn fremgår af Tabel 11 med tilhørende kommentarer. Ud over basiseftersynet er der undersøgelser, der anbefales udført af hensyn til den generelle videnindsamling. Disse undersøgelser omfatter:

1. Verifikation af kloridindholdets afhængighed af koten.
2. Undersøgelse af kloridindholdets variation som funktion af pilleorienteringen.
3. Undersøgelser af sammenhængen mellem defektdybde og kloridindtrængning.
4. Undersøgelser af det vandopløselige kloridindhold.

Ved kortlægning af såvel punkt 1) som 2) forventes prøveomfanget på længere sigt at kunne formindskes, idet undersøgelserne naturligt vil koncentrere sig om de kritiske områder.

Vurdering af resultaterne ved efterfølgende undersøgelser bør udføres i henhold til vurderingskriterierne opsat i afsnit 4. Vurderingskriterierne bør revurderes efterhånden som datagrundlaget bliver mere omfattende og systematiseret.

Undersøgelse	Metode se endvidere Bilag 3	Omfang		
		Orientering note 1)	Kote [m]	Antal piller
1. Tilstands- registrering	Visuel besigtigelse, registrering af skadetyper og omfang	Alle sider	Fra vandoverfladen til pilletop	Alle
2. Dæklag	Måling med covermeter kalibrering mod ophugninger	Jævnfør punkt 3	Jævnfør punkt 3	2
3. Armeringstilstand	Potentialemåling inkl. modstandsmåling og ophugning	Ø, V	Fundament, pille Feltstørrelse: Min. 3 x 2 m, Maskevidde: 0,25 m Ophugninger: Min. 2 pr. felt	2 Note 2)
4. Kloridindhold Borekerner - profilfræsning eller støvprøver	I henhold til DS 423.28 RCT RCTW	N, S, Ø, V samt tilpasset den enkelte bro	0-2 m, afhængig af broen herunder om der er parement. Støvprøver pr. 0,5 m	2 Note 2)
5. Karbonatiserings- dybde	I henhold til TI-B 35	Jævnfør punkt 4	Jævnfør punkt 4	2
6. Betonsammen- sætning	Strukturanalyse på Ø 75 mm kerner (eller Ø 100 mm ved samtidig bestemmelse af kloridindholdet	Ø	1,5; 2,5	1

Note 1) Ø=øst, V=Vest, N=nord, S=syd

Note 2) I hht. Ref. 1 bør der udføres målinger på 25% af broøjlerne. Hensynet til de maksimale undersøgelsesomkostninger og erfaringerne fra de øvrige eftersyn gør, at det for de fleste broer vil være tilstrækkeligt at undersøge to bropiller, omfanget bør dog afstemmes i det enkelte tilfælde.

Tabel 11 Forslag til undersøgelsesomfang ved fremtidige basiseftersyn.

7.2 Visuelle registreringer

Den visuelle besigtigelse udføres for samtlige havvandspåvirkede piller. De registrerede skader indtegnes på skitser af pillerne. Skadegrad og -omfang noteres i henhold til beskrivelsen i Bilag B4.1. Ved besigtigelsen lægges der vægt på inspektion af parementsfugerne med hensyn til porøsitet, revner, udludning samt udfældning af korrosionsprodukter.

7.3 Dæklagsmålinger

Dæklagsmåling er allerede udført på flere felter på flere af broerne. Hvor undersøgelserne udføres på de samme piller i de samme felter, kan dæklagsmålingerne undlades, idet de tidligere målinger så anvendes. Der bør dog udføres dæklagsmåling i forbindelse med ophugninger.

7.4 Potentialemålinger

Der kan anvendes et andet udstyr end det i tabellen angivne, dog er det en forudsætning for vurderingen af resultaterne, at det pågældende udstyr kan måle den elektriske modstand.

Potentialemålingerne skal altid kalibreres mod ophugninger til registrering af armeringens aktuelle korrosionsmæssige tilstand. Ophugningerne bør placeres, dels hvor der forventes korrosion (ved mest negative potentialeverdier og største gradienter kombineret med lave modstande), dels hvor korrosionsrisikoen er usikker. Ophugningerne er også påkrævet for vurdering af det kritiske kloridindhold. Såfremt der ikke observeres korrosion af armeringen i det målte område med størst risiko for korrosion, kan antallet af ophugninger begrænses, alternativt udføres en ophugning ved område med mindre risiko for korrosion etc.

Korrosionshastighedsmåling kan blive relevant. Disse er ikke medtaget ved de allerede udførte eftersyn, hvilket bunder i, at udstyret på nuværende tidspunkt betragtes som værende på udviklingsstadiet, og at undersøgelserne er bekostelige.

7.5 Prøveudtagning og kloridindhold

Ved anvendelse af RCT-test til kloridanalyse skal der måles efter min. 24 timers ekstraktionstid.

Det anbefales at fortsætte med bestemmelse af de vandopløselige klorider på udvalgte prøver. Analysen udføres i henhold til den nyeste brugermanual for RCTW, hvor prøverne filtreres efter 1 minut og ved samtidig bestemmelse af pH-værdien af den pågældende prøve. Herved fås sammenlignelige resultater med hensyn til ekstraktionstider.

Undersøgelser udført under Kystbroprojektet har vist, at prøveudtagningsmetoden sandsynligvis har afgørende indflydelse på størrelsen af det målte kloridindhold. Det har ikke kunnet dokumenteres, i hvilket omfang forskellen mellem størrelsen af kloridindholdet bestemt ved støv og kerneprøver skal tilskrives udtagningsmetoden på den ene side og variationer i betonkvalitet fra sted til sted på den anden side. Det foreslås, at der udtages 3 sæt bestående af 1 borekerne Ø100 mm sammen med 3 Ø20 mm borehuller med en indbyrdes vandret afstand på 1 m.

Kernerne profilfræses til minimum 30 mm's dybde. Yderligere 2 dybder af 15 mm saves og knuses. Fræsedybden tilpasses i alle tilfælde den aktuelle indtrængningsdybde. Der udtages støvprøver i 0-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, ... mm dybder.

I forbindelse med fremtidige fremskrivninger bør det overvejes at anvende andre kloridindtrængningsmodeller end Fick's 2. lov, herunder HETEK-modellen, til vurdering af deres anvendelighed til fremskrivning af kloridprofiler i takt med, at kloridprofiler med års intervaller bestemmes.

Omfang:

I forbindelse med ophugning i potentialefelterne skal der, inden ophugningen udføres, udtages støvprøver umiddelbart over armeringen, der skal blotlægges. Ud fra kloridindholdet og armeringens korrosionsmæssige tilstand, kan det kritiske kloridindhold søges indkredset.

Det foreslås endvidere, at støvprøver udtages i parementsfuger. Det anbefales, at der for broer med parement nedtages en parementssten (omfang er begrænset, idet det er bekosteligt). Der udtages 2 borekerner Ø75 mm af den bagvedliggende beton, således at borekernen indeholder konstruktionsbetonen.

7.6 Karbonatiseringsmålinger

Som det er set ved basiseftersynene er karbonatiseringsdybden generelt meget beskeden. Det anbefales dog fortsat at udføre karbonatiseringstest i forbindelse med ophugningerne, idet kloridfronten vil rykke med karbonatiseringsfronten, og idet det er en simpel og i praksis omkostningsfri undersøgelse.

7.7 Betonsammensætning

Der har ved projektet vist sig et behov for at kende den faktiske betonsammensætning. For enkelte af broerne er der allerede udført en strukturanalyse.

Det vil dog have videnskabelig interesse at udbygge kendskabet til sammenhængen mellem "defektdybde" og kloridindhold, jævnfør afsnit 4 og Bilag 8. Analyserne foreslås udført på de 3 borekerner nævnt under afsnit 7.6.

8 Referenceliste

1. Vejdirektoratet. Tilstandsvurdering af kystbroer. Vurderingsrapport. 20.12.1995. RAMBØLL og COWI.
2. COWI og RAMBØLL-note. Tilstandskontrol af kystbroer, supplerende undersøgelser. 15 april 1998.
3. Vejdirektoratet. Basiseftersyn Bro 142-0002 Kronprins Frederiks Bro. Vurderingsrapport. December 1995. COWI og RAMBØLL.
4. Vejdirektoratet. Basiseftersyn Bro Nr. 445-0016 Vilsundbroen. Vurderingsrapport. December 1997. RAMBØLL.
5. Vejdirektoratet. Bro 467-0011 Aggersundbroen. Katodisk beskyttelse af strømpiller. December 1989. COWIconsult.
6. Vejdirektoratet. Basiseftersyn Bro 132-0006 Kong Frederik d. IX's Bro. Vurderingsrapport. December 1995. RAMBØLL og COWI.
7. Vejdirektoratet. Bro 132-0006 Kong Frederik d. IX's Bro, pille 8 Nord og 12 Nord. Teknisk og økonomisk særeftersyn. December 1998. COWI.
8. Vejdirektoratet. Basiseftersyn Bro 206-0003 Langelandsbroen. Vurderingsrapport. december 1998. COWI.
9. Vejdirektoratet. Basiseftersyn 206-0002 Siø Sundbroen. Vurderingsrapport. December 1996. COWI.
10. Vejdirektoratet. Basiseftersyn Bro 205-0020 Svendborgsundbroen. Vurderingsrapport. November 1996. COWI.
11. Vejdirektoratet. Tilstandsvurdering af kystbroer. Supplerende undersøgelser. Bro nr. 205-020 Svendborgsundbroen. Målerapport. December 1998. COWI og RAMBØLL.
12. Vejdirektoratet, M40-5087, Ny Lillebæltsbro. Eftersyn for måling af chloridbelastning, December 1988, COWIconsult.
13. Vejdirektoratet, M40-5087, Ny Lillebæltsbro. Betonundersøgelser - chloridindtrængning, Data- og vurderingsrapport, Februar 1996, COWIconsult.
14. Vejdirektoratet. Basiseftersyn Bro nr. 462-0-0012 Hadsundbroen. Vurderingsrapport. December 1996. RAMBØLL.
15. Vejdirektoratet. Basiseftersyn Bro nr. 4420-0-0015 Sallingsundbroen. Vurderingsrapport. December 1996. RAMBØLL.
16. Vejdirektoratet. Tilstandsvurdering af kystbroer. Supplerende undersøgelser. Bro nr. 4420-0-0015 Sallingsundbroen. Målerapport. December 1998. RAMBØLL og COWI.
17. Vejdirektoratet. Basiseftersyn Bro M60-0026 Vejle fjordbroen. Vurderingsrapport. December 1997. COWI.
18. Chalmer's University of Technology, Department of Building Materials. Moisture and Chloride Profiles in a Column in the Vejle Fjord Bridge after 18 years of Exposure to Marine Environment. Work Report May 1996.
19. AECLaboratoriet. Vejle fjordbroen - pille nr 8. Prøveudtagning og undersøgelsesomfang. 1996.10.28.

20. Vejdirektoratet, 316-0012, Alssundbroen, Eftersyn for måling af chloridbelastning, december 1988, COWIconsult.
21. Vejdirektoratet. Basiseftersyn. Bro nr. 3-0-0092 og 3-0-1092 Kalvebodløbbrøen. Vurderingsrapport. December 1996. RAMBØLL.
22. Vejdirektoratet. Basiseftersyn Bro nr. 3-0-0090 og 3-0-1090 Sorterendebrøen. Vurderingsrapport. December 1996. RAMBØLL.
23. Vejdirektoratet, M30-066 og M30-068, Farøbroerne, chloridprojekt, Opfølgende målinger, Vurderingsrapport. December 1994. COWI.
24. Vejdirektoratet, M30-066 og M30-068, Farøbroerne, chloridprojekt, Opfølgende målinger, Vurderingsrapport, december 1997, COWI.
25. Vejdirektoratet. Tilstandsvurdering af kystbroer. Vurdering af prøveudtagningsmetodens indflydelse på bestemmelse af kloridindholdet og vurdering af indflydelsen af koten samt pillens orientering på kloridindholdet. December 1998. RAMBØLL og COWI.
26. Vejdirektoratet. Bro nr. 060-0026, Vejlefjordbroen, Bro nr. 316-0012, Alssundbroen. Vurdering af udvalgte holdbarhedsmæssige forhold. Juni 1992, COWIconsult.
27. Vejdirektoratet. Særeftersyn af Hadsundbroens mellempille, April 1997. RAMBØLL
28. Eftersyn af bygværker. Vejdirektoratet - Vejregeludvalget. November 1994.
29. Eftersyn - Vejledning for Driftspersonale i ejendoms og boligselskaber. Beton 3. SBI 1984.
30. CM5 CoverMaster, User Manual. Germann Instruments.
31. CM52, User Manual. Germann Instruments.
32. CM9, User Manual. Germann Instruments.
33. DS423.28. Betonprøvning. Hærdnet Beton. Chloridindhold.
34. RCT Instruction and Maintenance Manual, Germann Instruments, 1996.
35. RCTW Instruction Manual for Measurement of the pH and estimation of the water soluble amount of chlorides of concrete (RCTW), Germann Instruments. Marts 1996.
36. User's manual for Bloodhound, ver. 5.5. Cyberdan. 1992.
37. TI-B prøvningsmetode. Nr. TI-B 35 (87). Hærdnet betons karbonatiseringsdybde. 1987.05.21.
38. ASTM C 856 "Petrographic Examination of Hardened Concrete.
39. Strukturanalyse af beton, Beton-Teknik 4/07/1985.
40. SNV 640 461. Richtlinien zur Bestimmung und Prüfung der Frosttausaltbeständigkeit von Zementbeton, 1977, Schweiz.
41. ASTM C876-91. Standard Test Method for 'Half Cell' Potentials of Reinforcing Steel in Concrete.
42. Elsener, B., and Böhni, H. Potential Mapping and Corrosion of Steel in Concrete. Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP 1065, N.S. Berke, V. Charker and D. Whiting, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.
43. Poul Chess & Frits Grønvold. Corrosion Investigation a Guide to Half Cell Mapping, 1996.

44. Armeringskorrosion i kloridpåvirket beton. Publikation nr. 44. Dansk Betonforening. 1995.
45. Poul Sandberg. Critical Evaluation of Factors Affecting Chloride Initiated Reinforcement Corrosion in Concrete. University of Lund, Lund Institute of Technology. Report TVBM-3068. 1995.
46. Poul Sandberg. Chloride Initiated Reinforcement Corrosion in Marine Concrete. University of Lund, Lund Institute of Technology. Report TVBM-1015. 1998.
47. Vejdirektoratet. Kloridbetinget korrosion, Undersøgelse af kloridbelastning og korrosion på bropiller. Broområdet. Okt. 1991 (VD Blå rapport)
48. Statens Vegvesen, Vejdirektoratet, Norge. Chloridbestandighed af Kystbroer i Beton, Kloriddiffusion. Vurderingsrapport. Juli 1992. COWIconsult.
49. Vejdirektoratet. Mikrodefekters indflydelse på chloridindtrængning i beton. Rapport nr. 75. 1996 (VD Blå rapport)
50. Institutet for Metallære. Danmarks tekniske højskole, Dæklagsundersøgelser i Storebæltsområdet (kloridindtrængning i beton). 1979.
51. HETEK Report No. 53, Chloride penetration into concrete - State of the Art, The Danish Road Directorate, 1997.
52. HETEK Report No. 54, The effect of the w/c ratio on chloride transport into concrete, The Danish Road Directorate, 1997.
53. HETEK Report No. 83, A System for estimation of Chloride ingress into Concrete - Theoretical background, The Danish Road Directorate, 1997.
54. HETEK Rapport nr. 87, Chloridindtrængning i beton -Vejledning, Vejdirektoratet, 1997.
55. HETEK Report No. 123, Chloride Penetration into Concrete - Manual, The Danish Road Directorate, 1997.
56. Allen, R. T. L. (editor) Concrete in Coastal Structures, Thomas Telford, 1998.
57. E. Stoltzner, B. Buhr, S. Englund: The Faroe Bridges. Chloride Penetration Rate Estimated on a Basis of Measurements from 1988 to 1997; to be published at the Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, June 2000.
58. Danmarks Meteorologiske Institut, Trafikministeriet. Danmarks klima, 1997
59. <http://www.germann.org/products/rct.htm>
60. NT Build 433. Concrete Hardened: Accelerated Chloride Penetration. UDC 691.31.
61. Vejdirektoratet, M60-0026, Vejlefyjordbroen, Chloridindhold i piller, februar, 1988, COWIconsult.

Bilag

Bilag 1 Placering af broerne

- B1.1: Placering af undersøgte kystbroer i Danmark
- B1.2: Kortudsnit, fotografi samt plan- og snittegning

Bilag 2 Undersøgelsesomfang

Bilag 3 Undersøgelsesmetoder

Bilag 4 Visuel besigtigelse

- B4.1: Visuel registrering af skader
- B4.2: Fotografier af typiske skader fundet ved basiseftersynene

Bilag 5 Dæklagsmålinger

Bilag 6 Kloridindhold

- B6.1: Oversigtsskema for totalt syreopløseligt og vandopløseligt kloridindhold
- B6.2: Vurdering af indflydelsen af koten samt pillens orientering på kloridindholdet
- B6.3: Vurdering af vandopløseligt kloridindhold

Bilag 7 Potentialemålinger

- B7.1 : Vurdering af de foretagne EKP-målinger
- B7.2 : Oversigt over sammenhørende ophugningsresultater og EKP-målinger
- B7.3 : Grafisk fremstilling af udvalgte EKP-målinger

Bilag 8 Strukturanalyser - defektdybder

Bilag 9 Beregninger på kloridprofiler

- B9.1: Analysegrundlag
- B9.2: Initialt kloridindhold
- B9.3: Fick-resultater

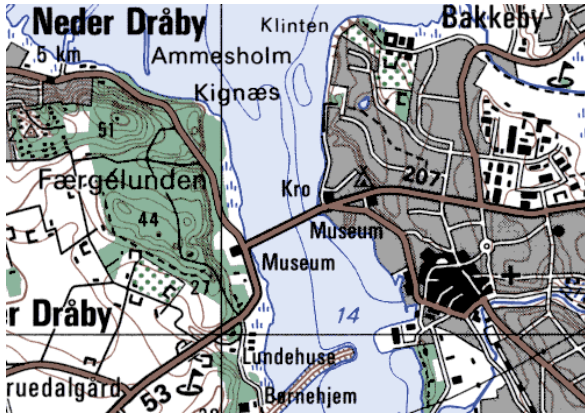
Bilag B1.1 : Placering af undersøgte kystbroer i Danmark



Placering af kystbroer. Markering af bro angiver kun orientering og ikke længden af den enkelte bro.

Bilag B1.2 : Kortudsnit, fotografi samt plan- og snittegning

Dette bilag indeholder for de 13 undersøgte kystbroer: et kortudsnit som viser placering, et fotografi af en typisk pille samt en plan- og snittegning for en typisk pille.

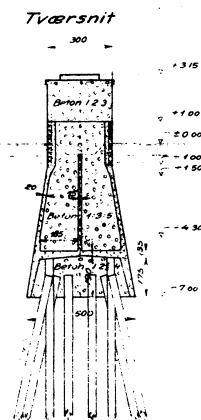
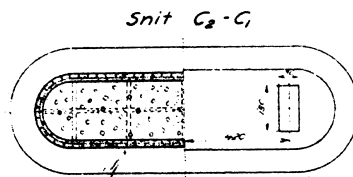


**Kronprins Frederiks
Bro
Indviet: 1936**

Foto: Pille. Parement til kote 1,0 m.

Snit i pille.
Opstalt af pille.

Kort- og Matrikelstyrelsen
har copyright på kortudsnit

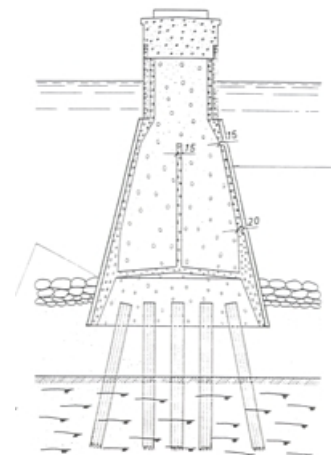
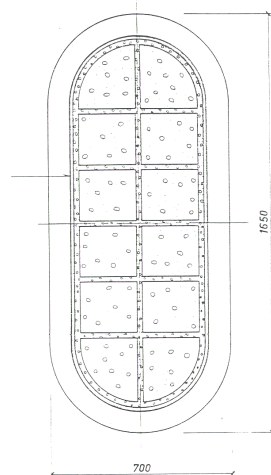


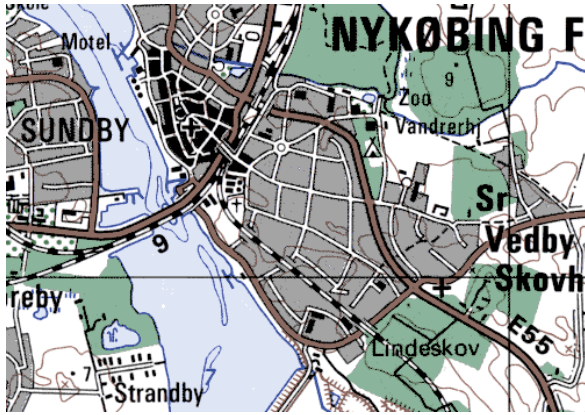
**Vilsundbroen
Indviet år: 1936**

Foto: Pille. Parement til kote 1,5 m.

Snit i pille.
Opstalt af pille.

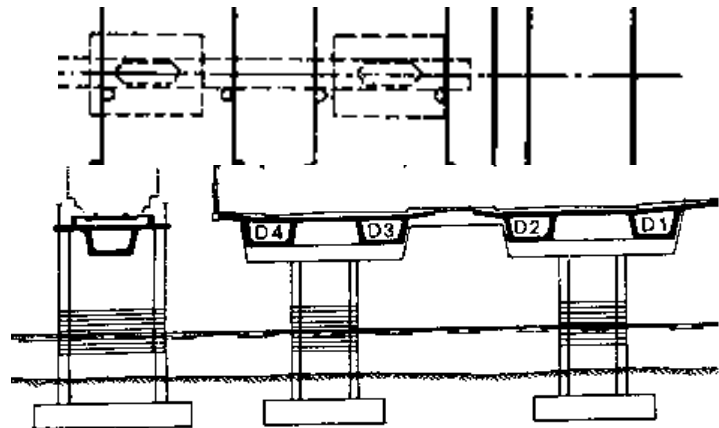
Kort- og Matrikelstyrelsen
har copyright på kortudsnit





**Kong Frederik d. IX's
Bro
Indviet år: 1962**

Foto: Pille. Parent til kote 1 m



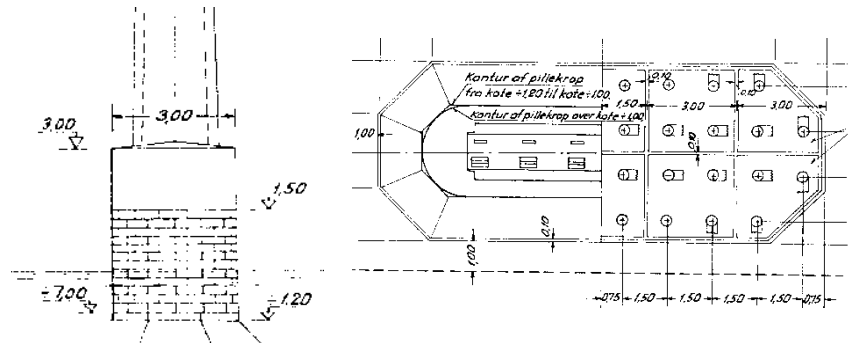
Kort- og Matrikelstyrelsen har copyright på kortudsnit



**Langelandsbroen
Indviet år: 1962**

Foto: Pille. Parent til kote 1,5 m. Reces i kote 3,0 m.

Opstalt af pille.
Plan af pille.



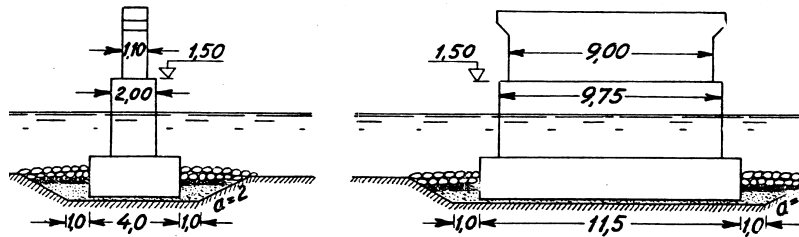
Kort- og Matrikelstyrelsen har copyright på kortudsnit



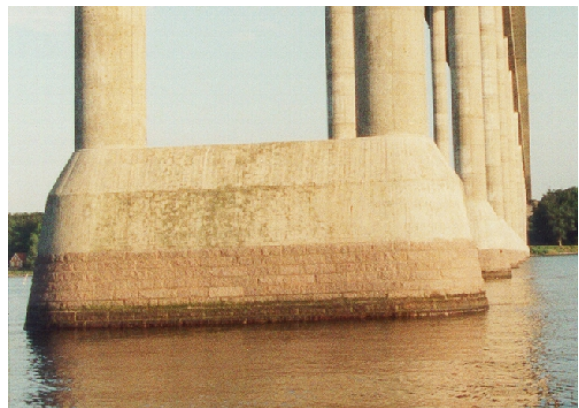
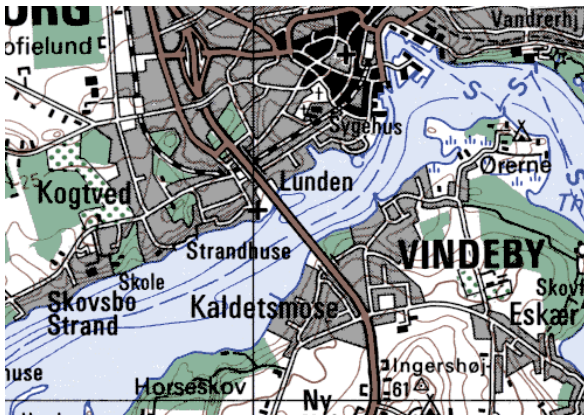
Siø Sundbroen
Indviet år: 1964

Foto: Pille. Parent til kote 1,0 m. Reces i kote 1,5

Opstalt af pille.



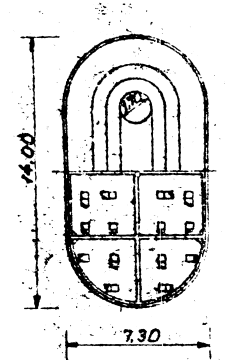
Kort- og Matrikelstyrelsen har copyright på kortudsnit



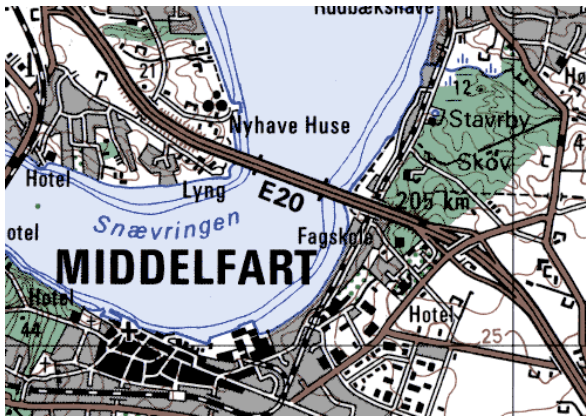
Svendborgsundbroen
Indviet år: 1966

Foto: Pille. Parent til kote 1,5 m.

Snit i pille.
 Opstalt af pille.



Kort- og Matrikelstyrelsen har copyright på kortudsnit

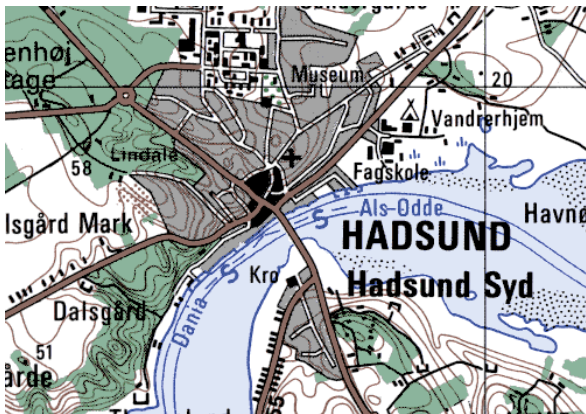
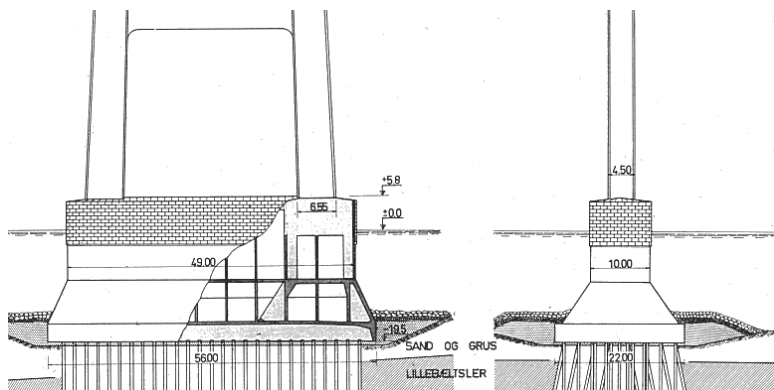


Ny Lillebæltsbro Indviet år: 1970

Foto: Hovedtårn. Parent
til kote 5,6 m. Betonreces i
kote 4,8.

Opstalt af hovedtårn.

Kort- og Matrikelstyrelsen
har copyright på kortudsnit

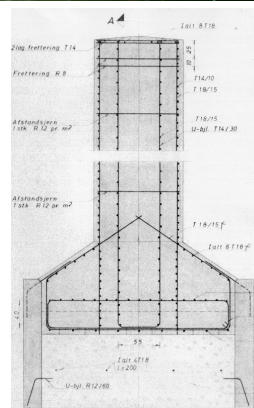
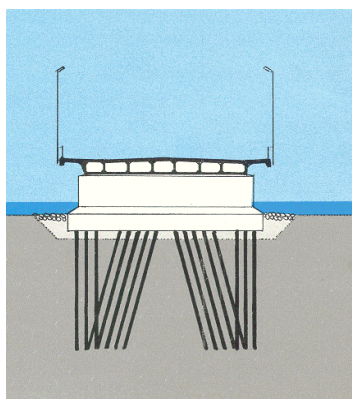


Hadsundbroen Indviet år: 1976

Foto: Pille.

Opstalt af pille.
Armering i pille.

Kort- og Matrikelstyrelsen
har copyright på kortudsnit

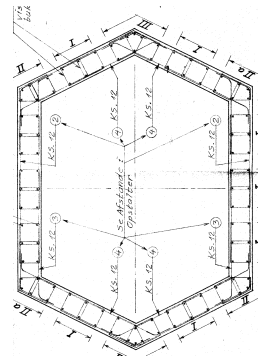
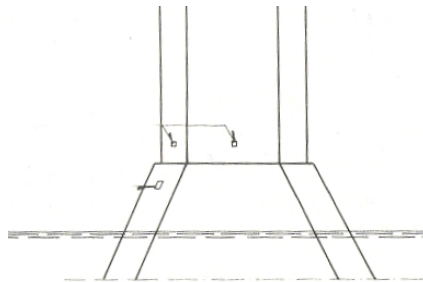




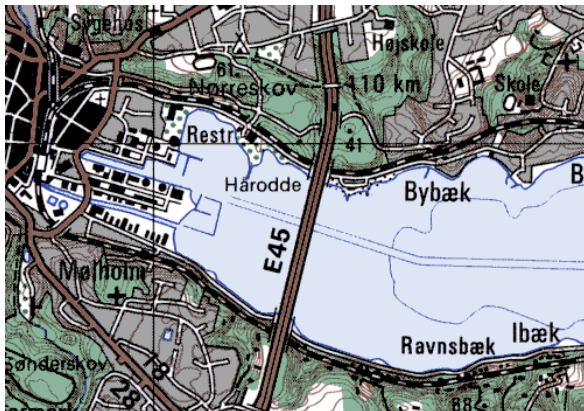
Sallingsundbroen
Indviet år: 1978

Foto: Pille med isbryder.

Opstalt af pille og isbryder.
 Armering i pille.



