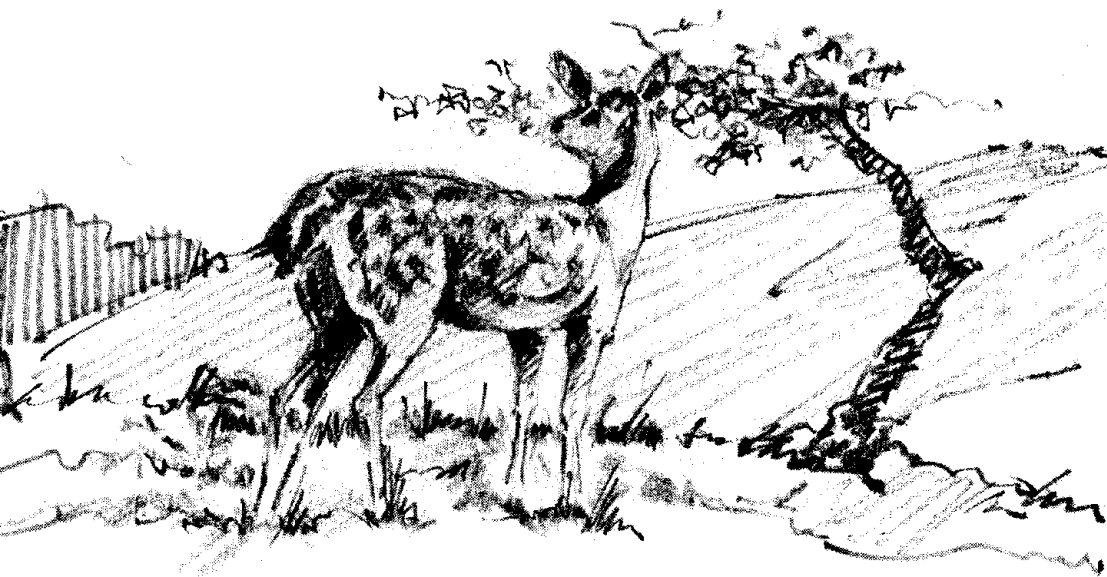
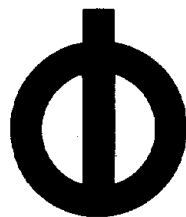
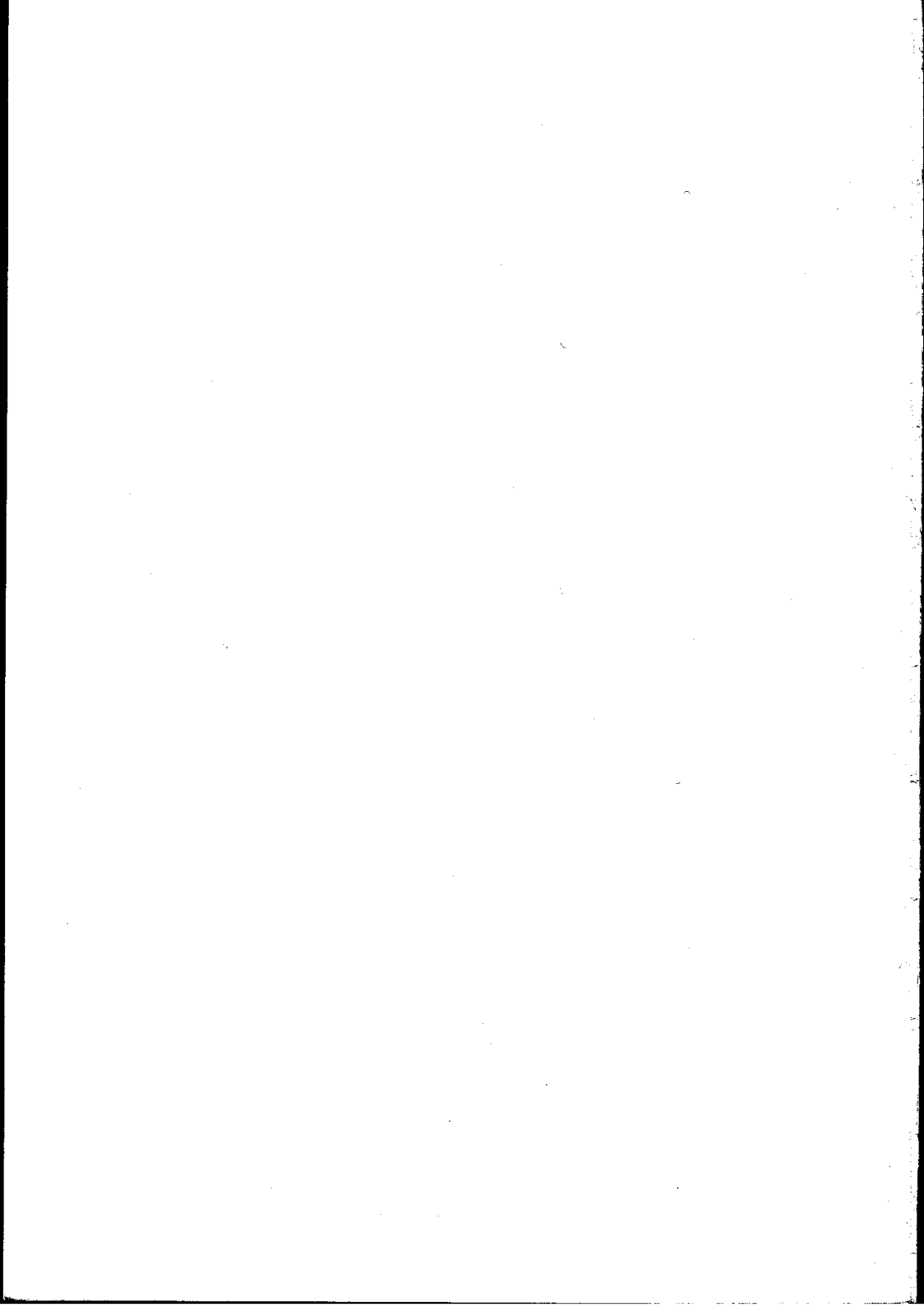


Dansk Betonforening

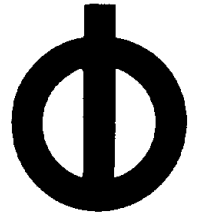


Dansk Betondag 1991

Publikation nr. **37**



Dansk Betonforening



Dansk Betondag 1991

Publikation nr. 37

Publikaton nr. 37:91

Denne publikation indeholder indlæggene fra

Dansk Betondag 1991

der blev afholdt
den 5. september 1991
på Hotel Rebild Bakker

Forsidetegning

af Helge V. Qvistorff
Stendalsvej 42, 9520 Skørping

Publikationen er udgivet af:

Dansk Betonforening
c/o Dansk Ingeniørforening
Vester Farimagsgade 29, 1780 København V
Tlf.: 33 15 65 65

<u>Indhold:</u>	<u>Side</u>
Kjeld Roger Henriksen:	
Forord	5
Per Clausen:	
"At bygge bro"	7
Peter Kristensen:	
"At bygge bro"	23
Preben Christensen:	
Tilslagsmaterialer til fremtidens superbeton....	37
Anders Henrichsen:	
Fremtidens Betonveje ?	47
Jens Holm:	
Fremtidens superbeton - en kommentar	55
Birgit Sørensen:	
Chloridkorrosion	
- forudseende projektering	75
Steen Rostam:	
Chloridkorrosion.	
- reparationserfaringer og deres	
nyttiggørelse i ny-projektering	95

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

340

341

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

371

372

373

374

375

376

377

378

379

380

381

382

383

384

385

386

387

388

389

390

391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

435

436

437

438

439

440

441

442

443

444

445

446

447

448

449

450

451

452

453

454

455

456

457

458

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480

481

482

483

484

485

486

487

488

489

490

491

492

493

494

495

496

497

498

499

500

501

502

503

504

505

506

507

508

509

510

511

512

513

514

515

516

517

518

519

520

521

522

523

524

525

526

527

528

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

539

540

541

542

543

544

545

546

547

548

549

550

551

552

553

554

555

556

557

558

559

560

561

562

563

564

565

566

567

568

569

570

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

591

592

593

594

595

596

597

598

599

600

601

602

603

604

605

606

607

608

609

610

611

612

613

614

615

616

617

618

619

620

621

622

623

624

625

626

627

628

629

630

631

632

633

634

635

636

637

638

639

640

641

642

643

644

645

646

647

648

649

650

651

652

653

654

655

656

657

658

659

660

661

662

663

664

665

666

667

668

669

670

671

672

673

674

675

676

677

678

679

680

681

682

683

684

685

686

687

688

689

690

691

692

693

694

695

696

697

698

699

700

701

702

703

704

705

706

707

708

709

710

711

712

713

714

715

716

717

718

719

720

721

722

723

724

725

726

727

728

729

730

731

732

733

734

735

736

737

738

739

740

741

742

743

744

745

746

747

748

749

750

751

752

753

754

755

756

757

758

759

760

761

762

763

764

765

766

767

768

769

770

771

772

773

774

775

776

777

778

779

780

781

782

783

784

785

786

787

788

789

790

791

792

793

794

795

796

797

798

799

800

801

802

803

804

805

806

807

808

809

810

811

812

813

814

815

816

817

818

819

820

821

822

823

824

825

826

827

828

829

830

831

832

833

834

835

836

837

838

839

840

841

842

843

844

845

846

847

848

849

850

851

852

853

854

855

856

857

858

859

860

861

862

863

864

865

866

867

868

869

870

871

872

873

874

875

876

877

878

879

880

881

882

883

884

885

886

887

888

889

890

891

892

893

894

895

896

897

898

899

900

901

902

903

904

905

906

907

908

909

910

911

912

913

914

915

916

917

918

919

920

921

922

923

924

925

926

927

928

929

930

931

932

933

934

935

936

937

938

939

940

941

942

943

944

945

946

947

948

949

950

951

952

953

954

955

956

957

958

959

960

961

962

963

964

965

966

967

968

969

970

971

972

973

974

975

976

977

978

979

980

981

982

983

984

985

986

987

988

989

990

991

992

993

994

995

996

997

998

999

1000

Forord

I disse år præges aktiviteterne inden for bygge- og anlægssektoren i udpræget grad af de kommende bro- og vejforbindelser. Storebæltsbyggeriet er igang.

Projekteringen af en Øresunds-forbindelse forventes igangsat i løbet af efteråret 1991, og der tales nu også om en Femernforbindelse.

Det viser sig, at der ved gennemførelse af større anlægskonstruktioner oftest stilles nye krav til betonen som bygningsmateriale. Senest er der ved Storebæltsbyggeriet stillet krav om 100 års levetid mod 50 år for tidligere bygningsværker. Sådanne nye krav er med til at skubbe den teknologiske udvikling fremad.

Det er derfor naturligt, at emnevalget i forbindelse med planlægningen af vor årligt tilbagevendende Betondag i år påvirkes af gennemførelsen af disse væsentlige samfundsinvesteringer.

Vi har tidligere erfaret, at en væsentlig årsag til konstaterede betonskader har været en manglende videnformidling. Vi har derfor i år i forbindelse med afholdelse af Betondag '91 i Rebild valgt at gøre en form for status, samtidig med at vi prøver at se ud i fremtiden.

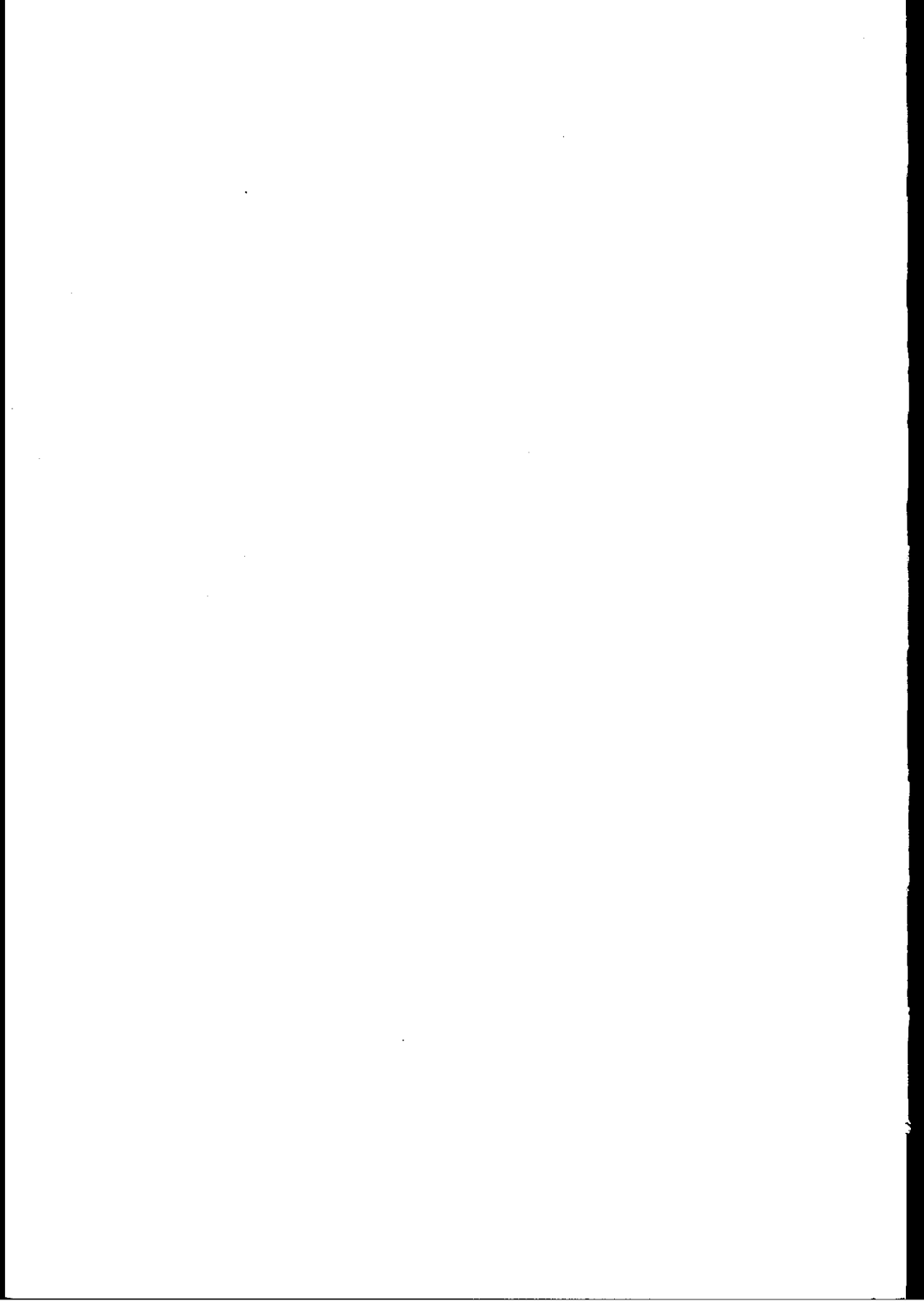
Dette vil vi forsøge at gøre ved at lade inviterede foredragsholdere give deres personlige svar på følgende spørgsmål:

- Hvad har vi taget ved lære af?
- Hvordan ser fremtidens beton ud?

Måtte denne Betondag herved give sit bidrag til at forøge kendskabet til betonen som bygningsmateriale.

Kjeld Roger Henriksen

formand for Dansk Betonforening



Vejdirektoratet, Broområdet,
Lyngbyvej 17,
2100 København Ø
tlf. 31 18 62 66

"AT BYGGE BRO"

af

Overingeniør Per Clausen, Vejdirektoratet

Juli 1991

INDHOLD

Bygningen af de seneste tiårs store broer og tunneler og udviklingen af beton som byggemateriale har været tæt knyttet til hinanden. Et forsøg på at trække visse hovedpunkter fra disse anlægs betonbeskrivelser frem vil også beskrive noget af den ændring i dansk betontechnologi, der er sket i disse år. Udviklingen har været præget af en stigende opmærksomhed omkring betonens holdbarhedsmæssige egenskaber. I den efterfølgende gennemgang beskrives kortfattet nogle hovedtræk i de ændringer, der har været for de store anlægs betoner med hovedvægten lagt på de nyere anlæg.

Broer i 70'erne

Sallingsundbroen

Sallingsundbroens betonbeskrivelse er fra 1973. Beskrivelsen indeholder ingen krav vedrørende tilslagets reaktivitet, men der var krav om bestemmelser af cementens alkaliindhold (ækv. Na_2O). Alle krav til betones delmaterialer og den friske og færdige beton var angivet ved absolutte værdier. Der blev anvendt lavalkalisulfatbestandig cement og hurtighærdende portlandcement. Endvidere anvendtes søsten og sand fra Vigsø og granitskærver fra Sverige. Broen blev åbnet for trafik i 1978.

Hadsundbroen

Hadsundbroen er fra samme periode. Betonbeskrivelsen er fra 1974. Den indeholdt talbaserede krav til betonens sand- og stenmaterialer. Sandet skulle være rent og bestå af sunde og stærke korn. Kalk, flint, ler, humus eller andre skadelige stoffer måtte ikke forekomme i betydeligt omfang. Det totale flintindhold måtte ikke overstige 5 % efter vægt. Stenene skulle være sunde, stærke, rene og frostbestandige og ikke alkalireaktive. Der blev anvendt almindelig portlandcement, som dengang havde et højere alkaliindhold. Endvidere anvendtes kvartssand fra Voervadbro og granitskærver fra Rønne. Betonsammensætningen så således ud:

Almindelig portlandcement	355 kg/m ³
Kvartssand 0-5 mm	730 kg/m ³
Granitskærver 5-25 mm	1140 kg/m ³
vand/cement-tal	0.47

Hadsundbroen blev åbnet i 1978.

Vejlefjordbroen

Vejlefjordbroens betonbeskrivelse er ligeledes fra 1974. Den indeholdt ikke specifikke krav til sand- og stenmaterialerne med henblik på at undgå alkalikiselreaktioner, men derimod krav om løbende kontrolprøvning af cementen, der også omfattede alkaliindholdet. Der blev anvendt portlandcement bortset



Vejlefjordbroen

fra områder i vandgangssnittet, hvor der anvendtes en tysk slaggecement- aquafirmcement - som er en lavalkalisulfatbestandig cement. Sandet kom fra Ørum og granitskærverne fra Rønne. Betonen var i høj grad baseret på erfaringerne fra Lillebæltbroens beton. Recepterne så således ud:

	fundamenter,	vandgangs-, snit	piller, kg/m ³	overbyg- ning kg/m ³
	kg/m ³	kg/m ³ (aquafirm)	kg/m ³	kg/m ³
Portlandcement	330	400	370	415
Bakkesand	715	590	660	635
Granitskærver	635	670	570	660
5-18				
Granitskærver	455	460	570	440
18-25				
eff.vandindhold	168	180	160	170
vand/cement-tal	0.55	0.45	0.43	0.41

Der blev anvendt tilsætningsstoffer i al beton. Ialt blev der støbt 70.000 m³ beton. Vejle fjordbroen blev overalt støbt på stedet, og på grund af produktionsprocessen var det nødvendigt med en høj betonstyrke i løbet af 24-36 timer. Der skulle støbes en sektion (længde 3,5 m) i overbygningen hver fjerde dag. Undersøgelser af kraftige revnedannelser i den først udstøbte del af overbygningen afslørede betydelige temperaturforskelle i betonen under hærdningen. Det blev derfor nødvendigt at indføre en såkaldt "efterløber" til overbygningens forskalling, der isolerede 1 1/2 tidligere udstøbt sektion. Ligeledes blev pillernes fundamentsklodser forsynet med isolering. Bevidstheden om termospændingernes skadelige revnedannelse var skabt. Vejle fjordbroen blev åbnet for trafik i 1980.

Alssundbroen

Alssundbroens beskrivelse er fra 1977. Broen indholdt støbning af ialt 23.000 m³ beton. Alssundbroen adskillede sig m.h.t. betontechnologi fra de tidligere større broer på følgende punkter:

- * der var specificerede krav til indholdet af alkalireaktivt materiale i sandet
- * luftporestrukturen i den hærtnede beton skulle dokumenteres, afstandsfaktoren måtte ikke overstige 0.25 mm
- * der var specificerede krav vedr. tilladte temperaturforskelle i betonen under afbindingen (mindre end 20°C)
- * der var krævet en øget kontrolintensitet til sikring af de stillede kravs opfyldelse.

Alkaliopløseligt materiale i sandet måtte ikke overstige 1,5 vægtprocent i middel, beregnet efter Forchungsinstitut der Zementindustrie's forløbige retningslinier febr. 1974 - altså en udenlandsk retningslinie.

Der blev anvendt lavalkalisulfatbestandig cement, den såkaldte ALS-cement. Ålborg Portland havde udviklet denne cement med henblik på en kommende Storebæltforbindelse. Som bekendt gik Storebæltssagen på det tidspunkt i stå; men udviklingen kunne nu komme andre bygværker tilgode, og som den første Alssundbroen. ALS-cementen udviklede 10-15% mindre varme end almindelig portlandcement. Man startede med at anvende sand fra Klemhest nær Kruså, men det blev under opførelsen ændret til en blanding af bakkesand fra Røllum og søsand fra Halkhoved. For stentilslaget var krævet, at det ikke måtte indeholde mineraler, der kunne fremkalde kemiske reaktioner med cementens alkaliindhold i skadelig mængde. Undersøgelser af stenmaterialernes egnethed i så henseende skulle dog kun udføres efter tilsynets nærmere bestemmelser, og udgifterne hertil afholdes af bygherren. Som stenmateriale valgte man granitskærver fra Dalby nær Malmø.

I undervandsbeton til bundpropper ved funderingen og i pillefundamenter anvendtes fra starten flyveaske; men denne anvendelse blev standset efter støbning af to pillefundamenter pga. usikkerhed omkring betonens holdbarhed.

For de forskellige betoner var der stillet krav til styrken, vand/cement-tallet, sætmål, bearbejdelighed, pumpbarhed, lav varmeudvikling og lang eller kort afbindingstid. Der blev anvendt 10 forskellige betonrecepter. Som illustration kan nævnes en af overbygningens 4 recepter.

ALS-cement	380 kg/m ³
bakkesand	507 kg/m ³
søsand	217 kg/m ³
granitskærver 4-12	367 kg/m ³
granitskærver 12-25	731 kg/m ³
vandindhold	150 kg/m ³
vand/cement-tal	0.39

Der anvendtes tilsætningsstoffer i alle betoner.

Kravet til temperaturgradienter medførte, at man anvendte konstant friskbeton-temperatur både sommer og vinter. Til styring af temperaturforløbet blev der også arbejdet med isolering og nedkøling gennem indstøbte kølerør. Der var mange diskussioner omkring de krævede temperaturforanstaltninger og om disses nødvendighed. Det kunne dog fastslås, at bl.a de gennemførte temperaturforanstaltninger medførte en reduktion i antallet af temperatursvindrevner sammenholdt med, hvad der tidligere var konstateret i lignende betonkonstruktioner. Ved Alssundbroen blev al kontrol af betonens styrke med henblik på fastsættelse af tidspunktet for afforskalling eller forspænding konsekvent baseret på maturitymålinger, enten ved hjælp af maturitymeter eller beregninger baseret på temperaturmålinger. Alssundbroen åbnede i 1982.

Broerne i 80'erne

"Betons holdbarhed"

Vejdirektoratet iværksatte i årene 1978-84 en række undersøgelser/projekter under hovedoverskriften "betons holdbarhed". Når disse nævnes, er det fordi, de fik stor indflydelse på udbuds- og anlægfsforskrifterne for 80'ernes store og små broer.

Fra disse undersøgelser foreligger følgende rapporter:

- * Rapport nr. 1, 1978, Indledende undersøgelser af broer med revneskader
- * Rapport nr. 2, 1980, Undersøgelser af udvalgte betonbroer
- * Rapport nr. 3, 1981, Overfladebeskyttelse af betonbroer
- * Rapport nr. 4, 1982, Forsøg med silicabeton, Ryå-broen
- * Rapport nr. 5, 1984 Forsøg med flyveaskebeton Madum-å broen

Undersøgelserne viste bl.a.

- et øget revneskadeomfang for konstruktionsdele udført med et cementindhold større en 350 kg/m³ i forhold til dele med lavere cementindhold.
- et større revneskadeomfang i konstruktionsdele udstøbt i januar og februar.
- at en række defekter i beton kan føres tilbage til forhold i forbindelse med udførelsen.
- at der var alkalireaktive partikler i sandfraktionen på mange tidligere opførte broer.
- at der var mange mikrorevner hidhørende fra termospændinger.
- at der var mange sammensætningsfejl i den aktuelt udførte beton og en bedre kvalitetsstyring var nødvendig.

På Ryå-broen viste det sig, at det var muligt at producere en beton med forventet stor holdbarhed, der havde et moderat cementindhold i kombination med et silicaindhold på 15 % af cementvægten. Vi lærte også, at den valgte betontypes stenindhold og vandindhold - på baggrund af holdbarhedsønsker - var presset så meget, at betontypen under udførelsen med hensyn til bearbejdelighed og separation viste sig noget følsom over

for variationer i betonens sammensætning. Der er en grænse for, hvor langt man i praksis bør gå. - Et usikkerhedsmoment omkring holdbarheden er knyttet til det konstaterede høje mikrorevneomfang i betonens cementpasta.

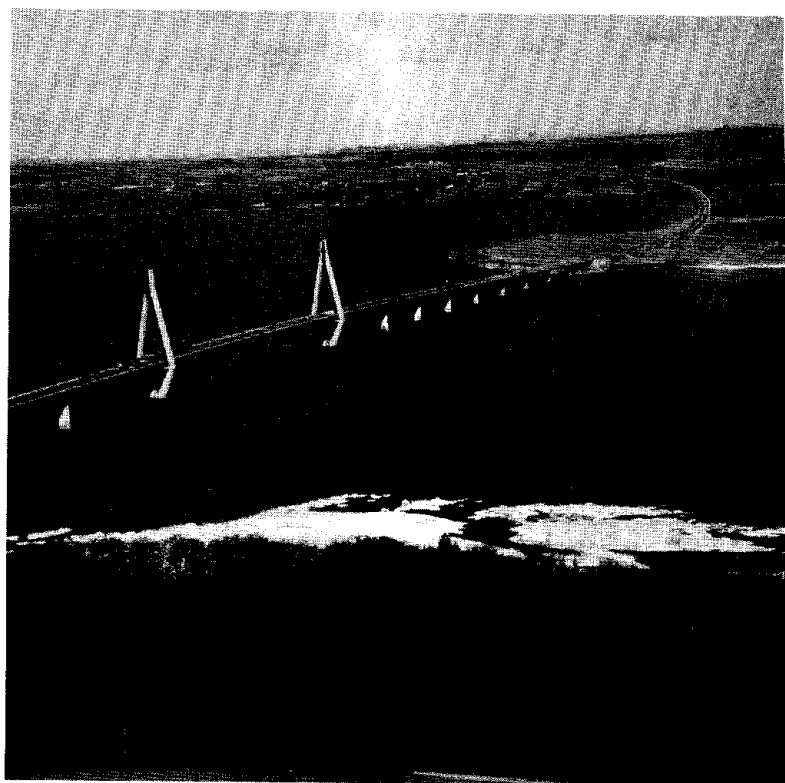
På Madum å -broen ønskede vi at efterprøve, om en flyveaske-tilsætning kunne forbedre den friske betons stabilitet og bearbejdighed, betonens hærdningsproces og den hærdnede betons tæthed, kemiske modstandsdygtighed og styrkeegenskaberne. Forsøget afdækkede iøvrigt en række nye problemstillinger omkring betons luftindhold.

Farøbroerne

Farøbroens betonbeskrivelse er fra 1979. I kontrakterne indgik en aftale om efteruddannelse af entreprenørens og tilsynets personale gennem et 5 dages betonkursus. Der var strenge krav til betonens delmaterialer, hvor man bl.a. skelnede mellem anvendelse af lavalkalisulfatbestandig cement og almindelig portlandcement. Indholdet af alkaliopløseligt materiale i sandet måtte ikke overstige 1,5 vægtprocent i middel ved anvendelse af førstnævnte cementtype. Ved anvendelse af portlandcement var krævet, at sandet skulle være kalk- og flintfrit sand fra tertiære aflejringer eller nedknust granit og sorteret således, at mængden af finmaterialer var reduceret til 10 %. Til bedømmelse af betonens delmaterialer blev der nu anvendt petrografiske undersøgelser. Ud over krav til delmaterialerne var der stillet en række krav til den friske beton, betonen under hærdning og den færdige beton.

Der blev anvendt lavalkalisulfatbestandig beton, og der blev tilsat flyveaske. Sandet var søsand fra Femø, og endvidere anvendtes granitskærver fra Rønne. En væsentlig årsag til valget af flyveasketilsætning var problemer med bleeding-tendenser i den friske beton ved de første prøvestøbninger. Der blev iøvrigt gennemført et omfattende prøvestøbningsprogram.

Hærdeteknologien blev for alvor taget i anvendelse ved proceskontrollen, og der var krævet en kraftig styring af hele tem-



Farøbroerne

peraturforløbet til sikring af en revnefri beton. Hårdeteknologien, der nu var udviklet, gjorde det muligt at styre afforskallingen og eventuel supplerende isolering i afhængighed af vejrbetingelserne m.v. Begreber som maturitydøgn blev almindelig kendt. Statistiske metoder indgik i kvalitetskontrollen, der var baseret på karakteristiske værdier. Bag alle krav til betonen lå naturligvis ønsket om tilstrækkelig styrke, frostsikkerhed, ingen alkalikiselreaktioner og en tæt revnefri beton.

Efter en række prøveblandinger og forsøg blev den endelige betonrecept

	Undervandsbeton	Konstruktionsbeton
	kg/m ³	kg/m ³
Lavalkalisulfatbest.cement	330	330 (340)
Flyveaske	100	40
Søsand 0-2	580	622
Granitskærver 2-8	354	285
Granitskærver 8-18, 18-25	749	920
Vandindhold	150	140

Der anvendtes tilsætningsstoffer i begge betoner.

Den anvendte cementtype, flyveaske og de anvendte tilsætningsstoffer medførte et behov for at vide mere om de kemiske reaktioner under hærdningen. Farøbroerne åbnede for trafik i 1985.

Guldborgsundtunnelen

På Guldborgsundtunnelen blev erfaringerne fra Farøbroernes beton videreført. Betonbekrivelsen er fra 1984. Der skulle støbes ca. 30.000 m³ beton. Gennem prøvestøbninger for opfyldelse af de stillede krav valgte man beton med lavalkalisulfatbestandig cement og flyveaske. Senere tilføjedes mikrosilica på grund af problemer med opfyldelse af temperaturkravene. Mikrosilicaen blev tilsat som slurry. Ved valg af endelig betonsammensætning benyttedes en model med en procentvis vægtning af hovedegenskabernes opfyldelse:



Guldborgsundtunnelen

* forprøvningsresultater	75 %
* holdbarhed	20 %
* ensartethed af pulver	5 %

I holdbarhedsundersøgelserne benyttedes ligeledes en karakter-skala med forskellig vægtning af holdbarhedsegenskaberne permeabilitet, sulfatbestandighed, kloridindtrængning, karbonatisering og fare for alkalikiselreaktioner.

Sandet blev sammensat af 2 leverancer af forskellig herkomst. Først benyttedes søsand fra Femø og det noget grovere søsand fra Grønsund. Senere blev Grønsundsandet erstattet af søsand fra Knudshoved. Indtil august 86 anvendtes knust granit fra Lysekil (Bohus granit) i fraktionerne 4-8, 8-16, 16-32 mm. Senere brugtes knust granit fra Baggerman nær Båstad (Valhamn Granit).

Efter undersøgelser af de forskellige delmaterialer og foretagne prøvestøbninger samt kontrol heraf, blev der arbejdet med følgende betonrecepter:

	Tunnelement 1		Tunnelement 2	
	kg/m ³		kg/m ³	
Lavalkalisulfat-	275		275	
bestandig cement				
Flyveaske	80		50	
Mikrosilica	-		15	
Søsand 0-2	260	695	165	650
Søsand 0-4	435		485	
Granitskårver 4-8	180	1190	200	1190
Granitskårver 8-16	460		400	
Granitskårver 16-32	550		590	
Vandindhold	128		143	
Vand/cementtal	0.42		0.43	

Til begge betoner anvendtes tilsætningsstoffer. Hærdeteknologien og petrografen var nu en integreret del af hele procesforløbet. Det kunne konstateres, at kølerør, el-varmetråde og forskellige typer isolering var nødvendige for at styre temperaturforskellene inden for de forlangte grænser, 20° C (15° C). Erfaringerne viste bl.a. et øget behov for ensartethed i kvalitet og dosering af mikrosilica. Ligeledes kunne der rejses tvivl om kontrolmetoderne for luftindhold og deres berettigelse.

Broernes tilstand i dag

Lige siden ibrugtagningen har alle broer været under løbende overvågning. Betonernes tilstandsudvikling er registreret og reparationsbehov har været løbende beskrevet. Nødvendige arbejder er gennemført. På Dansk Betondag vil tilstandsudviklingen i de forskellige broers betoner blive gennemgået. Det er vigtigt, at disse erfaringer nyttiggøres mest muligt ved skabelsen af betoner til kommende brobyggerier.

Som det er fremgået af det foregående, har et af ønskerne været, at skabe betoner uden skadelige alkalikiselreaktioner. Mange ældre broer har disse skader. Som et led i en forøget forståelse af holdbarhedsproblemerne og betonernes udvikling har Vejdirektoratet i årene 1984-89 initieret og finansieret et projekt om alkalikiselskadede bjælkens bæreevne. På trods af en kraftig accelereret skadesudvikling, skabt i laboratoriet, viser resultaterne bl.a., at forskydningsbæreevnen ikke reduceres. Forankringsstyrken reduceres dog noget (20-30 %). Hovedkonklusionen er, at såfremt man kan forhindre udviklingen af andre nedbrydningsmekanismer, kan alkalikiselskadede konstruktioner fortsat have en lang levetid. Projektet om alkalikiselskadede bjælkens bæreevne er dokumenteret i Vejdirektoratets rapport fra oktober 1990.

Afslutning

Det må nok konstateres, at de store broers betonsammensætning er presset så meget, at selv små variationer i delmaterialernes mængde og i deres egenskaber under den praktiske udførelse kan få afgørende indflydelse på bearbejdelighed og risiko for separation. Betoner, der er mere robuste overfor variationer, bør nok anvendes ved almindelige bygværker. Den seneste revision af vejreglernes udbuds- og anlægsforskrifter for betonbroer fra 1990 skulle gerne være et udtryk for forståelse herfor.

Med de mange tilsætningsstoffer og anvendelse af flyveaske og mikrosilica står vi i en situation, hvor de kemiske processer under hærdningen ikke er tilstrækkeligt belyst herunder virkningerne på længere sigt. En større viden herom er ønskelig. Vejdirektoratet igangsætter i efteråret 1991 opfølgende undersøgelser af betonerne i Ryå-broen og Madumå-broen for at undersøge udviklingen i de forskellige holdbarhedsparametre. Vi håber, at der kan foreligge rapporter herom i løbet af 1992.

Fremtiden byder fortsat på mange udfordringer til betontechnologer. Lad os ikke glemme, at en del af disse udfordringer knytter sig til de allerede udstøbte betoner og disses vedligeholdelse. Vi skal vide langt mere om skadesudviklingssammenhænge, levetidsmodeller, og elektrokemiske reparationsmetoder. Vi skal arbejde yderligere med probabilistiske overvejelser, og emner som rigtig kvalitetssikring og certificering banker på døren. Samfundsøkonomisk er der ikke mindst på disse områder store økonomiske benefits at hente ved at hæve videngrundlaget.

En af betonbranchens udfordringer bliver også konkurrencen om udstøbning af 1.080.000 m³ beton til Øresundsforbindelsen. Held og lykke med det.

DSB, Projekttjenesten, Møntergade 1, 3. sal, 1116
København K, 33 14 04 00 lokal 15278

"AT BYGGE BRO"

af

Afdelingsingeniør Peter Kristensen, DSB

JUNI 1991

INDHOLD

I de sidste ca 25 år har DSB bygget ca 360 broer fordelt med 230 sporbærende og 130 vej bærende. I nærværende artikel redegøres for de af DSB i projekterne indarbejdede kravspecifikationer vedrørende materialer og udførelsesmæssige forhold. Endvidere gennemgås de siden udførelsen registrerede skadestyper samt den løbende ændring af kravspecifikationerne, som er sket i periodens løb på baggrund af den øgede teoretiske viden omsat til generel anvendelsespraktisk viden der er indhentet i perioden. Til illustration gennemgås i forbindelse med ovenstående udvalgte, af DSB i perioden udførte bygværker, og der sluttes af med et bud på fremtidige udviklingsområder.

BRO VED RINGE

En af de første af DSB udførte forspændte, sporbærende broer er broen ved Ringe på Fyn på banestrækningen Odense - Svendborg.

Broen blev bygget i 1964 efter følgende krav:

cement kg/m ³	AKR krav	ΔT °C	Hærde afdækn	Luft- indhold
Min 300 (Indb 415- 466)	ingen 1)	ingen	ingen	ingen

1) sand fra den nu lukkede grusgrav (Hadevad)

Skader:

I 1975 blev der registreret lodrette langsgående revner i de sydlige runde søjler. Revnerne er siden løbende holdt under observation og har siden da udvidet sig ca 2 mm.

I foråret 1991 udførtes særeftersyn, hvoraf det fremgår at revnerne, der nu er ca 4 mm brede, skyldes alkali-kiselreaktioner og er fortsat som frostsprængninger med kloridindtrængning fra vejsaltning. Sandet, i den mest skadede (sydlige) søjle, indeholdt foruden tæt flint og kalk tillige porøs calcedon-flint og op til 0,16% klorid.

Reparation:

Efter en supplerende bestemmelse af fugtindhold og restalkalireaktiviteten påregnes søjlerne repareret med behugning og spøjtebeton på supplerende ringarmering. Derefter overfladebehandles alle søjler mod slagregn og kloridholdigt vejsprøjt.

STRANDMØLLEBROEN

Til erstatning for den i 1896 etablerede stålbro på banestrækningen København - Helsingør, etableredes i 1979 en ny betonbro af forspændte, præfabrikerede betonelementer (OT-bjælker) med påstøbt overbeton og isolering af epoxy med direkte sporbefæstigelse.

Broen blev bygget efter følgende krav:

Cement kg/m ³ min-max	V/C abs	AKR krav	ΔT °C	Hårde afdækn	Luft- indhold	Klorid- indhold
275	0,45	ingen	ingen	-	ingen	0,5
-	-					
400	0,50					

Skader:

I 1988 blev der registreret skadelige AKR-reaktioner i sydlige endepille. Revnerne er siden holdt under observation.

Reparation:

Da der er tale om jordpåvirket konstruktion, med mulighed for kapillarsugning af vand, er reparation af eksisterende endepille ikke umiddelbart mulig. I stedet overvejes støbt ny væg foran eksisterende, til optagelse af lejekræfterne.

Broen, der ligger i et moseområde, blev af hensyn til funderingen gjort så let som muligt ved af udelade skærveballasten, og i stedet udført med direkte sporbefæstigelse og overfladeisolering med epoxybelægning. Der har været problemer med at få sporet og broens statiske lejeforhold til at følges ad, med det resultat, at flere af sporets påklæbte sveller er blevet løse.

I øjeblikket følges ved målinger broens og sporets bevægelser og det overvejes indenfor en årrække, at etablere ovennævnte ny endevederlagsvæg og reparere brodækkets epoxybelægning eller forsyne broen med en traditionel bitumenpladeisolering med overliggende traditionel skærveballast. Sidstnævnte vil sandsynligvis være mulig efter internationale UIC-forskrifter for kontrolberegning af eksisterende sporbærende broer (DSB's bebastningsforskrifter fra 1974).

BRO 19, KVISTGÅRD

I forbindelse med udførelse af Helsingørmotorvejens nordlige del, lod DSB i 1974 projekttere og udføre en 4-fags, ca 80 m lang efterspændt, sporbærende bro (kasse-drager).

Broen blev bygget efter følgende krav:

Cement kg/m ³ min-max	V/C	AKR krav	ΔT °C
420 - 450	0,40	ingen	ingen 1)

Hårde afdækn	Luftind- hold	Klorid- indhold %
ingen	ingen 2)	ingen

1) udstøbningstakt beskrevet

2) vibrering beskrevet

Skader:

På baggrund af lodrette revner i søjler og vandrette revner i kantbjælker udførtes i 1977 og 1985 særeftersyn af broen. De 1 m brede kantbjælker isoleredes i 1985 på oversiden med bitumenplader for at nedsætte vandbelastningen (og dermed søge at begrænse AKR-udviklingen).

Særeftersynet følges op i 1991, hvor søjlerevner måles, rest-AKR-aktivitet bestemmes, fugtindhold i søjler samt brodæk bestemmes og sætninger af mellempiller der perioden 1974 - 1991 har andraget > 45 mm, vurderes.

Reparation:

Fundamenter for mellempiller udvides (evt), søjler behugges og opsprøjtes efter montering af supplerende vandret ringarmering. Brofacader overvejes overfladebehandlet. Alternativt overvejes hele broen overfladebehandlet med tæt membran på ydersiden og affugtningsudstyr placeret inde i den hule kasse, til sikring af en relativ fugtighed på under 80% for at forebygge yderligere AKR-reaktioner.

VIBY RINGVEJ I BRABRAND VED ÅRHUS

I forbindelse med udførelse af Ringvejsforbindelsen i Århus projekterede og udførte DSB i 1973 en 4-fags ca 60 m lang efterspændt, sporbærende bro.

Broen blev bygget efter følgende krav:

Cement kg/m ³ min-max	V/C	AKR krav	ΔT °C
350	0,45	ingen	ingen
-	-		
400	0,50		

Hærde afdækn	Luftind- hold	Klorid- indhold %
fugtighold- else 14 dg (dæk)	ingen 1)	ingen

1) målt under udførelsen til 1-2%

Skader:

På baggrund af observerede lodrette revner i søjler og vandrette revner i brofacader udførtes i 1986 særeftersyn af broen. Særeftersynet er blevet fulgt op i 1991 hvor der på baggrund af udtagne betonkerner er konstateret ca 5 mm brede lodrette revner i søjler og ca 1 mm brede vandrette revner i brodæk. Borekernerne, der udtoges vandret for brofacader og lodret fra brodæksunderside, var laminerede og i visse tilfælde delt i 2-3 stykker. Rest-AKR-aktiviteten, flint- og kloridindhold er under bestemmelse.

Foreløbige EKP-målinger viser ingen/til begyndende korrosion af armering. Foreløbige kloridmålinger viser værdier over acceptgrænsen i nederste dele af søjler.

Reparation:

En reparation forudsætter en begrænset restreaktivitet samt mulighed for, indenfor en rimelig økonomisk ramme, af udskifte/supplere betonen med dertil hørende supplerende armering.

Under forudsætning af ovenstående betingelser er opfyldt skønnes søjler og endevederlag behugget og sprøjtepuddset på ny supplerende armering. Det overvejes af overfladebehandle de ca 1 m brede vandrette kantbælkens overside samt lodrette brofacader og mellem-/endepiller for at gøre den mere vandafvisende og dermed søge at begrænse den ene af de tre faktorer der skal til for at AKR-reaktioner kan foregå (de øvrige to faktorer er reaktivt flint i sand-/stenmaterialet og alkali i cementen).

INDSKUBNINGSBRODÆK HORSENS (HATTING)

I forbindelse med udførelse af Ringvejsforbindelsen vest for Horsens projekterede og udførte DSB i 1989 et to fags brodæk, bygget ved siden af banen og indskubbet af DSB under banen i drift.

Broen blev bygget efter følgende krav:

Flyve- aske max %	Cement kg/m ³ min-max	V/C	AKR krav	ΔT °C	Hærde afdækn
-------------------------	--	-----	-------------	----------	-----------------

20	275- 450	0,45	max 2% 1)	ja	ja
----	-------------	------	--------------	----	----

Luftind- hold af matrix min-max	Klorid- indhold %
--	----------------------

10-25%	max 0,3
--------	---------

1)ekspansion 1 0/00 over 8 uger.

Skader:

Broen er bygget efter at DSB i 1981 indførte AKR-krav til betonens delmaterialer. Der er ikke registrerede skader på broen.

TRAFIKTERMINAL I HELSINGØR

I forbindelse med udførelse af fælles Trafikterminal i Helsingør udfører DSB, til ibrugtagning, november 1991 havneanlæg og terminalbygning.

Betonen i saltvandspåvirkede kajkonstruktioner det vil sige betonen over dagligt vande udføres efter følgende krav:

Flyveakse max %	Mikrosilica max %	Cement kg/m ³ min-max	AKR krav max %	ΔT °C
20	10	300 400	sand 2	krav er stillet
Hårde afdækn	Luft- pore- indhold	Klorid- indhold %		
krav er stillet	min 15%	0,2		

Alkaliindhold i færdig beton max 3%, med max ekspansion 1‰ over 8 uger.

KONKLUSION

DSB's erfaringer fra brobyggeriet de sidste 25 år er at der er en del skadede broer fra tidsrummet fra 1965 - 1981. Den enkelte bro er skadet af en eller flere af følgende forhold:

- AKR: Det drejer sig om skader på søjler udsat for vejsprøjt, endevederlag med jordtryk, kantbjælker som er regnbelastede. For alle konstruktionsdele gælder at de indeholder 2-5% reaktivt flint i sandfraktionen, cementindhold 350-400 kg/m³, og i enkelte tilfælde højere, og en målt fugtighed i betonen på 90-95%.
- Frostskader: Det drejer sig om skader på søjler og brodæk på grund af ingen/for lidt luftindhold, der er for dårlig fordelt.
- Kloridskader: Det drejer sig om skader på søjler påvirket af saltvandssprøjt med korroderet søjlearmering. Kloridindhold over 0,1-0,15%.
- Mikrorevner: Det drejer sig om skader på brodæk pga for store temperaturgradienter under udstødning, dvs større end $\frac{1}{2}^{\circ}\text{C/cm}$.

I nye konstruktioner foreslås følgende forbedringer af de konstruktive forhold:

Armering bør anordres til også at kunne optage/begrænse skader af ovennævnte ikke tilsigtede påvirkninger.

Bøjler bør have tilstrækkelig styrke/stødlængde til at binde hoved- og tværarmering sammen. Tværarmering bør lægges nederst til sikring af, at betonen kan overføre stødkrafter i hovedarmering (ved AKR-skader).

Ligeledes, bør supplerende lodret, slap forskydningsarmering i brodæk overvejes indlagt, selv om beregningerne ikke direkte viser behov herfor.

Vandret bøjlearmering i søjler bør ikke kun vælges ud fra det udvendige betontværsnit (tidligere normbestemmelse).

Der er ikke registreret nævneværdige skader på broer udført i tidsrummet 1981-1991.

Dette kan enten skyldes at de ikke har nået at udvikle skader endnu eller (forhåbentlig), at de i slutningen af 1970'erne indførte krav til cementen (lavt alkali-indhold), til temperaturgradienten (under udstøbning), til kloridindhold (i nyudstøbt beton), til miljøklasser (dæklag), til flintindholdet (sand og stenfraktionen) mv har givet bedre og mere holdbare konstruktioner.

FREMTIDIGE UDVIKLINGSOMRÅDER

I forbindelse med anvendelse af nye tilsætningsstoffer, microsilika, og flyveaske, samt nye efterbehandlingsmetoder af beton søges stedse, at udvikle en mere holdbar og modstandsdygtigt beton. Ved overfladebehandling af betonen søges en god proportioneret beton gjort bedre, ligesom DSB fortsat ønsker at isolere betonen godt (med bitumenplade, acrylbelægning eller polyurethanbelægnings).

Preben Christensen, Tlf 98 22 56 33
Thorupholmevej 270, 9690 Fjerritslev.

TILSLAGSMATERIALER TIL FREMTIDENS SUPERBETON.

Af

Preben Christensen, geolog, mag. scient.

TILSLAGSMATERIALER TIL FREMTIDENS SUPERBETON.

Indledning.

Tilslaget - sand og sten - udgør som bekendt op mod 80 vol. % af beton. Det er derfor naturligvis kritisk, at tilslaget besidder egenskaber, der bedst muligt sikrer bestandigheden af betonen, i det miljø den udsættes for.