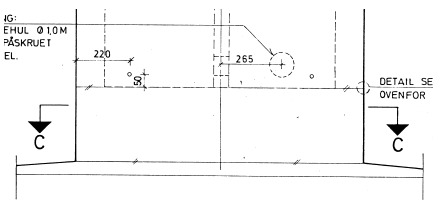
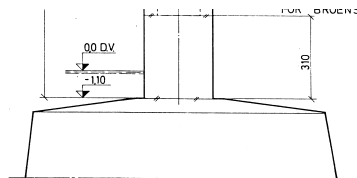
Kort- og Matrikelstyrelsen
 har copyright på kortudsnit



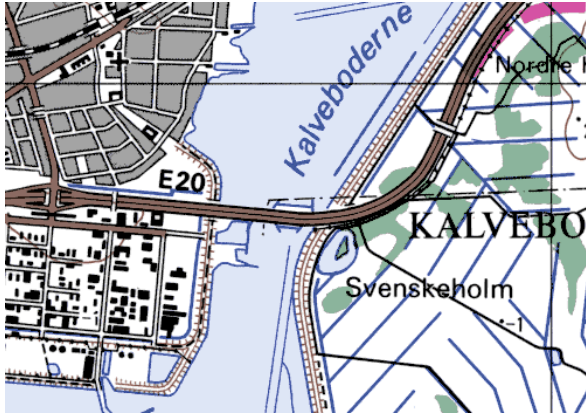
Vejlefjordbroen
Indviet: 1980

Foto: Pille.

Opstalt af pille.



Kort- og Matrikelstyrelsen
 har copyright på kortudsnit

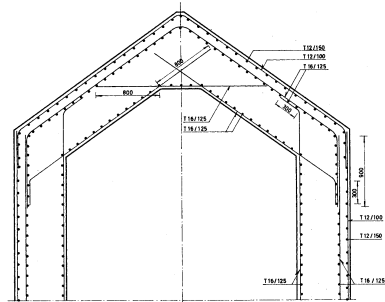
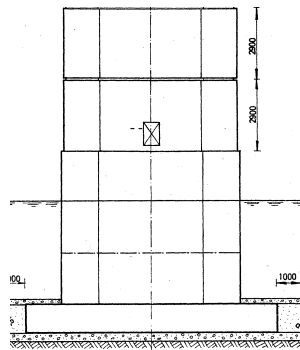


Kalvebodløbbrøen
Indviet år: 1984

Foto: Mellemunderstøtning.

Opstalt af mellemunderstøtning.
 Armering under kote 2,0.

Kort- og Matrikelstyrelsen har copyright på kortudsnit

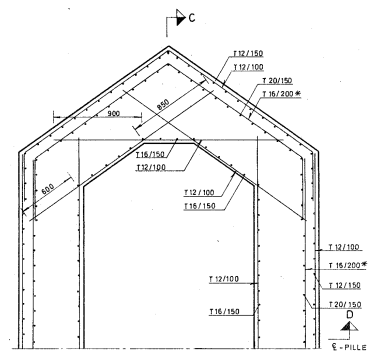
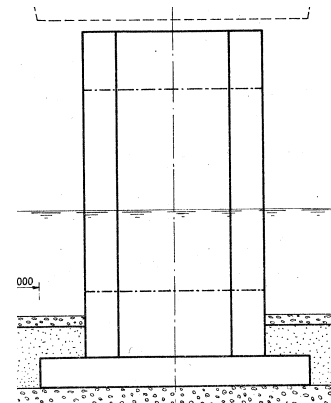


Sorterendebroen
Indviet år: 1984

Foto: Mellemunderstøtning.

Opstalt af mellemunderstøtning.
 Armering i mellemunderstøtning.

Kort- og Matrikelstyrelsen har copyright på kortudsnit



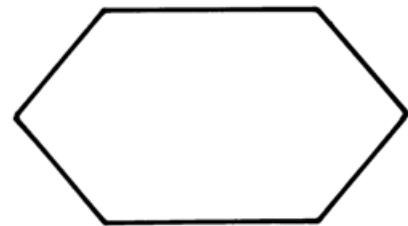
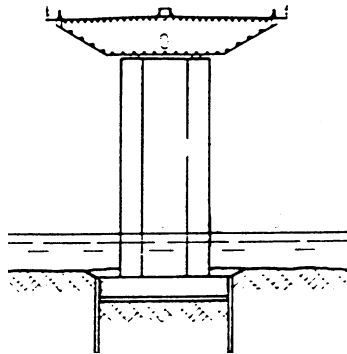


Farøbroerne
Indviet år: 1985

Foto: Pille.

Opstalt af pille.
Snit i pille.

Kort- og Matrikelstyrelsen
har copyright på kortudsnit





Bilag 2

Undersøgelsesomfang

Bilag 2 Undersøgellesomfang

Bro	Antal piller i vand inklusiv klappiller. I parentes antal piller på land	Indviet år	Undersøgt år	Dæklags-	Potentiale-	Ophu-	Kloridbestemmelser (havvandspåvirkede konstruktionsdele)						Strukturanalyse		Karbonatisering	Bemærkning
				måling	måling	gninger	kerner antal	dybder pr. kerne	støvprøver antal steder	dybder	antal analyser syreopl.	vandopl.	makro	mikro	antal	
Kronprins Frederiks Bro	3	1936	1995	3	2	0	5	4	5	4	40		5	0	5	Basiseftersyn, hvis ikke andet er angivet.
Vilsundbroen	5	1936	1994				19	4-9			35		19	19		Særefertersyn i 1994 (klappille). Alle kerner under vand eller i klappælde.
			1997	6	2	4	2		24	5	120	50	2	2	2	
Kong Frederik d. IX's Bro	33	1962	1995	11	25	0	9	4	3	4	46		9	0	9	På klappille øst kun to kloridanalyser.
			1998	5	8	0	4	8	2	3	38		12	4	4	Særefertersyn
Langelandsbroen	20	1962	1998	7	7	3	4	10	16	3	88		4	2	4	Kloridundersøgelser i 1978, reparationer udført i 1984.
Sjøsundbroen	19	1964	1996	*	3	3	0	0	15	5	75	15				
Svendborgsundbroen	22 (26)	1966	1996	6	6	7	0	0	13	5	65	15	0	0	7	Enkelt orienterende kloridundersøgelser i ? (Søren Nielsen, Carl Bro)
			1998	0	0	0	0	0	12	3	36		2	2	2	
Ny Lillebæltsbro	2 (17)	1970	1988													Ikke basiseftersyn
			1996	5	2	2	6	3 til 10	6	2 til 4	23		6	6	10	Ikke basiseftersyn. Der er tillige udført luftporeanalyse.
Hadsundbroen	7	1976	1996	2	3	7	0	0	13	5	65	15	0	0	7	
			1997				6	5			60					Særefertersyn 1997. Katodisk beskyttelse i 1998. Reparationer i 1999. 4 kerner under vand.
Sallingsundbroen	18	1978	1996	3	3	10	0	0	15	5	75	15	0	0	10	
			1998				3	9	12	3	36	0	2	2	2	
Vejlefjordbroen	13	1980	1988	10	0	0	0	0	12	3-6	102					Ikke basiseftersyn
			1989	2	5	2	0	0	0	0	0		0	0	2	Ikke basiseftersyn
			1996													AEC
			1997	6	6	4	6	10	1	4	64	21	0	0	6	
Kalvebodløbbrøen	6	1984	1996	2	2	7	0	0	11	3 til 5	48	13	0	0	7	
Sorterendebrøen	6	1984	1996	2	2	6	0	0	11	5	55	10	0	0	6	
Farøbroerne	36	1985	1997	10	2		9	10	13	2 til 3	29	6	6	6	6	Ikke basiseftersyn, der er tillige udført undersøgelser i 1989, 1991, 1994 og 1999

* Ikke muligt at måle på grund af meget dybtliggende skinnearmering



Bilag 3

Undersøgelsesmetoder

Bilag 3 Undersøgelsesmetoder

1 Visuel besigtigelse

1.1 Metode:

Den visuelle besigtigelse er generelt udført med det blotte øje; undtagelsesvis er der anvendt kikkert. Den overordnede orienterende besigtigelse er udført fra båd, mens felterne udvalgt til de mere detaljerede undersøgelser er besigtiget tæt på.

Der er ved besigtigelsen registreret de mest gængse skader som:

- Korroderet armering med afskallet betondæklag
- "Rustpletter", udfældning af korrosionsprodukter
- Revner med/uden udfældning af korrosionsprodukter eller hvide udfældninger/udludninger
- Netrevner med/uden hvide udludninger
- Overfladeforvitring/erosion
- Springere/afskalning
- Alge/mos/begroning

Endvidere er reparationer registreret.

Resultaterne af besigtigelsen er i nogle tilfælde angivet på skitser, enten som beskrivelse eller som detailregistrering med optegning af revner med videre.

Besigtigelsen er suppleret med en fotoregistrering af typiske skader.

I forbindelse med den visuelle besigtigelse er der stikprøvevis udført delamineringsundersøgelser ved hammertest. Der er med en lægtehammer hamret på betonoverfladen. Ud fra lyden kan delaminerede områder kortlægges, idet sund beton har en hård og klingende lyd, mens delamineret beton har en mere hul lyd.

I forbindelse med systematisering af data er opstillet retningslinier for registrering af skadegrader og omfang, der henvises til bilag B4.1. "Visuel besigtigelse".

2 Dæklagsmåling

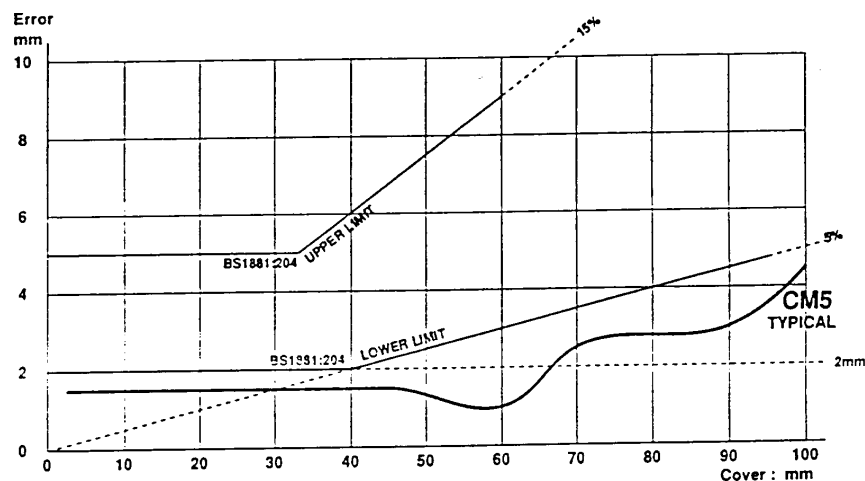
2.1 Metode:

Dæklagsmålinger er udført med covermeter. Der er anvendt covermetre af typen "Protovale CoverMaster CM5", "Protovale CoverMaster CM52" og "Protovale CoverMaster CM9". Målingerne er udført i henhold til brugermanualen for det pågældende covermeter, jævnfør Ref. 30, 31, 32.

2.2 Målenøjagtighed:

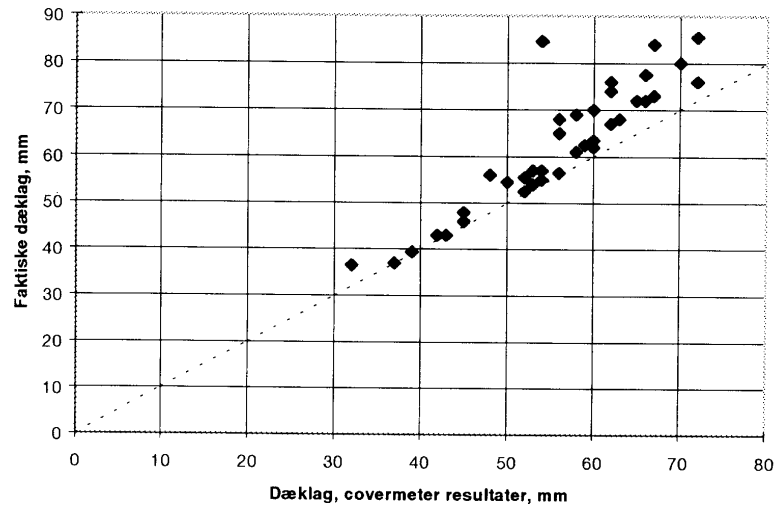
Dæklagsmålingerne er kalibreret i ophugninger udført i forbindelse med potentialemålingerne, og dertil kommer erfaringstal for nøjagtighed fra tidligere kalibreringer.

Dæklaget målt med CM5 er mindre end det faktisk målte dæklag afhængig af den faktiske dæklagstykkelse. Måleusikkerheden stiger med stigende dæklagstykkelse. Leverandøren har i forbindelse med kalibrering af covermeteret, Ref. 30, fundet en sammenhæng som vist på Figur B3.1. Heraf fremgår det, at covermeteret er nøjagtigt til ca. 70 mm dybde, hvorefter usikkerheden stiger til ca. + 4 mm ved 100 mm dæklag. Fra in-situ målinger ses en nøjagtighed som vist på Figur B3.2. Her ses en lidt større afvigelse mellem målte og reelle dæklag, ca. +0-5 mm ved 50 mm dæklag og ca. + 0-10 mm ved dæklag over 60 mm.

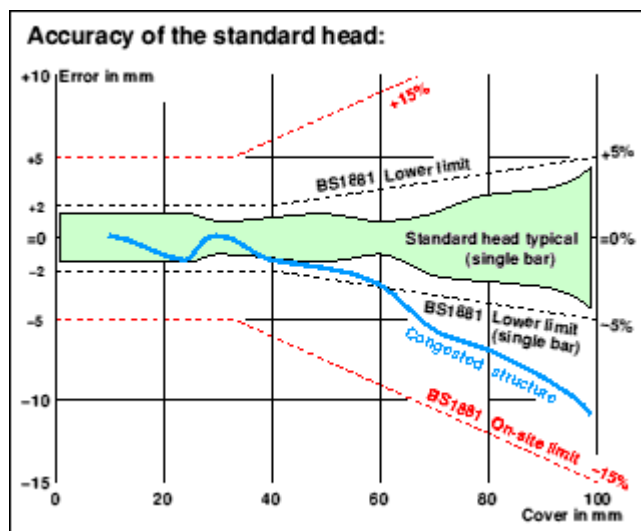


Figur B3.1 Middelværdier inklusiv angivelse af maksimal- og minimalværdier for CM5 Covermeter, Ref. 30.

Den erfaringsmæssige nøjagtighed af dæklaget målt med CM9 er $\pm 1-2$ mm for dæklag mindre end 50-60 mm og $\pm 2-3$ mm for dæklag mellem 50 og 80 mm. Den teoretiske nøjagtighed er vist på Figur B3.3.



Figur B3.2 Målt og reelt dæklag ved in-situ målinger, Ref. 24.



Figur B3.3 Nøjagtighed af CM9 i henhold til Ref. 32.

3 Kloridbestemmelse

3.1 Metode:

3.1.1 Prøveudtagning

Der er gennem projektforløbet anvendt prøveudtagningsmetoder baseret på udtagning af støvprøver med en håndboremaskine eller udtagning af borekerner med et kerneboreudstyr.

Støvprøver:

Prøverne er udtaget med forskellige kombinationer af bordiameter og antal borehuller. Der er anvendt følgende kombinationer (i tidlig udvikling fra 1995-98): Ø12 mm bor med 3-5 huller, Ø16 mm bor med 5 huller samt Ø20 mm bor med 2 eller 3 huller. Opsamlingen af borestøvet er generelt udført via et plastrør med påmonteret plastpose. Ved enkelte målinger er der anvendt en elektrikerkop eller plastpose monteret omkring boret. Der er hovedsageligt udtaget støvprøver i dybder af 15 mm. Borestøv fra samme dybde er sammenblandet og homogeniseret.

Borekerner:

Udtagningen af borekerner er udført som beskrevet i "TI-B-1, Udtagning af borekerner, 1987". Borekernerne er udtaget med forskellig diameter. Der er anvendt diametrene Ø50 mm, Ø70 mm, Ø75 mm og Ø100 mm. Neddelingen af kernerne er udført enten ved savning og knusning eller ved profilfræsning. Neddelingen er udført i henhold til "NT Build 433. Concrete Hardened: Accelerated Chloride Penetration. UDC 691.31", Ref. 60. Ved savningen er kernen typisk delt i 15 mm skiver, mens profilfræsningen er udført som et mere detaljeret profil med typisk 2-4 mm step.

3.1.2 Analysemetoder

Kloridindholdet er bestemt som det syreopløselige eller det vandopløselige kloridindhold. Det syreopløselige kloridindhold betegnes tillige det totale kloridindhold.

Det syreopløselige kloridindhold er bestemt med to principielt forskellige metoder, med titrering og med anvendelse af en ionselektiv elektrode (RCT-test).

Titrationen er på alle væsentlige punkter udført i henhold til DS 423.28 "Betonprøvning. Hærdnet beton. Kloridindhold". Der er for en del af prøverne ikke udført forudgående tørring af prøverne. Fugtindholdet i borestøvprøver udtaget umiddelbart over vandlinien har typisk et vandindhold (bestemt ved tørring ved 105 °C) på under 3%, hvilket giver et 3% lavere kloridindhold end for en tilsvarende tørret prøve. Fræsestøvet har en finhed, der vurderes at overholde et krav om kornstørrelse på under 0,1 mm (krævet i henhold til DS 423.28). Borestøvet er grovere og vil ikke kunne overholde et 0,1 mm krav. Borestøvsprøver udtaget med små bordiameter vil være grovere end borestøvsprøver udtaget med et større bordiameter. Det vurderes i alle tilfælde at være betonens tilslag, der vil ligge som enkelte lidt grovere korn i det opsamlede borestøv. Det er cementpastaen, der indeholder klorid, når det anvendte

tilslag er tæt (granit og flint), hvorfor kornstørrelsen ikke vurderes at have væsentlig indflydelse på størrelsen af det målte kloridindhold.

RCT-testen er udført i henhold til "RCT Instruction and Maintenance Manual" Germann Instruments A/S, Marts 1996, Ref. 34, hvor 1,5 g støv tilsættes en syre. Med en kloridselektiv elektrode måles kloridindholdet på basis af en kalibreringskurve, hvor sammenhørende værdier mellem kloridindhold og spændinger er fundet.

I metodebeskrivelsen for RCT er angivet, at prøverne skal rystes i henholdsvis 5 og 10 minutter afhængig af prøven (fint støv eller større partikler), hvorefter prøverne er klar til måling svarende til en ekstraktionstid på minimum 5 eller 10 minutter. I forbindelse med undersøgelsen af kystbroerne er der anvendt minimum 24 timers ekstraktionstid. Tidligere erfaringer har vist, at prøverne vil have en tendens til at arbejde videre efter opblanding med vandet, og en måling efter f.eks 4 timer vil give et lavere målt kloridindhold i forhold til kloridindholdet bestemt efter 24 timer og bestemt i henhold til DS 423.28.

Ved såvel RCT som RCTW er prøvemængden afvejet på en analysevægt.

RCTW-testen er udført i henhold til "RCTW Instruction Manual for Measurement of the pH and Estimation of the Water Soluble Amount of Chlorides of Concrete" Germann Instruments A/S, Marts 1996, Ref. 35.

Det vandopløselige kloridindhold bestemmes med en kloridselektiv elektrode (RCTW-test), hvor borestøvet tilsættes deioniseret vand. I metodebeskrivelsen for RCTW er angivet, at prøverne skal rystes i 3 minutter, hvorefter pH kan måles. Efterfølgende tilsættes en bufferopløsning, og prøverne er klar til måling af det vandopløselige kloridindhold. I den seneste metodebeskrivelse er metoden modificeret, således at prøven filtreres efter 1 minut. Denne fremgangsmåde er ikke anvendt i dette projekt. Ved de seneste undersøgelser er ekstraktionstidens indflydelse på kloridindholdet forsøgt kortlagt gennem en række målinger med ekstraktionstider på henholdsvis 0, 1, 5, 30 og 120 minutter. Resultaterne er kommenteret under bilag 6 B6.3.

3.2 Målenøjagtigheden

Målenøjagtigheden er bestemt dels af nøjagtigheden på analysemetoderne dels af nøjagtigheden på prøveudtagningen.

3.2.1 Analysemetoder

Målenøjagtigheden for den enkelte analysemetode er ikke angivet i metodebeskrivelserne for nogen af de anvendte analysemetoder.

Ved titreringen bestemmes kloridindholdet ved hjælp af et farveomslag. Målenøjagtigheden er bestemt af nøjagtigheden på afvejningen af prøven ($\pm 0,01$ g), der analyseres ca. 10 g beton svarende til 2 g cement ved hver bestemmelse. Endvidere er målenøjagtigheden bestemt af nøjagtigheden af buretterne ($\pm 0,05$ ml). Da der er tale

om en vurdering af farveomslaget fra hvid til rød/orange, udføres løbende kalibreringsmålinger på prøver med et kendt kloridindhold, således at det samme farveomslagspunkt benyttes fra gang til gang. Sammenlagt er der en målenøjagtighed på ca. $\pm 0,004$ % Cl⁻ klorid af betonvægten. Hertil kommer +/- under 3% afhængig af prøvens fugtindhold.

Ved RCT-testen bestemmes kloridindholdet ved hjælp af en kloridselektiv elektrode. Målenøjagtigheden er bestemt af nøjagtigheden af afvejningen af prøven ($\pm 0,01$ g), nøjagtigheden af voltmeteret, måletemperaturen, finheden af støvet, der måles på, kalibreringsvæskernes koncentration og alder samt ekstraktionstiden. Nøjagtigheden af RCT er i henhold til leverandøroplysninger, Ref. 59, 6 % af kloridindholdet.

For RCTW-testen er nøjagtigheden afhængig af de samme parametre som ved RCT-testen. Den væsentligste usikkerhed på bestemmelsen vurderes dog at være ekstraktionstiden jævnfør Bilag 6 B6.3. Samtidig vurderes små variationer i måletemperaturen at have en væsentlig indflydelse på målingen, jo større temperatur jo større målt vandopløseligt kloridindhold. Den nye metodebeskrivelse, hvor opløsningerne filtreres efter 1 minut, vurderes at være en væsentlig forbedring, omend proceduren bliver mere omstændelig.

3.2.1 Prøveudtagningsmetoden

Prøveudtagningsmetodens (borestøv kontra borekerner) indflydelse på kloridindholdet blev i 1998 undersøgt eksperimentelt i forbindelse med Kystbroprojektet.

Ud fra antagelsen om at støv fra en borekerne, der fræses eller saves/knuses, giver den mest nøjagtige bestemmelse af kloridindholdet, blev der foretaget en sammenligning mellem bestemmelse af kloridindhold på:

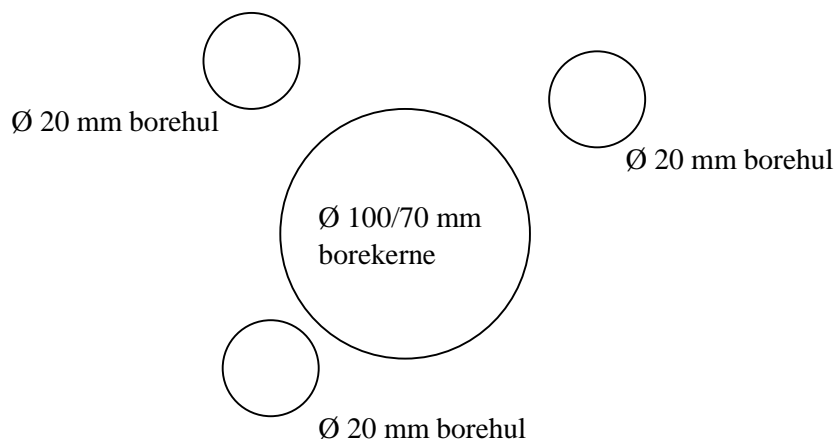
- Støv fra borekerner og
- Borestøv fra borehuller

Procedurer

Til at vurdere prøveudtagningsmetodens indflydelse på bestemmelsen af kloridindholdet i beton blev der udtaget borekerner og borestøv umiddelbart ved siden af hinanden.

Der blev udtaget Ø70/Ø100 mm kerner hver med tilhørende borestøv fra 3 Ø 20 mm borehuller (støvet blandes og homogeniseres). Borehullerne blev placeret i en maksimal afstand af 100 mm fra kernen. Borekerne og borehuller blev placeret i områder, hvor betonen var uden synlige skader på betonoverfladen. Se Figur B3.4.

Kernerne blev fræset eller savet/knust i step à 5 mm indtil 45 mm's dybde (i alt 9 step). Ca. 75 % af kernernes overfladeareal blev fræset/knust, da en del af de enkelte kerner er anvendt til petrografisk analyse. Borestøvet blev udtaget i 3 dybder: 0-15 mm, 15-30 mm og 30-45 mm. Støv fra fræsning og borestøv blev efterfølgende analyseret ved titrering.



Figur B3.4 Placering af borekerne og borestøvprøver.

Resultater

Der blev på Sallingsundbroen udtaget sammenhørende borekerner og borestøv på 3 sider af en pille (alle i kote 1,75 m). Der blev på Langelandsbroen udtaget sammenhørende borekerner og borestøv i 4 punkter på pille 12 og 13 i henholdsvis kote 1,6 m og kote 3,1 m. Dette giver totalt 17 sammenhørende værdier. Data i nedenstående tabel er taget fra Ref. 25.

Kloridindholdet fra profilfræsning er i hvert interval fundet som en middelværdi af målinger af kloridindhold i det angivne interval. Det vil sige indhold i 0-15 mm er fundet som en middelværdi af målinger fra 0-5 mm, 5-10 mm og 10-15 mm.

Afvigelsen er beregnet som $(\text{pulverprøver-profilfræsning})/\text{profilfræsning} \times 100\%$.

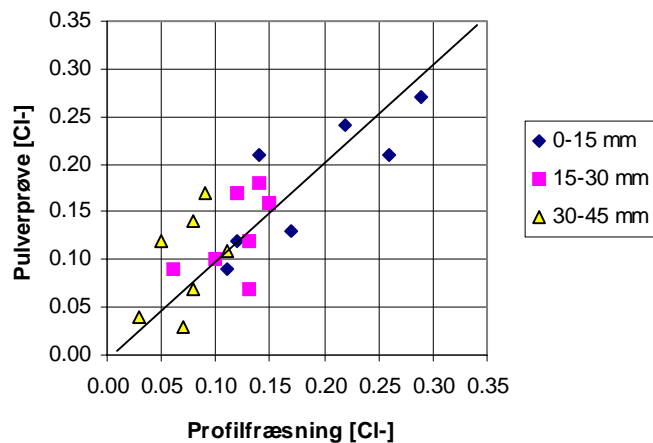
Vurdering

Sammenligningerne mellem støv fra profilfræsning og borestøv er vist på Figur B3.5. Den ideelle sammenhæng mellem kloridbestemmelse ved hjælp af borestøv fra pulverprøver ($\text{Cl}^-_{\text{pulver}}$) og kloridbestemmelse ved hjælp af borestøv fra profilfræsning/savning og knusning ($\text{Cl}^-_{\text{kerne}}$) er indtegnet på figurene ($\text{Cl}^-_{\text{pulver}} = \text{Cl}^-_{\text{kerne}}$).

Kloridindhold fundet fra pulverprøver og støv fra profilfræsning				
Placering	Dybde [mm]	Kloridindhold, % Cl af betonvægten		Afvigelse [%]
		Pulverprøver	Profilfræsning	
Sallingsundbroen pille 14, nord kote 1,75	0-15	0,27	0,29	-7
	13-30	0,16	0,15	7
	30-45	0,14	0,08	75
Sallingsundbroen pille 14, vest kote 1,75	0-15	0,13	0,17	-24
	13-30	0,09	0,06	50
	30-45	0,04	0,03	33
Sallingsundbroen pille 14, øst Kote 1,75	0-15	0,24	0,22	9
	13-30	0,12	0,13	-8
	30-45	0,07	0,08	-13
Langelandsbroen fundament 12, øst (repareret), kote 1,6 m	0-15	0,21	0,26	-19
	13-30	0,07	0,13	-46
	30-45	0,03	-	-
Langelandsbroen pille 12, øst, kote 3,1 m	0-15	0,12	0,12	0
	13-30	0,10	0,10	0
	30-45	0,12	-	-
Langelandsbroen fundament 13, øst, kote 1,6 m	0-15	0,21	0,14	50
	13-30	0,17	0,12	42
	30-45	0,17	-	-
Langelandsbroen pille 13, øst, kote 3,1 m	0-15	0,09	0,11	-18
	13-30	0,18	0,14	29
	30-45	0,11	-	-

Tabel B3.1 Resultater af kloridbestemmelser på henholdsvis pulverprøver (borestøv) og fræsestøv. På Sallingsundbroen blev der udtaget Ø70 mm kerner, og på Langelandsbroen blev der udtaget Ø100 mm kerner. Afvigelsen er beregnet som (pulverprøve-profilfræsning)/profilfræsning x 100%.

Cl_{pulver} er angivet som en funktion af Cl_{kerne} , ud fra den betragtning, at Cl_{kerne} er den "rigtige" værdi. Denne antagelse er foretaget, fordi Cl_{kerne} bestemmes ud fra en støvprøve fra en større mængde støv. Støv fra en 100 mm kerne giver mindst 6 gange så meget støv som støv fra tre Ø20 mm borehuller, og støv fra en Ø70 mm kerne giver mindst 3,5 gange så meget støv som støv fra tre Ø20 mm borehuller. Her er antaget, at ca. 25% af kernen mistes på grund af petrografisk analyse, og at alt støv opsamles fra borehuller.



Figur B3.5 Kloridbestemmelse ved hjælp af borestøv fra pulverprøver som funktion af kloridbestemmelse ved hjælp af borestøv fra profilfræsning.

Der er ved begge metoder til udtagning af borestøv (kerner og borehuller) en række fejlkilder, som kan være med til at øge eller mindske det fundne indhold af klorid i forhold til den ”rigtige” værdi. Af fejlkilder kan nævnes:

- Ved udtagning af borestøv vil målinger langt fra overfladen blive forurenede af borestøv fra lag, som er tættere på overfladen (boremaskine holdes skævt, manglende fjernelse af støv fra tidligere dybder). Dette vil give højere kloridindhold end det rigtige (under antagelsen at kloridindholdet – bortset fra de yderste mm – falder med afstanden fra overfladen). Dette kan dog ikke forklare de fundne store afvigelser i 30-45 mm dybde.
- Størrelsen af tilslaget vil have større betydning for, hvor repræsentativ en prøve udtaget i 3 Ø 20mm borehuller er i forhold til borestøv fræset/savet/knust fra en Ø 70 eller Ø 100 mm kerne. Dette vil kunne betyde, at borestøvet undervurderer det ”korrekte” kloridindhold på grund af procentvis stort indhold af tilslag i borehullerne og vice versa.

Hypotesen, at middelværdien på afvigelsen mellem bestemmelserne er 0, er testet med et 5% signifikansniveau. Det kan på den baggrund ikke afvises, at middelværdien for afvigelsen er 0.

På baggrund af sammenligningen er der fundet en variation i bestemmelsen af kloridindholdet på op til +/- 60 %, hvilket er bekræftet af målinger udført ved Farøbroerne, hvor en afvigelse på +/- 40% blev fundet, Ref. 24.

Beton er ikke et homogent materiale, og variationer som følge af variationer i betonkvaliteten (såvel deciderede defekter som områder, der er mørtelrige/fattige) må

forventes. Det er således ikke afklaret, hvor store variationer i kloridindholdet der hidrører fra variationer i vand/cementforhold, tilslagsmængder og så videre, hvilket i alle tilfælde må forventes at variere fra bro til bro, og hvor store variationer, der hidrører fra prøveudtagningsmetoden.

4 Potentialemåling og ophugning

4.1 Metode

Potentialemålingerne (EKP-målingerne) er udført med enten et udstyr af typen "Bloodhound", der har automatisk dataopsamling, eller manuelt med et voltmeter.

Målingerne udført med "Bloodhound" er udført i henhold til "Brugermanual for Cyberdan's Bloodhound, version 5.5", Ref. 36. Der er ved målingen anvendt en sølv-/sølvkloridelektrode (SCE), som af bloodhound-udstyret omregnes til et potentiale mod kobber/kobbersulfat (CSE). Omregningen fra SCE til CSE fås ved at trække 100 mV fra måleværdierne for SCE. Vedrørende måling af potentialer generelt henvises til Ref. 43.

Ved målingen med "Bloodhound" bestemmes endvidere betonens elektriske modstand.

I forbindelse med potentialemålingen etableres der kontakt til armeringen to steder i hvert målefelt, og det kontrolleres, om armeringen er kontinuert. Måleelektroden kalibreres i forbindelse med hver måling.

Sammen med potentialemålingerne er der udført ophugninger til kalibrering af armeringens faktiske korrosionstilstand i forhold til måleresultaterne.

Placeringen af ophugningerne vælges ud fra de absolutte potentialeverdier, potentialegradienterne og målte betonmodstande. Der er således udført ophugninger ved de mest negative potentialer kombineret med store gradienter og lave modstande svarende til områder, hvor korrosion er sandsynlig. Endvidere er der udført ophugninger ved mindre negative potentialer, hvor det vurderes ikke at være korrosion.