Tilslag til beton i Danmark fremstilles lokalt, på landjorden eller fra havbunden. Granittilslag fremstilles på Bornholm. Tilslag til beton importeres også fra udlandet, særligt Norge og Sverige, i de senere år også fra NV Scotland. De importerede materialer betragtes generelt som gode.

I artiklen vil jeg prøve at meditere lidt over, hvad fremtiden kan bringe, for derved at gøre nogle forestillinger om, hvad vi kan vente i de kommende år, når vi skal lave superbeton.

Der gøres overvejelser over:

- Erfaringer.
- Normer og standarder.
- Den teknologiske udvikling.
- Forsyningsstrukturen.

Påstand.

Den vigtigste betonteknologiske forholdsregel at tage i Danmark, for at sikre betonernes holdbarhed er, at undgå alkali-kiselreaktioner. Der er mange muligheder derfor. Den sikreste er, at undgå anvendelse af alkalikiselreaktivt tilslag. Dette er muligt uden væsentlige ekstra omkostninger ved fremstilling af beton i Danmark, på grundlag af både Danske og importerede materialer.

Erfaringer.

I Danmark er de to primære tilslagsforvoldte skader følgende:

- Frostspringere og
- Alkalikiselreaktioner.

Begge skyldes tilstedeværelsen af selv beskedne mængder af porøs opalflint i tilslaget, kombineret med tilstrækkeligt ugunstige miljøpåvirkninger. Er man passende uheldig kan begge typer skader opstå samtidig og være destruktive for beton.

Påstanden kan dokumenteres af det meget store antal skadesundersøgelser, der er udført på danske laboratorier i tidens løb. Det betyder ikke, som man kan tro fra pressen, at beton generelt er dårlig og skadet.

Den alt overvejende del af betonen i Danmark er god og holder "evigt". Det snakker vi bare ikke om. Der er formentlig udstøbt omkring 300.000.000 m³ i tidens løb. Det meste står som nyt.

I de senere år har jeg beskæftiget mig med "gammel" beton med god holdbarhed. Eksempler er der masser af, f.eks. visse betonveje, visse populationer af bunkers, de fleste fundamenter og næsten al indendørs beton. Et etagedæk af P beton, hvorover der blev etableret et pakkeri for saltede sild, udviste dog et så stort spild af salt og vand, at der udvikledes alkalireaktioner i etagedækket. Miljøpåvirkningen blev under brugsbelastning ændret fra P til SA analogt til svømmebassiner med ingeniørgang.

Nord for Limfjorden er vi heldige. Naturgrundlaget for tilslagsmaterialerne er således, at man skal lede længe efter reaktive og frostfarlige materialer, omend de findes. I Vendsyssel findes flere hundrede kilometer betonveje fra 1930'erne, der selvfølgelig er slidt, har knækkede hjørner i støbe-

felterne, har dårlige fuger o.s.v. men som grundlæggende er sunde og vedligeholdelsesfri. Det meget karakteristiske er, at alkalikiselreaktioner praktisk taget aldrig ses.

Bunkers skal kort omtales. Der er ca 8000 kystnære bunkers registreret i Danmark, de fleste i Nord- og Vestjylland. Dertil kommer et ukendt antal inde i landet. F.eks. er der ca. 600 på flyvestation Karup.

Startende ved Frederikshavn, nordover mod Skagen, og videre langs kysten til Hanstholm, er den altovervejende del af konstruktionerne i en tilstand næsten som den dag de blev støbt. Der ses naturligvis begroning med laver og mosser, enkelte frostspringere, for tynde dæklag med deraf følgende armeringskorrosion og den slags, men i borekerner er betonene som nye. End ikke karbonatisering er særligt udpræget, uanset en alder på snart 50 år. Den bunker vi har nærmest Fjerritslev har en karbonatiseringsdybde på under 0,5 mm efter ca. 50 år. End ikke armeringen kan finde ud af at ruste uanset meget væsentlig chloridbelastning.

Fra Hanstholm og sydover til syd for Ringkøbing fjord er det karakteristisk, at konstruktionerne er præget af revner, gennemsivninger, udfældninger af geler, springere, og alt hvad hjertet kan begære af skadessymptomer, atter bortset fra armeringskorrosion. Tilslagsmaterialerne er anderledes, karakteriseret af høje indhold af alkalireaktive korn. Det er her interessant at notere, at den bjergart vi benævner "porøs calcedonflint" sjældent eller aldrig viser tegn på at have reageret. Det viser den heller ikke i den førstnævnte population.

Så kommer en tredje population af bunkers, helt ned til Rømø. De ser gennemgående atter ud som var de lavet i går. I borekerner ses heller ikke her tegn på alkalikiselreaktioner. De sædvanlige, enkelte frostspringere ses.

Tilslaget til den først omtalte population kommer fra de store strandvoldssystemer i Nordjylland.

Tilslaget til den næste population, fra Hanstholm og sydover, ved jeg ikke hvor kommer fra, men antagelig fra større formationer i Midtjylland. Sådan ser materialerne i alt fald ud. Populationen fra sydenden af Ringkøbing Fjord og sydover, er stort set lavet med materialer fra de store strandvoldssystemer fra Esbjergkanten, Børsmose, Oxbøl og Tjæreborg m.v.

De sammenfattende erfaringer er, at der kan opstå skader i betoner uden at tilslaget nødvendigvis er reaktivt. Det er blot sjældent i Danmark. Det generelle billede i Danmark er imidlertid, at der normalt ikke ses skadede betoner uden at alkalikiselreaktioner kan tillægges en stor del af skylden. Det er endelig værd at notere, at der findes masser af konstruktioner, hvor alkalikiselreaktioner burde være opstået, skadevoldende, uden at det er sket. Det er således ikke en naturlov, at fordi de potentielle muligheder for alkalikiselreaktioner er tilstede, udvikles de også.

Normer og standarder.

Gældende danske Normer og Standarder forholder sig utilfredsstillende til tilslagsmaterialernes egenskaber. BBB er en undtagelse. Der findes ikke normer og standarder på områderne alkalikiselreaktioner eller frostskaader. Det bedste vi råder over, er en række TI-B prøvemethoder. Om det bliver bedre af at få CEN normer er uvist. Der er begrundet forhåbning om, at det vil være muligt at bevare en række normer, standarder og prøvemethoder som "valid in the place of use". Så kan vi stadig sikre os mod alkalikiselreaktioner ved at tage hensyn til lokale forhold. Det er stadig vigtigt, at undgå alkalikiselreaktioner i beton i Danmark. Det er tilsvarende vigtigt ude omkring i Europa, men her er problemet ikke erkendt i samme omfang som i Danmark.

Den teknologiske udvikling.

Det væsentlige for teknologiudviklingen er at forstå, at uanset om vi arbejder med sand eller sten, er det samme bjergart, vi er efter. Porøs opalflint er skadelig i stenfraktionerne, fordi den kan medføre dannelse af frostsprængere, s.k. "kalkspringere". I sandfraktionen er samme bjergart skadelig, fordi det er den, der forvolder alkaliskelreaktioner. Opalflint findes imidlertid ikke blot som homogene korn, men også som skorper på iøvrigt uskadelig, tæt flint, og det vil derfor aldrig blive muligt, på grundlag af Danske råvarer, at fremstille produkter, der absolut ikke indebærer risiko ved brug. Teknologiudviklingen bør tage udgangspunkt i dette faktum. Sikkert "inaktive" materialer vil ikke med 100 % sikkerhed kunne findes, og andre, supplerende forholdsregler, såsom brug af flyveaske, mikrosilica, lavt V/C tal fibre og additiver, er derfor fornuftige.

På stenområder har vi set en stedse øget anvendelse af maskineri til densitetssortering, JIG anlæg eller HMS anlæg. De naturligt forekommende sten kan maskinelt opdeles i to fraktioner:

- En fraktion beriget på skadelige sten i forhold til råvaren.
- En fraktion fattigere på skadelige sten end råvaren.

Fraktionen fattigere på skadelige sten end udgangsmaterialet er naturligvis bedre end dette til fremstilling af superbeton.

Jeg har vanskeligt ved at forestille mig opfindelse af mere effektivt maskineri til sortering af sten, medmindre der accepteres en væsentlig lavere kapacitet. Jeg har derimod fantasi til at forestille mig, at maskinerne såvel som driften deraf, kan gøres enklere og dermed billigere i drift, mere energiøkonomiske og dermed mere attraktive for indvindingsvirksomhederne. Det er også min opfattelse, at asfaltbranchen på et eller andet tidspunkt vil erkende, at de sten

der volder skade i asfalt, er de samme som de sten, der volder skade i beton. Denne erkendelse vil medføre en øget anvendelse af teknologi til densitetssortering af sten, til gavn for begge industrier.

På sandområdet er beslægtet teknologi til rådighed. Problemet her er, at maskineriet er så dyrt, at det er prohibitivt for anvendelsen. Densitetssortering af sand er p.t. kun mulig til fremstilling af - ikke sandet som sådan - men indvinding af et lille indhold af sjældne mineraler, s.k. tungmineraler. Om sandet som biprodukt vil kunne anvendes til betonfremstilling vil bero på et skøn, på de kemikalier der måtte have været anvendt, og på eksperimenter i konkrete tilfælde. Mineaffald er sjældent set anvendt til noget fornuftigt.

I Danmark er det imidlertid så heldigt, at indholdet af skadelige bestanddele i sand stiger med kornstørrelsen. Dette medfører, at man ofte kan sigte sig ud af problemet med alkalikiselreaktive korn, i almindelighed. Et 0/2 sand, uanset forekomst, vil alt andet lige være mindre risikabelt at anvende i henseende til alkalikiselreaktioner, end et 0/4 sand fra samme forekomst.

Teknologiudviklingen på området må forventes at gå i følgende retninger:

- Bedre og bedre rensigtning af materialerne.
- Højere og højere kapacitet på maskineriet.

Tendensen vil iøvrigt være den, at der vil blive lagt øget vægt på ensartethed af de materialer, der leveres til beton.

Der vil formentlig også i fremtidens superbeton kunne opnås fordele ved anvendelse af mikrofillere med størrelser i området mellem cement og flyveaske, fordi en række måleresultater og andre indikationer tyder derpå. Forskellige former for "ler" er her en mulighed. Det må derfor anbefales at bruge kræfter på at undersøge optimering af finstofandelens

kornkurve, dvs. mikrosilika, cement, flyveaske og sand under 0,25 mm's indflydelse på betonegenskaberne. Herunder bør undersøges muligheden for cementsubstitution, samt muligheden får at opnå lavest muligt vandbehov med mindst muligt brug af kemikalier til betonen. Støbeligheden kan delvis tilsikres ved luftiblanding, i de forudseelige tilfælde.

Den teknologiske udvikling bør iøvrigt i videst mulig udstrækning tjene til at nyttiggøre råstoffer til betonfremstilling, der ligger indenfor de udpegede graveområder på landjorden. Den teknologiske udvikling bør endvidere tilgodese den forventning, at en stigende andel af de råstoffer, sand og sten, der skal anvendes til beton i Danmark, vil komme fra søterretoriet eller fra udlandet. Der er for mange interessekonflikter på landjorden til at tro, at indvinding af råstoffer vil være ønskeligt og muligt i det lange løb.

Forsyningsstrukturen.

Der er p.t. ca. 800 aktive indvindingsvirksomheder på landjorden i Danmark.

Der er ca. 20 virksomheder, der har tilladelse til indvinding af materialer fra havbunden.

Der er ca. 10 virksomheder, der markedsfører betontilslagsmaterialer, fremstillet i udlandet.

Der kan noteres stor interesse, blandt de større danske virksomheder på området, i opkøb af kolleger med "fornuftige" reserver. Der kan også noteres en meget væsentlig koncentration af indvindingen af råstoffer fra søterretoriet.

Der kan endelig noteres en spirende interesse for import af stenmaterialer fra områder udenfor de traditionelle - Norge og Sverige - f.eks. Scotland, fordi transportmulighederne forbedres og billiggøres. Det er således ikke utopisk at tro, at vi vil se import fra steder såsom Portugal, Østtyskland, Polen og måske endog Afrika.

Der er konkrete eksempler således:

Kvarts til fremstilling af ferrosilicium kan i Sarpsborg i SØ Norge fremskaffes billigere fra Portugal end fra den modsatte side af Oslofjorden.

I Danmark har vi noteret, at chaussesten, kantsten m.v. kan fremskaffes billigere fra Portugal end fra Bornholm, og på området "Ornamental Stone" er der set import af polerede granitfliser fra Italien og fra forskellige steder i Afrika, til konkurrencedygtige priser.

Vi har endnu ikke noteret import fra østlandene.

Forventningen vil være, at vi vil opleve en stigende import af granit og granitlignende materialer fra lande med billig arbejdskraft, i stadig større skibe, således at udbuddet af importerede materialer vil stige, til konstante eller faldende priser. Da importerede materialer generelt anskues som gode vil de formentlig blive brugt til fremtidens superbeton. Vi løber her ind i den risiko, at det ikke er sikkert at vi kan evaluere egenskaberne af importerede materialer ved hjælp af hverken gængse danske prøvemethoder eller CEN normer, af disse varer, på en måde, der tilgodeser ønsket om lang holdbarhed af betonkonstruktioner i Danmark. Det er ikke sikkert at alt er godt, blot det ikke er fremstillet i Danmark og ligner granit.

Slutning.

De bedste materialer i Danmark, der er til rådighed for fremstilling af langtidsholdbar beton på den mest økonomiske måde er:

- Densitetssorterede sten med oprindelse som stærkt, naturligt bearbejdede råmaterialer, f.eks. fra strandvolde. Materialerne er domineret af tæt flint og kvartsit.

- Naturligt sand med D max på ca. 2 mm, med mindre end ca. 2 Vol % potentielt reaktive korn, og et lavt vandbehov.

De næstbedste materialer er granitiske, afrundede eller knuste materialer fra Skandinavien, med kendte, gode brugs- og holdbarhedsegenskaber, fortrinsvis fra Bornholm.

Det er min klare opfattelse, at fremtidens superbeton bør fremstilles af disse typer sand og sten. Der skal være mange sten og lidt sand. Så må cement, mikrosilica, flyveaske, fibre og kemikalier foreløbig klare resten.

DANSK BETON TEKNIK A/S
Helleruplund Allé 21
DK-2900 Hellerup

FREMTIDENS BETONVEJE ?

Anders Henrichsen

JULI 1991

FREMTIDENS BETONVEJE ?

Indledning

Udførelse af betonbelægninger har siden begyndelsen af dette århundrede været gennemført med svingende held og intensitet.

Problemerne har været mangfoldige. Dårlig kørselskomfort, manglende holdbarhed, svigtende friktionsegenskaber og svag konkurrenceevne overfor det alternative belægningsmateriale, asfalt.

På trods af disse vanskeligheder kan det dog konstateres, at betonbelægninger har fået en ganske stor udbredelse.

De tekniske problemer er i det væsentlige overvundet, og materialets potentielt store styrke og holdbarhed fører i mange situationer til valget af denne belægningstype fremfor asfalt ud fra økonomiske levetidsbetragtninger.

I de senere år er trafikbelastningen af vejnettet i den industrialiserede verden ændret radikalt. Tilladelige akseltryk er stort set fordoblet, og vægten af de enkelte transportenheder er øget markant. I tillæg hertil synes super single dæktyper at finde anvendelse i stærkt stigende omfang.

Resultatet af denne udvikling viser sig tydeligst i asfaltbelægningerne, der bliver sporkørte. Deformationer i grus- og

jordlag samt den indre stabilitet i asfaltbelægningerne er problemer, der uundgåeligt må påvirke valg af belægningstype til gunst for stive eller halvstive belægninger. Der er således opstået en enestående mulighed for at overtage markedsandele fra asfaltindustrien, uden at dette skal ske i benhård økonomisk konkurrence med risiko for påvirkning af kvaliteten.

Betonindustrien må imidlertid sikre, at fremtidens betonveje bliver konstrueret så talentfuldt, at de både lever op til det høje vejtekniske kvalitetsniveau, som asfaltbelægningerne har nået og bibeholder denne kvalitet gennem en lang levetid.

Betonbelægningstyper

Betonbelægninger udføres i dag overvejende i følgende 3 konstruktivt forskellige former:

- * uarmerede belægninger med kontraktionsfuger.
- * kontinuerligt armerede belægninger (uden fuger).
- * belægninger udført af belægningssten.

Sidstnævnte type har fundet meget stor udbredelse som pladsbelægning til trafikale eller industrielle formål, men kan formentlig lades ude af betragtning ved vurdering af den konstruktive udformning af fremtidens superbelægninger. Udgangspunktet for en sådan vurdering skal søges indenfor de to førstnævnte typer.

Uarmerede betonbelægninger er idag den foretrukne belægningstype til hårdt trafikerede motorveje. Belægningstykkelsen er normalt 25 cm, svarende til en påregnet levetid på ca. 30 år med en trafikintensitet i størrelsen 50-100.000 ÅDT.

Betonentreprenørerne har efterhånden lært at udføre disse belægninger. Resultatet er trafikalt set acceptabelt, og problemer med sikring af betonmaterialets holdbarhed i belægningernes funktionsperiode er overvundet.

Driftsomkostningerne består hovedsageligt i vedligeholdelse af fuger samt afstribning.

Kontinuerligt armerede betonbelægninger anvendes i mindre

udstrækning end den ovenfor anførte type, hovedsageligt af økonomiske årsager. Med den voksende trafikbelastning er det imidlertid muligt, at denne belægningstype vil opleve en renaissance.

Driftsomkostningerne er minimale og kørselskomforten bedre, da den kontinuerligt armerede plade er væsentlig mere geometrisk stabil overfor temperatur differencer i pladen og overfor fugtforskelle.

Fremtidens betonbelægning

Sandsynligheden taler for, at fremtidens vejbeton i det store og hele vil ligne de betoner, der anvendes i dagens vejbygning.

Behovet for at stille sofistikerede krav til et materiale, der forventes nedbrudt af brugsbelastningen over en 30 års periode er ikke erkendt på samme markante måde, som det ses i brobygningskredse.

Der synes altså ikke umiddelbart at opstå behov for anvendelsen af særligt højt ydende betontyper til brug i vejbelægninger.

Alligevel kan der spores en vis udvikling indenfor området. F.eks. går man i Sverige og Norge entusiastisk ind for anvendelsen af betonbelægninger med stor slidstyrke - anvendelse af pigdæk i disse lande gør avancerede betontyper hensigtsmæssig.

Disse betoner er, udover de slidmæssige egenskaber, kendetegnet ved stor styrke og holdbarhed.

Det kan ikke udelukkes, at erfaringer, der indhøstes fra disse belægninger, kan være medvirkende til introduktionen af belægninger med levetider, der overstiger aktuel dimensioneringspraksis.

Hvis vejnettets opbygning, i henseende til styrke af underbund og grusbærelag, er af en sådan kvalitet, at risiko for belægningsskader, forårsaget af bæreevnesvigt i disse elementer af vejen kan udelukkes, kan en dimensioneringsperiode for vejbelægningen, der

overstiger de aktuelle 30 år, komme på tale.

Under denne forudsætning kunne man forestille sig en 'superbelægning', der var karakteriseret ved følgende egenskaber:

- * konstruktiv udformning uden fuger
- * høj slidstyrke
- * stor indre stabilitet
- * lang levetid.

Disse funktionskrav vil i det store og hele være opfyldt af det betonmateriale, der indgår i ECOPAVE belægningerne.

ECOPAVE er betegnelsen for en betonbelægning, der er under udvikling i et EF-finansieret forskningsprojekt med deltagelse af Statens Vejlaboratorium, Aalborg Portland og Dansk Beton Teknik i samarbejde med engelske virksomheder.

Betonsammensætningen i en sådan beton kunne f.eks. være:

Cement	175 kg
Filler, flyveaske el. andet inaktivt pulver	75 kg
Mikrofiller (ler, silica el. lign.)	25 kg
Sand 0/2 mm	550 kg
Knuste sten 8/48 mm	1600 kg
Vand	80 kg

Som det ses er materialesammensætningen præget af et meget stort stenindhold, kraftige partikelspring og lavt cementindhold.

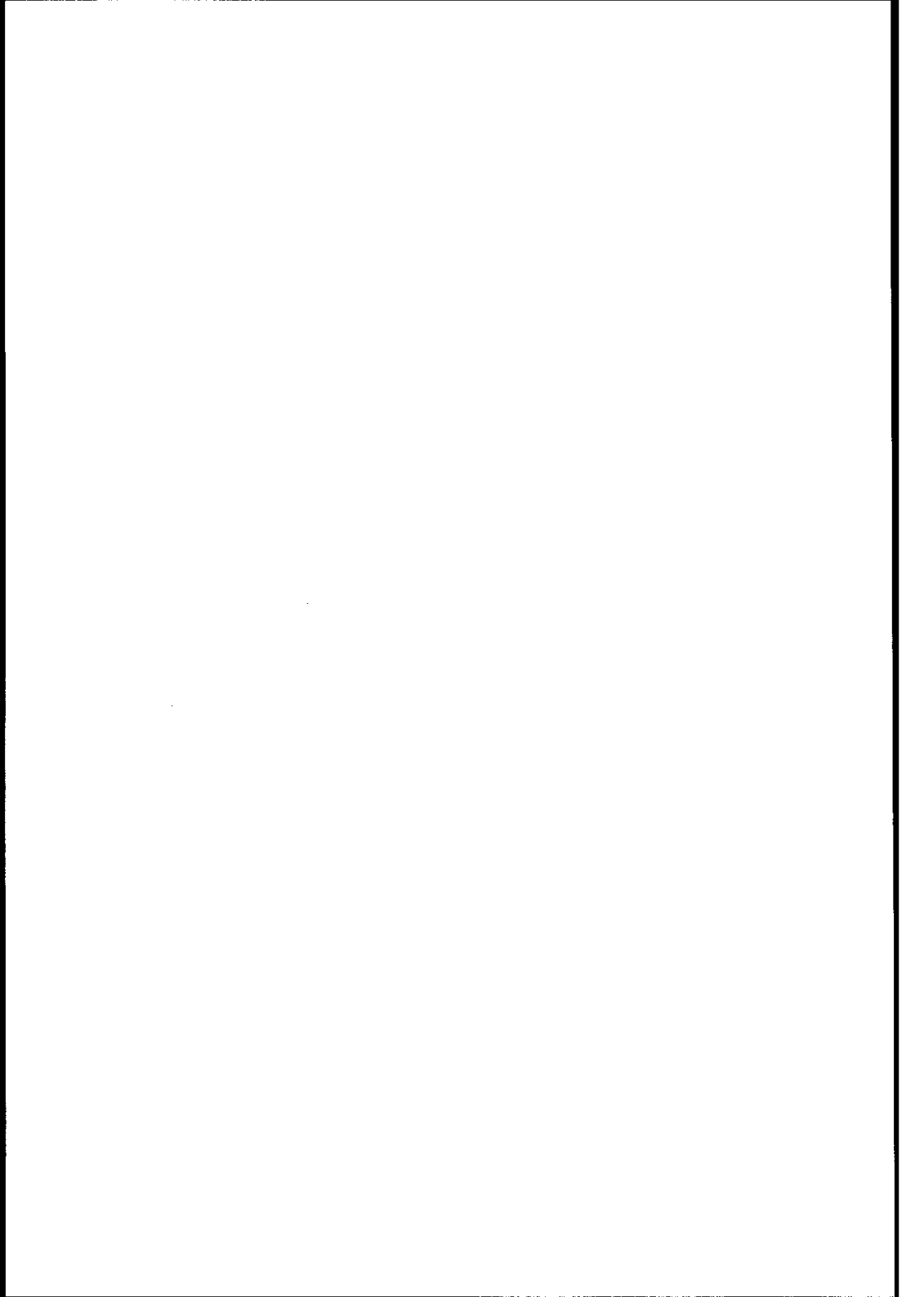
Denne beton vil kræve en særlig teknik for at blive udlagt og komprimeret på tilfredsstillende måde. Det kunne tænkes, at dette kunne ske med asfaltudlægger, der ved tryk, pulsation og vibration dels pakker stenskelettet, dels sikrer en tilstrækkelig flydning i bindemidlet til opnåelse af maksimal tæthed af betonen.

Det må forventes, at betonen er meget stærk (trykstyrke ca. 100 MPa) og afhængig af stenmaterialets kvalitet både slidstærk og holdbar.

Hvorledes det skal sikres, at betonen kan anvendes i betonbaner uden kontraktionsfuger er ikke klarlagt på nuværende tidspunkt. Armering som det kendes idag er naturligvis en mulighed, men andre metoder ville, ud fra en økonomisk synsvinkel være

ønskværdig.

Sammenlignes den foreslåede betonsammensætning med traditionel belægningsbeton vil det ses, at materialeprisen er ca. 10% lavere.



G.M. IDORN CONSULT A/S

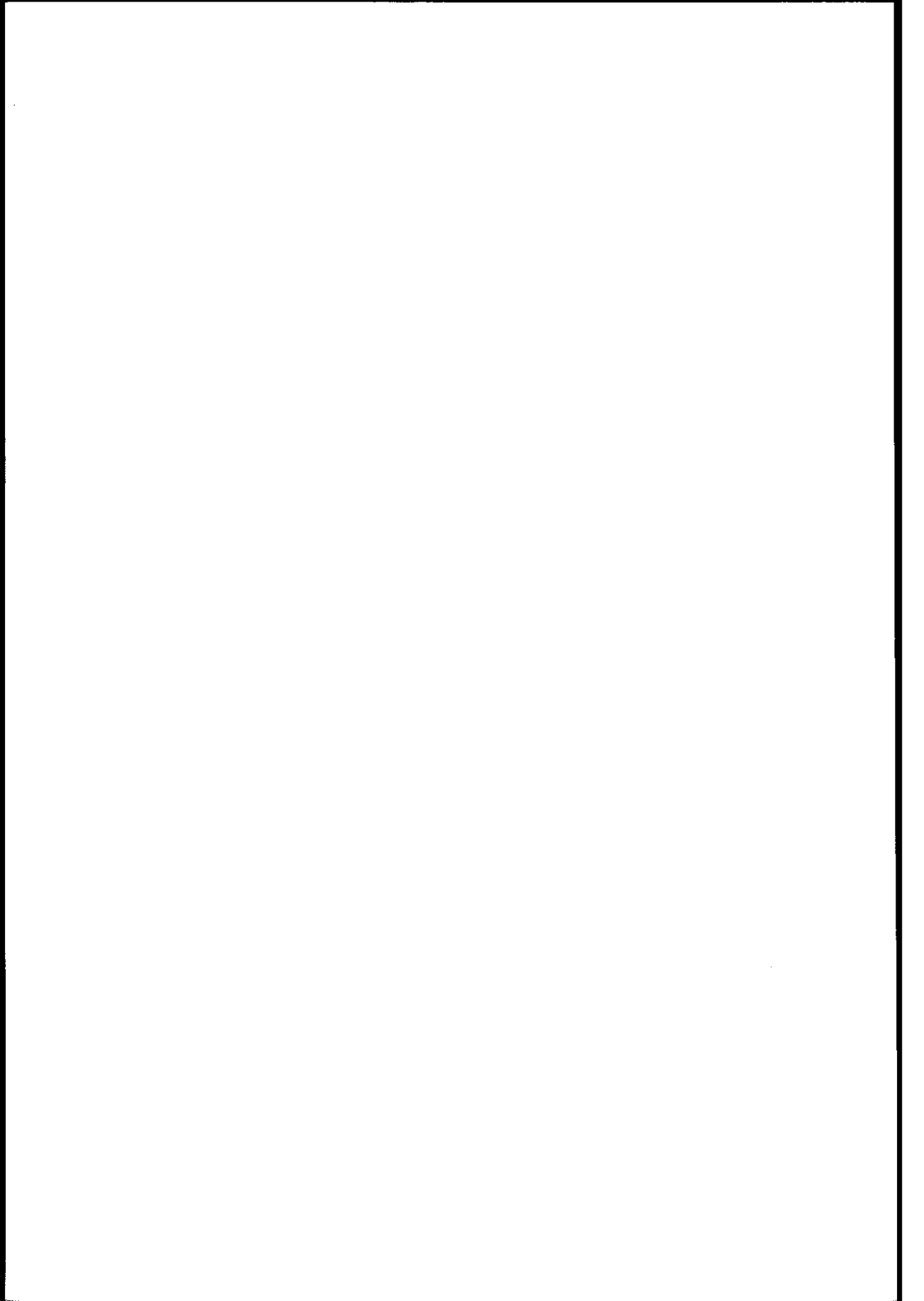
Blokken 44

3460 Birkerød

FREMTIDENS SUPERBETON - EN KOMMENTAR

af

Jens Holm



FREMTIDENS SUPERBETON - EN KOMMENTAR

Indledning

Målt i tonnage er beton idag verdens næstmest anvendte brugsgode, kun overgået af drikkevand. Omkring 10 000 mill tons bliver det til pr år. Mængden af produceret beton afspejler den store bredde i betons anvendelighed. Beton's "kvalitet" må kunne defineres som forholdet imellem betonens evne til at fungere i den aktuelle konstruktion eller betonprodukt og de forventninger, der på forhånd er stillet til betonen. Det betyder, at et begreb som "superbeton" nødvendigvis også må følges af en definition af "super til hvad?". Det er også en væsentlig årsag til, at betonnormer m.v. opererer med miljøklasser.

Men lad os for nærværende anvende en definition af begrebet "superbeton" som en beton, der i særlig grad egner sig til anvendelse i konstruktioner i aggressive miljøer. Desuden vil der i det følgende blive lagt lidt ekstra vægt på bindemidlet i betonen; dvs. cement og andre hydrauliske materialer.

Den Internationale Situation

Skuer man rundt om i verden, opdager man hurtigt, at "superbeton", defineret som beton til særligt udsatte konstruktioner, kan være et ret vidt begreb. I det følgende er kort beskrevet nogle af de vejledninger vedrørende "superbeton" til anlægskonstruktioner, man kan støde på. Der gøres dog opmærksom på, at en given reference til et lands praksis er at opfatte som et eksempel, ikke som en udtømmende beskrivelse. Målet er at give et indtryk af bredden i opfattelsen af,

hvordan bindemidlet i en "superbeton" skal sammensættes, ikke at give en detaljeret redegørelse for state-of-the-practice. For det er i andre lande som i Danmark, at hvert nyere større anlægsarbejde giver anledning til nye overvejelser. Det er vel naturligt, for i mellemtiden er der også indløbet ny viden. Vi kan blot se på vore egne større broprojekter de sidste årtier. Slaggecement til en del af Vejleffjord broen; flyveaske i betonen til Farøbroerne; flyveaske og mikrosilica i beton til Guldborgsundtunnellen.

Herhjemme i Danmark må beton til Storebælt vel idag siges at være vores bud på en superbeton. Bindemidlet i vores superbeton anno 1991 består af lavalkali sulfaltbestandig cement, flyveaske og mikrosilica. Der er minimumskrav for indholdet af hver af disse delkomponenter; til cementen er det 300 kg/m³; og v/c tallet skal være max. 0,35 (A-beton); beregnet vha aktivitetsfaktorer. For betonen til Guldborgsundtunnellen var kravet til cementindholdet min. 285 kg/m³. Kombinationen af flyveaske, silica og cement er desuden interessant, idet Basisbeton-beskrivelsen jo indeholder en passus om, at "Der må ikke anvendes mikrosilica sammen med portlandflyveaskecement i moderat og aggressiv miljøklasse".

Tager vi til Sverige, kan man finde præference for lavalkali sulfatbestandig cement, gerne min. 400 kg/m³, men ikke noget med flyveaske eller andre pozzolaner. Et v/c tal på max. 0,40 kan man finde i svenske anvisninger. Men Tjørnbron blev bygget med beton, der indeholdt mikrosilica.

I Norsk Standard NS 3420 findes krav om min. 300 kg/m³ bindemiddel i beton til meget aggressivt miljø. Cementindholdet beregnes som cement plus pozzolaner uden aktivitetsfaktorer. Der kræves et v/c tal på max. 0,45; v/c tallet beregnes dog med aktivitetsfaktorer (der iøvrigt er meget lave; f.x. 1 for mikrosilica, hvis ikke andet dokumenteres). Nordmændene synes at foretrække almindelig portlandcement, evt. i kombination med mikrosilica.

Fra den Finske National Road Administration har jeg i juli d.å. modtaget et brev, hvoraf det fremgår, at de idag gældende vejledninger vedr. superbeton til udsatte Finske betonkonstruktioner ikke har vist sig at være tilstrækkeligt gode. Man syntes derfor ikke, det var relevant for nærværende at informere om disse gældende regler. I Finland foregår der revisionsarbejde med henblik på at få rettet op på deres norm. Fra en anden kilde har jeg fået oplyst, at tendensen i finsk betontechnologi peger imod at specificere et min. indhold af almindelig portlandcement og at mindske anvendelsen af pozzolaner.

I Tyskland er det vedtaget ved lov, at al slagge fra højovnene skal quenches, dvs. køles hurtigt (for at bevare slaggen i en reaktiv tilstand). Bl.a. derfor anvendes slaggecement i udbredt grad i Tyskland. Tysk beton til aggressivt miljø skal fremstilles med min. 270 kg/m^3 cement, der enten kan være lavalkali sulfatbestandig eller en slaggecement med 50-65 procent slaggeindhold. Pozzolaner kan anvendes under forudsætning af, at pozzolaneeffekten, aktivitetsfaktoren og egenskaberne af pozzolanen dokumenteres. Et maksimalt tilladeligt v/c tal på 0,5 kan findes i DIN 1045.

I Frankrig relateres kravet om min. cementindhold sig til maks. stenstørrelse, dvs. min. cementindhold $(\text{kg/m}^3) = 700 \cdot D^{-0,2}$, hvor D er maks. stenstørrelse i mm. Frankrigs norm åbner således mulighed for, at entreprenøren kan belønnes for at anvende størst mulig maks. stenstørrelse; noget det generelt anerkendes er ønskværdigt mht mange af betons egenskaber.

Et af de nyeste større udsatte bygværker i Frankrig er Pont de Normandie, der er under opførelse. Betonen dér vil indeholde min. 385 kg/m^3 cement, CPJ 55 PM, og have et max. v/c på ca. 0,4. I de franske foringselementer til kanaltunnellen er anvendt min. 400 kg/m^3 cement, CPA 55 PM, og et v/c forhold på ca. 0,35. Begge cementer er styrkeklasse 55, Prise Mer, dvs. til brug i konstruktioner udsat for havmiljø. Men for CPJ gælder krav om maks. 5% C_3A , medens der for CPA gælder maks. 10% C_3A . For kanaltunnellen gjaldt endvidere et minimumskrav,

4 eller 5%, til cementens indhold af C_3A , hvilket førte til, at man måtte anvende en blanding af to cementer. For Storebælt er kravet vedr. C_3A indholdet 3-5%. I Sverige ligger man på et krav om maks. 3,5% C_3A .

I Frankrig har man ikke tradition for at anvende pozzolaner i nogen særlig udstrækning undtagen i form af slaggecement. Der er ikke meget flyveaske af god kvalitet i Frankrig, da over 50% af elektricitetsforsyningen varetages af atomkraftværker.

I England, derimod, er flyveaske ganske populært. Ihvertfald i visse kredse. England fyrer i udbredt grad med kul. Det motiverer også til stor anvendelse af flyveaske i beton.

Betonen til den engelske del af kanaltunnellen har således et indhold af bindemiddel bestående af 310 kg/m^3 almindelig portland cement (OPC) og 130 kg/m^3 flyveaske, dvs. 30% af bindemidlet er flyveaske. V/c tallet er ca. 0,35 baseret på en aktivitetsfaktor for flyveaske på 1.

Franskmændene støbte deres elementer liggende - som MT Group gør det. Englænderne støbte deres elementer stående på en side. De to udstøbningsteknikker er væsentligt forskellige, og de stiller helt forskellige krav til betonens egenskaber specielt i den friske egenskab. Måske kan det siges, at et meget stort holdbarhedsforsøg er igang under den engelske kanal, hvor konkurrenterne er en fransk cement med moderat C_3A indhold versus en engelsk blanding af portland cement og flyveaske. Hvorvidt der vil være en significant forskel i holdbarheden af de to systemer, vil kun tiden kunne vise.

Ellers gælder det generelt i England, med henvisning til 1990 udgaven af BS 5329: Part 1, at cement til meget udsatte konstruktioner skal have et minimum indhold af bindemiddel på 400 kg/m^3 og et maks. v/c tal på 0,45. Bindemidlet, dvs. cement plus evt. pozzolan, skal være styrkeklasse C50. Cementen's øvrige egenskaber skal specificeres i relation til det specifikke bygværk. Kravet om min. bindemiddelindhold kan

reduceres med 30 kg/m^3 , hvis maks. stenstørrelse øges fra 20 til 40 mm; omvendt skærpes kravet for reduceret D_{maks} .

I Spanien kræver normen EH-88 et minimum cementindhold på 325 kg/m^3 og et maks. v/c forhold på 0,50 i de mest udsatte konstruktioner. Desuden anbefales det, at cementindholdet helst ikke skal overstige 400 kg/m^3 .

På Europæisk plan foregår endvidere Eurocode arbejdet. I Eurocode 2 og ENV206 kan man hente følgende vejledning: Min. cementindhold på 300 kg/m^3 ; maks. v/c forhold på 0,45. I dette tilfælde betyder "c" ækv. cementindhold, idet Eurocode åbner muligheden for, at der i henhold til gældende national praksis kan anvendes pozzolaner i betonen.

I USA er billedet noget diffust, idet der er flere interesseorganisationer, der hver for sig udsteder statslige og nationale normer og guides. American Concrete Institute (ACI) foreslår i structural code ACI 318-89 min. v/c = 0,40 for de mest udsatte konstruktioner. Trykstyrken skal være min. 35 MPa. Der angives ikke min. cementindhold, men der skal anvendes lavalkali sulfatbestandig cement (Type V). Dog anføres, at selv i sulfatbelastede miljøer kan cement med et C_3A indhold på op til 10% anvendes, blot v/c forholdet ikke overstiger 0,40.

American Association of State and Highway Officials (AASHTO) specificerer min. cementindhold på 335 kg/m^3 og maks. v/c forhold på 0,44. Trykstyrken skal være min. 28 MPa.

Derudover har stort set hver stat i USA sine egne små spidsfindigheder vedrørende beton til aggressive miljøer.

I Canada's National Standards lægges for beton til udsatte konstruktioner naturligt særlig megen vægt på brug af luftindblanding. Derudover findes krav om maks. v/c forhold, 0,40, og min. trykstyrke, 35 MPa. Noget krav om min. cementindhold ses ikke.

I Saudi Arabien findes Saudi Aramco Engineering Standard. Heri refereres i udbredt grad til amerikanske normer og standarder, dog med den tilføjelse, at al armering, både individuelle stænger og svejste net, skal være epoxy-coated. Eneste undtagelse er svejste net til plader på jord. I Saudi har man således tilsyneladende opgivet håbet om, at betonen kan yde tilstrækkelig korrosionsbeskyttelse af armeringen. Omvendt vil man stå skidt, hvis epoxyen svigter, for så kan f.x. katodisk beskyttelse blive meget vanskelig at udføre i praksis.

I Australien er National Bridge Design Code iøjeblikket under revision, men begrebet holdbarhed vil fortsat være dækket af Building Code AS 3600-1988. Heri findes et krav om minimum trykstyrke på 50 MPa for beton i tidevandszoner. Der er dog også mulighed for specificering af min. cementindhold for særlige konstruktioner. I Sydney Harbour er den nye Glebe Island skråstagsbro under bygning. Til betonen til denne bro er specificeret slaggecement, 65% slagge - 35% cement, min. 440 Kg/m³. V/c forholdet vil være under 0,40.

I betonen til Sydney Harbour Tunnel, en sænketunnel, der også er under udførelse, anvendes 410 kg/m³ slaggecement (60% slagge) og et v/c tal på 0,36. Specifikationerne krævede maks. v/c tal på 0,45, men det var entreprenørens eget forslag at gå ned på de 0,36.

I Australien anvender man i udbredt grad slaggecement. Slaggecement er kendt som særdeles egnet til udsatte konstruktioner (Saudi-Bahrain Causeway, næsten al hollandsk off-shore beton o.m.a.). Men der kan ikke ses bort fra, at Australien har en politisk meget stærk stålindustri, der ønsker at afsætte sin højovnsslagge.

Sammenfatning - internationalt

Som det foregående illustrerer, er opfattelsen af begrebet "superbeton" - defineret som beton til særligt udsatte konstruktioner - ganske bredt favnende. Der er nok ikke nogen eentydig forklaring på dette forhold. Meget har med den

lokalpolitiske og økonomiske situation at gøre. Men der er sikkert også en stor del årsag at finde i det faktum, at det trods alt ikke er så tit, at der er problemer med betonkonstruktioner kombineret med, at vi sjældent ofrer tid på at undersøge de gode bygværker. Måske ved vi i virkeligheden mere om, hvad der er foregået, når noget er gået galt, end vi ved, hvorfor tingene i et givet, udsat byggeri synes at gå godt. Måske et studie af betons holdbarhed skulle tage udgangspunkt i de situationer, hvor betonen har klaret sig strålende? Det er glædeligt, at Preben Christensen som een af kræfterne søger at belyse sagen fra denne vinkel.

For som det er i øjeblikket, er det sandsynligvis meget lokale oplevelser, som influerer mest på opfattelsen af, hvordan en superbeton skal sammensættes. Der fokuseres på at afhjælpe, mere end på at gøre godt bedre.

Lidt længere henne vil jeg vende tilbage til problemstillingen om bindemidlet. Men først:

Superbeton til hvad?

Vore råvarer og ressourcer er begrænsede. Derfor skal de bedste materialer bruges fornuftigt. Men hvad er fornuft i denne sammenhæng? Det kan synes logisk at stille krav om en meget lang levetid for broer - 100 år for Storebælt's vedkommende. Omvendt er der kun gået godt 100 år siden den industrielle revolution. Og udviklingen har accelereret kraftigt. Hvem ved, hvad udviklingen indenfor f.x. superledere, computere, energi fra fusion, elektronisk kommunikation, menneskers behov, ja den globale økonomi vil vise? Er det realistisk at tro, at vi om 50 år transporterer os på en måde, der blot tilnærmelsesvis ligner de mønstre, vi idag kan forestille os? Naturligvis må man på ethvert givet tidspunkt handle ud fra sin bedste viden. Men det synes tankevækkende, at man vedr. betonkonstruktioner nærmest forventer status quo i et helt århundrede med minimal vedligehold, mens vi nærmer os en situation, hvor en almindelig

PC realistisk må afskrives på et år eller mindre, fordi udviklingen løber så stærkt.

Desuden må vi ikke glemme, at der samtidig sker en voldsom udvikling i vores viden om metoder til afhjælpning af skadesudviklinger på eksisterende bygværker. Ihvertfald kan vi stort set få styr på korrosionsproblemet via katodisk beskyttelse, og systemerne hertil blive stadigt bedre og mere pålidelige. Der er rivende udvikling indenfor overfladebehandling, og problemer med frost er blot et spørgsmål om at undgå porøse materialer og sikre god luftindblanding. Dét er dagens tilsætningsstoffer ganske gode til. Mht alkali-kisel reaktioner er billedet lidt anderledes, men vi burde med den idag kendte viden kunne anvende snart sagt et hvilket som helst reaktivt tilslag, blot der tages højde herfor. Herom mere senere.

Jeg vil mene, at eet af de steder, hvor man især bør bruge superbeton, er til alle former for miljøtekniske installationer. Vi bruger milliarder af kroner på at sikre holdbarheden af bygværker, som vi kan nå ved blot at gå eller sejle hen til dem. Det er ikke det store besvær at overvåge sådanne bygværker. Men hvad med det danske kloaksystem? Vi har i Danmark tusindvis af kilometer kloakledninger af beton, der som en tikkende miljøbombe ligger og forvitrer. Ingen tør vel forestille sig, hvad det vil koste at rette op på dette forhold. Her kan udgifterne sandsynligvis måles i Storebælts-forbindelser. Og vi bør komme igang med det samme.

Superbeton skal efter min mening først og fremmest, men ikke eksklusivt, anvendes til meget udsatte konstruktioner, hvis funktion har stor samfundsmæssig betydning økonomisk og miljømæssigt, og som det er vanskeligt at reparere, hvis tingene går galt.

Tilslag til Superbeton

Egentlig burde dette afsnit være meget kort: Undgå tilslag, der kan give anledning til frostspringere, og træf passende forholdsregler, hvis tilslaget kan være alkali-reaktivt.

American Society for Testing and Materials (ASTM) udgiver "Standard Specification for CONCRETE AGGREGATES" under betegnelsen ASTM C33. Alkali-reaktioner i beton blev første gang konstateret af Thomas E. Stanton, Californien, i 1940. Allerede i 1950'erne erkendte forskerne, at der er mulighed for at anvende reaktiv tilslag i beton, blot der tages højde herfor. ASTM C33 kom således meget tidligt til at indeholde en for fint og groft tilslag enslydende passus (med mine understregninger) om, at "Coarse (or fine) aggregate for use in concrete that will be subject to wetting, extended exposure to humid atmosphere, or contact with moist ground shall not contain any materials that are deleteriously reactive with the alkalis in the cement in an amount sufficient to cause excessive expansion of mortar or concrete, except that if such materials are present in injurious amounts, the coarse (or fine) aggregate may be used with a cement containing less than 0.6% alkalis calculated as sodium oxide or with the addition of a material that has been shown to prevent harmful expansion due to alkali-silica reaction".

ASTM C33 åbner således mulighed for, at man kan anvende reaktivt tilslag, blot der træffes passende forholdsregler for at undgå skadelige reaktioner. Det harmonerer godt med situationen på Island, der nærmest består af reaktivt materiale. Dér iblandes cementen omkring 7% mikrosilica, der sørger for, at skadelige alkali-kisel reaktioner ikke udvikles i de islandske betoner. De seneste årtiers forskning indenfor pozzolantilsætning har også til overflod demonstreret, at en passende tilsætning af et egnet pozzolan kan forhindre skadelige alkali-reaktioner i at udvikle sig selv for stærkt reaktivt materiale. Det kan derfor undre, at denne viden ikke har sneget sig ind i dansk betonteknologi.

Det er klart, at til superbeton skal anvendes super gode materialer. Men det behøver ikke at betyde, at materialerne hver for sig skal ligge i toppen af deres respektive eliter. Det er jo kombination af materialerne samt det omgivende miljø, der er afgørende. Eksemplet fra Island belyser dette med tydelighed. Herhjemme, derimod, er vi desværre nok blevet for fikserede på alkali-kisel reaktioner. Storebæltsbeton består således bl.a. af lavalkali cement, ikke-reaktivt tilslag samt hele to pozzolaner.

Et projekt som Storebælt fortjener naturligvis den største sikkerhed. Men vi må ikke regne med, at vi blot kan bruge løs af de allerbedste materialer til enhver udsat konstruktion. Det er dårlig ressourceøkonomi, og miljøhensyn vil nok heller ikke tillade en sådan strategi. Derimod skal vi nok forstærke indsatsen for at anvende lidt mere marginale materialer; materialer, der fungerer som super-materialer, blot vi behandler dem fornuftigt.

Bindemidlet

Bindemidlet i beton har til opgave at cementere eller lime tilslaget sammen. Kigger man lidt i teorierne omkring limning, eller taler man med en snedker, får man hurtigt oplyst, at god limningsteknik bl.a. handler om anvendelse af den mindst mulige mængde lim, altså lige akkurat nok til, at limen væder overfladerne og helt udfylder hulrummet derimellem. På den baggrund må det undre, at man indenfor betontechnologi traditionelt arbejder med minimumskrav til cementindholdet i superbetoner.

Sandsynligvis er der meget historik i dette. I beton, der kun består af sand, sten, cement og vand, er vandindholdet en meget betydelig faktor i forhold til den friske betons bearbejdelighed. Mere vand => bedre bearbejdelighed. Men da v/c tallet bestemmer styrken og har stærk indflydelse på holdbarheden, betyder mere vand krav om mere cement. Det er nok heraf, kravet om min. cementindhold er opstået.

Idag har vi tilsætningsstoffer, der kan hjælpe os meget langt med hensyn til bearbejdeligheden, eller udstøbeligheden, som jo i virkeligheden er det, sagen drejer sig om. Vi kan generelt klare os med mindre vand i betonen og stadig opnå et pænt produkt. Behøver vi så så meget cement?