Måleresultaterne fra "Bloodhound" er efterfølgende udtegnede.

4.2 Målenøjagtighed

Målenøjagtigheden ved en given måling er bestemt af måleudstyrets nøjagtighed, elektrodens nøjagtighed samt af forvandingen af betonoverfladen.

Ved måling med "Bloodhound" udføres der 3 målinger pr. sekund i det enkelte målepunkt. Målingen i punktet accepteres først, når to på hinanden følgende målinger har en given nøjagtighed (kan vælges i intervallet 0,1 mV til 1,0 mV). Målenøjagtigheden ved anvendelse af voltmeteret er $\pm 0,1$ mV. Den krævede nøjagtighed på elektroden ved kalibrering er ± 2 mV.

Forvandingen har afgørende betydning for målingerne. Ved utilstrækkelig forvanding kan afvigelser i potentialet på op til 100 mV risikeres. Ved anvendelse af "Bloodhound" kontrolleres forvandingen indirekte via niveauet af den elektriske modstand, idet en utilstrækkelig forvanding vil give høje elektriske modstande. Ved anvendelse af voltmeteret er der ikke den samme indbyggede kontrolmulighed.

Såfremt der måles i delamineret område vil målingen være fejlbehæftet, hvilket typisk vil kunne vurderes ud fra store modstandsværdier.

Ved måling af armeringens potentiale fås et "øjebliksbillede". Potentialebilledet vil variere afhængig af blandt andet betonens aktuelle fugtforhold og temperatur. Målenøjagtigheden, for så vidt angår måleudstyret, er i forhold til disse variationer negligeabel.

5 Karbonatiseringsbestemmelse

5.1 Metode

Karbonatiseringsdybden er udført i henhold til TI-B 35 "Hærdnet betons karbonatiseringsdybde", dateret 1987.05.21, Ref. 37.

Karbonatiseringsdybden er fundet ved påsprøjtning af phenolphthalein på friske betonbrudflader, typisk i forbindelse med ophugningerne jf. afsnit 4. Phenolphthalein har omslagspunkt ved pH ca. 9,5. Ved højere pH-værdier rødfarves betonen, mens den forbliver ufarvet ved lavere pH-værdier.

Karbonatiseringsdybden er ikke ensartet i en ophugning men afhængig af beliggenhed af tilslagspartikler, revner, lokale variationer i pastapørøsitet med videre. De angivne karbonatiseringsdybder er derfor ofte angivet som et interval med angivelse af minimum og maksimum.

Bestemmelse af karbonatiseringsdybden er endvidere bestemt som et led i strukturanalysen af tyndslib, der indeholder eksponerede betonoverflader. Ved bestemmelse af karbonatiseringsdybden (ses som udfældet karbonat i mikroskop) under mikroskop måles ofte en større karbonatiseringsdybde, idet begyndende karbonatdannelse kan ses, uden at porevæskens pH-værdi generelt er faldet til under 9,5.

5.2 Målenøjagtighed:

Målenøjagtigheden er bestemt dels af målestokkens mindste inddeling ($\pm 0,5$ mm) dels af operatørens vurdering af farveomslaget. Farven for ukarboniseret beton er dog meget karakteristisk, og karbonatiseringsfronten er som oftest klart aftegnet. Det vurderes derfor, at den samlede målenøjagtighed svarer til målestokkens nøjagtighed.

6 Strukturanalyse

6.1 Metode

6.1.1 Prøveudtagning

Der er udtaget borekerner til strukturanalyse. Borekernerne har en diameter på Ø100 mm eller Ø70 mm.

6.1.2 Analysemetode

Der er udført såvel makro- som mikroanalyse på borekernerne. Analyserne er udført ved hjælp af "ASTM C 856 "Petrographic Examination of Hardened Concrete", "Strukturanalyse af beton", Beton-Teknik 4/07/1985 samt SNV 640 461 "Richtlinien zur Bestimmung und Prüfung der Frosttausaltzbeständigkeit von Zementbeton", 1977, Schweiz, Ref. 38, 39, 40. Ingen af de nævnte "standarder" er dog dækkende for den strukturanalyse, der bliver udført. ASTM giver nogle retningslinier for, hvad man skal se efter og hvordan - men er langt fra dækkende for vores form og omfang ved en strukturanalyse. For eksempel omtaler ASTM ikke fluorescensmikroskopi, det vil sige bestemmelse af v/c-forhold. Derfor henvises der også til Beton-Teknik, som beskriver dette forhold. De schweiziske retningslinier (af Romer med flere) er blot de første i verden, der brugte epoxy tilsat fluorescerende tilsætningsstoffer til imprægnering af beton (tyndslib og planslib). Så dette går blandt andet på, hvordan man laver tyndslib og så videre. På et tidspunkt kommer der i forbindelse med DS 481/482 et forslag til retningslinier for strukturanalyse i DS-sammenhæng, hvilket vil være dækkende for den danske udførelse af strukturanalyser.



Bilag 4

Visuel besigtigelse

B4.1 Visuel registrering af skader

I tabel B4.1 er opsummeret resultatet af den visuelle registrering af bropillerne. I det nedenstående er givet en forklaring af tabellens betegnelser:

Skadetype:

Skadetyperne er beskrevet i "Eftersyn af Bygværker", Ref.29. Kun skadetyper, der er anset for relevante i forbindelse med Kystbroprojektet, er medtaget.

Orientering:

Orienteringen er angivet som N (nord), S (syd), Ø (øst) og V (vest). Da broerne ikke alle har denne orientering, er alle resultaterne konverteret til denne orientering ud fra den aktuelle orientering. Ved vurdering af broerne, hvor pillerne ikke er orienteret NSØV, er der taget bidrag fra de relevante sider (for eksempel N = NV og NØ).

Konstruktionsdel:

Pillerne er inddelt i Pament, Fundament og Pilleskaft. Denne opdeling anvendes kun, hvor det er relevant, for eksempel Langelandsbroen. For Vejlefjordbroen er denne opdeling ikke relevant. Pillerne er her inddelt i koter efter betontype (slaggebeton/alm. beton).

Skadegrad:

Skadegrader er defineret i "Beton 3, SBI 1984", Ref.29, da definitionerne i "Eftersyn af bygværker", Ref.28 ikke umiddelbart er anvendelige til dette formål.

Skadegraden er angivet ved karakteren 0 til 3. Hver skadegrad er defineret som følger:

- 0 = Ingen skade,
- 1 = Lille, næsten usynlig skade
- 2 = Skader, der ligger mellem skader af graden 1 og 3
- 3 = Stor, tydelig skade

Skadeomfang:

Skadeomfanget er defineret på følgende måde, idet definitionen i "Eftersyn af bygværker", Ref.28 er for grov til dette formål:

Stort/mange, hvis skadeomfangets udbredelse er større end 25 % eller der er flere end 7 enkeltskader pr. pilleside.

Middel/flere, hvis skadeomfangets udbredelse er mellem 10-25 % eller der er mellem 2-7 enkeltskader pr. pilleside.

Lille/få, hvis skadeomfangets udbredelse er mindre end 10 % eller der er mindre end 2 enkeltskader pr. pilleside.

Observationerne er opsummeret for alle de undersøgte piller på samme bro (inden for samme koter). Af bemærkninger fremgår det, hvor stort et antal piller registreringerne er opsummeret fra. De med streg markerede rubrikker betyder, at enten er pillerne ikke undersøgt, eller også er skadetyperne ikke relevante.

Tabel B4.1; Registrering af visuelle skader

Skadetyper				Korroderet armering med afskallet dæklag			"Ruspletter" Udfældning af korr. produkter (urevnet)			Revne med udfældning af korrosionsprodukter			Revner med hvide udfældninger/udfludning			Enkelt revner uden udfældninger			Netrevner			Delamineret/løstsiddende beton			Overfladeforvitring/erosion			Springere/ afskalning			Algel/ mos/ begroning			Ses skaderne i forbindelse med reparation	Bemærkninger	
	Bro	Konst. Del	Kote	Orientering	Lille/få	Middel/f flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/f flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/f flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/f flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/f flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/f flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/f flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/f flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/f flere	Stort/mange					
Kronprins Frederiks Bro	Parement	0-1	N	-			-			-			-			-			-			-			-			-							Der er udført registrering af østlig og vestlig klappille samt mellem pillen. Pillerne er overfladebehandlet, hvilket kan skjule smårevner og udfældninger.	
			S	-			-			-			-			-			-			-			-			-								
			Ø	-			-			-			-			-			-			-			-			-								
			V	-			-			-			-			-			-			-			-			-								
	Pilleskaft	1-pille top	N	0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0				
			S	0		0		0		0		0		2		0		0		0		0		0		0		0		0		0		ja		
			Ø	3		0		3		0		2		0		1		0		0		0		0		0		0		0		0				
Vilsund	Parement		N	-			0		0		0		3		-		-		-		-		-		-		-		-		2			Der er udført registrering af alle 4 sider på pille 1 og pille 4. Pilleskafterne er behandlet med en grøn tykfilmsmaling. Der er tidligere foretaget reparation af (sandsynligvis grove) lodrette revner. Reparationer er foretaget med 1-3 U-bøjler pr. revne. Tykfilmsmaling kan ligeledes skjule grove lodrette revner.		
			S	-			0		0		0		3		-		-		-		-		-		-		-		-		2					
			Ø	-			0		0		0		3		-		-		-		-		-		-		-		-		2					
			V	-			0		0		0		3		-		-		-		-		-		-		-		-		2					
	Pilleskaft		N	0		1		2		1		1		0		1		0		1		0		0		0		0		0		2				
			S	0		1		2		1		1		0		1		0		1		0		0		0		0		0		2				
			Ø	0		1		2		1		1		0		1		0		1		0		0		0		0		0		2				
Kong Frederik d. IX's Bro	Parement		N	-			-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-			Registrering af pillerække 1 til 11 samt klappille og anslagspille. Parement er ikke registreret systematisk. Der er dog registreret rustudfældninger i fugerne samt udludede fuger.		
			S	-			-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-					
			Ø	-			-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-					
			V	-			-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-		-					
Pilleskaft		N	0		2		0		0		0		0		0		0		0		0		1		0		0		0		0					
		S	0		2		0		0		0		0		0		2		0		0		1		0		0		0		0					
		Ø	3		2		2		0		3		0		2		0		2		0		1		0		0		0		0					
		V	0		2		2		3		3		0		2		0		2		0		1		0		0		0		0					

Skadetyper	Korroderet armering med afskallet dæklag	"Rustpletter" Udfældning af korr. produkter (urevnet)	Revne med udfældning af korrosionsprodukter	Revner med hvide udfældninger/udludning	Enkelt revner uden udfældninger	Netrevner	Delamineret/løstsiddende beton	Overfladeforvitring/erosion	Springere/afskalning	Alge/ mos/ begroning	Ses skaderne i forbindelse med reparation	Bemærkninger			
													Lille/få	Middel/flere	Stort/mange
Bro	Konst. Del	Kote	Orientering			Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	
			N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			S	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Vejleford	Fundament	0-2	Orientering			Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Der er udført systematisk registrering af pillerne 4 til 15. Der er udført mange små lokale reparationer
			N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Ø	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	N	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Pilleskift	2-8	Orientering			Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	
			N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Ø	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Kalvebodløb	Pilleskift		Orientering			Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Der er udført registrering af søjle 1.1 og søjle 2.2. Søjlerne er vacuumbehandlet.
			N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Ø	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Sorterende	Pilleskift		Orientering			Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Lille/få	Middel/flere	Stort/mange	Der er udført registreringer af søjle 1.1 og søjle 2.2. Søjlerne er vacuumbehandlet.
			N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Ø	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

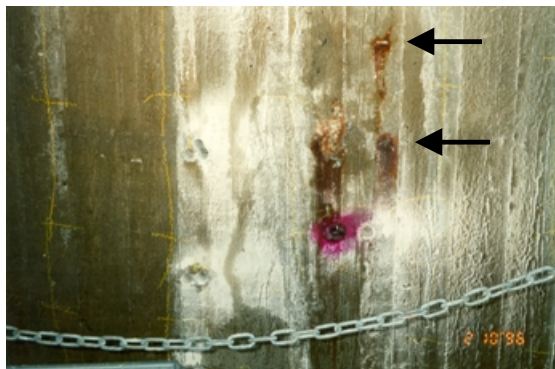
Note:

- : Angiver at konstruktionen ikke er besigtiget.

B4.2.
Fotografier af typiske skader fundet ved
basisundersøgelserne



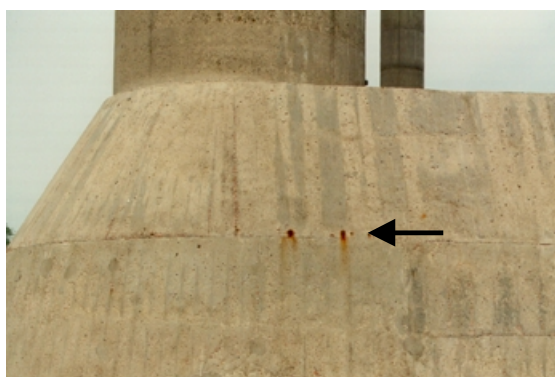
Korroderet armering, afskallet dæklag (Vejlefjordbroen)



"Rustpletter" - udfældning af røde korrosionsprodukter (Sallingsundbroen)



"Rustpletter" - udfældning af røde korrosionsprodukter (Sallingsundbroen)



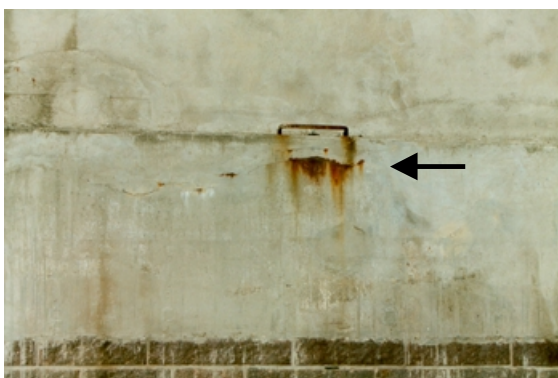
"Rustpletter" (Svendborgsund)



Revne med udfældning af korrosionsprodukter (Sallingsundbroen)



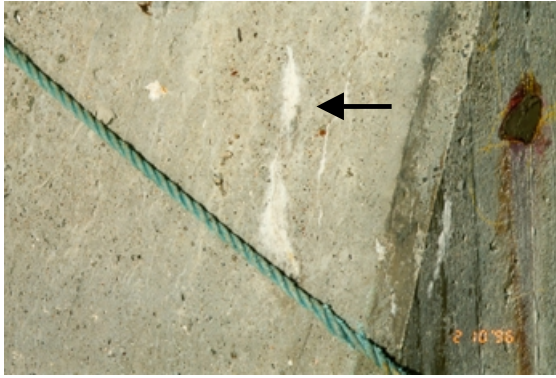
Revne med udfældning af korrosionsprodukter (Siøsundbroen)



Skade i støbeskel til reparation (Langelandsbroen)



Udfældning af korrosionsprodukter i fuger i parament (Langelandsbroen)



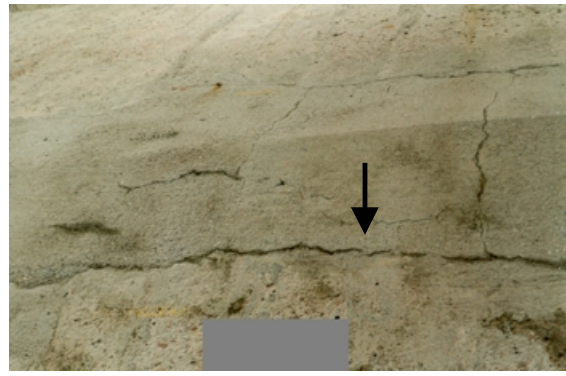
Revner med hvide udfældninger
(Sallingsundbroen)



Netrevner og revne med hvide
udfældninger (Siø Sundbroen)



Enkelt revne (Siø Sundbroen)



Revner i reparation (Svendborgsundbroen)



Enkelt grov revne (sten-mørtel) i paret
uden udfældninger (Vilsundbroen, pille 4)



Netrevner (Hadsundbroen)



Delamineret/Løs beton (Langelandsbroen)



Mos / forvitring (Langelandsbroen)



Afskalning (Langelandsbroen)



Overfladeforvitring/erosion
(Vejlefjordbroen)



Begroning (Vejlefjordbroen)



Alger/begroning i "splashzonen"
(Hadsundbroen)



Alge/mos over splashzonen
(Sallingsundbroen)



Alger/begroning (Langelandsbroen)



Bilag 5

Dæklagsmålinger

Bilag 5 Dæklagsmålinger

Dette bilag indeholder en oversigt over dæklagsmålinger foretaget i forbindelse med Kystbroprojektet. For hver bro er resultaterne af dæklagsmålinger angivet som funktion af søjle og kote. Ligeledes er dæklag ifølge tegninger medtaget, se Tabel B5.1.

Ud fra målinger på hver enkelt bro er der fastlagt et generelt dæklag til brug ved fremskrivningerne af kloridprofiler. Der er - så vidt muligt - kun valgt et dæklag for hver bro til brug ved fremskrivningerne. Ved valget af dæklag til fremskrivningerne er der valgt en værdi mellem mindste målte dæklag og en middelværdi af de foretagne dæklagsmålinger. Vægtningen af minimumdæklag eller middelværdi for dæklag er foretaget individuelt for hver enkelt bro, afhængig af antallet af målinger, fordeling af målinger samt en generel vurdering af alle dæklagsmålinger.

Der er på nogle broer lokalt målt dæklag 5-10 mm mindre end det valgte dæklag (til brug ved fremskrivningerne). Disse lokale områder med mindre dæklag vil - forudsat kloridbelastningen er ensartet - kunne udvikle kloridinitieret korrosion tidligere end andre områder med større dæklag. Dette lokale område vil efterfølgende kunne udvikle skader på betonen og armeringen tidligere end den øvrige del af pillen. Ved fremskrivningen ønskes det dog at vurdere initieringstiden (og dermed levetiden) samlet for alle pillerne. Derfor anvendes en værdi til fremskrivning som er mellem minimum og middelværdi af dæklagsmålinger.

Bro	Pille	Orientering	Kote	Dæklag, måling	Dæklag ifølge tegning
Kronprins Frederiks Bro 1936	K-Øst	Øst	0,0 - 1,5 m (0 - 1,5 m o.p.)	30-35 mm	30 mm (ydside)
	K-Vest	Nord	0,0 - 1,5 m (0 - 1,5 m o.p.)	35-45 mm	
		Øst	0,0 - 1,5 m (0 - 1,5 m o.p.)	30-35 mm	
M	Vest	0,0 - 1,5 m (0 - 1,5 m o.p.)	30-35 (40) mm	30-35 mm	
		Nord	0,0 - 1,5 m (0 - 1,5 m o.p.)	30-35 mm	
		Øst	0,0 - 1,5 m (0 - 1,5 m o.p.)	45-50 mm	
		Syd	0,0 - 1,5 m (0 - 1,5 m o.p.)	>50 mm	
			Dæklag til fremskrivning	30 mm	
Vilsundbroen 1936	1	Øst	1,5 - 2,5 m (0 - 1 m o.p.)	31 (40) mm	30 mm
		Nord	1,5 - 2,5 m (0 - 1 m o.p.)	33 (40) mm	
		Vest	1,5 - 2,5 m (0 - 1 m o.p.)	30 (45) mm	
	4	Syd	1,5 - 2,5 m (0 - 1 m o.p.)	40 (50) mm	
		Vest	1,5 - 2,5 m (0 - 1 m o.p.)	23 (40) mm	
		Syd	1,5 - 2,5 m (0 - 1 m o.p.)	30 (45) mm	
			Dæklag til fremskrivning	40 mm	
Kong Frederik d. IX's Bro 1960	4-2	Vest	2,0 - 3,0 m (0- 2 m o.p.)	50-55 mm	50 mm
		Øst	1,0 - 2,0 m (0 - 1 m o.p.)	60 mm	
			2,0 - 3,0 m (1 - 2 m o.p.)	45-50 mm	
	4-2	Vest	1,0 - 3,0 m (0- 2 m o.p.)	60-70 mm	
		Øst	1,0 - 3,0 m (0- 2 m o.p.)	35 mm	
			1,0 - 3,0 m (0- 2 m o.p.)	50-55 mm	
	K 8	Øst	1,0 - 3,0 m (0- 2 m o.p.)	50-55 mm	
		Vest	1,0 - 2,0 m (0 - 1 m o.p.)	22-25 mm	
			2,0 - 3,0 m (1 - 2 m o.p.)	30-40 mm	
	8	Øst	1,0 - 2,0 m (0 - 1 m o.p.)	20 mm	
			2,0 - 3,0 m (1 - 2 m o.p.)	30 mm	
		Vest	1,0 - 2,0 m (0 - 1 m o.p.)	20-25 mm	
12	Vest	2,0 - 3,0 m (1 - 2 m o.p.)	30-35 mm		
	Øst	1,0 - 3,0 m (0- 2 m o.p.)	65-70 mm		
		1,0 - 3,0 m (0- 2 m o.p.)	55-60 mm		
12	Vest	1,0 - 3,0 m (0- 2 m o.p.)	35 -55 mm		
			4-2 : 45 mm		
			8 : 25 mm		
			12 : 35 mm		
Langelandsbroen 1962	12	Øst, Fund.		14 (28;10) mm	30 mm (udvendig)
		Øst		28 (34; 3) mm	
	13	Syd		33 (39; 7) mm	
		Vest		26 (30; 2) mm	
		Øst, Fund.		33 (44; 10) mm	
		Øst		44 (46; 1) mm	
		Syd		42 (45; 3) mm	
			Dæklag til fremskrivning	30 mm	
Sjøsundbroen 1964	-	-	Dæklag til fremskrivning	100 mm	Skiner med et dæklag over 100 mm.
Svendborgsundbroen 1966	6	-		36 (41) mm	30 mm
	8			32 (36-41) mm	
	10			24 (44) mm	
	6-1			27 (30-41) mm	
	8-1			46 (41) mm	
	10-2			40 (43) mm	
			Dæklag til fremskrivning	35 mm	

Hadsund- broen 1976	2	Nord	0,25 m 1,50 m 2,00 m	40 mm 37 mm 38 mm	40 mm
	5	Syd-Vest	0,25 m 1,50 m 2,00 m Dæklag til fremskrivning	35 mm 40 mm 45 mm 35 mm	
Sallingsund- broen 1978	6	Syd	0 - 1,0 m 1,0 - 2,5 m	33-38 (50-60) mm 36-39 (45) mm	Isbryderskal 30 mm Pille 30 mm
	10	Syd, SV	0 - 1,0 m 1,0 - 2,5 m	32-42 (40-55) mm 30-32 (35-40) mm	
	12	Nord	0 - 1,0 m 1,0 - 2,5 m Dæklag til fremskrivning	32-42 (50-60) mm 32-35 (40-50) mm 40 mm	
Vejlefjord- broen 1980	4	Syd	Under / Over kote 2,0 m	35 (44) / 47 (53)	50 mm under kote 2,0 m 30 mm over kote 2,0 m
	8	Øst Nord Vest	Under / Over kote 2,0 m Under / Over kote 2,0 m Under / Over kote 2,0 m	mm 44 (59) / 55 (58) mm	
	9	Syd Nord	Under / Over kote 2,0 m Under / Over kote 2,0 m	39 (53) / 35 (56) mm 57 (66) / 58 (66) mm 39 (50) / 42 (58) mm 62 (66) / 56 (66) mm	
			Dæklag til fremskrivning	40 mm / 35 mm	
Kalvebodløb- broen 1984	Pille 1.1	Vest	0,30 m 1,10 m 1,85 m	38 mm 35 mm 38 mm	40 mm
	Pille 2.2	Øst	0,75 m 1,55 m 1,85 m 2,23 m Dæklag til fremskrivning	41 mm 40 mm 41 mm 35 mm 35 mm	
Sorterende- broen 1984	Pille 1.1	Øst	0,00 m 0,59 m 1,00 m 2,00 m	32 mm 34 mm 35 mm 36 mm	40 mm
	Pille 2.2	Vest	0,00 m 0,75 m 2,00 m Dæklag til fremskrivning	38 mm 43 mm 49 mm 35 mm	
<p>Noter: I kolonne "Dæklag, måling" er anvendt følgende benævnelser: 30 mm : Typetal for dæklagsmålinger 31 (40) mm : Minimum (middelværdi) af dæklagsmålinger (35 mm; 5 mm) : (middelværdi, spredning) for dæklagsmålinger</p>					

Table B 5.1 Oversigt over måling af dæklag i Kystbroprojektet samt valg af dæklag til brug i modeller til fremskrivning.



Bilag 6

Kloridindhold

B6.1 Oversigtsskema for totalt syreopløseligt og vandopløseligt kloridindhold

Kun data for marint eksponerede piller er medtaget. Data fra indvendigt i piller eller under vand er ikke inkluderet

Bro	Middel saltindhold i oo/o	Skønnet middel Cl-indhold i %	Indvielsesår	Undersøgelsesår	Alder	Løbe-nr. bro	Løbe-nr.	Pille P=pille F=pillefod	Orientering		Kote i m	Prøveudtagning		Titration	RCT Ext.-tid timer	RCTW Ext.-tid min.	Cl- i vægt% af betonvægten											
									Benæv-nelse	Grader N=0		Kerne					Støv-prøver	0-15 mm	15-30 mm	30-45 mm	45-60 mm	60-75 mm	75-90 mm	90-150 mm				
												Fræs-n.	Knusn.															
Kronprins Fr. note 1	16,9	0,93	1936	1995	59	1	1	Øst k.p	V	245	1,1			x	x			0,28	0,12	0,07	0,01							
						2	2	Øst k.p	V	245	1,1			x	x					0,17	0,12	0,04	0,02					
						3	3	Øst k.p	V	245	1,5		x					x				0,06	0,03	0,01	0,02			
						4	4	Øst k.p	N-V	290	1,1							x	x			0,12	0,14	0,12	0,10			
						5	5	Vest k.p	Ø	65	1,1							x	x			0,17	0,16	0,10	0,05			
						6	6	Vest k.p	N-Ø	20	1,1							x	x			0,14	0,12	0,11	0,06			
						7	7	Vest k.p	V	245	1,1			x					x			0,13	0,19	0,16	0,14			
						8	8	Vest k.p	V	245	1,5			x					x			0,12	0,10	0,10	0,07			
						9	9	Mellem p.	S-V	200	1,4							x		x		0,07	0,04	0,02	0,01			
						10	10	Mellem p.	Ø	65	1,2							x		x		0,06	0,05	0,03	0,03			
Vilsund	25,7	1,41	1936	1997	61	1	11	1	Ø	68	2,5			x		24		0,12	0,35		0,29		0,13	0,04				
						2	12	1	Ø	68	2,0			x		24				0,13	0,33		0,35		0,18	0,07		
						3	13	1	Ø	68	1,8	x					x				0,20	0,34	0,23	0,18	0,11	0,09	0,05	
						4	14	1	Ø	68	1,5						x		24			0,33	0,48		0,41		0,25	0,09
						5	15	1	Ø	68	1,5						x			1		0,19	0,15		0,33		0,17	0,06
						6	16	1	N	338	2,5							x		24		0,11	0,15		0,09		0,05	0,02
						7	17	1	N	338	2,0							x		24		0,08	0,08		0,02		0,02	0,01
						8	18	1	N	338	1,5							x		24		0,16	0,12		0,06		0,03	0,02
						9	19	1	N	338	1,5							x		1		0,14	0,11		0,06		0,04	0,02
						10	20	1	V	248	2,5							x		24		0,15	0,20		0,19		0,10	0,02
						11	21	1	V	248	2,0							x		24		0,15	0,21		0,14		0,06	0,02
						12	22	1	V	248	1,5							x		24		0,05	0,28		0,26		0,19	0,09
						13	23	1	V	248	1,5							x		1		0,05	0,17		0,19		0,14	0,06
						14	24	1	S	158	2,5							x		24		0,07	0,04		0,03		0,02	0,02
						15	25	1	S	158	2,0							x		24		0,09	0,07		0,05		0,02	0,02
						16	26	1	S	158	1,5							x		24		0,14	0,10		0,05		0,04	0,02
						17	27	1	S	158	1,5							x		1		0,19	0,08		0,04		0,03	0,02
						18	28	4	Ø	68	2,5							x		24		0,13	0,33		0,19		0,06	0,01
						19	29	4	Ø	68	2,5							x		1		0,07	0,21		0,14		0,03	0,01
						20	30	4	Ø	68	2,0							x		24		0,28	0,23		0,11		0,05	0,02
						21	31	4	Ø	68	2,0							x		1		0,18	0,13		0,06		0,03	0,01
						22	32	4	Ø	68	1,8	x							x			0,27	0,20	0,14	0,10	0,06	0,05	0,03
						23	33	4	Ø	68	1,5							x		24		0,27	0,27		0,15		0,05	0,01
						24	34	4	Ø	68	1,5							x		1		0,22	0,19		0,10		0,03	0,01
						25	35	4	N	338	2,5							x		24		0,06	0,12		0,07		0,02	0,01
						26	36	4	N	338	2,0							x		24		0,09	0,07		0,04		0,02	0,02

B6.1 Oversigtsskema for totalt syreopløseligt og vandopløseligt kloridindhold

Kun data for marint eksponerede piller er medtaget. Data fra indvendigt i piller eller under vand er ikke inkluderet

Bro	Middel saltindhold i oo/o	Skønnet middel Cl-indhold i %	Indvielsesår	Under-søgelsesår	Alder	Løbe-nr. bro	Løbe-nr.	Pille P=pille F=pillefod	Orientering		Kote i m	Prøveudtagning		Titration	RCT Ext.-tid timer	RCTW Ext.-tid min.	Cl- i vægt% af betonvægten							
									Benæv-nelse	Grader N=0		Fræsn.	Knusn.				Støv-prøver	0-15 mm	15-30 mm	30-45 mm	45-60 mm	60-75 mm	75-90 mm	90-150 mm
							27	37	4	N	338	1,5			x	24		0,01	0,01	0,08	0,08	0,03		
							28	38	4	N	338	1,5			x		1	0,00	0,00	0,05	0,07	0,03		
							29	39	4	V	248	2,5			x	24		0,11	0,23	0,15	0,04	0,01		
							30	40	4	V	248	2,0			x	24		0,13	0,16	0,06	0,02	0,01		
							31	41	4	V	248	1,5			x	24		0,14	0,10	0,03	0,01	0,01		
							32	42	4	V	248	1,5			x		1	0,13	0,08	0,03	0,01	0,00		
							33	43	4	S	158	2,5			x	24		0,06	0,04	0,02	0,01	0,01		
							34	44	4	S	158	2,0			x	24		0,12	0,07	0,05	0,02	0,01		
							35	45	4	S	158	1,5			x	24		0,16	0,13	0,08	0,06	0,03		
							36	46	4	S	158	1,5			x		1	0,13	0,09	0,06	0,04	0,02		
Kong Fr. IX note 3	11,3	0,62	1960	1995	35	1	47	4-2	V	240	1,2	x			x		0,16	0,08	0,02	0,01				
						2	48	4-2	Ø	60	1,3	x			x		0,10	0,08	0,03	0,01				
						3	49	4-2	V	240	1,3			x	24		0,21	0,14	0,08	0,05				
						4	50	4-2	V	240	2,8			x	24		0,13	0,09	0,08	0,05				
						5	51	4-2	S	150	0,4			x	24		0,72	0,49	0,32	0,31				
						6	52	klappille/K1	Ø	60	1,6	x			x		0,08	0,02						
						7	53	8N	V	240	1,2	x			x		0,17	0,10	0,09	0,07				
						8	54	8N	V	240	2,0	x			x		0,06	0,12	0,10	0,07				
						9	55	8N	S	150	1,3	x			x		0,13	0,18	0,12	0,1				
						10	56	8N	Ø	60	1,2		x		x		0,15	0,14	0,11	0,07	0,07			
						11	57	8N	Ø	60	1,2		x		x		0,12	0,13	0,11	0,09	0,04			
						12	58	12N	Ø	60	1,0	x			x		0,27	0,18	0,12	0,09				
						13	59	12N	Ø	60	1,9	x			x		0,06	0,07	0,03	0,04				
						14	60	12N	N	330	1,2	x			x		0,14	0,09	0,06	0,02				
						15	61	12N	Ø	60	1,2						0,17	0,17	0,13	0,09	0,03			
						16	62	12N	Ø	60	1,2						0,13	0,12	0,10	0,09	0,06			
Langeland note 4	14,6	0,80	1962	1998	36	1	63	F12	N	25	1,6			x	x		0,13	0,14	0,12					
						2	64	P12	N	25	3,1			x	x		0,18	0,12	0,07					
						3	65	P12	N	25	4,1			x	x		0,13	0,08	0,06					
						4	66	F12	Ø	115	1,6			x	x		0,23	0,24	0,18					
						5	67	F12.rep.	Ø	115	1,6			x	x		0,21	0,07	0,03					
						6	68	F12.rep.	Ø	115	1,6	x			x		0,26	0,13	0,07					
						7	69	F12	Ø	115	1,6	x				0	0,08							
						8	70	F12	Ø	115	1,6	x				1	0,11							
						9	71	F12	Ø	115	1,6	x				5	0,14							
						10	72	F12	Ø	115	1,6	x				15	0,16							