I virkeligheden er cementpasta jo betonens ringeste bestanddel, hvis da ikke tilslaget er elendigt. Det er igennem pastaen, chlorider diffunderer. Det er cementpastaen, der kan fryse i stykker. Cementpasta kan skades af sulfater; det er cementpastaen, der leverer alkalier til alkali-reaktioner. Det er også cementpastaen, der karbonatiserer, og det er i cementpastaen, der udvikles hærdevarme, der kan foranledige termorevner.

Jeg vil vove den påstand, at man i fremtidens superbeton snarere vil se en tendens i retning af reduceret end i retning af øget cementindhold. Man kan tage Anders Henrichsens forslag til en ny vejbeton som et eksempel. Pastaindholdet (uden luft) i hans beton er på 355 kg, resp. ca. 180 ltr, pr m^3 . Dvs. 18% af betonens volumen er cementpasta; resten er tilslag. Til sammenligning er der i en Storebæltsbeton (type A) typisk et pastaindhold (excl. luft) på ca. 486 kg, resp. ca. 244 ltr, pr m^3 . Målt på volumen er der altså ca. 35% mere "lim" i dagens Danmark's bud på en "superbeton" end i vores kollegas bud på den fremtidige superbeton til veje.

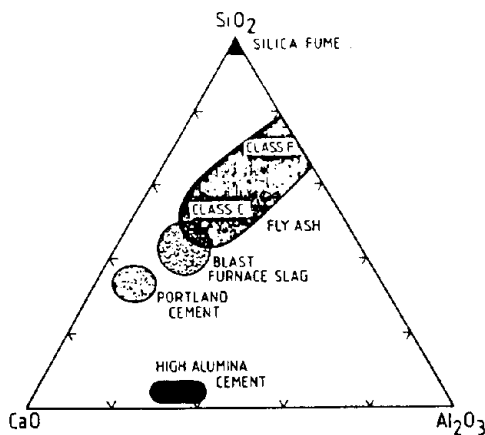
Nuvel, Anders Henrichsens beton vil kræve meget intensiv komprimering og vil nok ikke være egnet til f.x. Storebælt. Men tendensen er klart at pege i retning af reduceret indhold af pasta.

Hvad skal der så til for at kunne opnå et reduceret pastaindhold? Anders Henrichsen opererer med kraftige partikelspring. Det er én vej. En anden er at bruge en sammensætning af tilslaget med en kornkurve, der f.x. ved hjælp af matematiske hjælpeværktøjer og modeller optimeres til at give størst mulig pakning af tilslaget. Herved formindskes det volumen, der skal udfyldes af cementpastaen. Samtidig opnås en

yderligere gevinst, idet en pakningsoptimeret kornkurve giver god bearbejdelighed. Faktisk er det muligt ved pakningsoptimering at sammensætte en dansk superbeton efter dagens standard således, at der ved 244 ltr cementpasta pr m^3 vil være overskud af pasta; der vil ikke være plads nok imellem de enkelte tilslagspartikler.

Bindemidlets sammensætning er et ofte debatteret emne. Som den kursoriske oversigt over praksis i forskellige lande viser, er der heller ikke på dette område tegn på en dannelse af konsensus. Det er der mange årsager til, men det behøver heller ikke at være en dårlig ting.

Professor D.M. Roy, USA, har publiceret en artikel som supplementary paper til en Workshop i Sydney, Australien, i 1988, W.G. Ryan, editor, hvori hun bringer nedenstående figur:



Figuren viser en simplificeret repræsentation af den kemiske sammensætning af forskellige bindemidler. Det er interessant, at man ved en passende kombination af cement og flyveaske kan opnå en kemisk sammensætning af bindemidlet, der svarer til

højovnsslagges sammensætning. Det vides bl.a. fra den publicerede litteratur, at beton fremstillet med slaggecement kan blive endog særdeles tæt. Det burde alt andet lige også kunne lade sig gøre med en passende sammensat flyveaskecement. Forudsætningen er dog, at flyveasken bringes til at reagere. Det er i den forbindelse mange gange blevet påpeget af bl.a. G.M. Idorn, at man i forbindelse med brug af flyveaske skal passe på ikke at presse alkali-indholdet i cementen for langt ned, idet det netop er alkalierne, der sørger for det høje pH i porevasken, der igen får flyveasken til at reagere.

Af ovenstående figur kan man også se hvorfor, det for slagges vedkommende er muligt at erstatte 65% ja endnu mere af cementen, mens det i mindre grad gælder flyveaske og i endnu mindre grad gør sig gældende for mikrosilica. Slutproduktet skal jo være et calcium-silicat-hydrat med et Ca/Si forhold indenfor visse grænser. Derfor opnås ikke reaktionsmæssigt nogen fordel ved at øge tilsætningen af mikrosilica, der jo er næsten rent SiO_2 , udover visse grænser, skønt der måske kan være en vis tæthedsmæssig virkning.

Eet problem ved sammensætningen af bindemidler til superbetoner ligger i, at forskellige hensyn trækker i forskellig retning. Det illustrerede Leif Vincentsen på et møde i Betonforeningen forrige år ved hjælp af et diagram, som han havde ladet udarbejde på baggrund af et notat fra Thaulow & Holm. Skemaet er gengivet på omstående side.

Det fremgår af skemaet, at hensynet til forskellige skadesmekanismer eller andre væsentlige forhold ofte trækker i modsat retning. Hvor lavt alkaliindhold således er godt i relation til alkali-reaktioner, er det skidt i forhold til korrosion. Tilsvarende overvejelser gælder C_3A indholdet, hvilket også afspejles af eksempelvis den franske indstilling til dette spørgsmål.

Hvordan vil bindemidlet i fremtidens superbeton komme til at se ud? Der er nok ikke et enkelt svar på dette spørgsmål. Men en

kort venden tilbage til spørgsmålet fremgår af et kommende afsnit om modeller.

	Alkali-kisel	Frost/tø	Cl-korrosion	Sulfat-angreb	Termorevner
Højt C_3A			+	-	-
Lavt C_3A			-	+	+
Højalkali	-	(+)	+		(-)
Lavalkali	+	(-)	-		(+)
FA + MS	+	(-)	+	+	+
Luft	(+)	+	(+)	(+)	+
Lavt v/c		+	+	+	(+)

Oversigt over positive og negative effekter ved forskellige valg af cementtype og betonsammensætning

- + positiv effekt
- (+) en vis positiv effekt
- (-) en vis negativ effekt
- negative effekt

Prøvning

Der må (og vil?) ske en udvikling indenfor prøvning. Det er svært at forstå, at man efter 50 års samkvem med alkali-kisel reaktioner dels ikke har brudt låsen til disse reaktioners hemmeligheder, dels stadig ikke har fuldt pålidelige prøvningsmetoder. Men der er nok en sammenhæng imellem de to ting. Der "forskes" på livet løs i mange af verdens lande for at opfinde nye prøvningsmetoder til at undersøge reaktiviteten af tilslag dels for sig og dels i en given betonsammensætning. Men nøglen til at finde frem til prøvningsmetoderne eller prøvningsmetoderne, der med sikkerhed kan afsløre reaktivitet af tilslag, skal nok ikke findes via opfindelsen af nye prøvningsmetoder men derimod via bedre forståelse af de

grundlæggende kemiske, fysiske og termodynamiske forhold, der er på spil.

Tilsvarende er det tankevækkende, at vi ikke i Danmark har en prøvningsmetode til at måle hærnet betons frostbestandighed. Men det gælder nok her analogt til for alkali-kisel reaktionerne, at vi ikke helt ved, hvad der foregår, når beton fryser eller ikke fryser i stykker. Ihvertfald kunne vi under mødet om frost i beton i Betonforeningen d. 23. januar i år konstatere, at der hersker mange forskellige meninger omkring de fysiske og andre forhold, der spiller ind, når beton fryser i stykker.

Modeller

Under mødet i januar rejste Professor M.P. Nielsen sig op for (med egne ord) at ride een af sine kæpheste, nemlig modeller. M.P. Nielsen gav udtryk for en voldsom frustration over, hvad han oplevede som betonteologernes manglende evne eller lyst til at operere med modeller. Altså noget med at opstille og teste hypoteser.

Jeg er på mange måder enig med dette synspunkt. Hovedkulds prøvning uden nogen sund teoretisk begrundelse eller hypotese kan vanskeligt kaldes forskning i forskningens egentlige betydning. Det kan være, at man (ved et tilfælde) når et godt resultat, men det er ikke sikkert, at man ved hvorfor, eller at det er det bedst mulige resultat, man er nået til.

Eksempelvis er sammensætningen af bindemidlet til superbetoner genstand for mange overvejelser. Der er fortalere for silica; for slagge; for flyveaske. Der er også fortalere for fortsat at presse v/c tallet nedad. Betonerne bliver tættere og tættere. Og det er godt, for vi ønsker stor modstand imod indtrængning af chlorider, som Birgit Sørensen påpeger. Hagen ved det er, at vore accelererede prøvningsmetoder måske ikke er så egnede til prøvning af sådanne betoner; man begynder måske at nærme sig måleusikkerheden.

Der savnes modeller. Vi ved fra kemien, at under et vist v/c tal er der for lidt vand til, at alt bindemidlet kan hydratisere. Hvad er det da, vi opnår med stadigt lavere v/c tal. Er det, som Professor Sydney Diamond en gang sagde, at konstatere, at uhydratiseret cement er godt tilslag? Kunne vi så ved meget lave v/c tal erstatte en del af cementen med inaktivt filler? Det er Anders Henriksen inde på.

Men vi mangler modellerne. Eet sted, vi kan hente inspiration, er indenfor det område, der drejer sig om perkolationsteori. Perkolationsteori handler i denne sammenhæng bl.a. om hvorledes og i hvor høj grad, forskellige former for porer i cementpastaen er indbyrdes forbunde. Tydeligvis vil flere "blindgyder" og isolerede porer være at foretrække frem for et mere åbent system.

Et andet sted, hvor vi mangler gode modeller, er indenfor udstøbelighed. Det nytter jo ikke noget, at vi sammensætter en "concrete" som en "theory-crete", der muligvis kan blive til en god "lab-crete" men er en komplet umulig "real-crete". Vi skal hele tiden have for øjet, at målet er at opnå den bedst mulige beton i den færdige konstruktion. Derfor tror jeg selv, at i takt med, at forskning vil muliggøre stadigt tættere betoner, vil behovet for bedre modeller til forståelse af betons udstøbelighed - evt. benævnt betonens rheologiske opførsel - blive intensiveret. Det vil man være nødt til.

På samme måde vil de stadigt lavere vandindhold i betonen nok give anledning til øget F&U indenfor efterbehandling af beton. Der er så lidt vand i sådanne betoner, at selv en meget beskeden vandafgivelse tidligt efter udstøbningen vil volde uoprettelig skade i betonens yderste lag. Måske der en dag kommer effektive curing membraner på markedet. Men for nærværende er den bedste strategi at efterbehandle med vand.

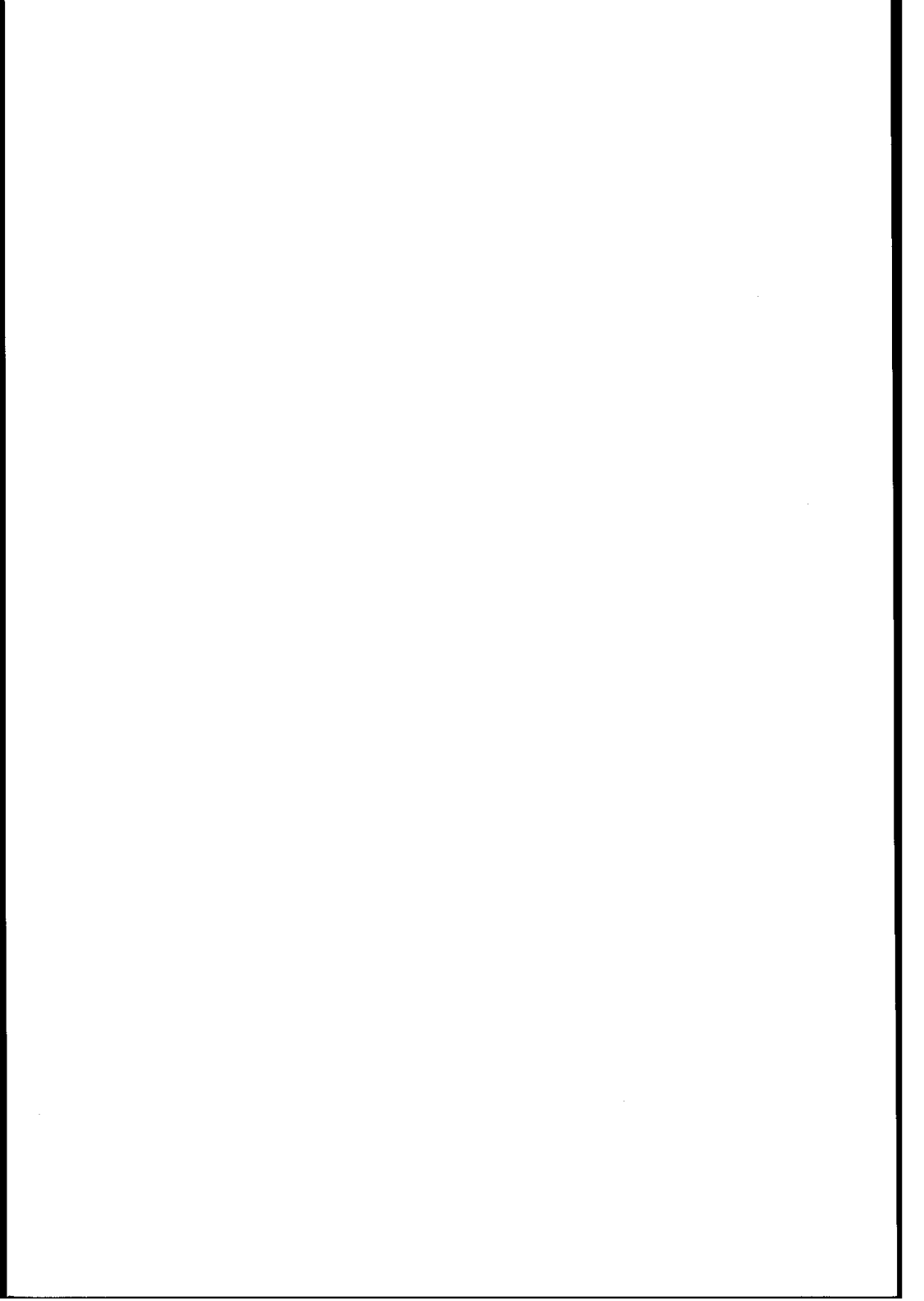
Afslutning

En af verdens store betonmænd, Dr Bryant Mather, har en gang udtalt (fordansket version): "God beton er lavet af sand, sten, cement og vand. Dårlig beton er lavet af nøjagtigt de samme materialer." Der er know-how til forskel.

Mit bud på udviklingen for "superbetoner" er, at de vil få et stadigt mindre pasta-indhold; dvs. et øget indhold af tilslag; at vores forståelse for cementpastaens mikrostrukturelle og kemiske udvikling vil øges, så vi bedre bliver istand til at "designe" cementpastaen; og at vi bliver nødt til i stigende grad at inddrage ressourcemæssige overvejelse i vort forbrug af materialer til beton. Jeg tror, at superbeton i stigende grad vil finde anvendelse i beton, der anvendes til miljømæssige forhold, og jeg tror, at betonrør vil blive en saga, hvis ikke der sker tiltag i retning af anvendelse af superbeton.

Jeg tror endvidere, at i takt med at vores viden fortsat forbedres, vil vi blive tvunget væk fra suboptimering.

Endelig tror jeg, at udviklingen indenfor tilsætningsstoffer vil fortsætte, og vi vil se helt nye produktkoncepter komme på markedet. Idag har man eksempelvis tilsætningsstoffer, hvormed hydratisering kan stoppes og startes helt vilkårligt.



FORCE Institutterne
Park Alle 345
2605 Brøndby
42 96 88 00

CHLORIDKORROSION. FORUDSEENDE PROJEKTERING.

af Civ.ing. lic. techn. Birgit Sørensen

Juli 1991

INDHOLDSFORTEGNELSE:

1. Indledning.	3
2. Korrosion.	5
3. Forebyggelse af armeringskorrosion på designstadiet.	8
3.1 Chloridpåvirkningen reduceres eller fjernes.	8
3.2 Chloridindtrængning reduceres eller hindres.	8
3.3 Transporthastigheden af chlorid reduceres.	8
3.4 Forøget transportvej.	10
3.5 Forøget chloridbinding.	10
3.6 Afbrydelse af elektrolyt-kontakt.	11
3.6.1 Maling af armeringsjern.	11
3.6.2 Udtørring af betonen.	12
3.7 Forøget kritisk chloridkoncentration.	12
3.7.1 Cementtype.	13
3.7.2 Armeringstype.	13
3.7.3 Forebyggende katodisk beskyttelse.	14
3.7.4 Udelukkelse af ilt.	14
3.7.5 Inhibitorer.	15
4. Diskussion.	15
5. Den bedste beton ???	17
Litteraturliste:	20

CHLORIDKORROSION. FORUDSEENDE PROJEKTERING.

1. Indledning.

Det har i en lang årrække været kendt, at indtrængning af chloridioner i beton kan forårsage lokalkorrosionsangreb med et efterfølgende stort behov for reparation af skadede dæklag og evt. udskiftning af armeringsjern. Det har imidlertid helt frem til begyndelsen af 1980'erne været en udbredt misforståelse, at chloridindtrængning med efterfølgende korrosionsinitiering udelukkende finder sted i konstruktion med for tynde eller porøse dæklag eller forekommer som sekundær skade i forbindelse med revner.

I de senere år har man i stigende grad nået til erkendelse af, at beton uanset kvaliteten vil være udsat for indtrængning af chloridioner, såfremt konstruktionen bringes i kontakt med saltholdige omgivelser. Undersøgelser af konstruktioner og felteksponerede prøvelegemer har sammen med laboratorieundersøgelser og modelopstilling for chloridindtrængning sandsynliggjort, at selv betontyper, som normalt betragtes som tætte, vil få indtrængning af chloridioner til niveau af armeringen indenfor en relativt kort årrække, [1],[2]. Et krav om at undgå initiering af armeringskorrosion i en konstruktions levetid kan derfor kun imødekommes ved særlige forholdsregler.

Forskellige filosofier kan lægges til grund ved valg af forholdsregler mod armeringskorrosion. Her i landet har man hovedsageligt valgt at reducere korrosionsrisikoen ved ¹⁾

konstruktive forholdsregler, der hindrer eller mindsker kontakt med chloridkilden, ²⁾ tykkere dæklag eller ³⁾ tætte betontyper. Anvendelsen af supplerende beskyttelse i form af overfladebehandlet armering, rustfri armering eller overfladebehandling af betonen anvendes i et vist omfang, hvorimod forebyggende katodisk beskyttelse endnu ikke anvendes herhjemme til indstøbt stål. Dette vil dog ske i nærmeste fremtid i forbindelse med visse konstruktionsdele på Vestbroen.

Etableringen af den faste forbindelse over Storebælt har ført til, at der for første gang herhjemme er stillet krav til betonens modstand mod chloridindtrængning, formuleret som et krav til maximal diffusionskoefficient i betonen til tunnelelementerne [1]. Parallelt hermed er anvendelsen af levetidsmodeller blevet mere udbredt [1],[3]. Disse modeller er endnu på et relativt primitivt niveau og modellerer endvidere kun tiden til initiering af korrosion og ikke selve korrosionsfasen.

Vore forventninger til, hvorledes og med hvilken hastighed korrosionsangrebet udvikler sig, efter at korrosionsprocessen er gået igang, er naturligt nok hovedsageligt knyttet til de konstruktioner, der udviser synlig og reparationskrævende skader. Dette har ført til en forventning om, at den tidsperiode, der går fra korrosionsprocessen starter, og til de første reparationskrævende skader indfinder sig, typisk er i størrelsesordenen 10-15 år. I dette billede skal det imidlertid ikke glemmes, at der også findes ældre betonkonstruktioner, der på trods af relativt høje chloridindhold er i en udmærket stand. Dette indikerer, at det anvendte skøn på 10-15 år fra korrosionsstart og til skadesbilledet er synligt, langt fra altid er gældende. Nogle af de væsentligste forhold, der sikrer en langsom udvikling af korrosionsprocessen, når denne først er gået i gang, er ¹⁾ betonens homogenitet, idet forhold som varierende dæklag, dårlig udstøbning omkring for tætliggende armeringsjern, støbeskel, stenreder, porøse områder, afstandsklodser etc.

fremmer dannelsen af stærkt lokaliserede korrosionsangreb, med tilsvarende høj lokal korrosionshastighed, ²⁾ betonens elektriske ledningsevne, der under visse forhold vil være bestemmende for korrosionshastigheden, samt ³⁾ betonens vandindhold, idet konstant tørre eller konstant vandmættet beton i praksis sikrer mod korrosion.

Betydningen af disse forhold er alment kendt, og har affødt en række forholdsregler indenfor alle dele af byggeriet i retning af at undgå inhomogeniteter i betonen samt at regulere fugtadgangen til konstruktioner. Der er derfor forhåbninger om at alene disse forholdsregler vil betyde en forøgelse ikke blot af initieringstiden til korrosion men også den tid, der går, inden korrosionsomfanget udvikler sig til reparationskrævende skader.

2. Korrosion.

Mekanismen for chloridfremkaldt korrosion er beskrevet i en lang række referencer, bl.a. [4], og vil derfor kun blive summarisk gennemgået i dette skrift. Det skal imidlertid understreges, at forståelsen for de grundlæggende mekanismer for armeringskorrosion er en forudsætning for at kunne forhindre armeringskorrosion og rehabilitere korrosions-skadede konstruktioner.

Fig. 1 viser forholdene i en chloridbelastet konstruktion før og efter initiering af armeringskorrosion. Før korrosionsinitiering er jernopløsningen uden praktisk betydning for konstruktionens levetid, idet korrosionsprodukterne udfældes som en tæt passivfilm. Passivfilmen forhindrer jernopløsningen, på trods af at metallisk jern er termodynamisk ustabil i betonen, ved at danne et tæt lag på metaloverfladen. En tilstrækkelig høj pH-værdi samt en vis iltadgang er en forudsætning for at passivering finder sted. Disse forhold er normalt til stede i almindelige beton- og konstruktionstyper.

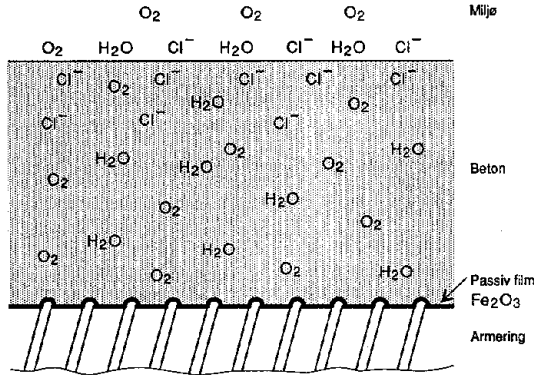


Fig. 1a. Armeret beton før korrosionsinitiering.

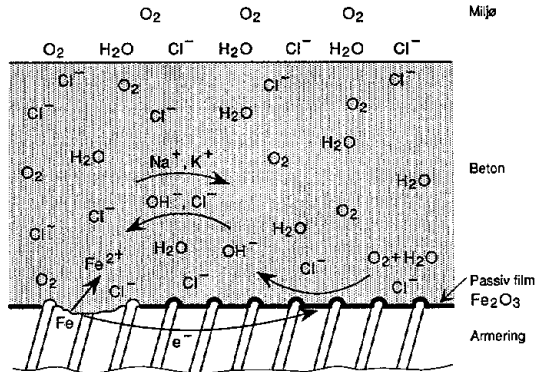
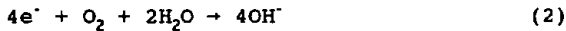


Fig. 1b. Armeret beton efter korrosionsinitiering.

Passiveringsprocessen er en elektrokemisk proces, hvor jern omdannes (oxideres) til jernoxider eller -hydroxider under samtidig omdannelse (reduktion) af ilt og vand til hydroxylioner:



Chloridioner kan trænge ind i beton ved en lang række forskellige mekanismer, [1],[3]. Da forebyggende forholdsregler mod armeringskorrosion kun i isolerede tilfælde afhænger af indtrængningsmekanismen vil emnet "transport-mekanismer" ikke blive behandlet her.

I betonkonstruktioner, der udsættes for vedvarende kontakt med saltvand, vil chloridionkoncentrationen i dæklaget omkring armeringsjernene øges med tiden. Når chloridkoncentrationen når over en kritisk værdi vil passivfilmen nedbrydes lokalt, og korrosionsprocessen går i gang:



Indtrængningen af chloridioner fra havvand eller tøsalt har foruden den korrosionsfremkaldende effekt en række andre negative effekter på betonens holdbarhed: ¹⁾ Salt har en vandbindende effekt. Det generelt højere vandindhold i saltholdig beton fører sammen med det højere indhold af ioner i porevæsken til, at betonens elektrisk modstand mindskes og giver dermed mulighed for en højere lokal korrosionshastighed. ²⁾ Indtrængning af natriumchlorid og kaliumchlorid vil endvidere føre til et forhøjet alkaliindhold i porevæsken. Dette i sammenhæng med det højere vandindhold i betonen giver mulighed for accelerering eller initiering af alkali-kisel reaktioner. ³⁾ Det forhøjede vandindhold i betonen vil fremme risikoen for frostska-der.

Efter initiering af korrosion er korrosionshastigheden styret af det effektive anode/katode-forhold, samt iltadgangen til de katodiske områder. Det effektive anode/katode arealforhold er defineret af hvor stort et areal, der korroderer (anode), i forhold til det areal, hvorpå der kan foregå en iltreduktion (katode), der understøtter korrosionsprocessen jf. ligning (3) og (4). Størrelsen af dette areal er primært bestemt af den elektriske modstand i

betonen, idet korrosionsstrømmen gennem betonen giver anledning til et ohmsk spændingsfald, der ved stor afstand mellem anode og katode bliver af samme størrelse som den drivende spændingsforskel mellem anode og katode, selv ved meget lave strømme.

3. Forebyggelse af armeringskorrosion på designstadiet.

Chloridfremkaldt armeringskorrosion kan forebygges på designstadiet ud fra en række forskellige angrebsvinkler:

3.1 Chloridpåvirkningen reduceres eller fjernes.

Chloridpåvirkningen kan i mange tilfælde reduceres ved at regulere afvandingsforholdene f.eks. omkring søjlefødder. En anden mulighed er helt at fjerne chloridkilden, hvilket kan ske f.eks. i boligbyggeri og på brodæk ved at ophøre med tørsaltning eller ved at anvende ikke-chloridholdige tørsalte, f.eks. urea eller CMA.

3.2 Chloridindtrængning reduceres eller hindres.

Betonen påføres en membran eller en overfladebehandling, der hindrer eller reducerer omfanget af chloridindtrængning.

3.3 Transporthastigheden af chlorid reduceres.

Transporthastigheden af chloridioner gennem dæklaget er afhængig af transportmekanismen, og dermed eksponeringsforholdene, samt af betonens beskaffenhed. Effekten af en række beton- og miljøparametre er belyst såvel ved laboratorieforsøg som ved eksponering under naturlige forhold, [1],[2],[3],[5]. Tabel 1 viser de hovedeffekter, der er bred enighed om, uagtet at der naturligvis altid kan peges på enkeltundersøgelser, der giver modstridende resultater.

Det skal understreges, at hovedparten af de undersøgelser, der refereres til i ovennævnte materiale, er lavet på betontyper med vand/cement forhold på 0.4 eller højere, og udelukkende på et- eller to-pulver blandinger. Forholdene i beton med lavere vand/cement-forhold samt for tre-pulverblandinger er fortrinsvist undersøgt i forbindelse med enkeltprojekter som f.eks. Storebælt-sprojektet, [1],[6].

Ud fra et ønske om at f. en beton, der yder en maximal modstand mod chloridindtrængning, vil tilsætning af flyveaske og mikrosilika (eller, som det anvendes i andre lande, af slagge) samt anvendelsen af lave vand/cement forhold være gode løsninger, men naturligvis indenfor visse grænser. Logisk set eksisterer der øvre grænser for tilsætning af flyveaske og mikrosilika over hvilken en yderligere tilsætning af disse stoffer ikke vil betyde nogen yderligere forbedring af modstanden mod chloridindtrængning. Tilsvarede må der forventes at være en nedre grænse for vand/cement forholdet. Det skal i øvrigt bemærkes, at lavt vand/cement forhold samt tilsætning af pozzolaner ligeledes vil øge betonens elektriske modstand, og dermed reducere muligheden for korrosion med et meget ugunstigt anode/katode arealforhold.

Teoretisk set kan diffusion af chloridioner gennem betonen ske via flere mulige ruter: ¹⁾ gennem porerne i cementpastaen, ²⁾ langs overfladen af stenmaterialet, ³⁾ gennem stenmaterialet, ⁴⁾ gennem defekter (revner, lokalt porøse områder) og ⁵⁾ via det elektriske dobbeltlag på poreoverfladerne. I den udstrækning at transporthastigheden er domineret af transport gennem porevæsken i pastaens porer vil en reduktion af vand/cement-forholdet reducere transporthastigheden, så længe der stadig er tale om en blanding med et vist overskud af vand. En reduktion af vand/cementforholdet til et niveau, der indebærer at pastaen i praksis er uigennemtrængelig for chloridioner,

men hvor den friskblandede betons fysiske egenskaber medfører risiko for dannelse af defekter, f.eks. som følge af komprimeringsproblemer, kan altså teoretisk set føre til en forøget transporthastighed ved reduceret vand/cement forhold, som følge af at transporten af chloridioner nu kan forgå via defekter.

Foruden de ovennævnte faktorer, vil chlorid transporthastigheden ved diffusion ligeledes være påvirket af typen af salt (natriumchlorid eller calciumchlorid), eksponeringstidspunktet i hærdningsforløbet og temperaturen.

3.4 Forøget transportvej.

En forøgelse af dæklagets tykkelse vil naturligt nok føre til en forlængelse af den tid der går, før den kritiske chloridkoncentration er opbygget i niveau af armeringsjernene. Såfremt chloridionerne transporteres ind i betonen ved diffusion er effekten ganske markant, idet f.eks. en forøgelse af dæklaget med 50% typisk vil føre til en forøgelse i den tid, der går, inden der initieres korrosion, med 125%.

3.5 Forøget chloridbinding.

En del af de chloridioner, der trænger ind i betonen vil bindes kemisk eller fysisk i cementpastaen. De bundne chloridioner udgør typisk mellem 20% og 80% af det totale chloridindhold. Armeringsjernenes korrosionsforhold er udelukkende defineret af porevæskens sammensætning, herunder indholdet af opløste chloridioner. De bundne chloridioner vil derfor ikke bidrage til at initiere korrosion. Af denne årsag er det af betydning at vælge betontyper med en stor bindingskapacitet.

Den kemiske binding foregår hovedsageligt i C_3A fasen, men derudover også i C_4AF fasen, i den udstrækning at denne fase reagerer. Da C_3A fasen fortrinsvist reagerer

med gips, vil gips virke reducerende på betonens evne til at binde chlorid kemisk. C_3A indholdet skal af denne årsag over 5 - 8% før der ses nogen betydende effekt på den kemiske binding [7],[8].

Den fysiske bindingskapacitet (adsorbition) er normalt væsentligt højere end den kemiske bindingskapacitet. Den fysiske bindingskapacitet afhænger af pastaens struktur, formentlig primært den specifikke overflade. Af denne årsag har blandinger med mikrosilika og flyveaske ofte en højere bindingskapacitet end ren cement beton.

pH-værdien i porevæsken har ligeledes betydning for bindingen, idet højere pH-værdi fører til lavere chloridbinding. Dette kan forklares ved, at hydroxidionerne og chloridionerne "konkurrerer" om de pladser, der er til rådighed for adsorbition. pH-værdier vil derudover muligvis også påvirke den kemiske binding.

Foruden ovennævnte faktorer, vil chloridbindingen ligeledes påvirkes af type af salt (natriumchlorid, calciumchlorid), eksponeringstidspunkt i hærdningsforløbet og temperaturen.

3.6 Afbrydelse af elektrolyt-kontakt.

3.6.1 Maling af armeringsjern.

Forudsætningen for at jern kan gå i opløsning er, at jernet er i direkte kontakt med betonens porevæske (elektrolytten). Denne kontakt kan brydes ved at påføre armeringen et tæt malingslag.

I praksis er det vanskeligt at opnå en 100% pore- og skadefri belægning på armeringen. Såfremt al sammenhængende armering er overfladebehandlet vil såvel anode- som katodereaktion imidlertid være henvist til at foregå på de frit eksponerede områder i porer og

defekter, og den accelerering, der ligger i at et lille anodeareal korroderer i kontakt med et stort katodeareal vil altså ikke kunne finde sted. En vis accelerering vil dog kunne forventes som følge af at korrosionsangrebet kan brede sig ind under malingslaget, hvor der skabes et specielt ugunstigt korrosionsmiljø. Endvidere vil iltadgangen til et isoleret jernareal i bunden af en pore af geometriske årsager være bedre end til det samme areal omgivet af en ståloverflade, hvor der også kan finde iltreduktion sted.

Såfremt den overfladebehandlede armering er i galvanisk kontakt med ikke-overfladebehandlet armering, vil der være en oplagt risiko for accelereret korrosion i forbindelse med defekter i malingslaget.

3.6.2 Udtørring af betonen.

Udtørring af betonen vil have en dobbelt gavnlig effekt på korrosionsforholdene. Dels vil fjernelse af porevæske (elektrolyt) hindre elektrokemisk kontakt mellem anodiske og katodiske områder, dels vil fjernelse af vand fra armeringsoverfladen jf. reaktionsskema (3) og (4) få korrosionsprocessen til at gå i stå.

3.7 Forsøget kritisk chloridkoncentration.

Det er kendt viden, at den kritiske chloridkoncentration er forskellig for forskellige konstruktionstyper. Dette forhold skyldes forskelle i betontype, konstruktionsprincipper og miljøpåvirkninger, [9],[10]. Derudover er det muligt at påvirke den kritiske chloridkoncentration med forskellige foranstaltninger.

3.7.1 Cementtype.

Cementtypens indflydelse beror hovedsageligt på, at porevæskens pH-værdi (hydroxylionkoncentration) er af betydning for hvor høj en chloridionkoncentration, der kan tolereres i porevæskan. Dette skyldes at chlorid og hydroxylioner konkurrerer om at adsorberes på armeringen på samme måde som de konkurrerer om at adsorberes i cementgelen. Sammenhængen mellem pH-værdien og den kritiske chloridkoncentration betyder, at den kritiske chloridkoncentration alt andet lige, er lavere i beton, der er lavet med lavalkali cementtyper eller med pozzolantilsætning. Effekten er i mange tilfælde marginal, men kan være markant hvis der anvendes mikrosilika tilsætning, der har en kraftig pH-reducerende effekt. I dette tilfælde skal den negative effekt på pH-værdien dog ses i sammenhæng med de positive effekt af mikrosilika på transporthastigheden af chlorid ind gennem dæklaget. Effekten af bindemiddelbestanddelene på chlorid-bindingskapaciteten er medtaget i tabel 1.

3.7.2 Armeringstype.

Den kritiske chloridkoncentration kan øges ved at anvende armeringsstål med en bedre korrosionsbestandighed end almindeligt ulegeret konstruktionsstål. Her udmærker de austenitiske rustfri stål sig ved en særdeles god korrosionsbestandighed i chloridholdig beton, men også lavere legerede ståltyper vil have en forbedret korrosionsbestandighed og dermed en højere kritisk chloridkoncentration end ulegeret stål.

Til ekstreme forhold kan endvidere benyttes ikke-metalliske armeringsmaterialer.

3.7.3 Forebyggende katodisk beskyttelse.

Katodisk beskyttelse anvendes oftest som rehabiliteringsmetode til korrosionsskadet beton. Undertiden monteres systemet imidlertid allerede i konstruktionsfasen, og aktiveres umiddelbart efter færdiggørelsen. Forebyggende katodisk beskyttelse virker ved en kombination af flere faktorer: ¹⁾ Jernets elektrokemiske potentiale sænkes momentant. Derved øges den kritiske chloridkoncentration. ²⁾ Betonens indhold af ilt reduceres gennem den første periode af anlæggets drift. Dette muliggør at beskyttelseseffekten vil være til stede, også hvis strømmen afbrydes for kortere perioder. ³⁾ Iltreduktionen på armeringens overflade giver anledning til produktion af hydroxylioner jf reaktionsligning (2), hvilket stabiliserer armeringens passivitet. ⁴⁾ Det påtrykte spændingsfelt bevirker, at chloridioner hindres i at bevæge sig ind mod armeringen.

Fordelene ved at etablere katodisk beskyttelse forebyggende er, at etableringsomkostningerne er minimale sammenlignet med, hvad det koster at etablere systemet på et senere tidspunkt. Endvidere er det væsentligt lettere at opretholde passivitet overalt på en ikke-skadet konstruktion fremfor at skulle retablere passivitet på en skadet konstruktion, der bl.a. p.gr. af varierende chloridindhold og korrosionsgrad udgør et inhomogent medium.

3.7.4 Udelukkelse af ilt.

Det er kendt, at korrosion sjældent opstår på konstruktioner, der er totalt neddyppet i havvand, på trods af at chloridniveauet kan være relativt højt. Dette skyldes, at iltniveauet i vandmættede konstruktioner er så lavt, at armeringen antager et lavt potentiale. Derved øges den kritiske chloridkoncen-

tration. Udelukkelse af ilt i landbaserede konstruktioner ved påføring af tætte membraner har været forsøgt, men så vidt vides uden nævneværdig succes.

3.7.5 Inhibitorer.

Brug af inhibitorer til at modvirke den skadelige effekt af chloridioner er kendt fra andre sammenhænge, og der markedsføres da også inhibitorer til iblanding i beton. Uafklarede forhold bl.a omkring risikoen for accelereret lokal korrosion og omfordeling af inhibitor i initieringsfasen er årsagen til, at det ikke på det nuværende grundlag kan anbefales at anvende inhibitorer i beton.

4. Diskussion.

Det er således muligt allerede på designstadiet at tage en række forholdsregler, der fjerner eller nedsætter risikoen for chloridfremkaldt armeringskorrosion på et senere tidspunkt i konstruktionens livsforløb.

Ingen enkelt beskyttelsesmetode kan udpeges som den bedste. For hver enkelt konstruktion må en samlet vurdering af beskyttelsesbehovet og de fremtidige muligheder for vedligeholdelse og service afvejes med de økonomiske realiteter. I denne forbindelse er det væsentligt også at analysere den situation, hvor beskyttelsen lokalt eller generelt ikke fungerer helt efter hensigten, eller hvis vedligeholdelsen af beskyttelsessystemet ikke gennemføres som planlagt. Disse situationer bør ikke kunne føre til accelereret nedbrydning sammenholdt med en situation uden supplerende beskyttelsesforanstaltninger.

I modsætning til f.eks. i USA, hvor anvendelsen af epoxy-belagte armeringsjern er endog særdeles udbredt, har man her i landet som hovedregel valgt at lade betonen "gøre arbejdet" med at beskytte armeringen mod chloridkorrosion. Denne

holdning har ført til et udviklingsarbejde, hvor målet har været at udvikle tætte betontyper, der reducerer indtrængningshastigheden af chloridioner. Under denne proces har beton udviklet sig fra et relativt simpelt materiale, til et særdeles sammensat materiale, i værste fald indeholdende: cement (fire faser, alkali, gips) tilslagsmateriale, vand, flyveaske, mikrosilika, luftindblanding, plastificering, superplastificering og retarder eller accelerator.

Vores viden om dette meget komplekse materiale er hovedsageligt knyttet til nogle fysiske parametre, der relativt simpelt kan måles i laboratoriet.

Vores viden om vekselvirkningseffekter mellem de enkelte delmaterialer er på et lavt niveau. Som eksempler på væsentlige områder, der bør belyses bedre, kan her nævnes samspillet mellem mikrosilika og flyveaske, hvor enkelte undersøgelser tyder på, at effekten af flyveasketilsætning på chlorid diffusionskoefficienten tilsyneladende er meget begrænset, hvis der også er silika i blandingen [1]. Dette forhold må imidlertid formodes at være afhængig af tid, hærdningstemperatur og cementens alkaliindhold. Eksakt viden om disse sammenhænge er ikke til stede.

Vor viden om reaktionshastigheder af mikrosilika og flyveaske er mangelfuld. Dette er specielt problematisk hvad angår flyveaske, der har en særdeles langsom og stærkt temperaturafhængig reaktionshastighed. Større indsigt på dette område er en forudsætning for, at laboratoriemålinger af chloridindtrængning i relativ ung beton kan anvendes til at forudsige tidspunktet for korrosionsinitiering i betonkonstruktioner.

Vores viden om kemiske tilsætningsstoffers effekt på chloridtransport og chloridbinding er særdeles ringe.

Vores viden om indflydelsen af mikrodefekter på betonens modstand mod chloridindtrængning er kun belyst i ringe

omfang. Effekten på korrosionsinitiering og korrosions-hastigheden er ukendt.

Det er gennem de seneste år blevet mere udbredt at anvende matematiske modeller til at forudsige tidspunktet for korrosionsinitiering. Disse modeller hviler på en række forudsætninger. Rigtigheden af disse forudsætninger er kun i begrænset omfang verificeret. Der er næppe tvivl om at disse modeller kan udvikles til et særdeles nyttigt værktøj under forudsætning af at grænsebetingelserne verificeres ved gentagne målinger på forskellige konstruktioner.

Besvarelsen af alle disse spørgsmål vil give os viden om de mekanismer, der er afgørende for betonens modstand mod chloridindtrængning samt om sammenhængene mellem sammensætning, struktur, egenskaber målt i laboratoriet og brugsegenskaber. Det praktisk udbytte af en sådan viden vil være ganske betydelig, idet dette vil danne grundlag for en sikker vurdering af konsekvenserne for tiden til korrosionsinitiering ved ændrede recepter, produktionsudsving eller ændrede miljøforhold.

5. Den bedste beton ???

God beton kan ikke laves ud fra et enkelt hensyn, i dette tilfælde hensynet til beskyttelse af armeringen mod chloridfremkaldt korrosion. Hensyn til fremstillingsprocessen (f.eks. afbindingshastighed i relation til den aktuelle produktionsproces eller komprimerbarhed), hærdningsforløbet (risiko for revnedannelse), mekaniske egenskaber (f.eks. styrkeudvikling eller slutstyrke), og andre holdbarhedsaspekter (f.eks. alkali-kiselreaktioner eller frostbestandighed) stiller ligeledes krav til betonens sammensætning, der i visse tilfælde er i konflikt med hensynet til en optimal beskyttelse mod chloridindtrængning.

Ud fra et isoleret hensyn til den størst mulige modstand mod chloridindtrængning og den lavest mulige korrosionshastig-

hed, hvis der alligevel finder korrosionsinitiering sted, kan man formulere følgende "ønskeseddel":

- et lavt vand/cement forhold, max. 0.4 (lav indtrængningshastighed, høj elektrisk modstand)
- tilsætning af mikrosilika eller flyveaske (lav transporthastighed, fysisk binding af chlorid, høj elektrisk modstand).
- højt C_3A indhold (min. 5 - 8%) (kemisk binding)
- højt alkaliindhold (højt kritisk chloridkoncentration, høj reaktionsgrad af mikrosilika og flyveaske)

Tabel 1: Forskellige parametres indflydelse på korrosionshæmmende egenskaber.

Ønsket egenskab

	lav indtrængningshastighed	høj binding	høj kritisk chloridkoncentration ¹⁾	lav elektrisk ledningsevne	netto effekt
v/c	lav			lav	lav
C ₃ A (C ₄ AF)		høj	høj		høj
Alkali		lav	høj	lav	høj
Flyveaske	høj	høj	(lav)	høj	høj
Mikrosilika	høj	høj	lav	høj	høj

¹⁾ Målt som total indhold af chlorid i % af beton vægten.

Litteraturliste:

- [1] Poulsen, Ervind. "Chlorider og 100 års levetid." Dansk Beton forening. Publikation nr. 36, 1990.
- [2] Banforth, P.B., Pocock, D.C. Proceedings fra 3. internationale symposium: Corrosion of Reinforcement in Concrete Constructions, pp 119-131, SCI, 1990.
- [3] Sørensen, B. "Kloridtransport i beton." Betonteknik, 3/17/1990.
- [4] "Corrosion of Steel in Concrete" edited by P.Schlessl. RILEM TC 60, 1988.
- [5] Thomas, M.D.A. Proceedings fra 3. internationale symposium: Corrosion of Reinforcement in Concrete Constructions, pp 198-212, SCI, 1990.
- [6] Munch-Petersen, Chr., Vincentsen, L.J. "Beton til Storebælt". Dansk Beton nr. 2, maj 1989.
- [7] Metha, P.K. ASTM STP 629 pp 12-19, 1976.
- [8] Al-Saadouri, R.S.S. et al. Proceedings fra 3. internationale symposium: Corrosion of Reinforcement in Concrete Constructions, pp 213-226, SCI, 1990.
- [9] Elsener, B. et al. Proceedings fra 3. internationale symposium: Corrosion of Reinforcement in Concrete Constructions, pp 348-357, SCI, 1990.
- [10] Hansson, C.M., Sørensen, B. ASTM, STP 1050, pp 3-16.

COWiconsult
Rådgivende Ingeniører AS
Teknikerbyen 45
2830 VIRUM
tlf.: 4597 2782

CHLORIDKORROSION.

**REPARATIONSERFARINGER OG DERES NYTTIGGØRELSE I NY-PROJEK-
TERING**

af

Civ.ing., lic.techn. Steen Rostam

Juli 1991

INDHOLDSFORTEGNELSE:

	<u>Side</u>
1. Indledning	3
2. Når skaden er sket	4
2.1 Visuel tilstandsvurdering = Maksimalisering af vedligeholdsudgifterne	5
2.2 Pletreparationer	6
2.2.1 Partiel betonudskiftning	11
2.3 Elektro-kemiske reparationer	14
2.3.1 Katodisk beskyttelse	16
2.3.2 Re-alkalisering og Chloridudtrækning	20
3. Projektering af holdbare betonbygværker	22
3.1 Identificere kritiske konstruktionsdele	22
3.2 Flertrins beskyttelsesstrategi	23
3.3 Eksemplificering	26
3.3.1 Storebæltsforbindelsen. Østtunnelen	28
3.3.2 Storebæltsforbindelsen. Vestbroen	31
3.4 Instrumentering af bygværker	31
LITTERATURLISTE	32

CHLORIDKORROSION

REPARATIONSERFARINGER OG DERES NYTTIGGØRELSE I NY-PROJEKTERING

1. Indledning

I et foregående indlæg ⁽¹⁾ ved denne Betondag i 1991 er beskrevet de muligheder, der foreligger, for at bremse eller standse chloridindtrængning til armeringen samt de muligheder, der foreligger, for at reducere korrosionshastigheden og eventuelt standse den, hvis betonens naturlige korrosionsbeskyttende effekt på armeringen er ophævet eller overvundet.

Ved Betondagen 1990 er beskrevet en matematisk modellering til forudsigelse af chloridioners indtrængningshastighed i beton udsat for et chloridholdigt miljø ⁽²⁾.

De nævnte indlæg søger at sammenfatte dagens viden om de grundlæggende mekanismer, der styrer transportmekanismerne i beton, og dermed styrer chloridkorrosion og den deraf følgende skadeudvikling på de berørte konstruktioner. Denne viden er uundværlig i enhver projektering af betonbygværker, der kan blive udsat for et fugtigt, chloridholdigt miljø.

Desværre er denne viden af relativ ny dato, når den vurderes i et tidsperspektiv, som er relevant i forbindelse med bedømmelsen af levetiden for betonbygværker og ved erfaringsindhentning fra betonbygværkers reparationer. Dette tidsperspektiv er typisk 20 - 50 år ved bygværksvurdering og 5 - 10 år ved reparationsvurdering. Dette forhold er en ofte

overset faktor, når byggebranchens erfaringer skal nyttiggøres, og opfattes ofte som en tilsyneladende træghed i branchen ved indførelsen af nye teknologier.