B6.1 Oversigtsskema for totalt syreopløseligt og vandopløseligt kloridindhold

Kun data for marint eksponerede piller er medtaget. Data fra indvendigt i piller eller under vand er ikke inkluderet

Bro	Middel saltindhold i oo/o	Skønnet middel Cl-indhold i %	Indvielsesår	Undersøgelsesår	Alder	Løbe-nr. bro	Løbe-nr.	Pille P=pille F=pillefod	Orientering		Kote i m	Prøveudtagning			Titration	RCT Ext.-tid timer	RCTW Ext.-tid min.	Cl- i vægt% af betonvægten											
									Benæv-nelse	Grader N=0		Kerne		Støv-prøver				0-15 mm	15-30 mm	30-45 mm	45-60 mm	60-75 mm	75-90 mm	90-150 mm					
												Fræs-n.	Knusn.																
						11	73	F12	Ø	115	1,6	x				30	0,18												
						12	74	F12	Ø	115	1,6	x				120	0,19												
						13	75	P12	Ø	115	3,1			x	x		0,12	0,10	0,12										
						14	76	P12	Ø	115	3,1	x			x		0,12	0,10	0,05										
						15	77	P12	Ø	115	3,1	x				0	0,04												
						16	78	P12	Ø	115	3,1	x				1	0,06												
						17	79	P12	Ø	115	3,1	x				5	0,07												
						18	80	P12	Ø	115	3,1	x				15	0,08												
						19	81	P12	Ø	115	3,1	x				30	0,08												
						20	82	P12	Ø	115	3,1	x				120	0,11												
						21	83	P12	Ø	115	4,1			x	x		0,11	0,18	0,14										
						22	84	F12	S	205	1,6			x	x		0,11	0,15	0,15										
						23	85	P12	S	205	3,1			x	x		0,09	0,09	0,06										
						24	86	P12	S	205	4,1			x	x		0,07	0,08	0,06										
						25	87	F12	V	295	1,6			x	x		0,16	0,13	0,10										
						26	88	P12	V	295	3,1			x	x		0,03	0,06	0,05										
						27	89	P12	V	295	4,1			x	x		0,02	0,06	0,05										
						28	90	F13	Ø	115	1,6			x	x		0,21	0,17	0,17										
						29	91	F13	Ø	115	1,6	x			x		0,14	0,12	0,09										
						30	92	P13	Ø	115	3,1			x	x		0,09	0,18	0,11										
						31	93	P13	Ø	115	3,1	x			x		0,11	0,14	0,11										
						32	94	P13	S	205	3,1			x	x		0,08	0,12	0,10										
Sjøsund note 5	14,6	0,80	1964	1996	32	1	95	P3(1)	NV	310	1,6			x	x		0,12	0,10	0,07	0,06	0,03								
						2	96	P3(2)	NV	310	1,6			x	x		0,24	0,12	0,06	0,03	0,01								
						3	97	P3(3)	NV	310	1,6			x	x		0,24	0,12	0,09	0,05	0,03								
						4	98	P3(3)	NV	310	1,6			x			1	0,19	0,08	0,05	0,03	0,02							
						5	99	P3(4)	NV	310	2,6			x	x			0,34	0,24	0,15	0,10	0,05							
						6	100	F3(5)	NV	310	1,1			x	x			0,19	0,09	0,13	0,09	0,05							
						7	101	P5(1)	NV	310	1,6			x	x			0,25	0,18	0,11	0,09	0,05							
						8	102	P5(2)	NV	310	1,6			x	x			0,17	0,14	0,10	0,06	0,03							
						9	103	P5(3)	NV	310	1,6			x	x			0,16	0,10	0,06	0,02	0,01							
						10	104	P5(3)	NV	310	1,6			x				1	0,08	0,05	0,04	0,02	0,02						
						11	105	P5(4)	NV	310	2,6			x	x			0,08	0,09	0,09	0,08	0,02							
						12	106	F5(5)	NV	310	1,1			x	x			0,30	0,19	0,11	0,05	0,01							
						13	107	P12(1)	NV	310	1,6			x	x			0,17	0,12	0,06	0,03	0,02							
						14	108	P12(2)	NV	310	1,6			x	x			0,25	0,14	0,11	0,06	0,03							

B6.1 Oversigtsskema for totalt syreopløseligt og vandopløseligt kloridindhold

Kun data for marint eksponerede piller er medtaget. Data fra indvendigt i piller eller under vand er ikke inkluderet

Bro	Middel saltindhold i oo/o	Skønnet middel Cl-indhold i %	Indvielsesår	Under-søgelsesår	Alder	Løbe-nr. bro	Løbe-nr.	Pille P=pille F=pillefod	Orientering		Kote i m	Prøveudtagning			Titration	RCT Ext.-tid timer	RCTW Ext.-tid min.	Cl- i vægt% af betonvægten						
									Benæv-nelse	Grader N=0		Kerne		Støv-prøver				0-15 mm	15-30 mm	30-45 mm	45-60 mm	60-75 mm	75-90 mm	90-150 mm
												Fræs.	Knusn.											
Svendborgsund note 5	14,6	0,80	1966	1996	30	15	109	P12(3)	NV	310	1,6			x	x			0,19	0,09	0,08	0,03	0,01		
						16	110	P12(3)	NV	310	1,6			x			1	0,13	0,05	0,05	0,03	0,02		
						17	111	P12(4)	NV	310	2,6			x	x				0,11	0,06	0,05	0,03	0,01	
						18	112	F12(5)	NV	310	1,1			x	x				0,41	0,23	0,13	0,09	0,02	
						1	113	F6	SØ	140	1,6			x	x				0,13	0,15	0,09	0,06	0,04	
						2	114	F6	SØ	140	2,1			x	x				0,12	0,05	0,01	0,00	0,00	
						3	115	P6-1	SV	230	4,1			x	x				0,24	0,13	0,03	0,01	0,01	
						4	116	P6-1	SV	230	4,1			x			1		0,11	0,05	0,01	0,00	0,00	
						5	117	P6-1	SV	230	5,1			x	x				0,14	0,12	0,05	0,01	0,01	
						6	118	F8	SØ	140	1,6			x	x				0,08	0,07	0,05	0,02	0,01	
						7	119	F8	SØ	140	1,6			x	x				0,10	0,14	0,11	0,05	0,01	
						8	120	P8-1	SV	230	4,1			x	x				0,13	0,03	0,01	0,01	0,00	
						9	121	P8-1	SV	230	4,1			x			1		0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	
						10	122	P8-1	SV	230	5,1			x	x				0,11	0,04	0,02	0,01	0,00	
						11	123	F8	NØ	50	1,6			x	x				0,18	0,11	0,05			
						12	124	F8	NØ	50	3,1			x	x				0,05	0,09	0,05			
						13	125	P8-1	NØ	50	4,1			x	x				0,27	0,17	0,07			
						14	126	F8	NV	320	1,6			x	x				0,07	0,02	0,03			
15	127	F8	NV	320	3,1			x	x				0,07	0,02	0,07									
16	128	P8-1	NV	320	4,1			x	x				0,15	0,05	0,02									
17	129	F8	SØ	140	1,6			x	x				0,12	0,08	0,07									
18	130	F8	SØ	140	3,1			x	x				0,13	0,08	0,08									
19	131	P8-1	SØ	140	4,1			x	x				0,19	0,08	0,02									
20	132	F8	SV	230	1,6			x	x				0,20	0,09	0,10									
21	133	F8	SV	230	3,1			x	x				0,22	0,11	0,07									
22	134	P8-1	SV	230	4,1			x	x				0,16	0,04	0,02									
23	135	F10	SØ	140	1,6			x	x				0,16	0,12	0,09	0,07	0,04							
24	136	F10	SØ	140	1,6			x	x				0,22	0,11	0,05	0,02	0,02							
25	137	F10	SØ	140	2,1			x	x				0,20	0,13	0,09	0,06	0,06							
26	138	P10-1	SV	230	4,1			x	x				0,32	0,20	0,04	0,01	0,01							
27	139	P10-1	SV	230	4,1			x			1		0,19	0,07	0,01	0,00	0,00							
28	140	P10-2	SV	230	5,2			x	x				0,37	0,17	0,06	0,02	0,01							
Hadsund	-	-	1976	1996	20	1	152	P2	N	322	2,0		x	x			0,05	0,05	0,03	0,01	0,00			
						2	153	P2	N	322	1,5		x	x			0,02	0,09	0,05	0,01	0,00			
						3	154	P2	N	322	1,0		x	x			0,07	0,11	0,07	0,01	0,00			
						4	155	P2	N	322	0,5		x	x			0,21	0,22	0,23	0,19	0,05			

B6.1 Oversigtsskema for totalt syreopløseligt og vandopløseligt kloridindhold

Kun data for marint eksponerede piller er medtaget. Data fra indvendigt i piller eller under vand er ikke inkluderet

Bro	Middel saltindhold i oo/o	Skønnet middel Cl-indhold i %	Indvielsesår	Under-søgelsesår	Alder	Løbe-nr. bro	Løbe-nr.	Pille P=pille F=pillefod	Orientering		Kote i m	Prøveudtagning		Titr.	RCT Ext.-tid timer	RCTW Ext.-tid min.	Cl- i vægt% af betonvægten							
									Benæv-nelse	Grader N=0		Kerne					Støv-prøver	0-15 mm	15-30 mm	30-45 mm	45-60 mm	60-75 mm	75-90 mm	90-150 mm
												Fræs-n.	Knusn.											
						5	156	P2	N	322	0,3		x	x			0,39	0,32	0,29	0,16	0,08			
						6	157	P2	N	322	0,0		x	x			0,43	0,34	0,26	0,19	0,10			
						7	158	P2	N	322	0,0		x		24		0,44	0,29	0,29	0,20	0,10			
						8	159	P2	N	322	0,0		x			1	0,22	0,20	0,16	0,11	0,06			
						9	160	P5A	S	142	0,3		x	x			0,16	0,07	0,03	0,00	0,00			
						10	161	P5A	S	142	0,0		x	x			0,35	0,23	0,12	0,04	0,01			
						11	162	P5A	S	142	0,0		x		24		0,32	0,21	0,12	0,04	0,01			
						12	163	P5A	S	142	0,0		x			1	0,20	0,12	0,06	0,02	0,01			
						13	164	P5B	S	142	2,0		x	x			0,03	0,01	0,00	0,00	0,00			
						14	165	P5B	S	142	1,0		x	x			0,15	0,05	0,02	0,00	0,00			
						15	166	P5B	S	142	0,5		x	x			0,17	0,11	0,06	0,01	0,00			
						16	167	P5B	S	142	0,3		x	x			0,49	0,21	0,16	0,05	0,01			
						17	168	P5B	S	142	0,0		x	x			0,73	0,38	0,31	0,11	0,02			
						18	169	P5B	S	142	0,0		x		24		0,50	0,40	0,38	0,11	0,03			
						19	170	P5B	S	142	0,0		x			1	0,50	0,24	0,19	0,06	0,01			
						20	171	P2	NØ		1,5		x	x			0,06	0,10	0,05	0,01	0,00			
						21	172	P2	NØ		0,5		x				0,31	0,28	0,11	0,06	0,01			
Sallingsund	27,9	1,53	1978	1996	18	1	173	S6	S	130	2,0		x	x			0,10	0,09	0,06	0,04	0,00			
						2	174	S6	S	130	1,0		x	x			0,30	0,24	0,16	0,09	0,14			
						3	175	S6	S	130	0,5		x	x			0,36	0,29	0,17	0,07	0,03			
						4	176	S6	S	130	0,3		x	x			0,35	0,23	0,12	0,04	0,01			
						5	177	S6	S	130	0,0		x	x			0,23	0,13	0,12	0,03	0,00			
						6	178	S6	S	130	0,0		x		24		0,19	-	0,12	0,05	0,01			
						7	179	S6	S	130	0,0		x			1	0,18	0,13	0,08	0,03	0,01			
						8	180	S10	S	130	2,3		x	x			0,22	0,12	0,05	0,01	0,00			
						9	181	S10	S	130	1,3		x	x			0,52	0,21	0,14	0,02	0,00			
						10	182	S10	S	130	0,8		x	x			0,47	0,23	0,14	0,01	0,00			
						11	183	S10	S	130	0,5		x	x			0,49	0,25	0,10	0,02	0,01			
						12	184	S10	S	130	0,0		x	x			0,56	0,23	0,12	0,03	0,00			
						13	185	S10	S	130	0,0		x		24		0,50	-	0,14	0,05	0,05			
						14	186	S10	S	130	0,0		x			1	0,44	0,16	0,08	0,02	0,01			
						15	190	S12	N	310	2,0		x	x			0,10	0,06	0,04	0,02	0,00			
						16	191	S12	N	310	1,0		x	x			0,20	0,08	0,03	0,01	0,01			
						17	192	S12	N	310	0,5		x	x			0,24	0,10	0,04	0,01	0,00			
						18	193	S12	N	310	0,3		x	x			0,25	0,13	0,08	0,00	0,01			
						19	194	S12	N	310	0,0		x	x			0,24	0,13	0,11	0,01	0,02			

B6.1 Oversigtsskema for totalt syreopløseligt og vandopløseligt kloridindhold

Kun data for marint eksponerede piller er medtaget. Data fra indvendigt i piller eller under vand er ikke inkluderet

Bro	Middel saltindhold i oo/o	Skønnet middel Cl-indhold i %	Indvielsesår	Under-søgelsesår	Alder	Løbe-nr. bro	Løbe-nr.	Pille P=pille F=pillefod	Orientering		Kote i m	Prøveudtagning			Titration	RCT Ext.-tid timer	RCTW Ext.-tid min.	Cl- i vægt% af betonvægten						
									Benæv-nelse	Grader N=0		Kerne		Støv-prøver				0-15 mm	15-30 mm	30-45 mm	45-60 mm	60-75 mm	75-90 mm	90-150 mm
												Fræsn.	Knusn.											
				1998	20	20	195	S12	N	310	0,0			x		24		0,22	0,16	0,08	0,07	0,07		
						21	196	S12	N	310	0,0			x			1	0,16	0,08	0,04	0,07	0,07		
						22	197	S14	N	310	1,3			x	x				0,53	0,28	0,18			
						23	198	S14	N	310	1,8			x	x				0,27	0,16	0,14			
						24	199	S14	N	310	1,8	x			x				0,29	0,15	0,08			
						25	200	S14	N	310	2,3			x	x				0,27	0,16	0,14			
						26	201	S14	Ø	40	1,3			x	x				0,22	0,14	0,10			
						27	202	S14	Ø	40	1,8			x	x				0,24	0,12	0,07			
						28	203	S14	Ø	40	1,8	x			x				0,21	0,13	0,08			
						29	204	S14	Ø	40	2,3			x	x				0,34	0,17	0,09			
						30	205	S14	S	130	1,3			x	x				0,44	0,20	0,07			
						31	206	S14	S	130	1,8			x	x				0,22	0,08	0,04			
						32	207	S14	S	130	2,3			x	x				0,14	0,09	0,03			
						33	208	S14	V	220	1,3			x	x				0,20	0,08	0,10			
						34	209	S14	V	220	1,8			x	x				0,13	0,09	0,04			
						35	210	S14	V	220	1,8	x			x				0,17	0,06	0,03			
						36	211	S14	V	220	2,3			x	x				0,10	0,07	0,05			
Vejlefjord note 6	-	-	1980	1997	17	1	212	P4	S	192	0,5	x		x				0,51	0,18					
						2	213	P4	S	192	2,8	x		x				0,17	0,13					
						3	214	P8	N	12	0,4	x		x				0,41	0,09					
						4	215	P8	N	12	0,4			x	x				0,47	0,06	0,01	0		
						5	216	P8	N	12	2,5	x		x					0,11	0,05				
						6	236	P9	N	12	0,5	x		x					0,71	0,12				
						7	237	P9	N	12	2,6	x		x					0,11	-				
Kalvebodløb note 7	12,1	0,67	1984	1996	12	1	238	S1.1	V	275	1,9			x	x			0,05	0,02	0,02	0,01	0,02		
						2	239	S1.1	V	275	1,6			x	x				0,07	0,02	0,01	0,01	0,01	
						3	240	S1.1	V	275	1,1			x	x				0,08	0,01	0,00	0,02	0,01	
						4	241	S1.1	V	275	0,3			x	x				0,22	0,01	0,00	0,00	0,01	
						5	242	S1.1	V	275	0,3			x		24			0,18	0,01	0,01	0,01	0,01	
						6	243	S1.1	V	275	0,3			x			1		0,11	0,01	0,00	0,00	0,00	
						7	244	S2.2	Ø	95	2,4			x	x				0,05	0,05	0,03	0,02	0,02	
						8	245	S2.2	Ø	95	1,9			x	x				0,06	0,04	0,02	0,01	0,02	
						9	246	S2.2	Ø	95	1,6			x	x				0,20	0,05	0,01	0,01	0,01	
						10	247	S2.2	Ø	95	1,1			x	x				0,29	0,10	0,01	0,01	0,01	
						11	248	S2.2	Ø	95	0,8			x	x				0,66	0,20	0,03	0,01	0,01	
						12	249	S2.2	Ø	95	0,8			x		24			0,50	0,21	0,05	0,01	0,01	

B6.1 Oversigtsskema for totalt syreopløseligt og vandopløseligt kloridindhold

Kun data for marint eksponerede piller er medtaget. Data fra indvendigt i piller eller under vand er ikke inkluderet

Bro	Middel saltindhold i oo/o	Skønnet middel Cl-indhold i %	Indvielsesår	Under-søgelsesår	Alder	Løbe-nr. bro	Løbe-nr.	Pille P=pille F=pillefod	Orientering		Kote i m	Prøveudtagning		Titration	RCT Ext.-tid timer	RCTW Ext.-tid min.	Cl- i vægt% af betonvægten							
									Benæv-nelse	Grader N=0		Fræs.	Knusn.				Støv-prøver	0-15 mm	15-30 mm	30-45 mm	45-60 mm	60-75 mm	75-90 mm	90-150 mm
						13	250	S2.2	Ø	95	0,8			x		1	0,40	0,14	0,02	0,01	0,01			
Sorterende	12,1	0,67	1984	1996	12	1	251	S1.1	Ø		2,0			x	x		0,05	0,02	0,01	0,02	0,02			
						2	252	S1.1	Ø		1,0			x	x		0,12	0,01	0,01	0,01	0,02			
						3	253	S1.1	Ø		0,5			x	x		0,14	0,02	0,01	0,02	0,02			
						4	254	S1.1	Ø		0,3			x	x		0,17	0,07	0,02	0,02	0,02			
						5	255	S1.1	Ø		0,0			x	x		0,26	0,10	0,04	0,01	0,02			
						6	256	S1.1	Ø		0,0			x		24	0,22	0,10	0,04	0,02	0,02			
						7	257	S1.1	Ø		0,0			x		1	0,17	0,06	0,02	0,01	0,01			
						8	258	S2.2	V		2,0			x	x		0,07	0,01	0,01	0,01	0,01			
						9	259	S2.2	V		1,5			x	x		0,08	0,01	0,01	0,01	0,01			
						10	260	S2.2	V		1,0			x	x		0,11	0,01	0,01	0,01	0,01			
						11	261	S2.2	V		0,5			x	x		0,14	0,01	0,01	0,01	0,01			
						12	262	S2.2	V		0,3			x	x		0,18	0,01	0,02	0,01	0,01			
						13	263	S2.2	V		0,0			x	x		0,61	0,08	0,01	0,01	0,01			
						14	264	S2.2	V		0,0			x		24	0,50	0,09	0,01	0,01	0,01			
265	265	S2.2	V		0,0			x		1	0,42	0,04	0,01	0,00	0,00									
Farøbroerne note 8	10,8	0,59	1985	1997	22	1	266	SF06	S	190	0,4	x		x			0,62	0,40						
						2	267		S	190	0,4	x		x		0,93	0,46							
						3	268		S	190	0,4	x		x		0,60	0,31							
						4	269	SF07	S	190	0,5	x		x		0,77	0,30							
						5	270		S	190	0,5	x		x		0,52	0,19							
						6	271		S	190	0,5	x		x		0,53	0,25							
						7	272	FF03	S		0,5	x		x		0,60	0,28							
						8	273		S		0,5	x		x		0,87	0,54							
						9	274		S		0,5	x		x		0,61	0,29							

Noter:

- 1) Kote er angivet i forhold til højde over parament.
- 2) Målinger under klappille ikke medtaget, da kloridpåvirket fra ovenliggende vejbane. Målinger indvendigt i klappille ikke medtaget
- 3) Pille 2-2 ændret til pille 4-2, pille 6-1 ændret til pille 8N, pille 10-1 ændret til pille 12N svarende til benævnelser anvendt i særeftersynsrapport fra 1998.
- 4) Målinger fra 1978 ikke medtaget.
- 5) De inderste målepunkter er for dybden 90-140 mm.
- 6) Der findes yderlige målinger, der ikke er medtaget, da de ikke passer ind i skemaet på grund af de undersøgte dybder.
- 7) De inderste målepunkter er i dybden 90-120 mm.
- 8) Der foreligger en lang række data fra flere år, men kun data fra 1997 er medtaget.

B6.2. Vurdering af indflydelsen af koten samt pillens orientering på kloridindholdet

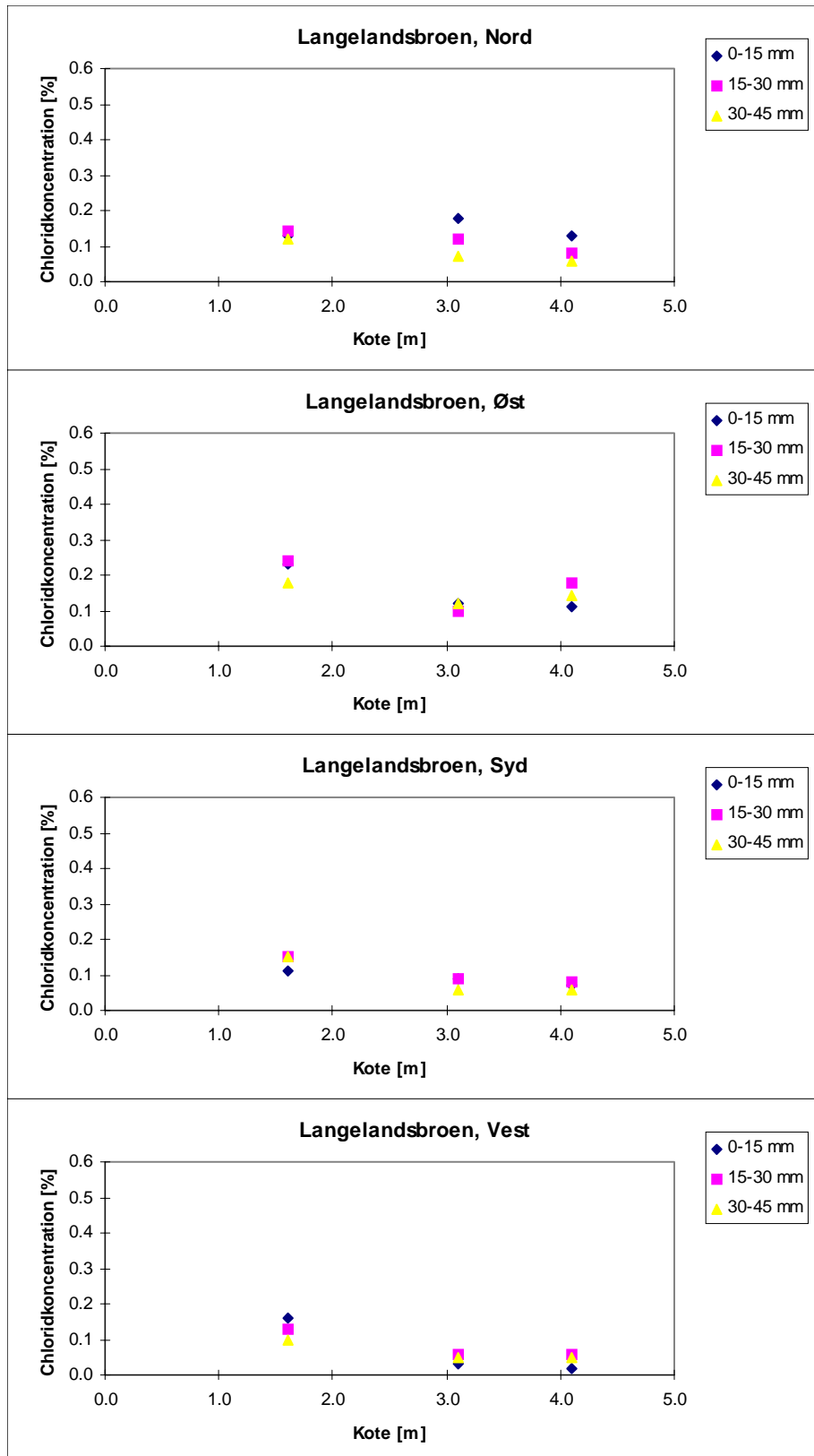
1. Baggrund

Der er gennemført en række målinger med det formål at bestemme kloridindholdets variation mellem forskellige koter samt at undersøge, om der eksisterer en systematisk variation af kloridindholdet på forskellige sider af en bropille.

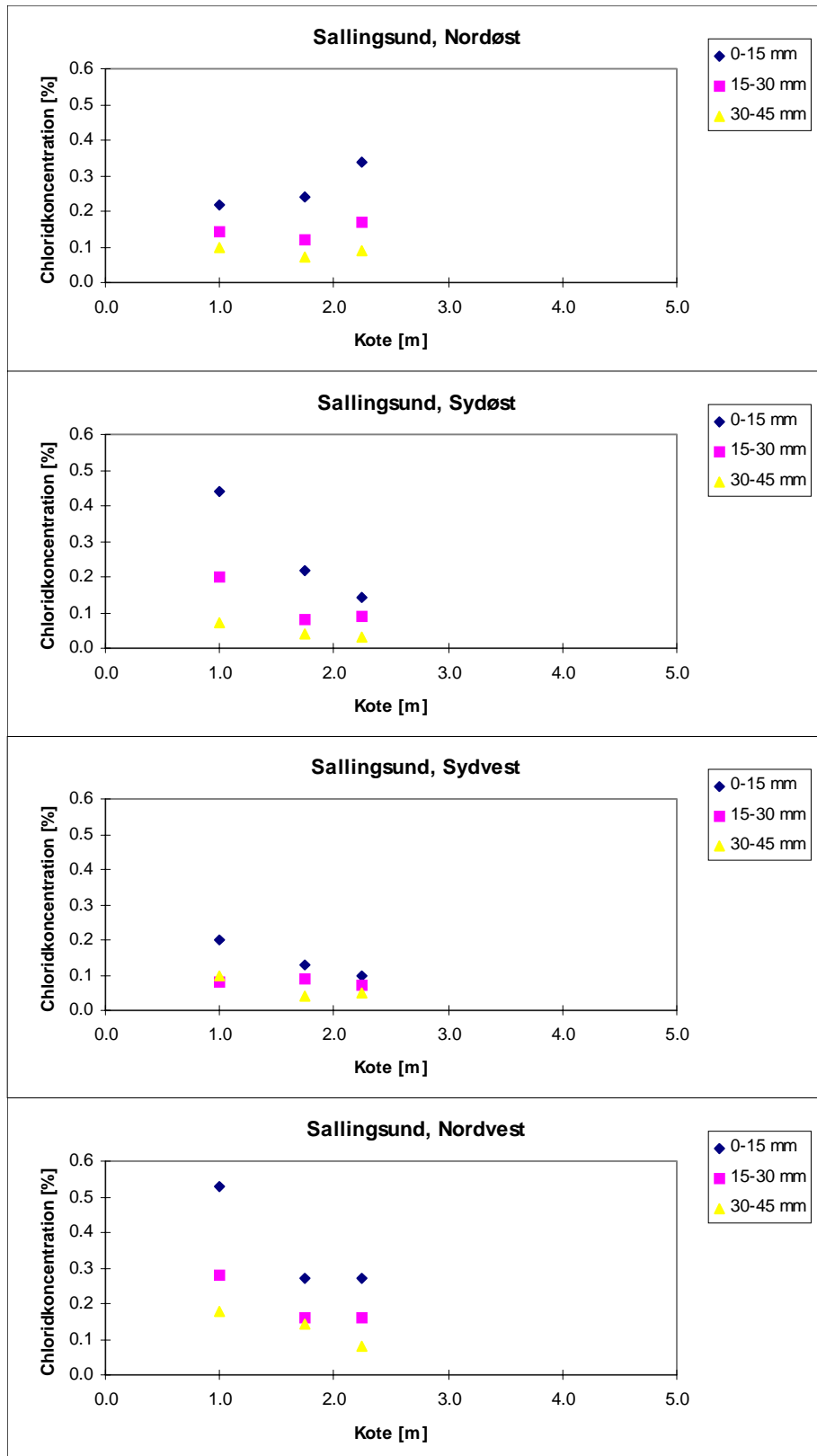
2. Resultater

Kloridkoncentrationens variation med koten er vist i figurerne Figur B6.1, Figur B6.2, Figur B6.3, Figur B6.4, Figur B6.5 for henholdsvis Langelandsbroen, Sallingsundbroen, Vilsundbroen, pille 4, Vilsundbroen, pille 1 og Svendborgsundbroen. Endvidere er der i Figur B6.6 vist måleresultater fra Langelandsbroen fra 1978 som funktion af koten.

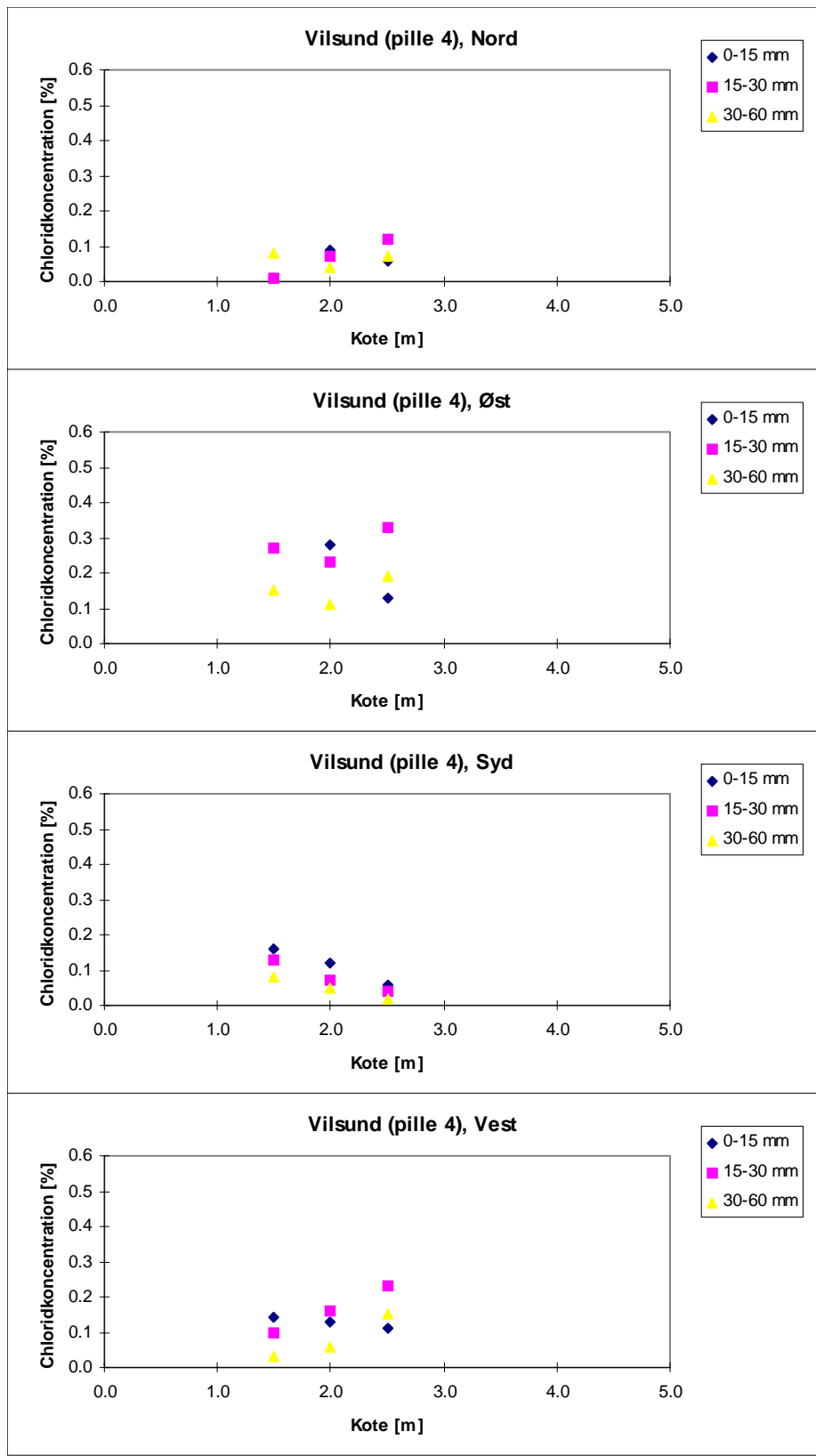
Kloridkoncentrationen som en funktion af orienteringen af overfladen, hvor målingen er foretaget, er vist i Figur B6.7, B6.8 og B6.9, hvor resultaterne fra alle broer i henholdsvis dybderne 0-15 mm, 15-30 mm og 30-45 mm er medtaget.