Dette indlæg søger at samle nogle af de væsentligste erfaringer indhentet gennem de senere års observationer af reparerede, chloridkorrosionsskadede betonbygværker. Disse indvundne erfaringer parres med dagens viden om transport- og nedbrydningsmekanismerne og søges nyttiggjort gennem et simpelt princip for projektering af nye bygværker med tilstræbt lang holdbarhed.

2. Når skaden er sket.

Som bekendt ⁽³⁾, udvikles betonkonstruktioners nedbrydning tidsmæssigt igennem to faser, jævnfør Fig.1.

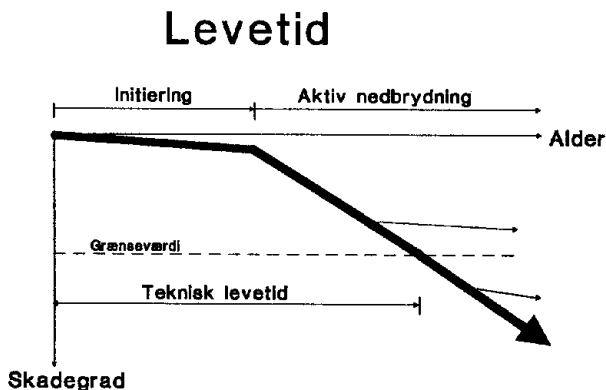


Fig.1: Skematisk levetidsmodel.

Disse er initieringsfasen, hvor en indbygget beskyttelse overvindes (chloridindtrængning med ophobning) eller nedbrydes (karbonatisering), og den aktive nedbrydningsfase, i hvilken betonen eller armeringen, eller begge dele, ned-

brydes. Den aktive nedbrydning kan være enten accelererende (chloridbaseret armeringskorrosion), tilnærmelsesvis lineær (tø - frost skader, karbonatiseringsbaseret armeringskorrosion), eller først accelererende for derefter at klinge af og eventuelt gå i stå (alkalikisel reaktioner).

Skader som følge af aktive nedbrydningsmekanismer bliver først synlige, når de har udviklet sig i et vist tidsrum, som kan være flere år. Det sidste gælder blandt andet armeringskorrosion under hjemlige klimaforhold.

2.1 Visuel tilstandsvurdering = Maksimalisering af vedligeholdsudgifterne

De tidligere anvendte almindelige tilstandsvurderinger af betonbygværker og derpå følgende beslutninger om reparationer var baseret på visuelle eftersyn. De observerede skader afgjorde hvornår og hvor meget der skulle repareres. Konsekvensen har været, at der først er grebet ind når den aktive nedbrydning var relativt langt fremskreden og skaden synlig, jævnfør Fig.2.

Dette giver uundgåeligt sene indgreb i nedbrydningen, og erfaringerne viser, at sådanne reparationer oftest er meget kostbare sammenlignet med udgifterne til forebyggende indgreb foretaget i initieringsfasen med henblik på at forlænge denne.

Visuelle tilstandsvurderinger var tidligere den almindeligt anerkendte fremgangsmåde for vedligehold af betonbygværker, indtil kendskabet til nedbrydningsmekanismerne åbnede øjnene for konsekvenserne. Simple målinger i initieringsfasen (på det visuelt uskadede bygværk) er tilstrækkelige til at varsle om hvor tæt bygværket er på at nå omslagspunktet mellem initiering og aktiv nedbrydning. Disse målinger er typisk:

- dæklagsmålinger (en gang for alle, for eksempel ved byggværkets aflevering)
- karbonatiseringsmålinger
- chloridprofilmålinger
- elektro-kemiske potentialemålinger (EKP).

Visuel Tilstandsvurdering

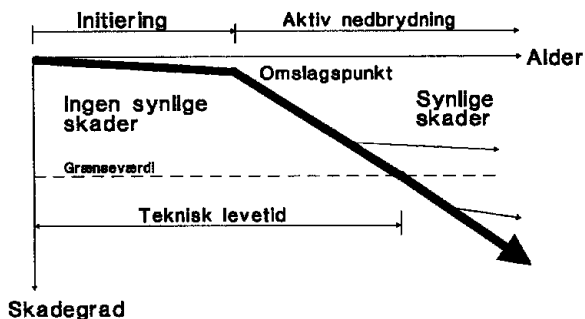


Fig.2: Visuelle tilstandsvurderinger udskyder vedligehold til skaderne er sket. Forebyggende vedligehold får da mindre chance. Dermed maksimaliseres vedligeholdsudgifterne.

2.2 Pletreparationer

Korrosionsskader konstateredes visuelt, når sprængningstrykket fra rusten gav revner i betondæklaget, rustmisfarvninger og større afskalninger, jævnfør Fig.3.

Lokal korrosion

Chlorider / karbonatisering

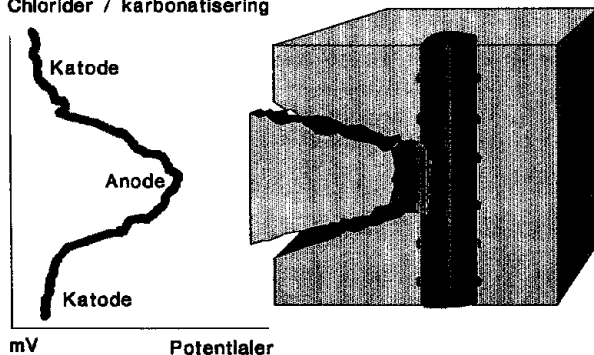


Fig.3: Korrosionsskade og tilhørende potentialemålinger.

Det tidligere reparationsprincip gik da ud på at fjerne den skadede og løse beton, afrense armeringen for løs rust, eventuelt anvendtes sandblæsning, og udstøbe en reparationsmørtel/sprøjtebeton til erstatning for den fjernede beton. I særlige tilfælde anvendtes kunststofmørtler, eller eventuelt påførtes armeringen en særlig overfladebehandling på kunststofbasis eller cementbaseret.

Denne type pletreparation har været gængs praksis i mange år, på trods af, at den med dagens viden om korrosionsmekanismen, især i forbindelse med chlorider, lider af fundamentale mangler, der kan føre til fortsat uændret korrosion eller endda til accelereret korrosion. Årsagen hertil er, at reparationen kun fjerner chloriderne i betonen lige ved anodeområdet, jævner korrosionsmekanismen beskrevet i ⁽¹⁾. Chloriderne i nabobetonen fjernes ikke, skønt koncentrationen sædvanligvis vil være højere end tærskelværdien for korrosion i den aktuelle konstruktion. Den aktive anode har blot tvunget naboområdet med lidt lavere chloridkoncentration til at være neutralt eller endda til at være katode. Når anoden fjernes gennem en "vellykket" reparation, omdannes naboområdet til anode, og korrosionen kan fortsætte til begge sider

for det reparerede område, som illustreret på Fig.4. Blot vil der gå en række år inden det opdages ved visuelle eftersyn. EKP-målinger vil tydeligt kunne afsløre dette forhold, når der er gået et kortere tidsrum efter reparationen, så den nye elektro-kemiske balance har fået tid til at indstille sig.

Lokal korrosion

Traditionel reparation

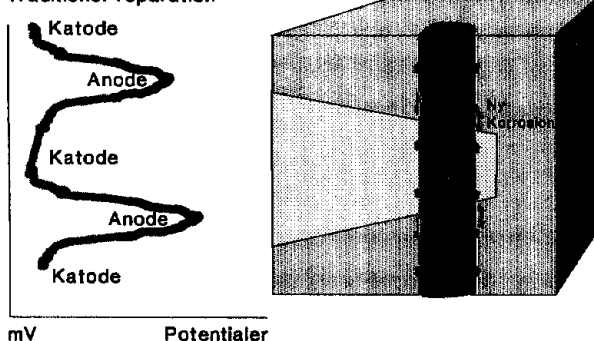


Fig.4: Reparationen har blot flyttet angrebet og camoufleret det.

Hvis reparationen er så godt udført, at chloriderne ved anoden fjernes, og reparationsbetonen omdanner anoden til katode gennem passivering fra den basiske beton, vil katode/anode-forholdet endda blive større end før, og korrosionen dermed kunne forløbe i naboområdet med samlet større jernopløsningshastighed efter reparationen end før. I gunstigste fald, hvilket vil sige med det reparerede område som inaktivt, vil en sådan reparation resultere i fortsat korrosion i naboområdet af samme hastighed som før reparationen, hvis der ikke suppleres med andre forholdsregler, der for eksempel kan bidrage til en udtørring af betonen.

Ulempen ved nedbrydningsmekanismen er, at det i det danske klima tager ca. 4 til 6 år, før den fortsatte korrosion giver

begyndende skader, som er synlige på betonoverfladen, og ofte yderligere nogle år før der gribes ind. Dermed vurderes det fejlagtigt, at denne reparation har holdt 5 til 10 år, skønt den igangværende nedbrydningsmekanisme ikke er påvirket nævneværdigt i gunstig retning.

At der er realiteter i disse betragtninger fremgår blandt andet af Fig.5 og 6, taget af søjler på broer over Ringmotorvejen ved København ca. 5 år efter der er udført lokale sprøjtebeton reparationer.

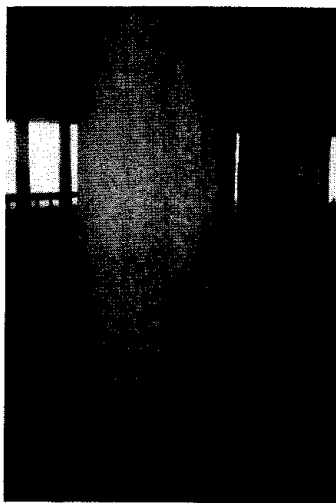


Fig.5: Brosøjle med revner langs sprøjtebeton reparation.



Fig.6: Revner og rustudfældninger ved sprøjtebeton reparation.

For at have en rimelig chance for at være holdbar, skal denne type pletreparationer have et omfang, så al beton nær armeringen med højere chloridindhold end tærskelværdien for korrosion fjernes. Herunder skal man være opmærksom på, at chlorider, der er trængt ind bag armeringen, kan diffundere tilbage i reparationsmørtlen eller til naboområderne og bidrage til en fortsat korrosion. De i praksis anvendte tærskelværdier for korrosion ligger i intervallet 0,05 til 0,10 mass-% Cl^- af betonvægten. Disse værdier er ikke absolut sikre værdier, da korrosionsinitiering udmærket kan finde sted ved lavere koncentrationer, men de har vist sig realistiske i praksis.

Dertil kommer, at reparationen bør suppleres med forholdsregler, der reducerer fugtadgangen, for eksempel i form af en overfladebeskyttelse. Valg af korrekt type overfladebeskyttelse er en særlig opgave, afhængig af konstruktionstype, udformning og miljøpåvirkning, men beskrivelsen heraf ligger uden for rammerne af denne redegørelse. Betydningen af at vælge korrekt må dog ikke undervurderes, da forkert valgt overfladebehandling kan gøre mere skade end gavn.

2.2.1 Partiel betonudskiftning

Partiel betonudskiftning i forbindelse med pletreparationer har statiske og bæreevnemæssige konsekvenser, der ofte undervurderes eller helt overses.

En reparationsbeton eller -mørtel vil altid have et vist svind. Restsvind og restkrybning i den oprindelige beton vil være uden betydning. Ved lokal betonudskiftning i trykbelastede konstruktionsdele vil reparationsmaterialets svind medføre, at dette fyldmateriale ikke i anvendelsesstadiet vil medvirke i det statiske system eller i lastoptagelsen. Især ved søjlereparationer kan dette være alvorligt, idet der indbygges usynlige excentriciteter i søjlerne, og jo mere man går til grænsen ved udnyttelsen af betonens og armeringens styrker, jo større risiko er der forbundet med sådanne reparationer.

Anvendelse af såkaldte svindkompenserede betoner, eller reparationsmaterialer "uden svind" er ikke pålideligt nok i denne sammenhæng.

Hel eller delvis aflastning før støbning af reparationen vil heller ikke være tilstrækkeligt, da dette kun kompenserer for den elastiske forkortelse af den oprindelige beton, men differenssvind og reparationsmaterialets krybning med tiden vil reducere og eventuelt eliminere reparationsmaterialets lastoptagning i anvendelsesstadiet. I brudstadiet vil reparationen sædvanligvis kunne regnes medvirkende, dog ikke i stabilitetsberegninger for søjlerne på grund af den skjulte excentricitet i anvendelsesstadiet, der i værste tilfælde kan give stabilitetsbrud allerede i anvendelsesstadiet.

Sådanne større lokale betonudskiftninger i trykpåvirkede elementer som søjler bør i stedet udvides til at omfatte hele søjletværsnittet i det skadede område, for at bevare søjlens mekaniske symmetriegenskaber og ikke kun den geometriske symmetri.

I samarbejde med Københavns Amt har COWIconsult siden 1987 gennemført en lang række partielle og fulde søjleudskiftninger på chloridkorrosionsskadede motorvejsbroer. Søjlerne er cirkulære med diametre fra 500 til 750 mm. Der er udviklet et særligt stålmanchetsystem til midlertidig lastoverføring, medens de søjledele, der skal fjernes, sprænges væk - som vist på Fig.7 - og finhugges, og den nye søjledel støbes op i stålform ved indpumpning af betonen nedefra i formen.



Fig.7: Delvis bortsprængt søjle med aflastningsåg.

Fig.8 viser en sådan søjle efter støbningen, hvor den forøgede tykkelse på den nedre del skal sikre forøget modstand mod chloridindtrængning i den mest udsatte del af søjlen. Som afslutning gives søjlerne en over-

fladebehandling i form af en delvis diffusionsåben elastisk svumme.

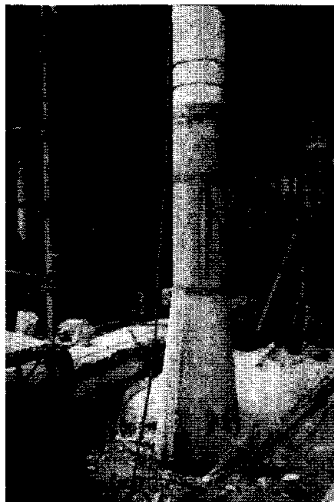


Fig.8: Færdigstøbt søjledel før riller til aflastningsåget pudses og søjlen gives en overfladebeskyttelse.

Med denne metode opnås tre tilstræbte virkninger, dels at fjerne al den beton, der har et for højt chloridindhold, dels at udskifte betonen symmetrisk i de slanke søjler, dels at reducere den fortsatte fugt- og chloridindtrængning i søjlerne.

På grund af gentagelseseffekten har denne relativt drastiske reparation af skader, der isoleret set kun omfatter søjlernes yderste dele ind til bag armeringsjernene, vist sig at være den mest økonomiske løsning. Alternativerne har været dels traditionel borthugning af chloridinficeret beton i et symmetrisk bælte rundt om søjlen, hvor dette er nødvendigt, afrensning af korroderede jern og efterfølgende sprøjtebetonstøbning, dels katodisk beskyttelse.

2.3 Elektro-kemiske reparationer

Netop korrosionsmekanismen ^{(1),(3)} er så afklaret idag, at den indbyder til direkte indgreb i de elektro-kemiske processer der styrer jernopløsningen, når der gennem for eksempel EKP-målinger eller ved visuel observation viser sig behov for reparationer.

Dette er især gældende ved chloridkorrosion på grund af chloridionernes specielt ugunstige egenskaber i forbindelse med armeringskorrosion:

- Selv i en tæt og stærkt basisk beton vil chlorider i fornøden mængde inde ved armeringen depassivere jernet og accelerere lokale korrosionsangreb. På grund af høje katode/anode-forhold udvikles sådanne angreb sædvanligvis som grubetæringer. Sådanne grubetæringer kan være så lokale (støbeskel, revner), at armeringen kan korrodere helt over uden at dette er synligt på betonoverfladen i form af revner, misfarvninger eller afskalninger. I denne sammenhæng skal sådanne visuelle skader opfattes som værdifulde advarsler om, at der er alvorlige skader under udvikling, og at det nu er på høje tid at gribe ind. Den primære skade er korrosionen og ikke revnerne, der "kun" varsler om, at der sker en skadeudvikling, vi ikke har opdaget tidligere. Først når revnerne udvikler sig til afskalninger med nedfaldende betonstykker, er dette en alvorlig risiko i sig selv.
- Chloridionerne igangsætter således korrosionen og accelererer den, men udskilles igen af korrosionsprodukterne. Dermed virker de som en katalysator på processen. Dette er specielt ugunstigt i reparationssammenhæng, for dermed er det ikke nogen løsning bare at standse yderligere tilførsel af chlorider, hvis et korrosionsangreb er konstateret. De allerede indtrængte chlorider vil i lang tid fremover kunne holde korrosionsprocessen igang. Først når korrosionsgruben, hvor chloriderne er kon-

centreret, bliver så stor, at ionkoncentrationen falder under en kritisk værdi, vil korrosionen bremses og eventuelt gå i stå. Membraner eller anden overfladebeskyttelse vil ikke i sig selv løse noget problem. Kun i de tilfælde at det samtidig lykkes at reducere fugtniveauet væsentligt, så den elektriske ledningsevne i betonen reduceres, kan korrosionshastigheden påvirkes i gunstig retning. Dette vil dog ofte være tilfældet ved korrekt valgt behandling, men i en del tilfælde kommer fugten fra vanskeligt tilgængelige sider.

- Chloriderne er hygroscopiske, det vil sige, at de suger fugt til sig. Dertil kommer, at chloridionerne selv fremmer den elektrolytiske ledningsevne af betonen. Dermed er det ekstra vanskeligt at reducere betonens ledningsevne ved hjælp af en overfladebehandling, når først chloriderne er trængt ind i betonen.

Rust Produkter

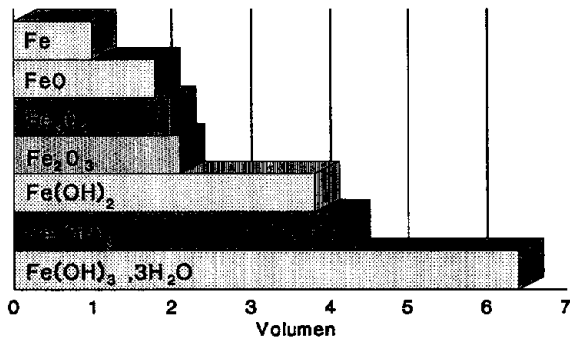


Fig.9: Volumener af forskellige typer korrosionsprodukter. Fugt- og ilttilgangen bestemmer hvilken type der dannes, og bestemmer dermed hvilket tryk der udvikles ⁽⁶⁾.

- Det ekspansionsstryk, korrosionsprodukterne normalt udøver, jævnfør Fig.9 taget fra ⁽⁶⁾, har den ovenfor nævnte gunstige virkning, at medføre revner i betonen. Desværre er det således, at hvis korrosionen sker i et iltfattigt miljø inde ved anoden, udvikles der korrosionsprodukter der kun har en meget beskeden ekspansion, og den dannede rust er et sort og slimet produkt, der kan finde plads inde i betonens porer, hvorved en skjult korrosion kan finde sted og helt fortære et armeringstværsnit uden at dette varsles på overfladen. Skønt denne proces forløber langsommere end den sædvanlige korrosion under tilstedeværelsen af rigelige mængder ilt og fugt, er denne "sorte rust" særdeles risikabel. Typiske steder, hvor opmærksomheden skal være henledt, er chloridbelastede og permanent næsten vandmættede konstruktionselementer som for eksempel fundamenter og søjler.

Som beskrevet i ⁽¹⁾, vil armering indstøbt i basisk (alkalisk) beton blive passiveret, og dermed beskyttet imod jernopløsning. Ved en igangværende korrosion virker den fortsat passiverede del af jernet som katode. Det i praksis ofte oversete ved korrosionsprocessen er, at netop katodeprocessen er den hastighedsbestemmende faktor i jernopløsningen. Katoden virker således som "motor" i korrosionsprocessen, og den indtrængte ilt virker som "brændstof", forudsat passende høj fugtighed.

2.3.1 Katodisk beskyttelse

Armeringen kan tvinges til at virke som katode, selv ved meget høje chloridionkoncentrationer ved armeringens overflade, - og dermed være passiveret -, ved at påtrykke den et elektrisk potentiale udefra. Denne katodiske beskyttelse kan opnås ved hjælp af anoder placeret enten fordelt på betonoverfladen (typisk:

coatede titannet, ledende maling, flammesprøjtet zink), i huller ind i betonen (typisk: coatede titanstænger i grafitpasta) eller, ved konstruktionsdele i vand eller fugtig jord, ved lokale anoder placeret i vandet eller i jorden. Anoderne kan enten fortæres under brug eller være inerte, og dermed langtids holdbare. Beskyttelsesstrømmen opnås enten ved strøm påtrykt via transformator og ensretter, eller eventuelt gennem naturlige potentialeforskelle opnået ved at koble armeringen til anoder af mindre ædelt metal (offeranode).

Med hensyn til detaljer om katodisk beskyttelse af betonkonstruktioner henvises til speciallitteraturen, for eksempel ⁽⁴⁾, samt til den af Dansk Betonforening under udarbejdelse værende Anvisning i Katodisk Beskyttelse af Betonkonstruktioner.

Ved at påføre betonkonstruktionen et sådant spændingsfelt opnås tre gunstige virkninger samtidigt, se blandt andet ⁽¹⁾:

- for det første opnås en potentialesænkning af armeringen, hvorved korrosionen standses (katodisk beskyttelse)
- for det andet medfører katodereaktionen, at der dannes $(OH)^-$ - ioner ved armeringen, hvorved betonens pH øges netop ved armeringen, hvor dette forbedrer armeringens passivering (re-alkalisering)
- for det tredje bliver armeringen negativt ladet, hvorved andre negativt ladede ioner, blandt andet Cl^- , frastødes og fjerner sig mere eller mindre fra armeringen (chloridudtrækning). For god ordens skyld skal det samtidig påpeges, at dette felt naturligvis tiltrækker positivt ladede ioner, som for eksempel Na^+ og K^+ , der netop er de alkali-

metalioner, der betinger skadelige alkalisk reaktioner, forudsat tilslaget er alkali reaktivt.

I denne forbindelse skal der mindes om den sproglige forvirring bygningsingeniører ofte kommer ud for ved diskussioner med kemikere og elektro-kemikere, nemlig at *alkali-metalionerne* i daglig tale betegnes alkali, samtidig med at betonens gunstige basiske egenskab til korrosionsbeskyttelse af armeringen betegnes betonens *alkalinitet*, udtrykt ved koncentrationen af $(OH)^-$ i porevæsken, altså angivet ved betonens eller porevæskens pH.

Ved overflademonterede netanoder påføres et betondæklag på 20 - 40 mm for at sikre elektrolytisk kontakt mellem anoden og den oprindelige beton. I vurderingen af holdbarheden af en installation med katodisk beskyttelse er vedhæftningen af denne overbeton afgørende for virkningen, og netop dette punkt er det mest kritiske element i systemet. Bortset fra trivielle fejl i form af fejlinstallationer, fejlstyring af strømmen i styrke og retning etc, er det kun vedhæftningssvigt, der har ført til svigt af installationer. Samtidig skal det understreges, at anlægget ikke er afhængig af vedhæftningens størrelse, kun af om der kan løbe en strøm mellem anoden og armeringen over grænselaget med vedhæftningen.

I 1987/88 installerede Københavns Amt på forsøgsbasis katodisk beskyttelse på en stribe med 14 cirkulære søjler, ø 600 mm, på Bro 3-0029 der fører Ringmotorvejen over Hillerødmotorvejen ved København. Installationerne er beskrevet i ⁽⁵⁾. Installationerne omfatter tre typer katodisk beskyttelse, to baseret på overflademonterede anoder med sprøjtebeton overdækning (Raychem polymer-anoder Ferex 100, platineret ekspanderet titannet af mærket Eltech), et baseret på ind-

borede platinerede titanstænger i grafit (Grønvold og Karnov ApS). Der gennemføres regelmæssige målinger, og idag fungerer alle systemer tilfredsstillende. Aftræksstyrkerne på sprøjtebetonen varierede i 1989 mellem 1,4 og 0,3 MPa. Der er ikke siden konstateret mærkbare ændringer i disse værdier, men nye værdier ventes præsenteret på Dansk Betondag 1991. Hvert system installeredes på tre søjler. To søjler fungerer som reference.

De resterende tre søjler blev forseglet med tre lag polyurethan maling til forsøgsvis hindring af iltadgangen til katodearealerne og dermed udsultning af korrosionsprocessen, jævnfør katodeprocessens hastighedsbestemmende indflydelse. Disse søjler blev forsynet med kontrolmåleceller svarende til søjlerne monteret med katodisk beskyttelse. Til dato synes korrosionen også at være standset på disse søjler, og de udviser tilsvarende konstant voksende elektrisk modstand med tiden som søjlerne med sprøjtebetonkappe. Denne gunstige effekt kan skyldes, at iltadgangen virkeligt er reduceret, eller blot at behandlingen har medført en voksende udtørring af betonen med tilsvarende gunstig effekt på korrosionen. Afklaringen heraf kræver nærmere undersøgelser.

I 1989 projekterede COWIconsult for Vejdirektoratet, Broafdelingen, katodisk beskyttelse på ydersiderne af de to klappiller på Aggersundbroen i Nordjylland. Anoden er et coated titannet med en sprøjtebetonkappe.

Ved kontrolmålinger i 1989 og i 1991 er det konstateret, at installationen fungerer tilfredsstillende, med forventede mindre reguleringer af strømforsyningen til enkelte af zonerne. Aftræksforsøg med sprøjtebetonen viste i 1989 styrker på 1,0 - 1,3 MPa, og ved gentagne målinger i 1991 er der ikke fundet ændringer i disse niveauer.

2.3.2 Re-alkalisering og Chloridudtrækning

I ovennævnte opremsning af gunstige virkninger er i parentes angivet de rehabiliteringsmetoder, der idag angives som elektro-kemiske rehabiliteringsmetoder.

Der er meget væsentlige og principielle forskelle på, hvorledes disse metoder anvendes i praksis og hvilken erfaring, der er med de enkelte metoder. I denne redegørelse er det ikke muligt at gå i detaljer med disse forskelle, men et par hovedpunkter skal drages frem.

- a) Katodisk beskyttelse opererer med katode-strømstyrker af størrelsesordenen 5 - 20 mA pr m² ståloverflade, maksimal anodestrom på 110 mA pr m² anodeoverflade og med spændingsforskelle på 2 - 6 volt. Den elektro-kemiske påvirkning af betonkonstruktionen må bedømmes som meget beskeden, men anlægget skal principielt være permanent med deraf følgende løbende drift- og vedligeholdelseskostninger.
- b) Re-alkalisering anvendes til at genopbygge et basisk miljø omkring armeringen i en karbonatiseret beton. Systemet skulle principielt etablere et stabilt pH-niveau på ca 10,5. Der opereres med katode-strømstyrker af størrelsesordenen 1000 - 2000 mA pr m² betonoverflade, hvilket typisk i husbygning vil svare til 1000 - 4000 mA pr m² ståloverflade. Den maksimale anodestrom bliver tilsvarende høj. Spændingsforskellene er typisk 6 - 40 volt. Den elektro-kemiske påvirkning af betonkonstruktionen er voldsom, men til gengæld er behandlingen temporær, og varer fra få dage til 2 - 3 uger, hvorefter hele installationen fjernes. Misfarvninger af betonoverfladen medfører at

der sædvanligvis udføres en fuld overfladebeskyttelse bagefter. Denne behandling vil i sig selv kunne yde en meget væsentlig beskyttelse imod skader som følge af karbonatiseringsbaseret korrosion.

- c) Chloridudtrækning anvendes til at fjerne kritisk høje chloridmængder i betonen. Chloriderne vandrer ud af betonen ud i et midlertidigt påsprøjt overfladelag af opfugtet pulp, genbrugt avisPapir, påført omkring en midlertidig anode placeret på betonoverfladen. Når tilstrækkeligt meget chlorid er fjernet fra betonen skylles pulpen væk og installationen fjernes. Af visuelle årsager gives overfladen sædvanligvis en afsluttende overfladebehandling. Strøm- og spændingsniveau er som for re-alkaliseringen. Behandlingen er ligeledes temporær, men varigheden af behandlingen er typisk 3 - 6 uger, forudsat betonen ikke er for tæt.

Anvendelse af re-alkalisering og chloridudtrækning er fortsat kontroversielt, og der foreligger en række rapporter med modstridende vurderinger af disse systemers effektivitet og pålidelighed.

De væsentligste spørgsmål knytter sig til konsekvenserne af de store strømtætheder, der kan give kato-dereaktioner, der eventuelt introducerer mikrorevner med reduceret vedhæftning og reduceret frostmodstandsevne til følge. Afklaring af fordele og ulemper med disse metoder henvises således til speciallitteraturen og til individuelle vurderinger fra sag til sag.

For tiden gennemføres der et erhvervsforskerprojekt med hovedemne i de elektro-kemiske reparationsmetoder for betonkonstruktioner. Projektet gennemføres i et samarbejde mellem Laboratoriet for Bygningmaterialer

og Instituttet for Metallære på DTH, og COWiconsult, Rådgivende Ingeniører AS.

3. Projektering af holdbare betonbygværker

Det er almindelig erkendt, at antallet af betonkonstruktioner, der har behov for meget omkostningskrævende reparationer, er utilfredsstillende stort. Det er derfor bydende nødvendigt at reducere graden af skader der vil opstå i vore fremtidige bygværker. Hertil vil detailviden om hvorfor de eksisterende konstruktioner i nogle tilfælde udviser utilfredsstillende holdbarhed, være værdifuldt. Med andre ord, vi skal drage nytte af den erfaring og viden der kan hentes via de eksisterende konstruktioner.

For at kunne forstå skadeudviklingen og ekstrapolere resultaterne til andre bygværker, andre materialesammensætninger og andre klimatiske forhold, altså for at kunne generalisere observationerne, må der anvendes modeller for de skadelige stoffers transport og for selve nedbrydningsmekanismernes. Disse modeller styres af nogle parametre fastlagt i bygværkets geometri, i materialeegenskaberne i det færdige bygværk og i særdeleshed af det klimatiske miljø der optræder lige ved betonoverflade, altså mikromiljøet.

Da dette bliver et meget komplekst problem, er det nødvendigt at simplificere modelleringen til et overskueligt niveau. Grundlæggende i denne proces er, at enhver model, som ikke strider imod sund fornuft og naturlovene, er bedre end ingen model.

3.1 Identificere kritiske konstruktionsdele

Ud fra erfaringerne med hvor skader typisk opstår i de eksisterende konstruktioner, kan de mest udsatte konstruktionselementer og de mest udsatte zoner af bygværkerne

identificeres. Dermed er det klart, at disse områder skal sikres bedre modstand mod nedbrydning.

Sådanne udsatte zoner er eksempelvis:

- søjler i bygninger og broer hvor vand, salt og andre skadelige stoffer kan optræde
- altaner, hvor især vederlagszoner er udsatte
- fuger, samlinger, inddækninger, støbeskel, afløb mv.

Særligt skal det bemærkes, at en række af disse udsatte dele af bygværkerne er kritiske ved også at være det svageste led i holdbarhedskæden idet skader her har overproportionale konsekvenser for bygværket. Hvis søjlerne ikke holder, falder hele bygværket ned, og hvis vederlagszonerne for altaner ikke holder, falder den ellers intakte altan ned. Tilsvarende kan et sprængt afløb eller en utæt fuge volde ubodelig skade på underliggende konstruktionsdele.

De således identificerede kritiske zoner bør derfor designes særligt omhyggeligt for at sikre deres holdbarhed. Dette er desuden ikke kun et spørgsmål om at sikre særligt gode materialer i disse områder, det er hele designet. Dette inkluderer konstruktiv udformning i lyset af de klimatiske og belastningsmæssige påvirkninger, ekstra beskyttelsesforanstaltninger, hvilket ofte er simpelst og billigst i design fasen, men væsentligt dyrere at sikre senere, og det er vurdering af mulighederne for at inspicere og vedligeholde og eventuelt udskifte dele i driftsfasen.

3.2 Flertrins beskyttelsesstrategi

Med udgangspunkt i kendskabet til typiske nedbrydningsmekanismer, er der udviklet en designstrategi, der kan være et værdifuldt hjælpemiddel til sikring af langtidsholdbare konstruktioner. Strategien er beskrevet på Fig.10.

Flertrins Beskyttelsesstrategi

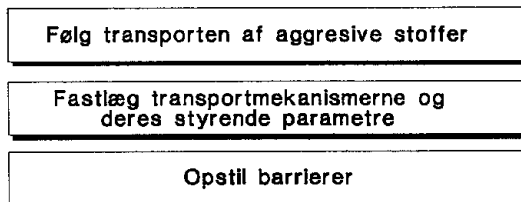


Fig.10: Flertrins beskyttelsesstrategi.

Denne strategi går ud på, at forudsige hvilke aggressive stoffer konstruktionen forventes at blive udsat for og følge deres mulige transportveje. Dernæst fastlægges hvilke mekanismer der styrer disse transporter, for eksempel om det er diffusion eller permeation, og de styrende parametre bestemmes. Ved udformning og materialevalg opstilles så et passende antal barrierer til hindring eller opbremsning af transporterne. Antallet af barrierer afhænger af typerne og af hvilken levetid der ønskes.

Dette princip er også antaget af CEB, den internationale beton komité, og er indbygget i CEB-FIP Model Code 1990 der netop er udkommet i sidste udkast før den udsendes officielt (7).

Afgørende for nedbrydningsmekanismerne er aggressive stoffer der trænger ind i betonen udefra igennem overfladelaget, jævnfør Fig.11.

Parametre

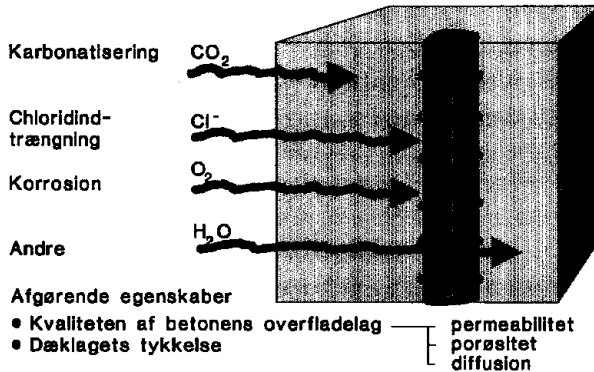


Fig.11: Afgørende holdbarhedsmæssige egenskaber.

Den hastighed hvormed stofferne vandrer ind i betonen er afhængig af nogle få parametre som betonens permeabilitet, dens porøsitet og dens diffusionsegenskaber over for forskellige stoffer. Tidspunktet, for hvornår stoffer som chlorid når ind til armeringen og kan begynde at volde skade, afhænger af dæklagets størrelse.

Transporthastighederne er stærkt afhængige af disse parametre, og det er væsentligt at være opmærksom på at de indgående parametre ikke har proportional indflydelse, men har meget kraftigere indflydelse. Eksempelvis fremgår det af Fig.12 hvilken betydning for levetiden det har, hvis et specificeret dæklag ikke opnås i konstruktionen, men for eksempel kun det halve dæklag er opnået. Dermed reduceres levetiden til ca. en syvendedel af det ønskede.

Parametre

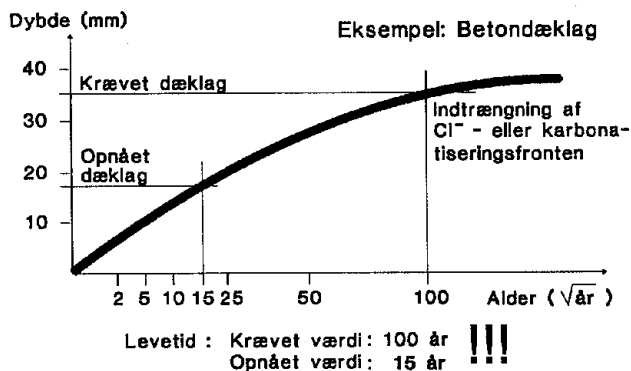


Fig.12: Ikke-lineær indflydelse af de styrende parametre.

Et tilstrækkeligt dæklag og god tæthed af dæklagsbetonen er de to væsentligste parametre at kontrollere, hvorved en markant forbedring af bygværkernes levetid kan forventes.

3.3 Eksemplicering

Den på Fig.11 viste indtrængning af de aggressive stoffer har en simpel, men interessant konsekvens for valg af geometrisk udformning af holdbare konstruktioner.

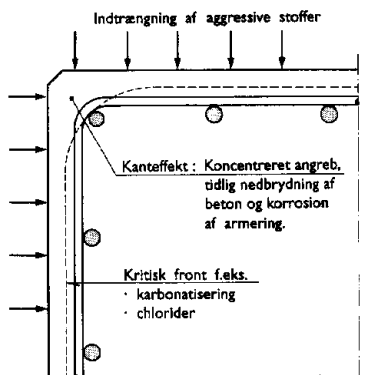


Fig.13: To-sidet angreb ved udadgående kanter og hjørner.

Af Fig.13 fremgår det, at ved udadvendte hjørner og kanter optræder angrebet fra to sider samtidig. Dermed kan der forventes betydeligt højere koncentrationer i hjørnezonerne, og indtrængningshastighederne vil være større i disse zoner på grund af de højere koncentrationsforskelle. Dette forklarer den velkendte observation, at skader ofte starter ved de udadvendte hjørner af konstruktionerne, den såkaldte hjørne- eller kanteffekt.

Ved at afrunde hjørnerne som vist på Fig.14, vil angrebet blive fordelt bedre, og en mere ensartet nedbrydning vil optræde, med forlænget levetid til følge, alt andet lige. Det betyder for eksempel at cirkulære eller ovale søjler er gunstigere end firkantede.

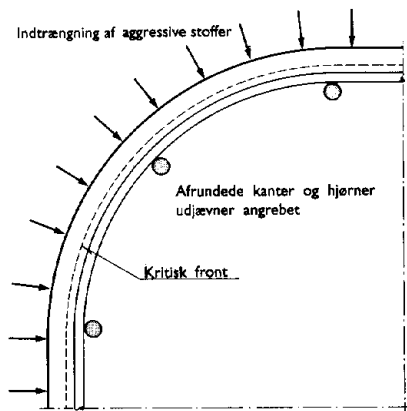


Fig.14: Afrundede hjørner og kanter fordeler angrebet og forlænger levetiden.

3.3.1 Storebæltsforbindelsen. Østtunnelen

Storebæltsforbindelsen har en design levetid på 100 år. Tunnelen består af præfabrikerede betonelementer anbragt i chlorid- og sulfatholdigt vand, jævnfør Fig.15. Et detailudsnit af tunnelvæggen er vist på Fig.16.

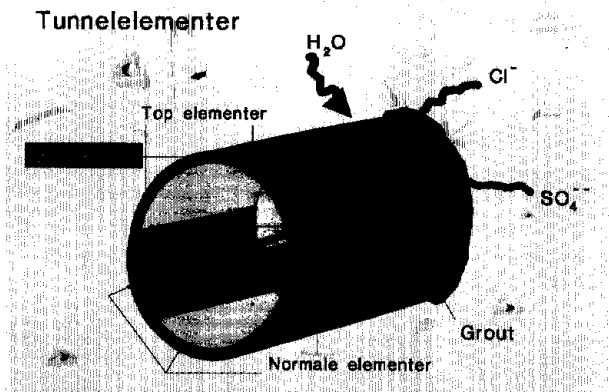


Fig.15: Storebælt. Østtunnelen.

Ophobning



Chlorider og sulfater

Fig.16: Ophobning med tiden af aggressive stoffer ved den tørre side.

På grund af fordampning fra den tørre side må der forventes en ophobning af de aggressive stoffer ved denne side en gang ud i fremtiden, afhængig af hvor hurtigt de vandrer igennem betonen.

Ud fra denne betragtning om transporterne er der opstillet fire barrierer imod chloridkorrosion og tre imod sulfatangreb med tiden:

- Grouten udfylder hulrummet mellem elementer og jorden og er den første fysiske og kemiske barrierer imod transporten. Denne grout indeholder en stor mængde flyveaske der binder både sulfat og chlorid
- betonen er lavet så diffusionstæt som muligt, til sikring af meget langsom transport. Blandt andet indeholder den både flyveaske og mikrosilika
- ved ophobning af især chlorider vil korrosionsrisikoen for armeringen kunne blive meget stor, hvorfor armeringen er epoxy coated. Der er anvendt en speciel coating teknik, hvor det færdigsvejste armeringsbur opvarmes og dyppes i fluidiseret epoxy pulver. Dermed coates hele buret på én gang, og armeringen skal hverken skæres over eller bukkes efter coatingen.
- hvis alle de foregående bestræbelser ikke viser sig at kunne sikre armeringen imod korrosion i de stipulerede 100 år, er der en sikkerhedsventil, idet der relativt simpelt kan etableres katodisk beskyttelse af armeringen. Da armeringen i hvert element er svejst sammen, skal der kun én armeringskontakt til, for at katodisk beskyttelse kan fungere. Hvis nettet var coated før nettet blev bundet op, ville alle stænger principielt være elektrisk isolerede fra hinanden, og katodisk beskyttelse ville ikke være en realistisk løsning, da der så skulle føres en ledning til hvert enkelt jern.

3.3.2 Storebæltsforbindelsen. Vestbroen

Ved udbudsprojekteringen indgik der tre typer underbygninger til Vestbroen. Ved alle disse var der taget væsentlige holdbarhedsmæssige hensyn ved valg af form. Som det fremgår af Fig.17, er der i vandgangssnittene valgt enten cirkulære, ovale eller oktagonale tværsnit, altså i alle tilfælde er principperne fra Fig.13 og Fig.14 søgt tilgodeset. I det udførte projekt er der valgt en af entreprenøren foreslået løsning med minimale afrundinger af hjørnerne.

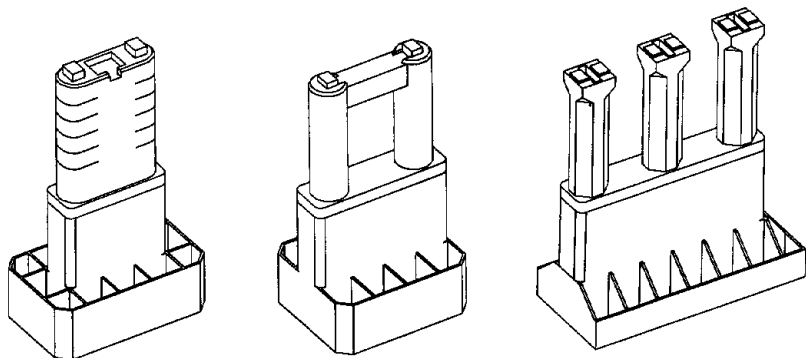


Fig.17: Pilleudformninger fra udbudsprojekterne til Storebæltsforbindelsens Vestbro.

3.4 Instrumentering af bygværker

Med den foran beskrevne opfattelse af transportmekanismernes og nedbrydningsmekanismernes betydning for vore muligheder for at designe holdbare konstruktioner, er det indlysende, at vore antagelser i designfasen bør verificeres i driftsfasen. Der er behov for at følge udviklingen inde i betonen

i de kritiske zoner gennem en instrumentering eller ved anden form for simpel registrering af tilstanden.

Det forventes, at der fremover vil ske en betydelig udvidelse i anvendelsen af instrumentering fra bygværkernes tilblivelse. Problemet er mest, at der endnu kun er få typer instrumenter til rådighed, som på tilstrækkelig pålidelig måde kan langtidsregistrere indtrængning af skadelige stoffer. Måling af parametre der styrer armeringskorrosion synes idag at være det mest lovende område, men udviklingen går meget hurtigt inden for dette felt.

I Storebælts Østtunnel er der således indbygget særlige korrosionsceller i en række såkaldte intelligente elementer. Også tøjningsmålere er indbygget i sådanne elementer.

I Storebælts Vestbro er aftaler om tilsvarende instrumentering i de kritiske zoner som splash zone og støbeskel netop ved at falde på plads.

Den slags instrumentering vil desuden kunne give værdifulde informationer til nytte for fremtidig projektering og udførelse af holdbare betonkonstruktioner generelt.

LITTERATURLISTE

1. Sørensen, Birgit. "Chloridkorrosion. Forudseende Projektering". Dansk Betonforening. Publikation, Dansk Betondag 1991.
2. Poulsen, Ervin. "Chlorider og 100 års levetid". Dansk Betonforening. Publikation nr. 36, Dansk Betondag 1990.
3. Tuutti, Kyösti. "Corrosion of Steel in Concrete". Cement och Betong Instituttet, Stockholm, 1982.

4. Manning, David G. "Cathodic Protection of Concrete Highway Bridges". Corrosion of Reinforcement in Concrete. Editors: C.L. Page, K.W.J. Treadaway, P.B. Bamforth. Published for the SCI by Elsevier Applied Science, 1990. Pages 486 - 497.
5. Rostam, Steen og Birit Buhr. "Katodisk beskyttelse af brosjøfler". Dansk Beton Nr. 2, 5. Årgang, maj 1988.
6. Nielsen, Anders. "Hvid, grøn og sort rust". Nordisk Betong nr. 2, 1976.
7. CEB. "CEB-FIP Model Code 1990". Final Draft. CEB Bulletin d'Information No. 203, 204, 205, July 1991.

DBF-publ.

Nr. 4:77 "The Role of Ready mixed Concrete in constr.indust"	Kr. 15,-
" 6:77 "Seminar om BRUDMEKANIK" Afh. 29.sept. 1977	" 60,-
" 2:78 "Flydebeton" af B. Hylén og H.H. Bache	" 20,-
" 3:78 "Dansk Betondag 1978"	" 20,-
" 4:78 "Prøvningsmetoder for beton" Møde 1.3.1978	" 40,-
" 5:78 "Beton i svømmebade" (Anders Nielsen&Sv.E.Petersen)	" 30,-
" 6:79 "Betonuddannelserne i Danmark" (C de Fontenay)	" 0,-
" 7:79 "Dansk Betondag 1979"	" 55,-
" 8:79 "Nedbrydn.af beton & svingn.påvirkn.af bygværker"	" 35,-
" 9:80 "Farø broerne" Møde 3.10.1979	" 45,-
" 11:81 "Brandpåvirkede betonkonstruktioner" Møde 21.1.81	" 35,-
" 12:81 "Tilsætningsstoffer til beton" Datablad II.udg.81	" 30,-
" 14:81 "Luftindblanding i beton" Debatmode 26.11.1980	" 25,-
" 15:82 "Plastificering af beton" Møde 30.9.81	" 35,-
" 17:83 "Holdbare svømmebassiner" (Sv. E. Petersen)	" 45,-
" 18:83 "Dansk Betondag 1983"	" 70,-
" 19:83 "Proportionering af holdbar beton"	" 60,-
" 20:84 "Demolering og genbrug af beton"	" 45,-
" 21:84 "Dansk Betondag 1984"	" 45,-
" 22:85 "Beton og frost" Nordisk Workshop okt. 1984	" 95,-
" 23:85 "Dansk Betondag 1985"	" 50,-
" 24:85 "Betonelementer - Europæisk udvikl" Møde 18.10.85	" 60,-
" 25:85 "In-situ ikke-destruktiv prøvning" Møde 6.11.1985	" 55,-
" 26:86 "Dansk Betondag 1986"	" 50,-
" 27:86 "Chlorider i armeret beton" Møde 11.12.86	" 55,-
" 28:86 "Luftporestruktur" Møde 22.1.86	" 70,-
" 29:87 "Dårlig beton - hvad nu?" Møde 18+25.3.87	" 70,-
" 30:87 "Store bro- og tunnelprojekter" Møde 26.11.86	" 60,-
" 31:87 "Dansk Betondag 1987"	" 55,-
" 32:88 "Dansk Betondag 1988"	" 60,-
" 33:89 "Dansk Betondag 1989"	" 40,-
" 34:89 "Anvisning for genanvendelsesmaterialer i beton til passiv miljøklasse"	" 30,-
" 35:90 "Anvisning for efterbehandling af beton"	" 30,-
" 36:90 "Dansk Betondag 1990"	" 55,-
Uden nr. Kontroljournaler 1988 - Blanketter m/vejledn.	" 75,-

**Publikationerne kan fås ved skriftlig henvendelse til:
Dansk Ingeniørforening, Mødereklstreringen
Vester Farimagsgade 29, 1780 København V**

ISSN nr. 0106-0406
ISBN nr. 87-87823-29-2
TEKNISK FORLAG A/S KØBENHAVN