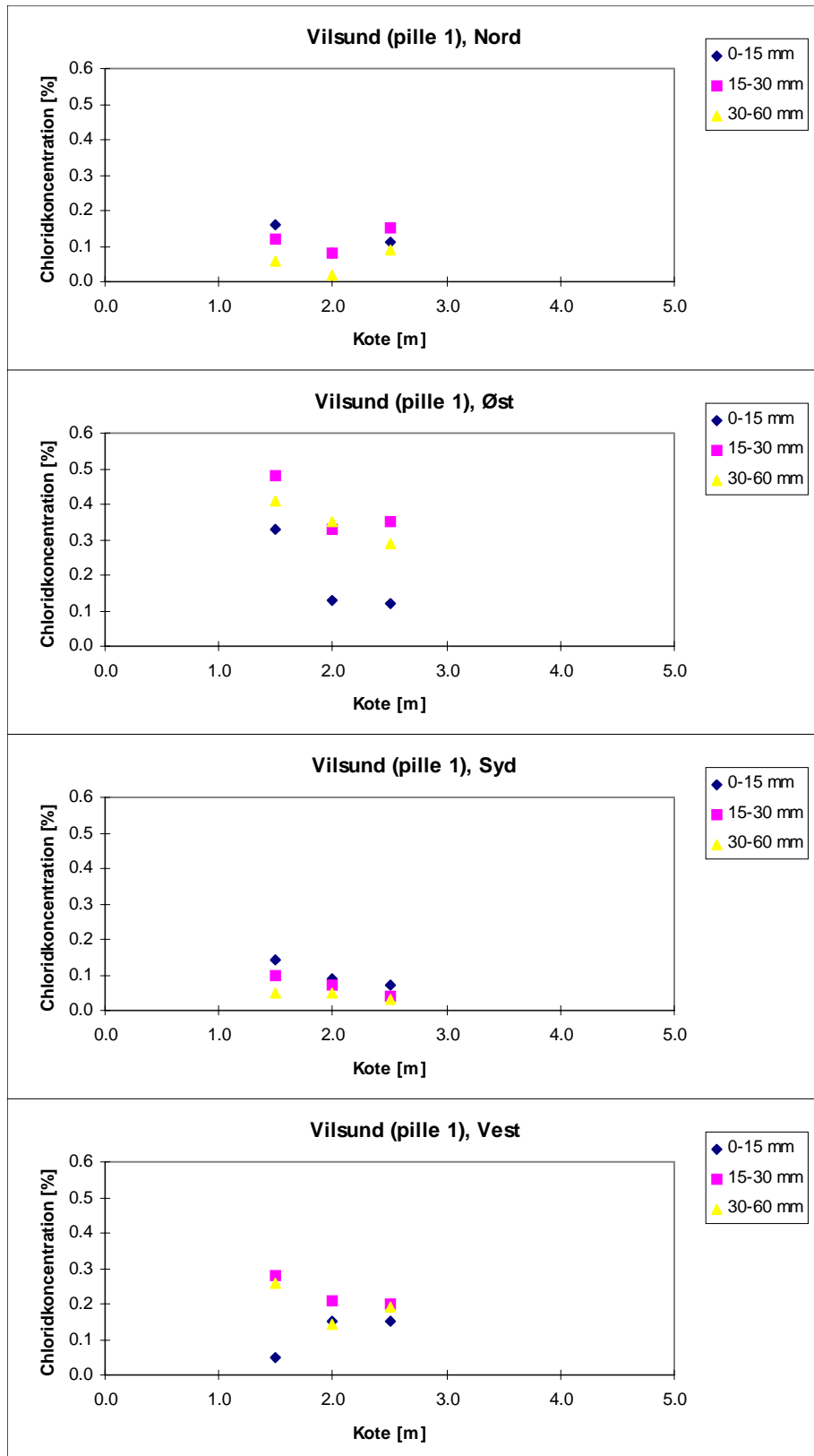
Figur B6.1 Kloridkoncentration som funktion af koten, Langelandsbroen.



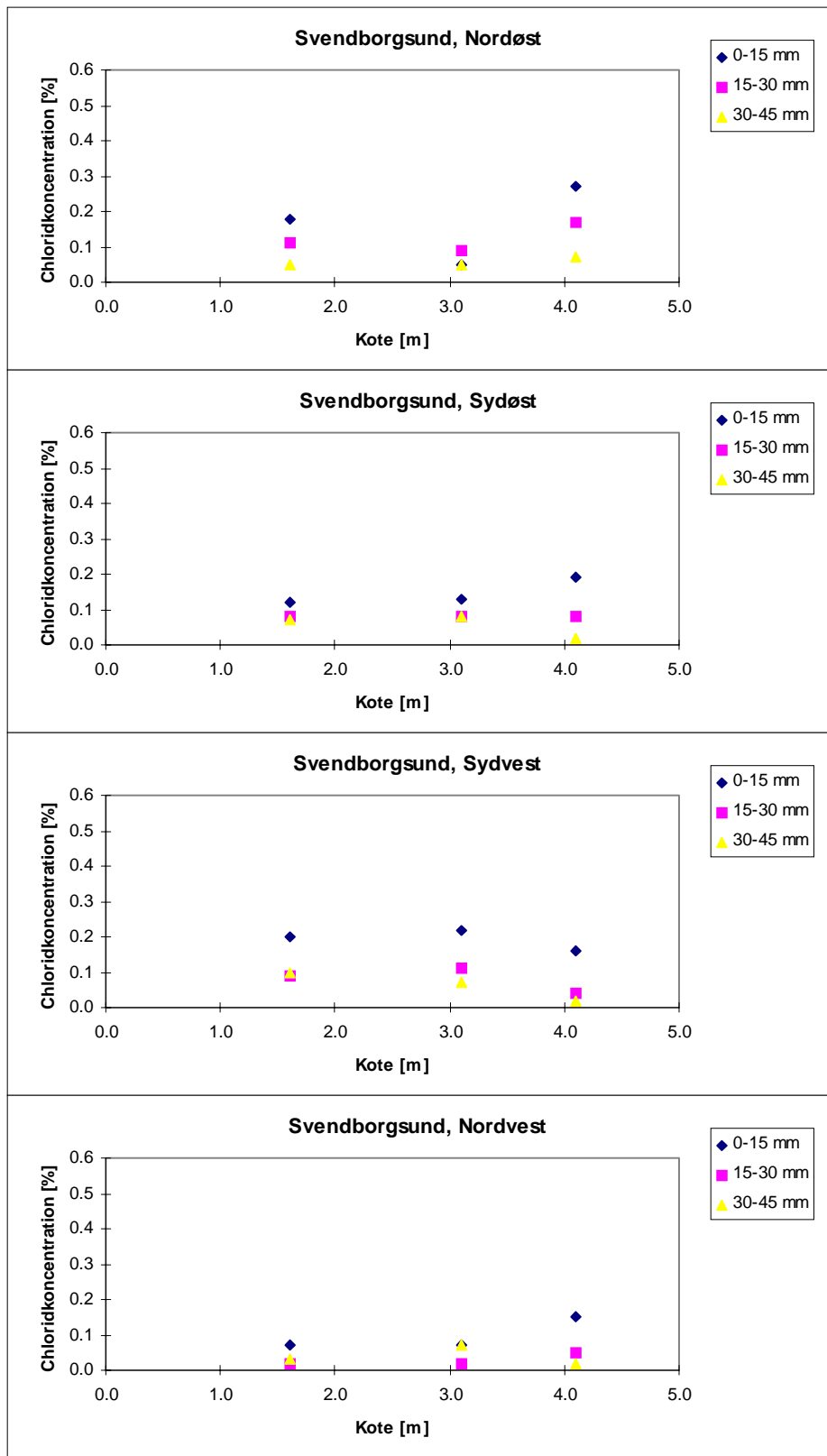
Figur B6.2 Kloridkoncentration som funktion af koten, Sallingsundbroen



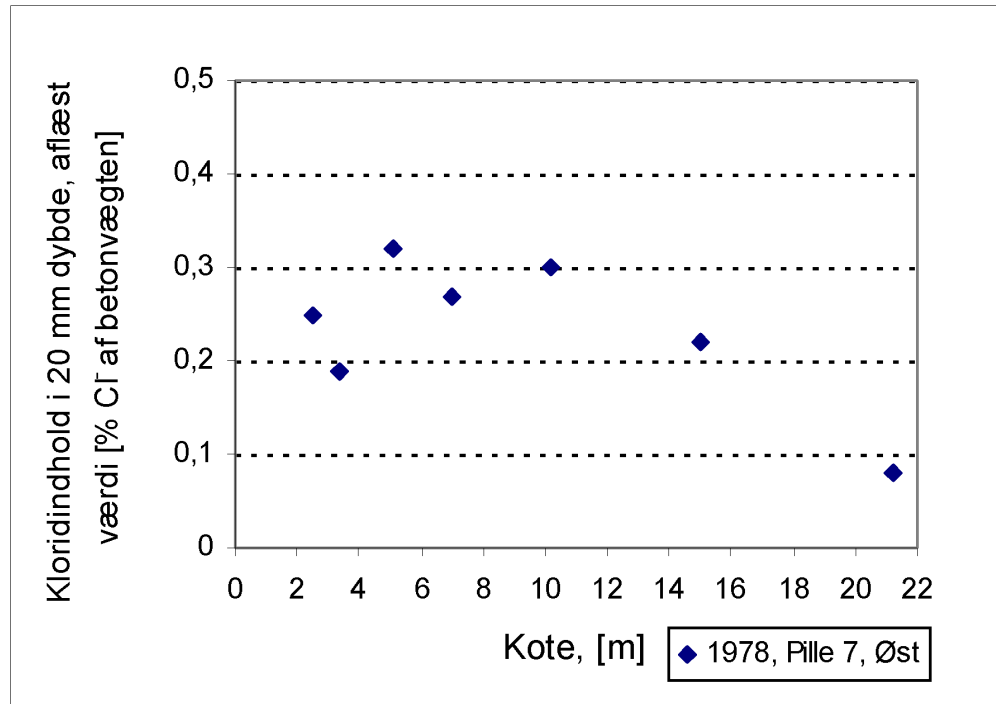
Figur B6.3 Kloridkoncentration som funktion af koten, Vilsundbroen, pille 4.



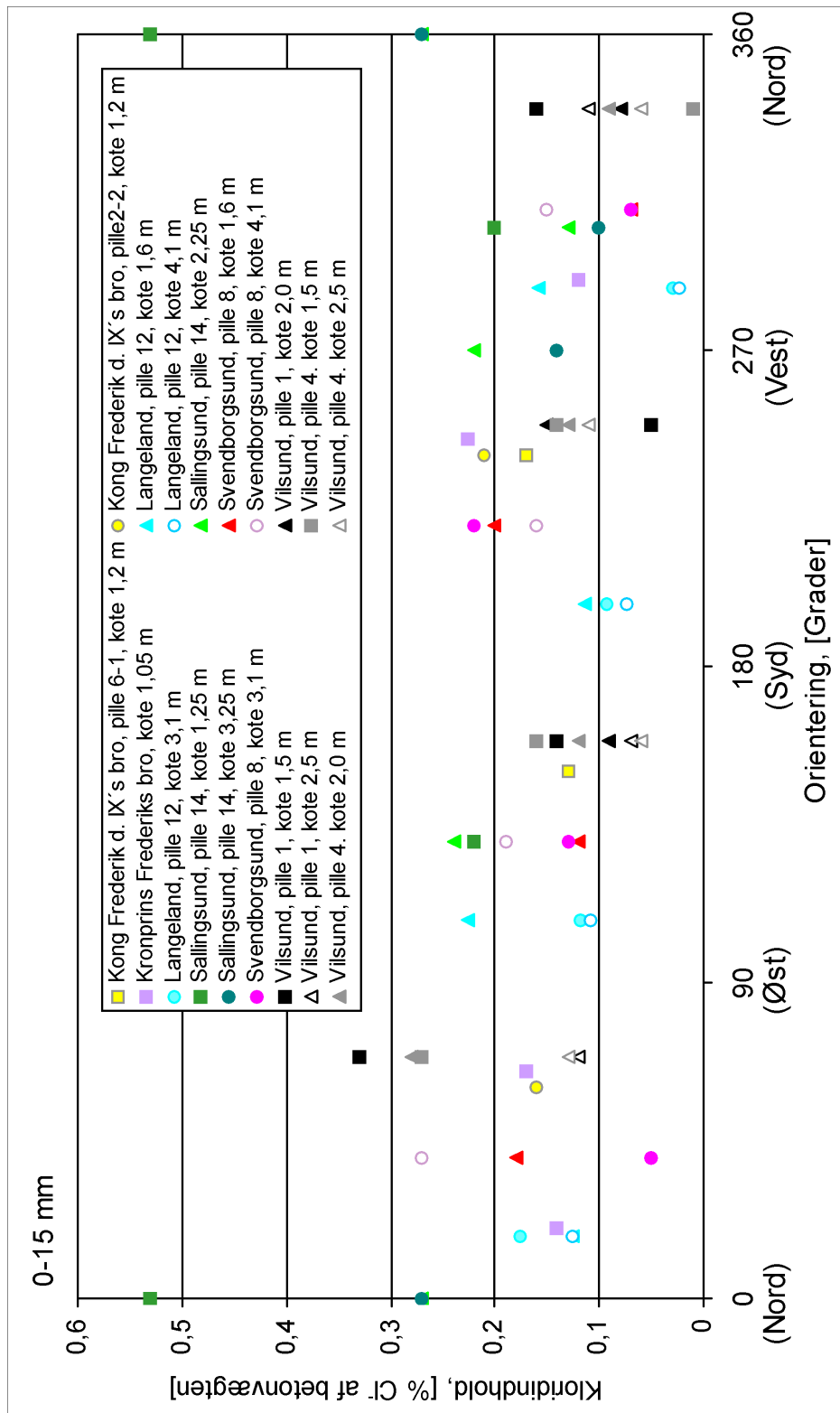
Figur B6.4 Kloridkoncentration som funktion af koten, Vilsundbroen, pille 1.

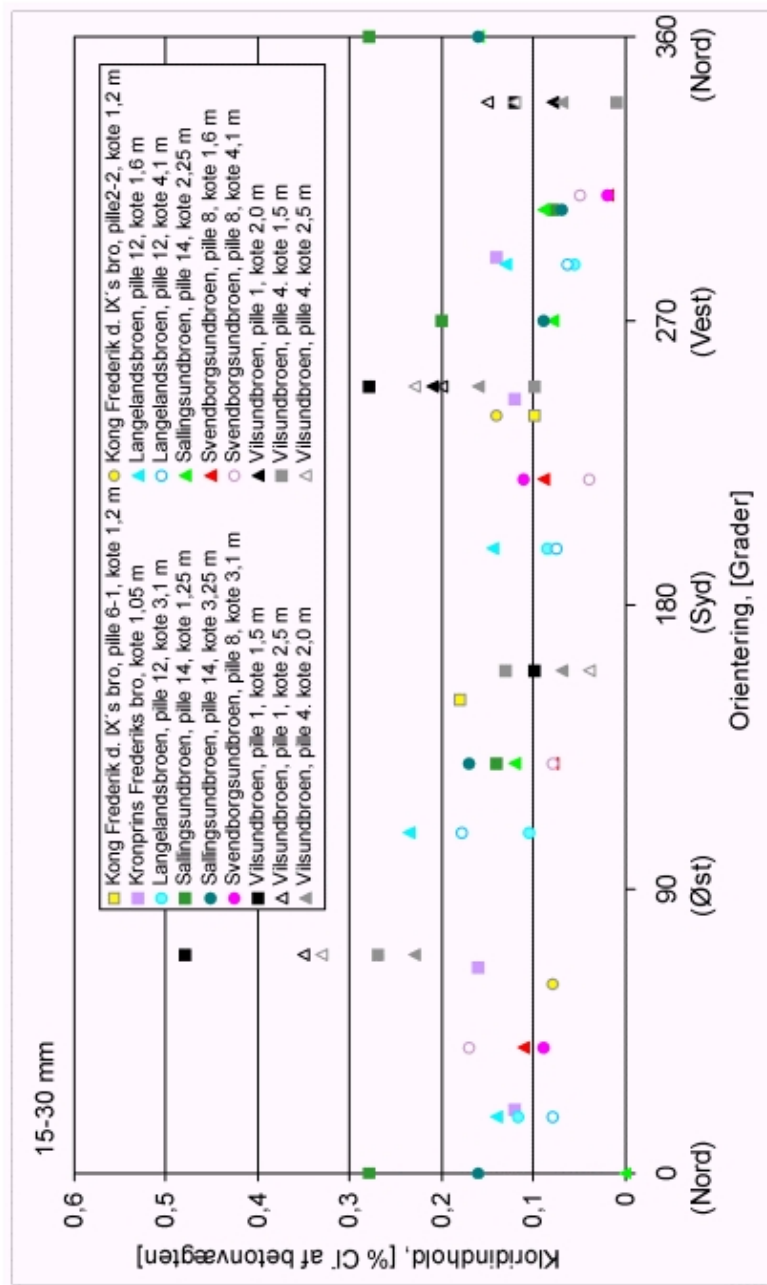


Figur B6.5 Kloridkoncentration som funktion af koten, Svendborgsundbroen

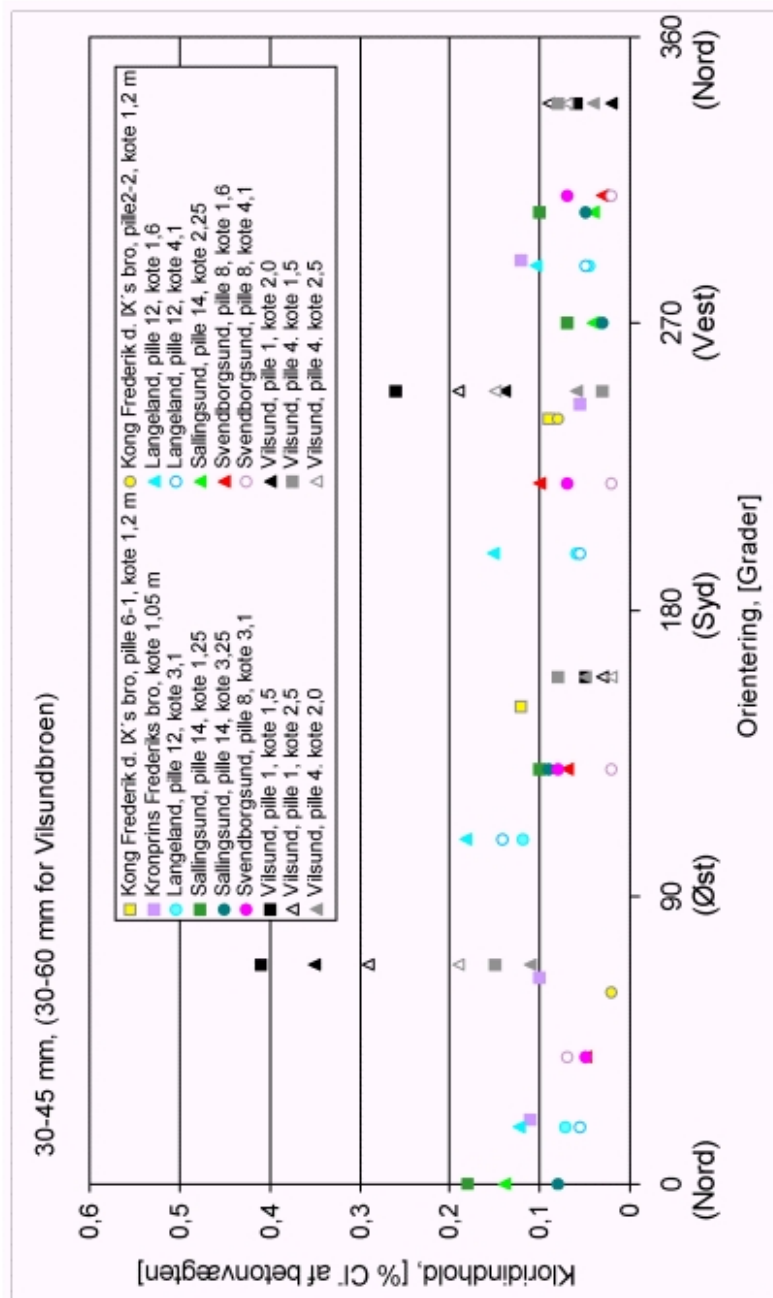


Figur B6.6. Kloridkoncentrationer målt på Langelandsbroen, 1978.





Figur B6.8: Kloridkoncentration i 15-30 mm dybde som funktion af orientering



Figur B6.9-Kloridkoncentration i 30-45 mm dybde som funktion af orientering

3 Vurdering af kloridkoncentrationens variation med koten

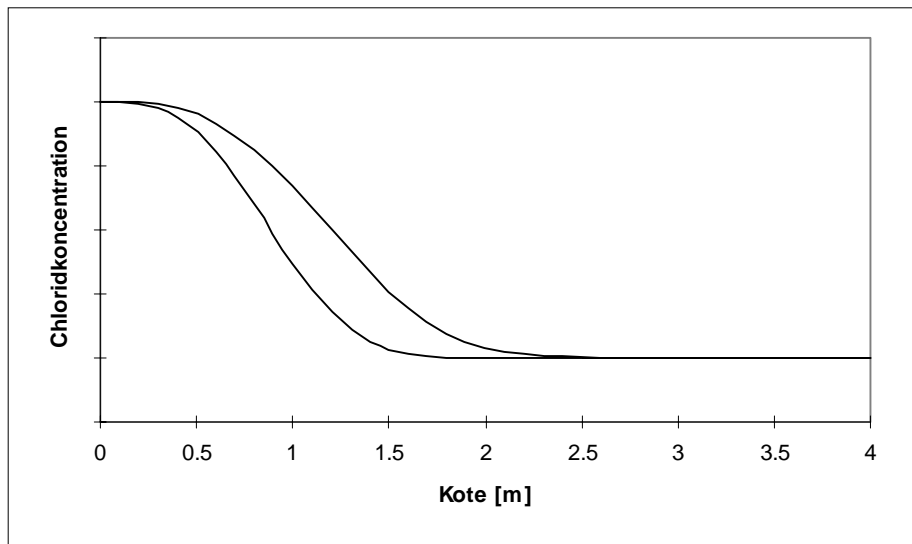
På både Langelandsbroen og Svendborgsundbroen er der udtaget støvprøver på fire sider af en pille i forskellige koter. Resultaterne er vist i Figur B6.1 og Figur B6.5. Prøverne fra 1998 er udtaget i koter som varierer mellem 1,6 m og 4,1 m. Figur B6.1 og Figur B6.5 indikerer, at der i dette interval ikke er nogen systematisk variation af kloridkoncentrationen.

På Vilsundbroen er der på to piller udtaget prøver i koter som varierer mellem 1,5 m og 2,5 m. Disse resultater er vist i Figur B6.3 og Figur B6.4. Kun for den sydvendte side af pillerne udviser prøverne fra de to forskellige piller samme tendens, dvs. at kloridindholdet falder med tiltagende kote. For de øvrige synes der ikke at være nogen systematisk sammenhæng mellem kloridkoncentrationen og koten. Sammenholdt med resultaterne fra Langelandsbroen og Svendborgsundbroen, som også dækker dette interval, synes konklusionen at være at der fra kote 1,5 m til kote 4,1 m ikke er nogen påviselig variation af kloridkoncentrationen med koten.

På Sallingsundbroen er der på en enkelt pille udtaget prøver fra fire forskellige sider i koter som varierer mellem 1,0 m og 2,25 m. Resultaterne af disse prøver er vist i Figur B6.2. Generelt viser disse at der sker en formindskelse af kloridkoncentrationen med tiltagende kote. Kun på den Nordøstvendte side sker der ikke nogen systematisk reduktion af kloridkoncentrationen med tiltagende kote. Endvidere gælder der at kloridkoncentrationerne observeret i kote 1,0 på Sallingsundbroen generelt er større end de kloridkoncentrationer som er observeret på de andre broer i en højere kote. Målingerne fra Sallingsundbroen indikerer altså at der sker en formindskelse af kloridindholdet i betonen med tiltagende kote indtil kote en kote omkring 1,5 m - 2,25 m.

Tidligere undersøgelser har tillige vist at der i lavere koter, dvs. omkring kote 0-0,5 m, er en betydeligt større kloridkoncentration (omkring 1.0 %) end værdierne målt på Sallingsundbroen (max. 0.5 %).

Udfra en antagelse om at kloridkoncentrationen i tidevands- og splashzonen er tilnærmelsesvist konstant synes målingerne at vise at kloridkoncentrationen varierer som vist i Figur B6.10. Denne principskitse tager naturligvis ikke hensyn til at pillerne kan ændre diameter med højden eller om pillerne eventuelt er placeret på et parent.



Figur B6.9. Principskitse af kloridkoncentrationen i overfladens variation med koten.

Endelig viser prøverne fra Langelandsbroen, 1978, hvor der er udtaget prøver i væsentligt højere koter at der ved koter større end 10-15 m sker en yderligere reduktion af kloridkoncentrationen, da sprayzonen for Langelandsbroen muligvis når dertil, se Figur B6.6.

4 Vurdering af indflydelsen af overfladens orientering på kloridkoncentrationen

Analyseresultaterne, som er benyttet til at vurdere kloridkoncentrationens variation med koten, kan også benyttes til at vurdere variationen af kloridkoncentrationen mellem pillernes forskellige sider, da der på alle piller er udtaget prøver på fire forskellige sider.

Der kan af flere årsager forventes at eksistere en variation af kloridkoncentrationen mellem pillernes forskellige sider. Det er blandt andet blevet argumenteret at der på grund af luftbåren klorid vil være størst kloridkoncentration på læsiden, endvidere kan siderne have forskellige udtørningshastigheder på grund af forskelligt solindfald og på grund af læeffekter. Endelig kan slagregn samt strømretningen eventuelt have en indflydelse.

Variationen af kloridkoncentrationen mellem pillernes forskellige sider vil i det følgende blive vurderet på grundlag af sidernes orientering i forhold til

- Verdenshjørnerne
- Broens længdeakse
- Strømretningen
- Den dominerende vindretning

Formålet med vurderingen af resultaterne er at bestemme om der er nogen systematisk variation, som gælder for alle de undersøgte bropiller, og som kan danne grundlag for udviklingen af en generel model.

I Figur B6.7, B6.8 og B6.9 ses det samstemmende for alle de tre undersøgte dybder (0-15 mm, 15-30 mm samt 30-45 mm) at kloridkoncentrationen er højest i retninger omkring øst-nordøst (60-90 grader) og i vest-sydvest (240-270 grader).

I bilag 1 er orienteringen af henholdsvis Langelandsbroen, Sallingsundbroen, Vilsundbroen og Svendborgsundbroen vist. Det ses, at strømretningen generelt er vinkelret på broens længdeakse, hvorfor en vurdering af kloridkoncentrationens variation omkring en pille i forhold til broens længdeakse også bliver en vurdering af kloridkoncentrations variation omkring en pille i forhold til strømretningen.

Det ses at broerne har ret varierende orienteringer. Hvis orienteringen er afgørende for kloridkoncentrationen skulle den maksimale kloridkoncentration således opstå på forskellige sider på broerne. Dette synes ikke at være tilfældet. Broens orientering og strømretningen vurderes derfor ikke at være afgørende.

Siderne med de maksimale kloridkoncentrationer synes at være sammenfaldende med de dominerende vindretninger som netop er vest-sydvest og øst-nordøst. Dette antyder, at det er vindretningen som er afgørende for kloridkoncentrationen.

Da det er antaget at de dominerende vindretninger er ens for alle broer bliver variationen med vindretningen også en variation med verdenshjørnerne. Det vurderes dog at det er vindretningen der er afgørende og ikke andre retningsbestemte effekter som f.eks. solindfald.

5. Samlet vurdering

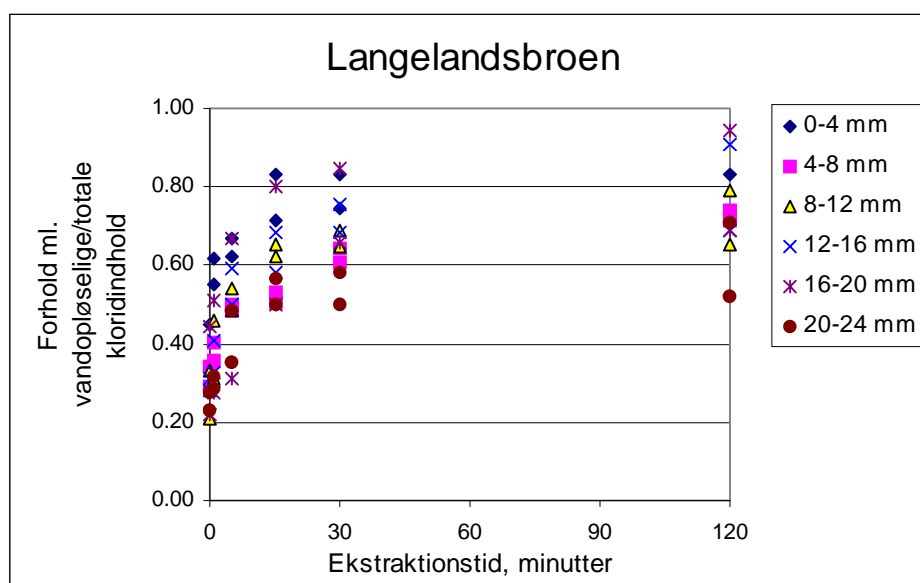
På baggrund af de supplerende undersøgelser af orienteringens indflydelse på kloridindholdets størrelse udført i 1998, indikerer de udførte undersøgelser at der er en vis systematik i kloridindholdets fordeling omkring bropiller eksponeret for marint miljø. Endvidere vurderes kloridindholdet at falde over kote 1,5-2 m og igen over kote ca. 10-15 m.

B6.3. Vurdering af vandopløseligt kloridindhold

For flere af de undersøgte kystbroer er det vandopløselige kloridindhold bestemt i henhold til RCTW-metoden, Ref. 35.

Det vandopløselige kloridindhold har overvejende været målt efter 1 minuts ekstraktionstid (tid målt fra tilsætning af buffer), men også ekstraktionstider på over 1 minut har været anvendt. I 1998 blev prøvningsbeskrivelsen revideret til at opløsningen skulle filtreres efter 1 minut, således at opløsningen ikke har mulighed for at arbejde videre og frigive flere klorider. Den nye metode er ikke anvendt for nogen af de undersøgte broer.

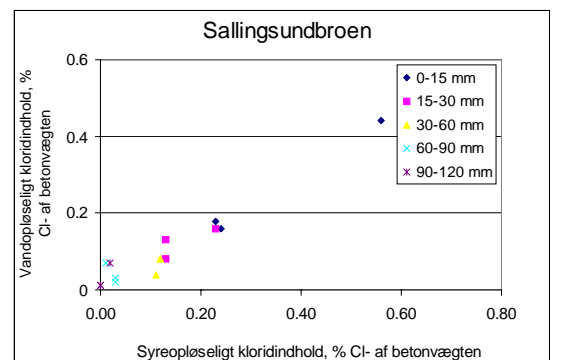
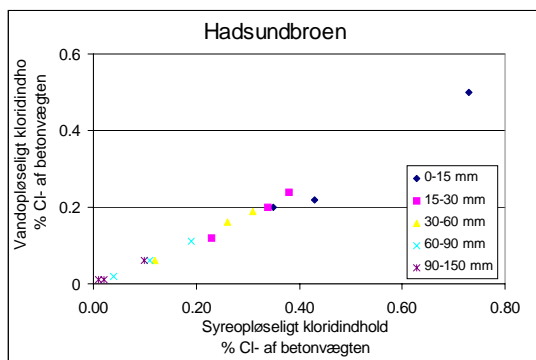
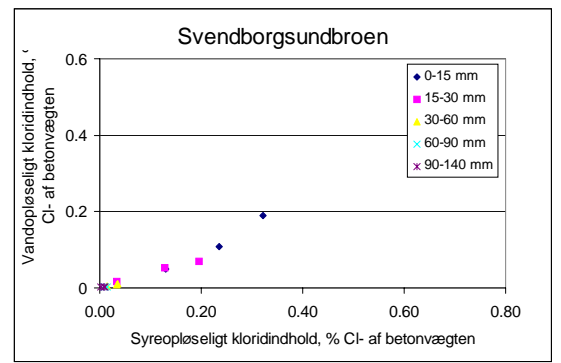
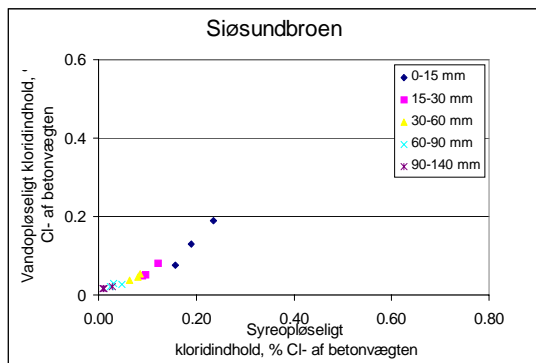
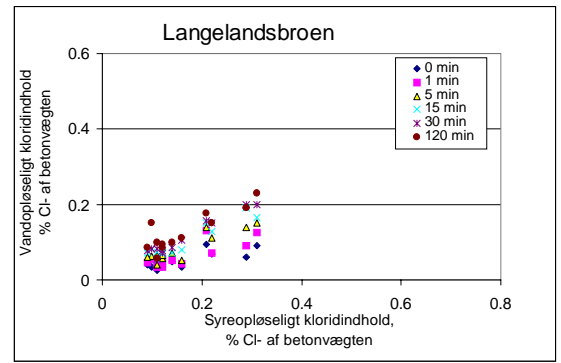
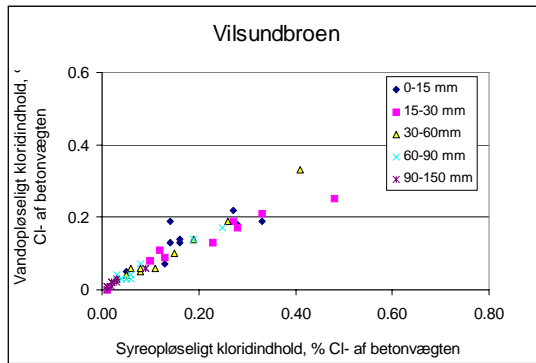
For Langelandsbroen er ekstraktionstidens indflydelse på størrelsen af det vandopløselige kloridindhold bestemt ved måling 0, 1, 3, 5, 15, 30 og 120 minutter efter tilsætning af buffer. Resultatet er vist i Figur B6.11



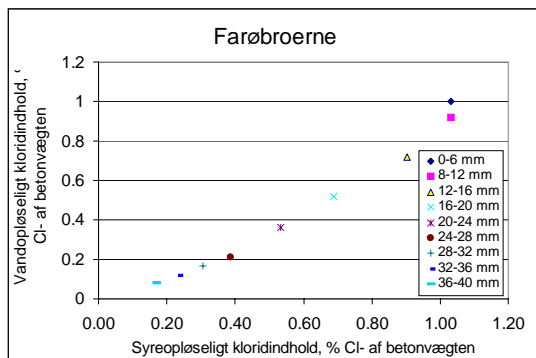
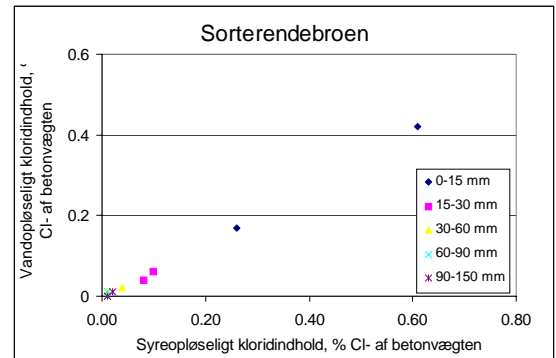
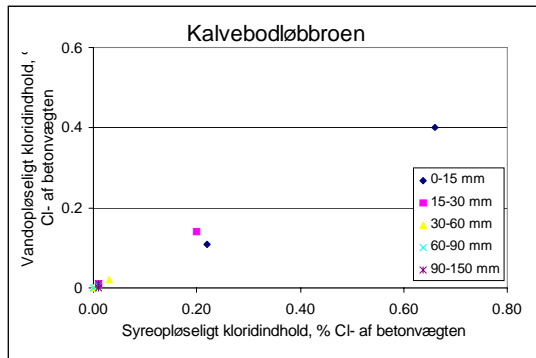
Figur B6.11. Indflydelsen af ekstraktionstiden på størrelsen af det vandopløselige kloridindhold.

Som det fremgår af Figur B6.11 er størrelsen af det vandopløselige kloridindhold stærkt afhængig af ekstraktionstiden. Det vides ikke hvilken ekstraktionstid der skal måles efter for at det målte indhold svarer til det frie kloridindhold, og om det vil være den samme ekstraktionstid for betoner med forskellige cementtyper og forskelligt kloridindhold (varierende mængde). Målingen med RCTW vil derfor (indtil en eventuel sammenhæng til frit kloridindhold etableres) være et relativt mål for kloridindholdets størrelse.

I Figur B6.12a ses sammenhørende bestemmelser af vandopløseligt kloridindhold afbilledet mod syreopløseligt kloridindhold for de undersøgte broer.



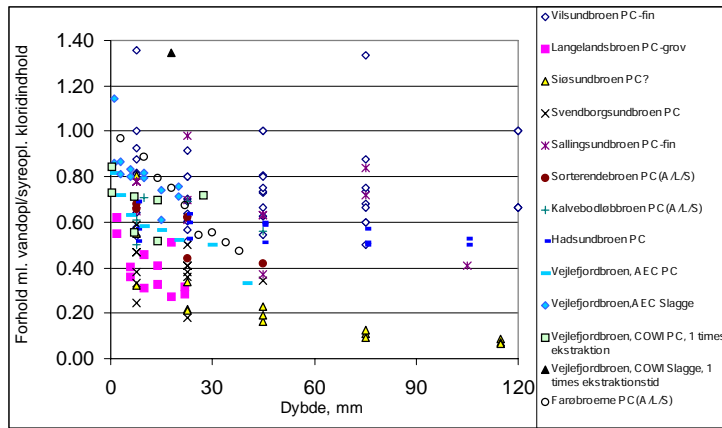
Figur B6.12a. Vandopløseligt kloridindhold afbildet mod syreopløseligt kloridindhold. Ekstraktionstid i alle tilfælde 1 minut.



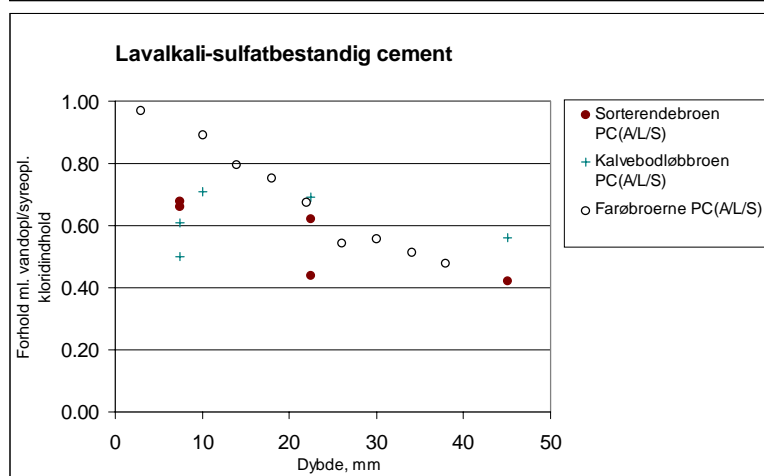
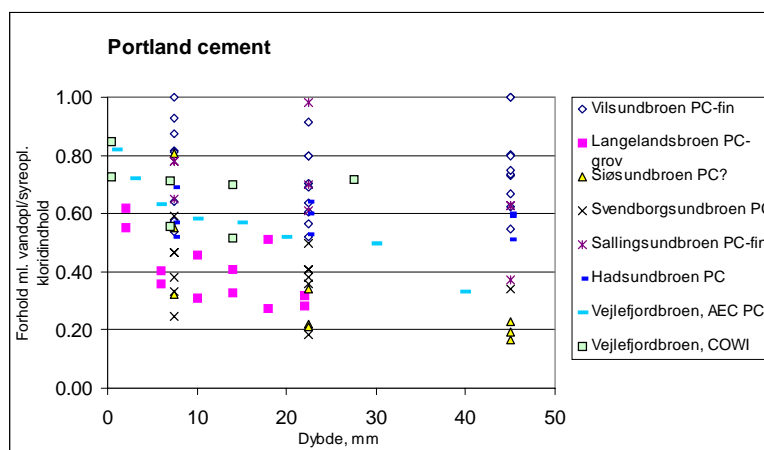
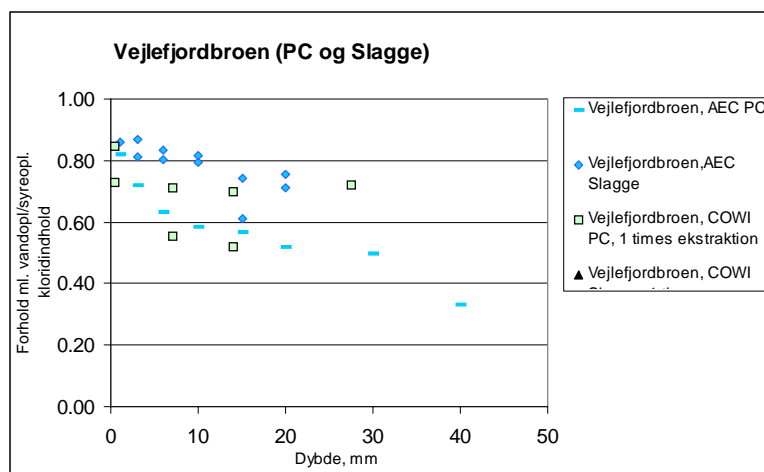
Figur B6.12b. Afbildning af vandopløseligt kloridindhold mod syreopløseligt kloridindhold, % Cl⁻ af betonvægten. Ekstraktionstid: 1 minut i alle tilfælde. NB afbildning af Farø-resultater med anden akse end de øvrige.

I tillæg til resultaterne ovenfor er der udført målinger af det vandopløselige kloridindhold for Vejlefjordbroen efter 1 timers ekstraktion. For analyserne med RCTW under kote 2 (slaggebeton) blev kloridindholdet bestemt til at være større end ved titrering. Ved de første RCT målinger af Vejlefjordbroens slaggebeton i 1988, ref. 61 blev kloridindholdet bestemt med RCT fundet at være omtrent dobbelt så stort som det tilsvarende indhold bestemt med titrering i henhold til DS 423.28. Det viste sig, at tilsætning af sulfidfælder til RCT-ampullernes væsker løste problemet med den kloridselektive elektrodes følsomhed overfor sulfid. Der er sulfidfælder i ampullerne til bestemmelse af det vandopløselige kloridindhold, men muligvis ikke tilstrækkeligt.

På Figur B6.13 er forholdet mellem det vandopløselige og syreopløselige kloridindhold for alle broer vist som funktion af dybden fra overfladen. I Figur B6.14 ses den samme afbildning men inddelt efter cementtyperne Portland (PC), lavalkali-sulfatbestandig cement (P(A/L/S)) og slagge, nb. med en anden akse-inddeling end Figur B6.13.

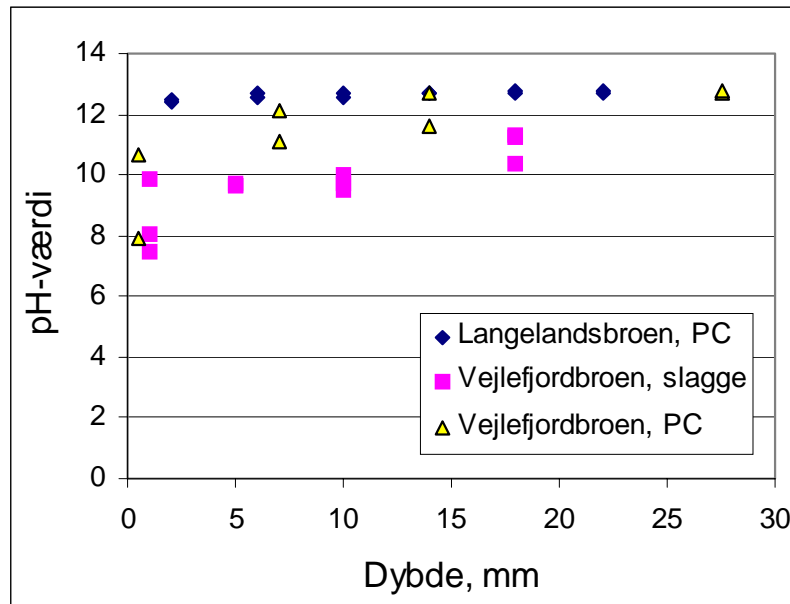


Figur B6.13. Forholdet mellem vandopløseligt og syreopløseligt kloridindhold som funktion af dybden fra betonoverfladen.



Figur B6.14. Forholdet mellem vandopløseligt og syreopløseligt kloridindhold afbilledet mod dybden fra betonoverfladen

På Figur B6.15 ses pH-værdien afbilledet som funktion af dybden fra overfladen (kun målt for Langelandsbroen og Vejlefjordbroen).



Figur B6.15. pH-værdi som funktion af dybden for Langelandsbroen og Vejlefjordbroen.

Det ses, at andelen af det vandopløselige kloridindhold for mange af de undersøgte broer er faldende med stigende dybde, hvilket kan skyldes et lavere pH-værdi nær betonoverfladen. Det ses endvidere, at pH-værdien stiger med stigende dybde for målinger af Vejlefjordbroens beton, mens pH-værdien for Langelandsbroen tilsyneladende er konstant med stigende dybde. Målingerne bekræfter de forholdsvis beskedne karbonatiseringsdybder ($\text{pH} < 9,5$) der er bestemt i Kystbroprojektet som helhed.

I Tabel B6.1 er aflæsninger af andelen af det vandopløselige kloridindhold i forhold til syreopløseligt kloridindhold i 20 mm dybde angivet sammen med bro navn og cementtype. I tabellen ses en svag tendens til at det vandopløselige/syreopløselige kloridindhold er større for betoner med lavkalisulfatbestandig cement i forhold til mellem til grovkornet Portland cement. Det skal understreges, at der er en væsentlig spredning på resultaterne.

Bro	Cementtype	Vandopløseligt/syreopløseligt kloridindhold i 20 mm dybde, aflæst værdi	Bemærkning
Vilssundbroen	PC-fin	45-70	meget varierende
Langelandsbroen	PC-grov	30	faldende indefter
Siø Sundbroen	PC?	35	Fin/grovkornet cement?
Svendborgsundbroen	PC-fin/mellem	35	
Hadsundbroen	PC-grov	60	
Sallingsundbroen	PC-fin	70	
Vejlefjordbroen	PC	50	Fin/grovkornet cement?
	Slagge	70	
Kalvebodløbbrøen	PC(A/L/S)	70	varierende
Sorterendebroen	PC(A/L/S)	45-65	varierende
Farøbroerne	PC(A/L/S)	70	jævnt faldende

Tabel B6.1 Andel af vandopløseligt kloridindhold i forhold til syreopløseligt kloridindhold i 20 mm dybde, aflæsninger sammen med angivelse af cementtyper.
 Det understreges, at der for nogle af betonerne er en væsentlig spredning, jævnfør bemærkningsfelt.



Bilag 7

Potentialemålinger

Bilag 7 Vurdering af EKP-målinger

Bilag B7.1: Vurdering af de foretagne EKP-målinger

Der er i Kystbroprojektet udført EKP-målinger på 10 kystbroer. På 8 af broerne er der udført ophugninger til armeringen for at kalibrere EKP-målingerne mod armeringens faktiske tilstand. På Kronprins Frederiks Bro og Frederik d. IX's Bro er der ikke lavet ophugninger. En liste over de undersøgte piller er angivet i Tabel B7.1. Samtlige sammenhørende EKP-målinger og ophugninger er angivet i Tabel B7.3 i Bilag B7.2.

Bro	Bygget	Undersøgelse/ Kommentar	Undersøgte piller
Kr. Frederiks bro	1936	Basiseftersyn 1995 Særeftersyn 1998	K-Øst, K-Vest
Vilsundbroen	1936	Basiseftersyn 1997	1*,4
Frederik d. IX bro	1960	Basiseftersyn 1995	2, K, 6, 10
Langelandsbroen	1962	Basiseftersyn 1998	12*, 13*
Svendborgsund	1966	Basiseftersyn 1996	6, 8, 10
Hadsundbroen	1976	Basiseftersyn 1996	2*, 5*
Sallingsundbroen	1978	Basiseftersyn 1996	6*, 10, 12*
Vejlefjordbroen	1980	Undersøgelser 1988-89. Basiseftersyn 1997	4, 8*, 9
Kalvebodløbbrøen	1984	Basiseftersyn 1996	1.1*, 2.2*
Sorterendebroen	1984	Basiseftersyn 1996	1.1*, 2.2*

Grafisk præsentation af EKP-undersøgelser på piller markeret med en stjerne (*) er vedlagt i Bilag 7.3. "K" angiver klappille. Nummerering af øvrige piller følger den normale nummerering på hver enkelt bro.

Tabel B7.1. Oversigt over udførte EKP-målinger i forbindelse med Basiseftersyn af Vejdirektoratets kystbroer.

Vurderingen er foretaget efter de korrigerede ASTM-kriterier, se afsnit 4.1.4 i hovedrapport. Alle henvisninger til potentialeverdier er i mV CSE (kobber/kobbersulfat-elektrode). De fleste målinger er foretaget med en Ag/AgCl (sølv-/sølvklorid-elektrode) men er altid omregnet til mV CSE. Omregning fra Ag/AgCl til CSE foregår ved at trække ca. 100 mV fra Ag/AgCl-værdien (kalibreret værdi).

I det følgende er EKP-målinger og korrosionsgrader gennemgået for alle broer i projektet.

Kronprins Frederiks bro

Der er foretaget EKP- og modstandsmålinger på klappille øst og klappille vest, men der er ikke foretaget ophugninger til kalibrering af EKP-målinger. Målingerne er derfor ikke medtaget i Tabel B7.3. De undersøgte piller var generelt i god stand. Alle piller var overfladebehandlet, og det kan ikke udelukkes, at revner, udfældninger og defekter kan være skjult under malingen. På klappille vest blev der målt potentialer mellem -50 og -165 mV og tilhørende modstande på 5 til 30 kOhm. På klappille øst blev der målt potentialer mellem -200 og -300 mV og tilhørende modstande mellem 1-2 kOhm og over 100 kOhm. *Vurdering:* De målte EKP-værdier indikerer enten ingen eller usikker korrosionstilstand men er ikke kalibreret ved ophugninger. Visuelt og ved hamring blev der ikke observeret omfattende skader.

Vilsundbroen

Der er foretaget 9 ophugninger og tilhørende EKP-målinger på pille 1 og 4 på Vilsundbroen. I alle ophugninger er kun fundet anløben armering (karakteren O). I fem ophugninger er der målt et kritisk kloridindhold i armeringsniveau, men EKP-værdien i disse 5 punkter er -3 mV eller højere (det vil sige positiv). Modstanden i samme punkter er ligeledes høj - typisk 10 kOhm eller mere. I 4 ophugninger er der målt et ikke-kritisk kloridindhold i armeringsniveau og tilhørende potentialer på -367 til -698 mV. Modstand i disse fire punkter er dog 18 kOhm eller mere. *Vurdering:* For de 5 ophugninger med kritisk kloridindhold i armeringsniveau svarer de målte EKP-værdier til ingen korrosion, hvilket svarer til den faktiske armeringstilstand. I de øvrige fire punkter er der ikke målt kritisk kloridindhold i armeringsniveau. EKP-værdierne for de fire punkter varierer fra usikkert område til 90% sandsynlighed for korrosion. Der blev ikke observeret nævneværdig korrosion i nogen af ophugningerne.

Kong Frederik d. IX's Bro

Der blev i 1995 foretaget EKP-målinger med håndholdt voltmeter på pille 4, 8, 12 og klappille, men der er ikke foretaget ophugninger til kalibrering af EKP-målinger. Målingerne er derfor ikke medtaget i Tabel B7.3. Hovedparten af pillerne er i god stand, dog med en række lodrette revner på den nederste meter over parementoverkant. Revner er dog almindeligvis uden gennemsvinger, udfældninger eller korrosionsprodukter. På række 5 og 6 er der mange lokale afskalninger, delaminering og blotlagte armeringsjern, som er kraftigt korroderede. De målte potentialer indikere risiko for igangværende korrosion specielt på en af de undersøgte piller. *Vurdering:* Synlige skader bekræfter at der er igangværende korrosion.

Langelandsbroen

Der er foretaget én ophugning på pille 13, én ophugning på fundament, pille 13 og én ophugning på fundament, pille 12. Kloridindholdet i armeringsniveau er lige omkring det kritiske niveau. For 2 ophugninger med let overfladerust (karakteren O) er der målt

EKP-værdier på ca. -250 mV. For 1 ophugning med grubetæring (karakteren G) er der målt en EKP-værdi på -335 mV. *Vurdering:* De målte EKP-værdier i 2 ophugninger svarer til de korrigerede ASTM-værdier. I ophugning med grubetæring er EKP-værdien for positiv til at stemme overens med den observerede korrosionstilstand.

Svendborgsundbroen

Der er foretaget 6 ophugninger på søjle 6, 6-1, 8, 8-1, 10 og 10-2. I 5 ophugninger er der fundet intakt armering (karakteren P). Potentialet i de 5 ophugninger er mellem 3 og -275 mV. I den sjette ophugning er der fundet grubetæring og et potentiale på -288 mV. Ophugningen er foretaget midt i en revne. *Vurdering:* De sammenhørende EKP-målinger og visuel registrering i ophugninger stemmer overens med de korrigerede ASTM-kriterier.

Hadsundbroen

For Hadsundbroen er der foretaget 4 ophugninger med ingen eller let overfladekorrosion (karakter P eller O). For alle disse ophugninger er EKP-værdien i området -200 mV til -350 mV. For 2 af de 4 ophugninger er kloridindholdet i armeringsniveau over den kritiske værdi og i de 2 andre af de 4 under det kritiske kloridindhold. Ophugninger er i overgangsområder efter ASTM-kriteriet. For de 2 andre ophugninger er EKP-værdien -400 mV til -500 mV, og der er fundet kraftig grubetæring eller kraftig overfladerust (karakter F og G). Det vil sige svarende til området for 90% sandsynlighed for korrosion efter ASTM-kriteriet og i overgangsområdet efter de korrigerede ASTM-kriterier. *Vurdering:* Sammenhørende EKP-værdier og ophugninger viser god overensstemmelse efter ASTM-kriteriet. De fundne EKP-værdier er lidt for høje (positive) til at vise god overensstemmelse med de korrigerede kriterier.

Sallingsundbroen

Der er på Sallingsundbroen foretaget 11 ophugninger på søjle 6, 10 og 12. Der er udført 3 ophugninger i selve pillen og 8 ophugninger i isbryderskal. Der er 1 ophugning med grubetæring (karakteren G) og tilhørende EKP-værdi på -345 mV, lille modstand og kritisk kloridindhold i armeringsniveau. Der er 1 ophugning med kraftig korrosion (karakteren F), EKP-værdi på -467 mV, modstand på 17 kOhm og kritisk kloridindhold i armeringsniveau. Der er 5 ophugninger med lettere korrosion (karakteren O) med EKP-værdier mellem -46 og -553 mV. Der er 4 ophugninger uden korrosion (karakteren P) med EKP-værdier mellem -57 og -486 mV. For de 9 ophugninger med karakteren O og P er der et kritisk kloridindhold i armeringsniveau på de 4 (EKP-værdier: -203 mV, -320 mV, -553 mV, -345 mV). *Vurdering:* For de i alt 11 ophugninger er der stor forskel i de målte EKP-værdier, korrosionsgrad og kloridindhold. Der er ikke umiddelbart overensstemmelse med det korrigerede ASTM-kriterium.

Vejleffjordbroen

Der er foretaget 3 ophugninger på pille 8, nord. I alle tre ophugninger er der kun fundet overfladekorrosion, som sandsynligvis stammer fra før indstøbningen. Ved vurdering af korrosionsrisiko ud fra korrigerede kriterier var et større korrosionsomfang forventet i den nederste ophugning, hvor der er målt et potentiale på -673 mV. Kloridindholdet i armeringsdybde for alle 3 ophugninger er dog under den kritiske værdi. *Vurdering:* Resultatet af 2 ophugninger stemmer overens med de korrigerede kriterier. Ud fra EKP-målingen var der forventet et større korrosionsomfang på armeringen i den tredje ophugning efter de korrigerede kriterier. Der er dog ingen klorid tilstede i armeringsniveau. De lave potentialer i de lave koter skyldes formentlig den ringe adgang af ilt.

Kalvebodløbbrøen

Der er foretaget 6 ophugninger med tilhørende EKP-, modstands- og kloridmålinger på pille 1.1, vest og pille 2.2, øst. Ved 5 ophugninger er potentialet større end -100 mV og i en ophugning -339 mV. Modstanden i alle ophugninger er omkring 10 kOhm eller højere. Kloridindholdet i armeringsniveau er for alle 6 ophugninger under den kritiske værdi, og der er ikke observeret korrosion i nogen af ophugninger (alle karakteren P). *Vurdering:* Både efter ASTM-kriteriet og efter det korrigerede ASTM-kriterium er der kun minimal risiko for korrosion på armeringen (størst i tidevandszonen). Udfra kloridmålinger er der ingen risiko for korrosion. Dette bekræftes af ophugningerne, som alle viser karakter P. Årsagen er primært, at broen på undersøgelsestidspunktet kun var 12 år gammel. For Kalvebodløbbrøen bekræfter sammenhørende EKP-målinger og ophugninger både ASTM-kriteriet og de korrigerede kriterier.

Sorterendebroen

Der er foretaget 6 ophugninger med tilhørende EKP-, modstands- og kloridmålinger på pille 1.1, øst/nord-øst og pille 2.2, vest. Ved to ophugninger er EKP-værdierne i overgangsområdet, og for de øvrige 4 ophugninger er der ingen risiko for korrosion efter de korrigerede kriterier. Ud fra måling af kloridindholdet i armeringsniveau er der for alle ophugninger ingen risiko for korrosion. For alle 6 ophugninger gælder, at der ikke er fundet korrosion (alle karakteren P)

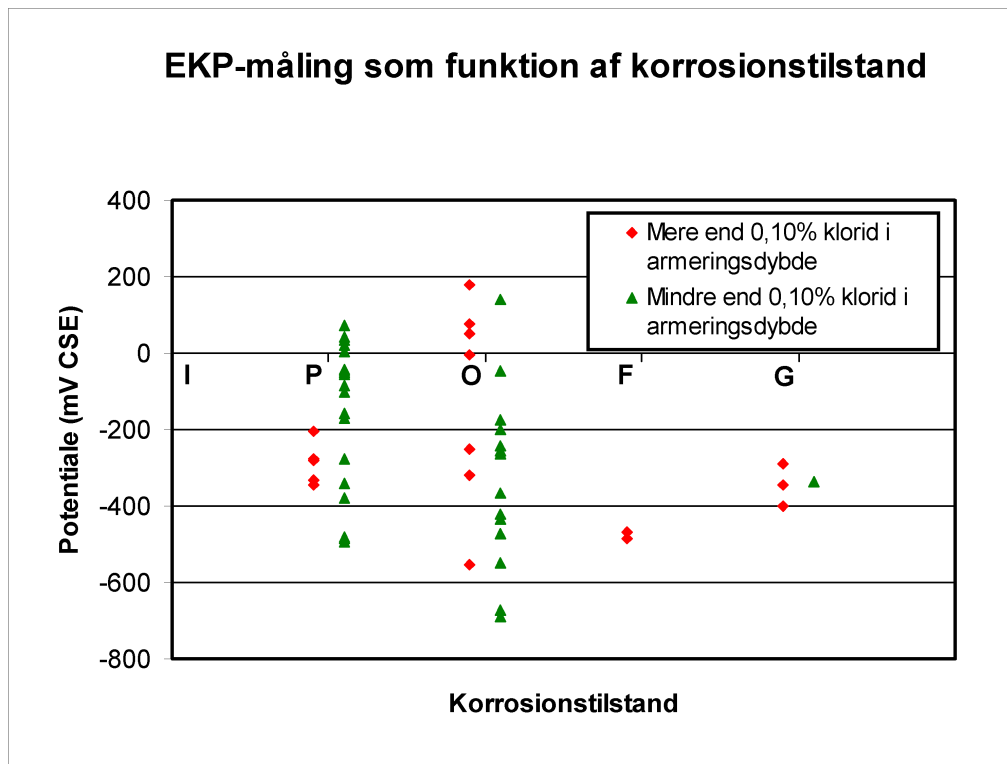
Vurdering: De samme kommentarer og vurderinger som for Kalvebodløbbrøen er gældende for Sorterendebroen. Dog er der omkring og under kote 0 potentialer i overgangsområdet eller i området for 90% sandsynlighed for korrosion. Ophugninger i overgangsområdet viste ingen korrosion. Der blev ikke foretaget ophugninger i området med EKP-værdier svarende til 90% sandsynlighed for aktiv korrosion. For Sorterendebroen bekræfter sammenhørende EKP-målinger og ophugninger de

korrigerede kriterier. Efter ASTM-kriteriet var der forventet et større korrosionsomfang.

I tabel B7.3 i Bilag B7.2 er alle sammenhørende EKP-målinger og ophugninger angivet. Forklaring til hver enkelt kolonne er angivet i Tabel B7.2.

Kolonne	Indhold / Kommentarer
Pille	Pillenr. hvor der er foretaget målinger. Nummeret følger den almindelige nummerering af piller for hver enkelt bro.
Orientering	Orientering af den undersøgte side.
Kote	Kote for den aktuelle måling.
Koordinater	Angiver koordinat på de optegnede EKP-kurver angivet på figurene Figur B7.1 til Figur B7.10 i Bilag B7.3.
EKP	EKP-værdien i mV CSE målt ved den foretagne ophugning (inden for 25 cm fra nærmeste punkt i EKP-nettet). For værdier skrevet med kursiv er der foretaget en interpolering af EKP-værdier for at finde en værdi ved selve ophugningen.
EKP gradient	Angiver forskellen mellem den største af de 8 nabomålinger (til den angivne EKP-måling) og den angivne EKP-måling i forrige kolonne.
Modstand	Modstanden målt sammen med EKP-værdien.
Korrosions-tilstand	I forbindelse med de foretagne ophugninger er armeringens aktuelle korrosionstilstand registreret. Der er anvendt følgende betegnelser for armeringens korrosionstilstand ved Kystbroprojektet: I = Immunt: Der ses blank stål P = Passiv: Armeringsoverfladen er mat hvid/grå. O = Overfladerust: Armeringsoverfladen er anløben evt. med spredte mindre rustprikker, men der er ingen tværsnitsreduktion. F = Fladekorrosion: Der er udbredt korrosion på armeringsoverfladen generelt med begyndende til alvorlig tværsnitsreduktion G = Grubetæring "Pitting": Der ses gruber lokalt til udbredt på armeringsoverfladen - i alvorlige tilfælde kan armeringsstangen være tæret over/væk.
Kommentar	Kommentar til ophugning - udover karakteren angivet i kolonnen "Ophugning".
Klorid	Angivelse af kloridindholdet i armeringsniveau. Det er antaget, at kloridindholdet er konstant i samme kote indenfor 1 m horisontalt på hver side af en foretaget kloridmåling (med mindre området på +/- 1 m kommer i nærheden af et hjørne). Kloridindhold, som er skrevet med kursiv, angiver, at der ikke er foretaget nogen kloridmåling med afstand mindre end 25 cm lodret fra EKP/ophugning. Den angivne værdi er inter- eller ekstrapoleret fra nærmeste kote(r).
Karbonatisering	Angiver den målte karbonatiseringsdybde (målt samme sted som ophugning er foretaget).
Dæklag	Angiver det faktisk målte dæklag i ophugninger.
Bemærkninger	Diverse bemærkninger vedrørende overfladebehandling, reparationer og så videre, som kan have indflydelse på EKP-målingerne.

Tabel B7.2 Forklaring til de enkelte kolonner i Tabel B7.3.



Figur B7.1 Målte potentialeverdier (mV CSE) som funktion af korrosionstilstand.

På Figur B7.1 er vist sammenhørende værdier for korrosionstilstanden i ophugninger og det målte potentiale. Skala I,P,O,F,G er defineret i Tabel B7.2, hvor skala går fra "I" for "immunt" til "G" for "grubetæring". Der er på figuren skelnet mellem de ophugninger, hvor kloridindholdet i armeringsniveau er over henholdsvis under den kritiske værdi.

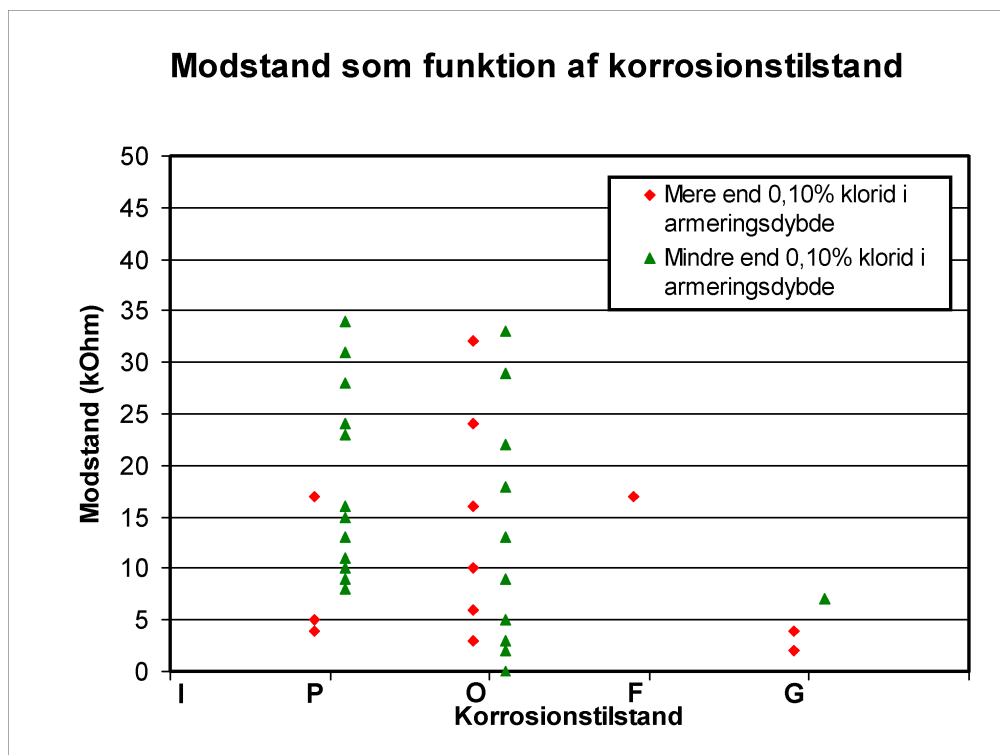
Det har ikke fra start været et formål at finde en sammenhæng mellem korrosionssandsynligheder/korrosionsgrader og de målte EKP-værdier. På grund af dette forhold er der - i statistisk sammenhæng - få punkter til at lave en vurdering. Endelig er der få punkter med karakteren F og G, hvilket ligeledes gør det svært at udlede en sammenhæng mellem korrosionstilstand og EKP-værdier for danske kystbroer.

Der er for korrosionstilstand O fire "røde" ophugninger med positivt potentiale, det vil sige punkter, hvor der er et kritisk kloridindhold i armeringsdybden, og der burde således være mulighed for korrosion, forudsat at de øvrige forhold er tilstede for korrosion (fugt og ilt). De 4 punkter er fra Vilsundbroen. Overfladen på disse søjler er

overfladebehandlet med en tykfilmsmaling op til kote 1,5 m eller højere. Det er derfor muligt, at forholdene på stedet bevirker de meget høje - positive - potentialeverdier.

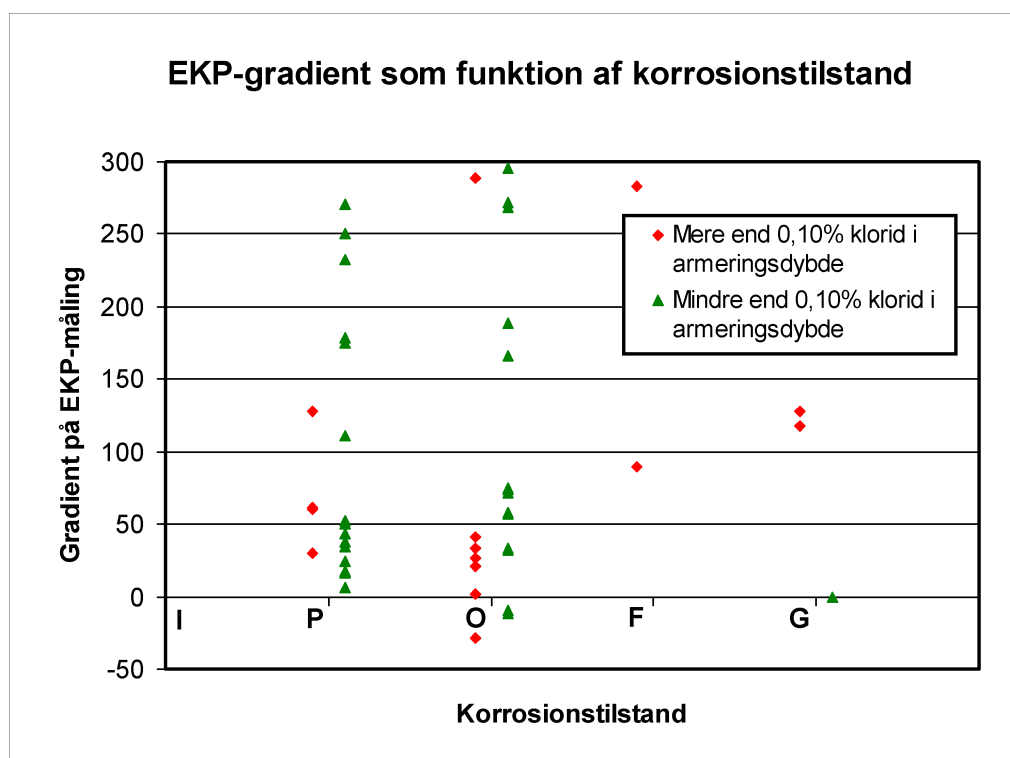
Der er differentieret mellem "røde" og "grønne" punkter ved et kloridindhold i armeringsniveau på 0,10% Cl⁻ af betonvægten. Det må antages at en værdi på 0,05% Cl⁻ af betonvægten flere steder også vil kunne initiere korrosion der ses som overfladekorrosion. Det store antal "grønne" ophugninger med karakteren O med EKP-værdier -200 mV til -700 mV kan indikere dette.

På **Figur B7.2** er vist sammenhørende værdier for korrosionstilstand i ophugninger og den målte modstand. Som for sammenhængen mellem korrosionstilstand og den målte EKP-værdi er der stor spredning på resultaterne. Generelt skal modstanden være mindre end ca. 10 kΩ, før der er sandsynlighed for korrosion. I ophugninger med karakteren F og G (og delvis O) bør modstanden være mindre end 10 kΩ. Modstanden afhænger af fugtindholdet i betonen og er dermed blandt andet afhængig af, hvornår på året målingerne foretages. De to "røde" punkter med grubetæring er dog foretaget i område med lille modstand. For de andre "røde" punkter er spredningen for stor til, at der kan udledes en sammenhæng.



Figur B7.2 Målte modstande (kΩ) som funktion af korrosionstilstand.

På **Figur B7.3** er vist sammenhørende værdier for korrosionstilstand i ophugninger og gradienten på de målte potentialeværdier. Gradienten på de målte EKP-værdier indikerer den relative størrelse mellem anode og katode. Et større katode til anodeforhold kan betyde højere korrosionsrater, det vil sige større potentialeforskelle (gradienter). Der er for de foretagne ophugninger ingen klar sammenhæng mellem korrosionsgrad og gradienter.



Figur B7.3 Gradient på de målte potentialeværdier (mV CSE) som funktion af korrosionstilstand.

Bilag 7 : EKP-målinger

Bilag B7.2 Oversigt over sammenhørende ophugningsresultater og EKP-målinger

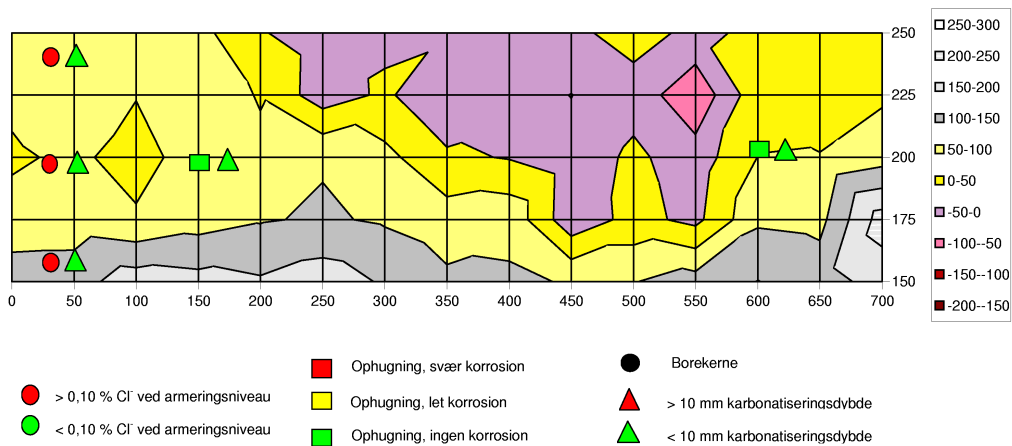
Bro	Pille	Orientering	Kote (m)	Koordinator på EKP-graf	EKP (mV)	EKP Gradient (mV)	Modstand (kohm)	Korrosionstilstand (I,P,O,F,G)	Kommentar til ophugning	Klorid (total) i armerings-niveau (vægt-%)	Karbonatisering (mm)	Dæklag (mm)	Bemærkninger
Sallingsundbroen	6	S	0,25	(25, 25)	-203	60	17	P	Ingen korrosion	0,17	0-1	35	Udeladt på ekp-graf
	6	S	0,75	(25, 75)	-320	26	3	O	Rød overfladekorrosion	0,25	1-2	22	
	6	S	2,25	(200, 225)	-550	75	5	O	Rød overfladekorrosion	0,08	0-1	45	
	10	S	0,50	(200, 50)	-553	289	3	O	Rød overfladekorrosion	0,19	1-2	30	
	10	S	0,75	(175, 75)	-345	128	4	G	Grubetæring	0,19	-	30	
	10	S	0,75	(175, 75)	-345	128	4	P	Ingen korrosion	0,19	0-1	35	
	10	S	1,25	(250, 125)	-467	283	17	F	Kraftig rød overfladekorrosion	0,15	0-1	30	
	10	S	2,50	(175, 250)	-486	179	8	P	Ingen korrosion	0,06	0-1	40	
	12	N	0,00	(300, 0)	-255	72	0	O	Rød overfladekorrosion	0,08	1-2	52	
	12	N	1,00	(375, 100)	-46	-9	2	O	Rød overfladekorrosion	0,05	0-1	30	
	12	N	2,00	(375, 200)	-57	38	31	P	Ingen korrosion	0,03	1-2	55	
Vejlefjordbroen	8	N	0,00	(700, 0)	-673	272	2	O	Overfladekorr., evt. fra indstøb.	0,00	1	65	
	8	N	0,50	(700, 50)	-420	269	3	O	Overfladekorr., evt. fra indstøb.	0,00	1	64	
	8	N	1,00	(700, 100)	-174	74	5	O	Overfladekorr., evt. fra indstøb.	0,00	1	59	
Langelandsbroen	13	S	3,00	(100, 300)	-263	189	33	O	Let overflade rust	-	-	45	Reparationer tæt ved ophugning
	F12	Ø	2,00	-	-335	-1	7	G	Grubetæring	0,08	-	<36	Reparationer tæt ved ophugning
	F13	Ø	2,00	(50, 200)	-251	33	16	O	Let overflade rust	0,10	3-5	41	Reparationer tæt ved ophugning
Hadsundbroen	2	N	0,25	(250, 25)	-331	30	5	P	Ingen korrosion	0,29	1-2	45	CI i samme kote varierer meget
	2	N	0,50	(375, 50)	-398	118	2	G	Kraftig grubetæring	0,23	7	45	
	2	N	2,25	(100, 225)	-170	111	8	P	Ingen korrosion	0,03	8-9	50	
	5	V	0,00	(100, 0)	-485	90	391	F	Kraftig overflade rust	0,31	0-1	47	
	5	S	0,25	(350, 25)	-280	61	4	P	Ingen korrosion	0,16	0-1	32	
	5	V	0,50	(100, 50)	-241	58	13	O	Let overflade rust	0,06	0-1	40	
	5	S	2,25	(500, 225)	-200	32	9	O	Let overflade rust	0,00	1-2	45	
Kalvebodløbbrøen	1,1	V	0,80	(360, 80)	-86	16	16	P	Ingen korrosion	0,00	1-2	38	Ved alle ophugninger: Betonoverflade uden skader. Få rustudfældninger (muligvis bindetråd).
	1,1	V	1,10	(222, 75)	-41	52	23	P	Ingen korrosion	0,00	1-2	40	
	1,1	V	1,85	(270, 185)	35	34	15	P	Ingen korrosion	0,02	1-2	38	
	2,2	Ø	0,30	(360, 30)	-339	232	9	P	Ingen korrosion	0,01	0-1	80	
	2,2	Ø	2,35	(360, 235)	71	24	34	P	Ingen korrosion	0,04	0-1	35	
	2,2	Ø	2,35	(135, 235)	41	6	28	P	Ingen korrosion	0,04	1-2	60	
Sorterendebrøen	1,1	Ø,NØ	0,00	(275, 9)	-380	250	8	P	Ingen korrosion	0,05	0-1	32	Ved alle ophugninger: Beton hård og klingende. Betonoverflade uden skader og udfældninger.
	1,1	Ø,NØ	0,50	(250, 50)	-103	43	16	P	Ingen korrosion	0,01	1-2	45	
	1,1	Ø,NØ	1,00	(375, 100)	-46	50	24	P	Ingen korrosion	0,01	0-1	40	
	2,2	V	0,00	(50, 0)	-495	175	11	P	Ingen korrosion	0,05	0-1	40	
	2,2	V	0,00	(200, 0)	-479	271	10	P	Ingen korrosion	0,05	0-1	38	
	2,2	V	0,75	(200, 75)	-50	18	13	P	Ingen korrosion	0,01	1-2	52	
Vilsundbroen	1	Ø	1,50	(150, 150)	177	-29	6	O	Anløben	0,41	2	44	Alle piller er malet med grøn tykfilmsmaling.
	1	Ø	2,00	(350, 200)	-3	2	10	O	Anløben	0,34	2	40	
	1	N	1,75	(200, 175)	140	166	22	O	Anløben	0,09	2	25	
	1	V	2,00	(150, 200)	75	21	32	O	Anløben	0,14	2	60	
	1	V	2,00	(600, 200)	51	41	24	O	Anløben	0,14	2	33	
	1	S	1,75	(100, 175)	-689	295	104	O	Anløben	0,05	2	40	
	4	V	1,50	(200, 150)	-367	33	18	O	Anløben	0,07	2	30	
	4	V	1,75	(400, 175)	-472	57	490	O	Anløben	0,04	2	43	
	4	S	2,00	(100, 200)	-436	-12	29	O	Anløben	0,05	2	48	
Svendborgsundbroen	6	-	0,10	(275, 175)	-275	-	-	P	Intakt	0,05	0-1	36	Dæklag ikke målt direkte i ophugninger.
	6-1	-	1,10	(75, 100)	-275	-	-	P	Intakt	0,12	0-1	27	
	8	-	0,30	(375, 175)	-158	-	-	P	Intakt	0,08	0-1	32	
	8-1	-	1,10	(75, 100)	23	-	-	P	Intakt	0,02	0-1	38	
	10	-	0,10	(25, 200)	-288	-	-	G	Grubetæring (i revne)	0,12	0-1	25	
	10-2	-	1,00	(75, 100)	3	-	-	P	Intakt	0,06	0-1	40	

Tabel B7.3 : Sammenhørende resultater fra ophugninger og EKP-målinger, kloridindhold og karbonatiseringsdybde.

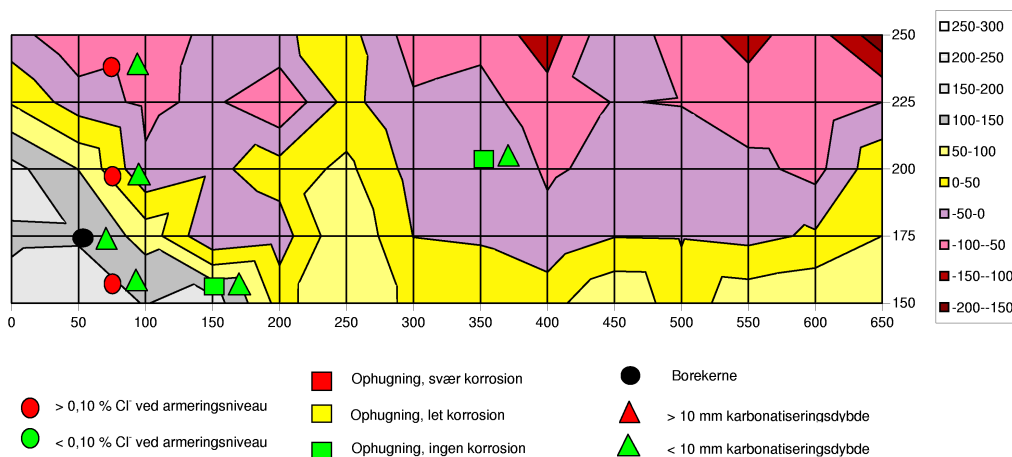
Bilag B7.3: Grafisk fremstilling af udvalgte EKP-målinger

Dette bilag indeholder en grafisk præsentation af EKP-målinger på udvalgte kystbroer hvor der er udført basiseftersyn i perioden 1995 til 1998. Ophugninger, kloridmålinger og borekerner er markeret på figurerne.

Vilsundbroen
Pille 1, side 3 (vest)

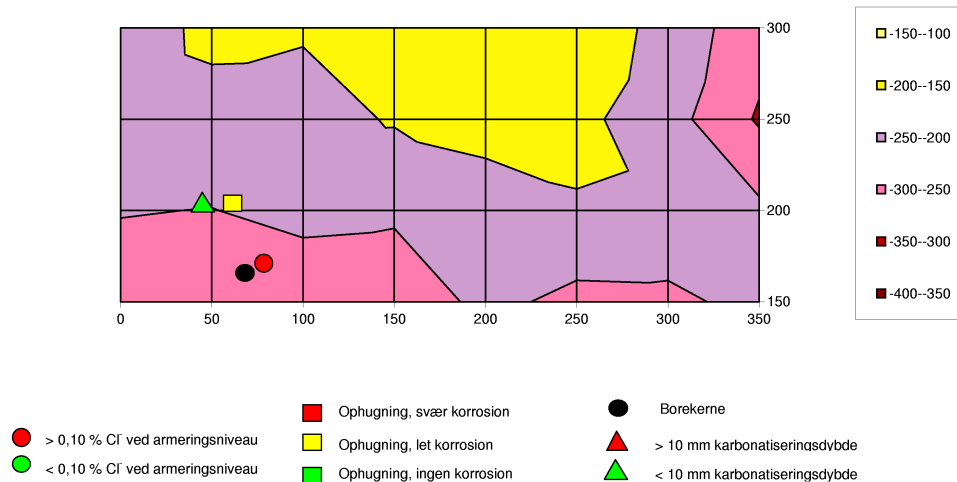


Vilsundbroen
Pille 1, side 1 (øst)

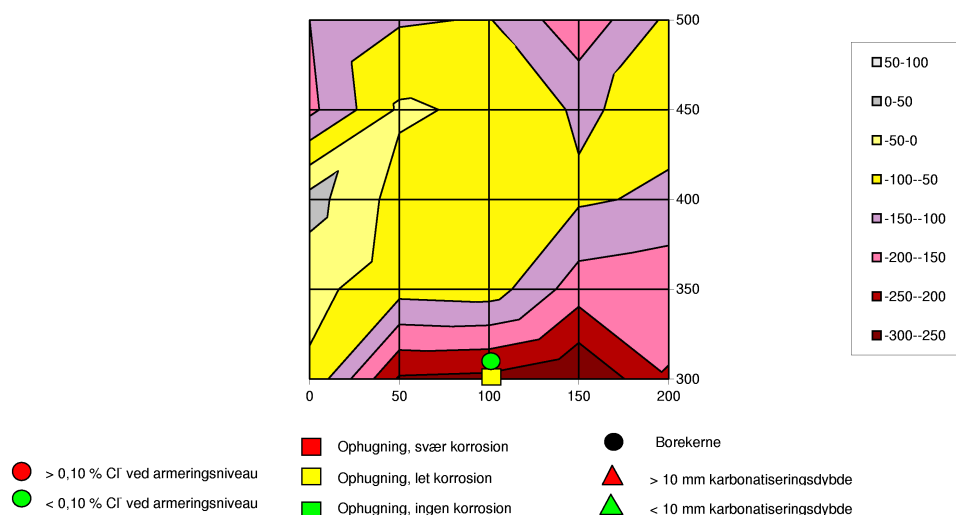


Figur B7.4 : EKP-målinger på Vilsundbroen udført i 1997. Se Tabel B7.3 for detaljer vedrørende placering af målinger.

Langelandsbroen, Fundament 13, øst

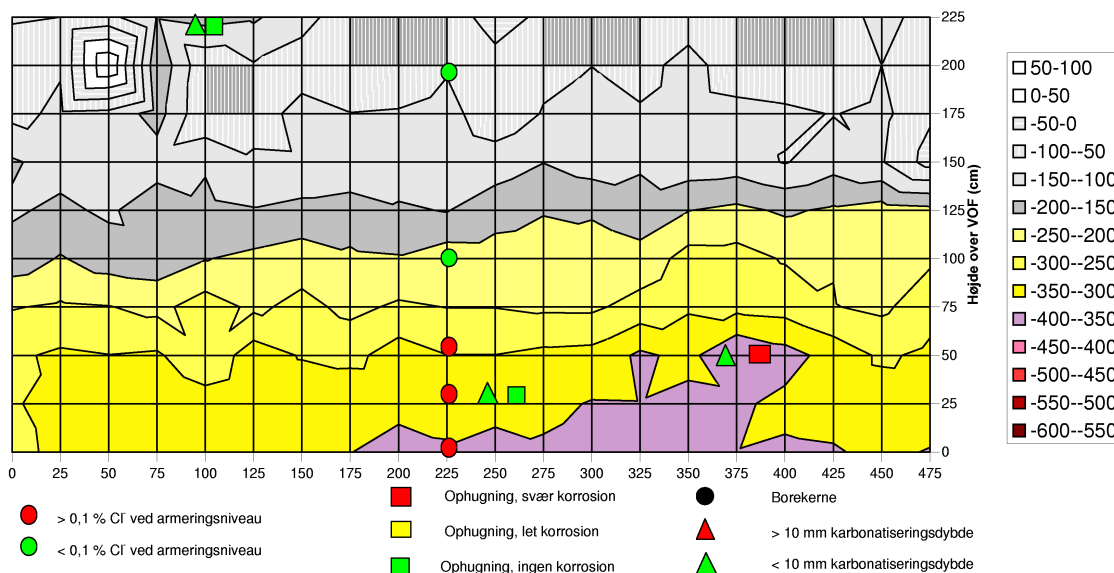


Langelandsbroen, Pille 13, syd

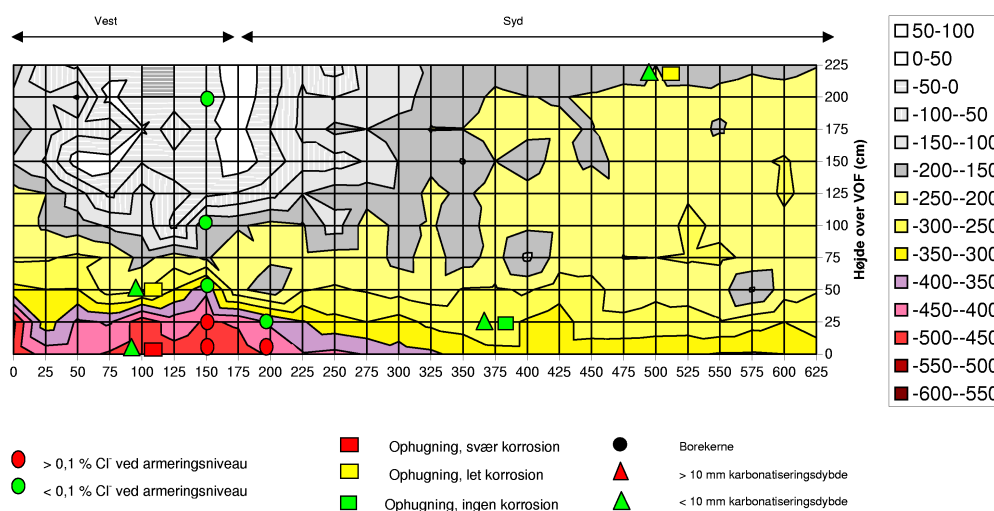


Figur B7.5 EKP-målinger på Langelandsbroen udført i 1998. Se Tabel B7.3 for detaljer vedrørende placering af målinger.

Hadsundbroen, Pille 2, nord

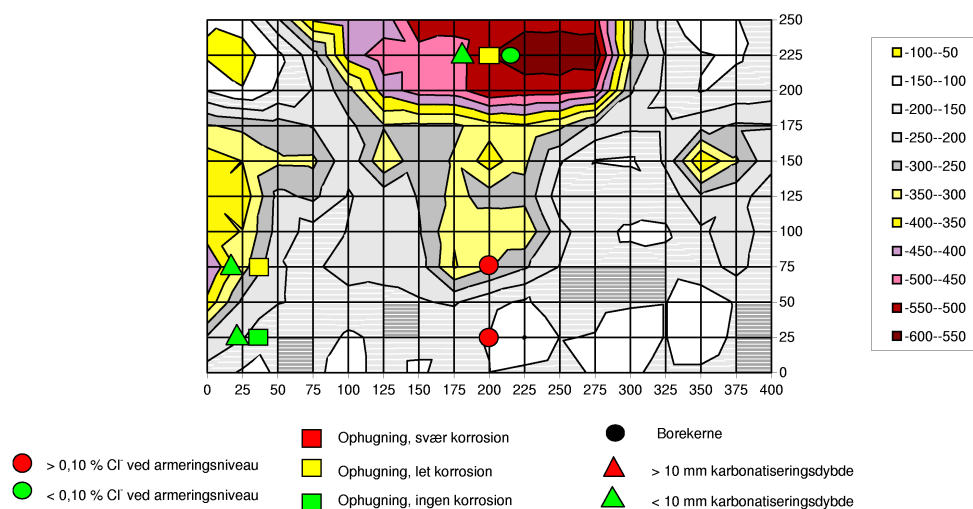


Hadsundbroen, Pille 5, Vest og Syd

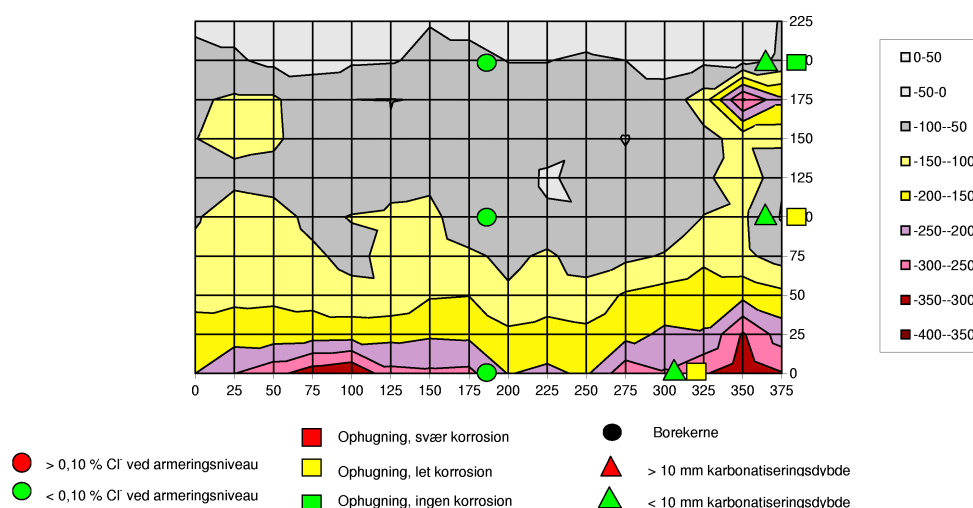


Figur B7.6 EKP-målinger på Hadsundbroen udført i 1996. Se Tabel B7.3 for detaljer vedrørende placering af målinger.

Sallingsundbroen, Søjle 6, Syd

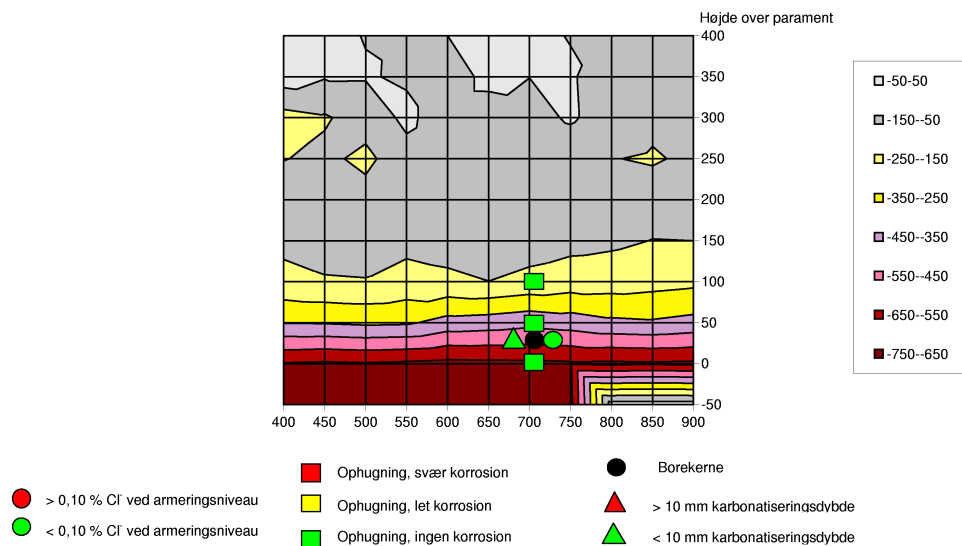


Sallingsundbroen, Søjle 12, Nord



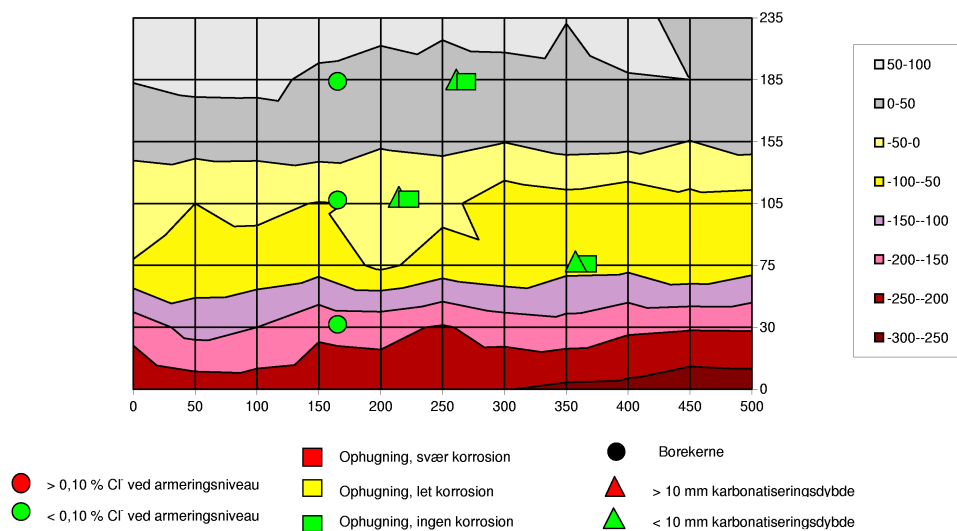
Figur B7.7 EKP-målinger på Sallingsundbroen udført i 1996. Se Tabel B7.3 for detaljer vedrørende placering af målinger.

Vejlefjordbroen, Pille 8, nord

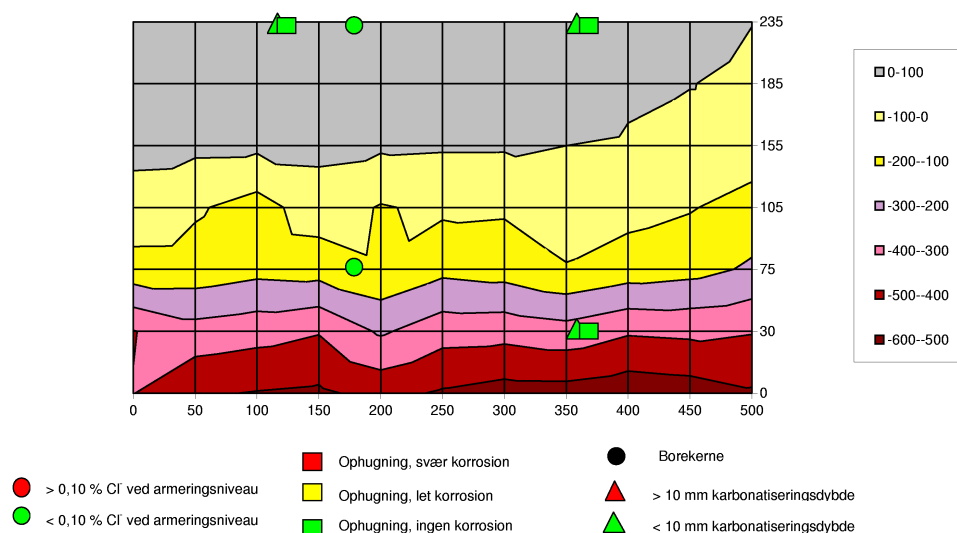


Figur B7.8 EKP-målinger på Vejlefjordbroen udført i 1997. Se Tabel B7.3 for detaljer vedrørende placering af målinger.

Kalvedløbbrøen, Søjle 1.1, vest

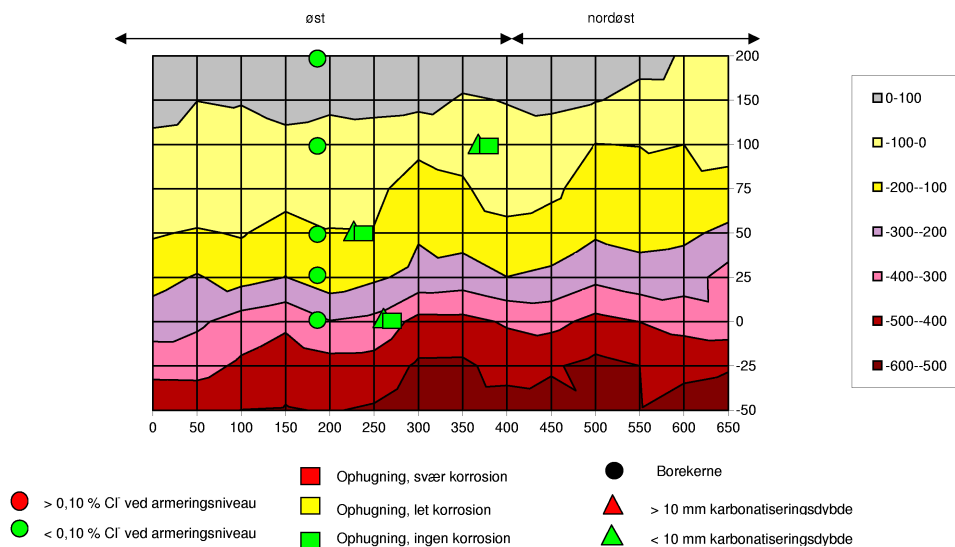


Kalvedløbbrøen, Søjle 2.2, øst

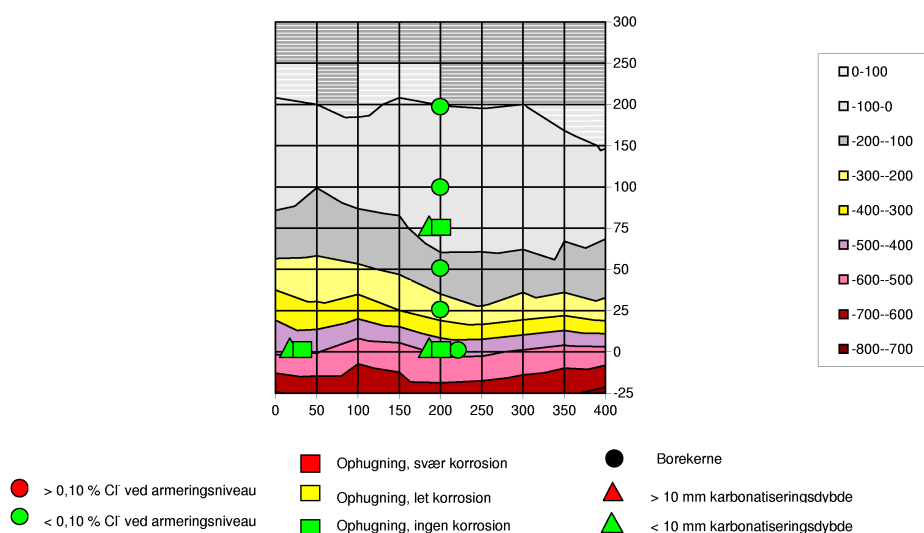


Figur B7.9 EKP-målinger på Kalvedløbbrøen udført i 1996. Se Tabel B7.3 for detaljer vedrørende placering af målinger.

Sorterendebroen, Søjle 1.1, øst, nordøst



Sorterendebroen, Søjle 2.2, vest



Figur B7.10 EKP-målinger på Sorterendebroen udført i 1996. Se Tabel B7.3 for detaljer vedrørende placering af målinger.



Bilag 8

Strukturanalyser - defektdybder

Bilag 8 Strukturanalyse - defektdybder

Mikrodefekter og kloridindtrængning

På baggrund af tidligere undersøgelser af følgende 5 kystbroer: Langelandsbroen, Vilsundbroen, Sallingsundbroen, Svendborgsundbroen og Kong Frederik d. IX's Bro er der udført en analyse for at vurdere, hvorvidt det er muligt at etablere en sammenhæng mellem omfanget af defekter (revner, inhomogeniteter med videre) og kloridindtrængning i betonen inden for såvel den enkelte bro som mellem de respektive broer.

Inden for Kystbroprojektet er det ikke muligt at drage sammenligninger mellem de forskellige broer, hvad angår kloridindtrængning versus mikrodefekter.

De aktuelle betoner i de undersøgte broer repræsenterer vidt forskellige miljøer (saltbelastning, koter med videre), aldre, sammensætninger med hensyn til for eksempel cementtyper, v/c-forhold og luft. Hertil kommer, at antallet af prøver er stærkt begrænset, typisk 2 per bro. Det statistiske grundlag for kystbroernes betoner kan således med fordel udbygges ved fremtidige undersøgelser, således at en sammenhæng mellem "defektdybde" og kloridindtrængning kan søges etableret.

Begrebet "defektdybde" er en vurdering af, til hvilken dybde den pågældende beton har overfladerelaterede defekter. Det er forudsat, at kun defekter (revner, inhomogeniteter med videre) som er beliggende i overfladen, eller som har direkte forbindelse med denne, har indflydelse på indtrængning af vand, salte med videre i betonen. Dette betyder samtidig, at dybereliggende defekter uden forbindelse til overfladen ikke anses for at have umiddelbar indflydelse på kloridindtrængningen i betonen, med mindre disse defekter er meget grove eller meget omfattende. Der skal desuden være tale om typisk og almindeligt forekommende defekter, som skønnes at være repræsentative for det aktuelle tyndslib/kerne. Det vil sige, at en helt lokalt tilfældigt forekommende defekt ikke alene kan afgøre eller bestemme defektdybden for det pågældende tyndslib. De defekter, der typisk er tale om, er revner (pasta- og vedhæftningsrevner), vedhæftningsdefekter, ansamlinger af luftindeslutninger og områder med høj eller stærkt forhøjet kapillarporøsitet, og kun i det omfang disse er lokaliseret umiddelbart ved/under den kloridekspanderede betonoverflade.

Det skal understreges, at bestemmelsen eller fastlæggelsen af den såkaldte "defektdybde" er baseret på et meget subjektivt skøn, og det kan således ikke forventes, at to forskellige petrografer vil kunne komme til præcis det samme resultat. Imidlertid er det sandsynligt, at en anden erfaren petrograf vil kunne finde frem til en tilsvarende relativ forskel på prøverne imellem.

I Tabel B8.1 ses en oversigt over kloridindhold og defektdybde fundet ved strukturanalysen.

Bro	Pille nr.	Opført år	Kloridindhold (% Cl ⁻ af betonvægten)			Defektdybde mm
			0-15 mm	15-30 mm	30-45 mm	
Vilsundbroen	4	1936	0,27	0,20	0,14	10
	1	1936	0,20	0,34	0,23	20 (45)
Sallingsundbroen	14N	1978	0,27	0,16	0,14	0
	14V	1978	0,13	0,09	0,04	0
Svendborgsundbroen	8P	1966	0,12	0,08	0,07	2
	8.2 *	1966	0,13	0,03	0,01	1
Kong Frederik d. IX's Bro	8.1/5	1962	0,12	0,13	0,12	5
	8.1/4	1962	0,15	0,14	0,11	1
	12.1/1	1962	0,17	0,17	0,14	3
	12.1/2	1962	0,13	0,12	0,10	10
Langelandsbroen	13Ø	1962	0,09	0,18	0,11	5
	13F	1962	0,21	0,17	0,17	6

* betyder at kloridindhold og strukturanalyse er udført på kerner fra forskellige piller.

Tabel B8.1. Oversigt over kloridindhold og defektdybde fundet ved strukturanalysen.



Bilag 9

Beregninger på kloridprofiler

Bilag 9 Beregninger på kloridprofiler

Bilag B9.1. Analysegrundlag

Bro	Dæklag anvendt ved fremskrivning	Dæklag ifølge tegning
Kronprins Frederiks Bro 1936	30 mm	30 mm
Vilsundbroen 1936	40 mm	30 mm
Kong Frederik d. IX's Bro 1962	45 mm (Pille 4-2) 25 mm (Pille 8) 35 mm (Pille 12)	50 mm
Langelandsbroen 1962	30 mm	30 mm
Siø Sundbroen 1964	100 mm	Skinner med et dæklag over 100 mm.
Svendborgsundbroen 1966	35 mm	30 mm
Hadsundbroen 1976	35 mm	40 mm
Sallingsundbroen 1978	40 mm 40 mm	Isbryderskal, 30 mm Pille, 30 mm
Vejlefjordbroen 1980	40 mm 35 mm	50 mm under kote 2,0 m 30 mm over kote 2,0 m
Kalvebodløb broen 1984	35 mm	40 mm
Sorterende broen 1984	35 mm	40 mm

Tabel B9.1. Dæklagsværdier, der i afsnit 5 anvendes ved fremskrivningen af kloridprofiler.

Til vurdering af følsomheden på fremskrivningsresultaterne er der ved fremskrivningen anvendt 3 værdier af dæklag for hver bro, dels dæklaget som angivet i Tabel B9.1, dels værdier ± 5 mm.

Bilag B9.2. Initialt kloridindhold

Bronavn	Estimat på C_0 % Cl af betonavægten
Kronprins Frederiks Bro	0,01
Vilsundbroen	0,02
Kong Frederik d. IX's Bro	0,01
Langelandsbroen	0,02
Svendborgsundbroen	0,01
Hadsundbroen	0,01
Sallingsundbroen	0,01
Vejlefjordbroen	0,01
Kalvebodløbbrøen	0,01
Sorterendebrøen	0,02

Bilag B9.3. Fremskrivning ved hjælp af Fick's 2. lov

I dette bilag er der foretaget en fremskrivning ved hjælp af Fick's 2. lov på udvalgte kloridprofiler. Hvert af de målte kloridprofiler (se oversigt i Bilag 6.1) er gennemgået manuelt, og for de profiler, som er egnede til en modellering i Fick's 2. lov, er der foretaget en fremskrivning for at bestemme tidspunktet for initiering for henholdsvis et kritisk indhold af klorid på 0,10% og 0,15% Cl af betonvægten. Der er anvendt samme numre på profilerne i dette bilag som i bilag B6.1.

Ligeledes er tidspunktet for initiering bestemt for dæklag henholdsvis 5 mm mindre og 5 mm større end det valgte dæklag anvendt til fremskrivning. Dette er gjort for at vurdere følsomheden på det valgte dæklag i fremskrivningen. Ved angivelse af initieringstider i teksten er der - hvis ikke andet er nævnt - refereret til en kritisk værdi på 0,10% Cl af betonvægten, og årstal er afrundet til nærmeste årstal deleligt med 5. I tabellerne er alle initieringstider efter år 2100 skrevet som "2100+"

Kronprins Frederiks Bro

Der er udtaget støv til 10 kloridprofiler på broen. For 3 profiler er der ikke foretaget en fremskrivning, da kloridindholdet i disse profiler enten er for lavt eller tæt på at være konstant i den undersøgte dybde. For de resterende 7 profiler er der foretaget en fremskrivning, som giver initieringstider mellem år 1945 og 2035. For 4 profiler er tidspunkt for initiering før år 1999. Ud fra de analyserede profiler burde korrosion være påbegyndt. Der er ikke foretaget ophugninger på denne bro. Visuelt var der på inspektionstidspunktet endnu ingen tegn på korrosionsskader.

Kronprins Frederiks bro (1936)											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m ² /sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0,15		
						- 5 mm	Dæklag 30 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1995	1	0,01	0,364	1,53E-13	1,05	1986	2008	2033	2025	2065	2100+
1995	2	0,01	0,219	2,31E-13	1,05	2005	2036	2072	2100+	2100+	2100+
1995	4	0,01	0,173	2,12E-12	1,05	1949	1955	1962	2087	2100+	2100+
1995	5	0,01	0,289	3,66E-13	1,05	1964	1976	1990	1996	2022	2054
1995	6	0,01	0,160	8,67E-13	1,05	1978	1996	2018	2100+	2100+	2100+
1995	7	0,01	0,229	2,50E-12	1,10	1942	1944	1947	1954	1962	1971
1995	8	0,01	0,128	1,65E-12	1,50	2001	2030	2064	2045	2093	2100+

Vilsundbroen

Der er udtaget støv til 36 profiler på broen - heraf er støv fra de profiler 26 profiler brugt til at måle syreopløseligt kloridindhold. Af disse 26 profiler er der foretaget en fremskrivning for 10 af profilerne. For de resterende 16 profiler er kloridindholdet oftest så højt at initiering regnes for at være sket før i dag. Disse 16 profiler er ikke medtaget på grund af formen på det målte kloridprofiler. Ud fra de analyserede profiler fås typisk, at initiering regnes at være sket før i dag. Ud fra både de analyserede og ikke analyserede profiler var korrosion forventet at være igang i dag med det anvendte kritiske kloridindhold. Ophugningerne viste dog kun ingen eller kun lettere korrosion.

Vilsundbroen bro (1939)											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m ² /sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0,15		
						- 5 mm	Dæklag 30 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1997	3	0,02	0,305	1,85E-12	1,80	1944	1946	1948	1949	1953	1958
1997	6	0,02	0,218	6,84E-13	2,50	1960	1969	1980	2013	2045	2083
1997	8	0,02	0,184	5,07E-13	1,50	1980	1998	2019	2224	2349	2498
1997	11	0,02	0,309	7,48E-13	2,00	1950	1955	1961	1962	1972	1984
1997	16	0,02	0,159	4,39E-13	1,50	2010	2042	2079	2100+	2100+	2100+
1997	18	0,02	0,527	5,55E-13	2,50	1948	1952	1957	1953	1959	1966
1997	20	0,02	0,326	5,52E-13	2,00	1953	1959	1967	1967	1980	1994
1997	22	0,02	0,304	6,27E-13	1,80	1953	1959	1966	1968	1980	1995
1997	30	0,02	0,338	2,33E-13	2,00	1971	1986	2002	2001	2029	2061
1997	35	0,02	0,173	1,00E-12	1,50	1963	1974	1987	2100+	2100+	2100+

Kong Frederiks d. IX's Bro

Der er udtaget støv til 16 kloridprofiler på broen. For de 12 af profilerne er der foretaget en fremskrivning, hvor 7 profiler giver initieringstider før år 1999 og de 4 sidste profiler initieringstider år 2030 eller senere. De 4 profiler, som ikke er medtaget, skyldes for få punkter eller formen på det målte profil. Ud fra de analyserede profiler forventes korrosion at være påbegyndt idag. Der er ikke foretaget ophugninger på broen, men visuelt er der flere steder tegn på korrosionskader.

Kong Frederik IX's bro (1960)											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m ² /sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0,15		
						- 5 mm	Dæklag	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1995	1	0,01	0,218	2,17E-13	1,20	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1995	2	0,01	0,127	3,05E-13	1,25	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1995	3	0,01	0,248	6,15E-13	1,25	2013	2027	2043	2100+	2100+	2100+
1995	4	0,01	0,142	1,25E-12	2,80	2081	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1995	5	0,01	0,779	4,88E-12	0,35	1962	1963	1963	1963	1964	1963
1995	7	0,01	0,178	1,18E-12	1,20	1974	1982	1991	2079	2100+	2100+
1995	10	0,01	0,163	3,00E-12	1,20	1969	1971	1976	2100+	2100+	2100+
1995	11	0,01	0,146	3,30E-12	1,20	1972	1976	1983	2100+	2100+	2100+
1995	12	0,01	0,304	8,82E-13	1,03	1975	1981	1988	1992	2004	2017
1995	14	0,01	0,169	5,16E-13	1,15	2044	2074	2100+	2100+	2100+	2100+
1995	15	0,01	0,206	1,81E-12	1,20	1974	1980	1985	2018	2039	2063
1995	16	0,01	0,140	4,35E-12	1,20	1981	1988	1997	2100+	2100+	2100+

Langelandsbroen

Der er udtaget støv til 32 kloridprofiler, hvoraf der er målt syreopløselig klorid i 20 af profilerne. Der er ligeledes udtaget 9 kerner, hvor der er målt kloridprofil. Der er lavet fremskrivning for 10 af støvprøverne og 4 af kernerne. For de ikke medtagne profiler gælder, at kloridprofilet oftest er konstant, hvorfor fremskrivning med Fick's 2. lov ikke er relevant. For mange af profilerne er tidspunkt for initiering før år 1999, og korrosion forventes derfor at være startet. Ophugningerne viser grubetæring.

Langelandsbroen (1962)											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m ² /sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0,15		
						- 5 mm	Dæklag 30 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1998	1*	0,02	0,147	7,4E-13	3,10	2019	2044	2073	2100+	2100+	2100+
1998	2*	0,02	0,142	8,2E-13	3,10	2021	2047	2078	2100+	2100+	2100+
1998	5*	0,02	0,386	1,3E+01	1,60	1990	2002	2016	2011	2032	2058
1998	6*	0,02	0,401	2,1E-13	1,60	1992	2005	2021	2014	2037	2064
1998	2	0,02	0,215	5,0E-13	3,10	1991	2004	2020	2069	2116	2172
1998	3	0,02	0,150	5,1E-13	4,10	2038	2072	2111	2100+	2100+	2100+
1998	4	0,02	0,254	5,5E-12	1,60	1964	1965	1966	1967	1970	1972
1998	5	0,02	0,311	1,2E-13	1,60	2030	2060	2096	2100+	2100+	2100+
1998	6	0,02	0,330	2,8E-13	1,60	1989	2001	2015	2015	2039	2067
1998	13	0,02	0,113	1,4E-05	3,10	1962	1962	1962	1962	1962	1962
1998	22	0,02	0,137	5,1E-03	1,60	1962	1962	1962	1962	1962	1962
1998	25	0,02	0,177	1,5E-12	1,60	1978	1985	1993	2100+	2100+	2100+
1998	28	0,02	0,214	5,5E-12	1,60	1965	1966	1967	1972	1976	1981
1998	29	0,02	0,155	1,6E-12	1,60	1983	1993	2004	2100+	2100+	2100+

Siøsundbroen

Der er udtaget støv til 18 kloridprofiler på broen. For de 14 profiler er der foretaget en fremskrivning. Dæklag er her 100 mm på armeringssveller. For denne armering er der ingen risiko for korrosion. Der er anden sekundær armering i broen med et dæklag på 25 mm i fundamentet og nær pilletop. For denne armering er der risiko for korrosion (ikke medtaget i skema).

Siøsundbroen (1964)											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m2/sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0,15		
						- 5 mm	Dæklag 100 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1996	1	0,0000	0,123	4,91E-12	1,60	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1996	2	0,0000	0,278	5,72E-13	1,60	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1996	3	0,0000	0,243	1,25E-12	1,60	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1996	5	0,0000	0,351	2,14E-12	2,60	2023	2029	2035	2070	2082	2094
1996	6	0,0000	0,166	6,59E-12	1,10	2043	2052	2061	3390	3544	3706
1996	7	0,0000	0,249	2,88E-12	1,60	2035	2042	2050	2100+	2100+	2100+
1996	8	0,0000	0,181	3,13E-12	1,60	2094	2108	2122	2100+	2100+	2100+
1996	9	0,0000	0,177	1,02E-12	1,60	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1996	12	0,0000	0,330	1,09E-12	1,10	2088	2101	2115	2100+	2100+	2100+
1996	13	0,0000	0,189	1,19E-12	1,60	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1996	14	0,0000	0,250	1,73E-12	1,60	2081	2094	2107	2100+	2100+	2100+
1996	15	0,0000	0,195	1,13E-12	1,60	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1996	17	0,0000	0,108	1,88E-12	2,60	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1996	18	0,0000	0,438	1,03E-12	1,10	2060	2070	2081	2100+	2100+	2100+

Svendborgsundbroen

Der er udtaget 28 profiler på broen. For de 16 af profilerne er der foretaget en fremskrivning. De 10 profiler, som ikke er medtaget er der udført bestemmelse af det vandopløselige kloridindhold (3 profiler), eller profilerne har konstant kloridindhold. 6 profiler har tidspunkt for initiering før i dag. De øvrige har initieringstider fra år 2020 eller senere. Ud fra de analyserede profiler er der risiko for korrosion på armeringen.

Svendborgsundbroen (1966)											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m2/sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0,15		
						- 5 mm	Dæklag 35 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1996	1	0,01	0,184	2,76E-12	1,60	1978	1983	1988	2049	2079	2114
1996	2	0,01	0,168	2,00E-13	2,10	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1996	3	0,01	0,309	3,58E-13	4,10	2003	2017	2032	2042	2069	2100
1996	5	0,01	0,172	8,77E-13	5,10	2013	2029	2049	2100+	2100+	2100+
1996	7	0,01	0,200	2,01E-12	1,60	1980	1985	1991	2029	2051	2077
1996	8	0,01	0,473	6,55E-14	4,10	2095	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1998	11	0,01	0,224	4,32E-13	1,60	2017	2035	2056	2100+	2100+	2100+
1998	13	0,01	0,339	4,45E-13	4,10	1993	2002	2014	2017	2035	2056
1998	16	0,01	0,219	1,51E-13	4,10	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1998	17	0,01	0,131	1,24E-12	1,60	2076	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1998	18	0,01	0,138	1,37E-12	3,10	2038	2064	2095	2100+	2100+	2100+
1998	19	0,01	0,266	1,98E-13	4,10	2049	2079	2114	2100+	2100+	2100+
1996	23	0,01	0,160	3,80E-12	1,60	1980	1985	1990	2100+	2100+	2100+
1996	24	0,01	0,192	7,38E-13	1,60	2007	2022	2040	2100+	2100+	2100+
1996	25	0,01	0,208	1,70E-12	2,10	1981	1986	1993	2025	2047	2071
1996	26	0,01	0,409	4,37E-13	4,10	1988	1996	2006	2004	2017	2033
1996	28	0,01	0,475	3,33E-13	5,20	1991	2000	2011	2006	2020	2037

Hadsundbroen

Der er udtaget støv til 21 profiler på broen. For de 12 af profilerne er der foretaget en fremskrivning, hvor initiering typisk er før år 1999. De 9 profiler, som ikke er medtaget, er enten vandopløselige, har for lavt målt indhold af klorid eller konstant kloridindhold igennem profilet. Ud fra de analyserede profiler forventes der at være udbredt korrosion på broen. Dette stemmer overens med de foretagne ophugninger, som 3 steder viser kraftig overfladerust eller grubetæring.

Hadsundbroen (1976)											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m2/sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0,15		
						- 5 mm	Dæklag 35 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1996	3	0,01	0,188	1,32E-12	1,00	2000	2009	2019	2100+	2100+	2100+
1996	5	0,01	0,423	5,59E-12	0,25	1978	1978	1979	1979	1980	1981
1996	6	0,01	0,443	5,77E-12	0,00	1978	1978	1979	1979	1979	1980
1996	7	0,01	0,434	6,41E-12	0,00	1977	1978	1979	1978	1979	1980
1996	9	0,01	0,209	4,19E-13	0,25	2036	2058	2083	2100+	2100+	2100+
1996	10	0,01	0,414	1,26E-12	0,00	1984	1986	1989	1989	1993	1999
1996	11	0,01	0,364	1,44E-12	0,00	1984	1986	1990	1990	1995	2000
1996	14	0,01	0,219	2,43E-13	1,00	2071	2105	2144	2100+	2100+	2100+
1996	15	0,01	0,200	1,09E-12	0,50	2002	2011	2021	2093	2100+	2100+
1996	16	0,01	0,550	9,14E-13	0,25	1984	1987	1990	1988	1993	1998
1996	17	0,01	0,772	1,69E-12	0,00	1979	1981	1982	1981	1983	1985
1996	18	0,01	0,541	1,28E-12	0,00	1982	1984	1986	1985	1988	1992

Sallingsundbroen

Der er udtaget 36 kloridprofiler på broen. For de 26 profiler er der foretaget en fremskrivning. 14 profiler har initieringstidspunkt før i dag eller inden år 2010. De øvrige 12 profiler har initieringstid fra år 2020 og fremefter. Initiering forventes derfor at være sket eller vil ske inden for de nærmeste 10 år. Ophugninger viser fra ingen korrosion til grubetæring, det vil sige en stor spredning.

Sallingsundbroen, bygget år 1978											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m2/sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0,15		
						- 5 mm	Dæklag 30 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1996	2	0,01	0,321	3,75E-12	1,00	1983	1984	1986	1987	1990	1993
1996	3	0,01	0,410	2,52E-12	0,50	1983	1985	1987	1987	1990	1993
1996	5	0,01	0,241	2,12E-12	0,00	1990	1994	1998	2012	2023	2035
1996	6	0,01	0,485	6,40E-14	0,00	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+
1996	8	0,01	0,271	7,96E-13	2,25	2005	2014	2023	1997	2003	2009
1996	11	0,01	0,611	7,25E-13	0,50	1991	1995	1999	1994	1998	2004
1996	12	0,01	0,377	1,63E-12	0,00	1987	1990	1993	2094	2100+	2100+
1996	13	0,01	1,285	6,55E-14	0,00	2069	2096	2100+	2044	2064	2087
1996	15	0,01	0,114	1,48E-12	1,00	2100+	2100+	2100+	2055	2078	2100+
1996	16	0,01	0,276	3,76E-13	0,50	2034	2052	2071	2022	2036	2051
1996	17	0,01	0,318	4,53E-13	0,25	2017	2029	2042	2004	2012	2021
1996	18	0,01	0,297	9,10E-13	0,00	1999	2005	2013	1995	2000	2005
1996	20	0,01	0,219	4,03E-12	0,00	1986	1988	1991	2020	2033	2048
1998	22	0,01	0,638	7,88E-13	1,25	1990	1993	1997	2021	2034	2049
1998	24	0,01	0,355	6,63E-13	1,75	2001	2008	2016	2028	2043	2060
1998	25	0,01	0,333	7,39E-13	2,25	2000	2007	2015	2044	2064	2087
1998	26	0,01	0,253	1,26E-12	1,25	1997	2003	2010	2100+	2100+	2100+
1998	27	0,01	0,298	6,08E-13	1,75	2009	2019	2030	2014	2025	2037
1998	28	0,01	0,236	2,84E-13	1,75	2074	2100+	2100+	2012	2022	2034
1998	29	0,01	0,427	5,87E-13	2,25	2000	2006	2014	2098	2100+	2100+
1998	30	0,01	0,587	4,22E-13	1,25	2001	2008	2016	2100+	2100+	2100+
1998	31	0,01	0,304	3,21E-13	1,75	2036	2054	2074	2083	2100+	2100+
1998	32	0,01	0,180	5,99E-13	2,25	2060	2086	2100+	2048	2070	2094
1998	33	0,01	0,220	9,89E-13	1,25	2009	2019	2030	2046	2067	2091
1998	35	0,01	0,264	7,75E-13	1,75	2007	2016	2026			
1998	36	0,01	0,114	1,4096E-12	2,25	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+

Vejlefjordbroen

Der er lavet fremskrivning på 6 profiler udtaget af borekerner. For alle kerner gælder, at initiering ikke regnes at ske før om 15 til 20 år.

Vejlefjordbroen, bygget år 1980.											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m2/sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0.15		
						- 5 mm	Dæklag 40 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1997	1*	0,010	0,856	2,81E-13	0,54	2006	2015	2024	2016	2027	2039
1997	2*	0,010	0,284	7,14E-13	2,80	2008	2017	2027	2043	2062	2084
1997	3*	0,010	0,660	1,99E-13	0,35	2024	2038	2053	2043	2063	2085
1997	4*	0,010	0,161	3,28E-13	2,50	2191	2255	2328	2100+	2100+	2100+
1997	5*	0,010	1,197	1,54E-13	0,48	2020	2032	2046	2032	2047	2065
1997	6*	0,010	0,197	2,41E-13	2,60	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+	2100+

Kalvebodløbbrøen

Der er udtaget 13 kloridprofiler på broen. For de 3 af profilerne er der foretaget en fremskrivning, som giver initieringstider mellem ca. år 1995 og år 2015. For de øvrige profiler er kloridindhold typisk mellem 0,05% og 0,20% i intervallet 0-15 mm og mellem 0,01% og 0,02% i de dybereliggende intervaller. For disse profiler er det ikke muligt at foretage en forsvarlig fremskrivning. Udfra de 15 profiler må det antages, at der går lang tid, før kloridindholdet bliver kritisk i niveau med armeringen. I ingen af de foretagne ophugninger var der tegn på korrosion.

Kalvebodløbbrøerne (1984)											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m2/sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0.15		
						- 5 mm	Dæklag 35 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1996	10	0,01	0,423	4,35E-13	1,05	2006	2013	2022	2020	2033	2048
1996	11	0,01	1,000	3,76E-13	0,75	1997	2002	2008	2002	2008	2015
1996	12	0,01	0,674	6,50E-13	0,75	1994	1997	2002	1998	2003	2009

Sorterendebroen

Der er udtaget 15 kloridprofiler på broen. For de 3 af profilerne er der foretaget en fremskrivning, som giver initieringstider mellem ca. år 2010 og 2035. For de øvrige profiler er kloridindhold typisk mellem 0,05% og 0,20% i intervallet 0-15 mm og 0,01% - 0,02% i de dybereliggende intervaller. For disse profiler er det ikke muligt af foretage en forsvarlig fremskrivning. Ud fra alle 15 profiler må det antages, at der går lang tid før kloridindholdet bliver kritisk i niveau med armeringen. I ingen af de foretagne ophugninger er der fundet korrosion.

Sorterendebroerne (1984)											
Insp. År	Profil Nr.	C _i [%Cl-]	C _s [%Cl-]	D [m2/sek]	Kote [m]	Levetid, C _{kr} =0,10			Levetid, C _{kr} =0.15		
						- 5 mm	Dæklag 35 mm	+ 5mm	- 5 mm	Dæklag	+ 5mm
1996	4	0,02	0,239	4,53E-13	0,25	2022	2036	2052	2094	2134	2180
1996	5	0,02	0,362	4,97E-13	0,00	2004	2012	2020	2021	2035	2050
1996	13	0,02	1,158	1,78E-13	0,00	2008	2017	2027	2016	2028	2041