

BETONG



GÖTEBORGS UNIVERSITET

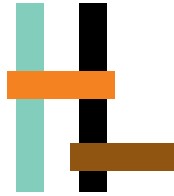
Hantverkslaboratoriet
Magasinsgatan 4
SE-542 21 Mariestad
craftlab@conservation.gu.se
www.gu.se/hantverkslaboratoriet

© Hantverkslaboratoriet 2022
Redaktörer: Sven Olof Ahlberg och Eva Löfgren
Grafisk form: Sara Höglund
Omslagsfoto: Betongfasad, Bergshamra kyrka från 1962. Solna församling i Stockholms stift. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.

Tryck: Exakta Print AB, 2022
Papper: 115 g Arctic matt
Omslag: 300 g Invercote G

ISBN: 978-91-986946-6-6 (tryck)
ISBN: 978-91-986946-7-3 (PDF)

Samverkande parter kring Hantverkslaboratoriet är Grevillis fond, Göteborgs universitet, John Hedins stiftelse, Kulturmiljöforum, Mariestads kommun, Nämnden för hemslöjdsfrågor, Riksantikvarieämbetet, Statens fastighetsverk, Svenska kyrkan, Sveriges hembygdsförbund, FRI (de svenska friluftsmuseernas samarbetsorganisation) samt Västra Götalandsregionen: Regional utveckling och Kultur.



HANTVERKSLABORATORIET

BETONG

material konstruktion åtgärder
skador arkitektur historia

Sven Olof Ahlberg & Eva Löfgren, red.



GÖTEBORGS UNIVERSITET



Förord

Betong är ett mångfasetterat material som ofta beskrivs i kontraster – det är starkt och sprött, lätt och tungt, enformigt och oändligt varierat. En snabb blick på den vanliga trottoarens gångplattor säger något om dess slitstyrka och skörhet. Decennier av slitage nöter knappt den släta ytan med sina tusentals grå nyanser, medan stötar och algpåväxt lätt kan ge plattorna ett skamfilat utseende. Betong finns överallt där det finns människor – i vägar, broar och byggnader, på land och i vattnet och kanske är det just därför den ofta tas för givet.

Den här boken riktar allt ljus på betongen. Boken har vuxit fram i mötet mellan forskare och yrkesverksamma som alla på ett eller annat sätt är inblandade i hanteringen av kulturhistoriskt värdefulla betongkonstruktioner. Behovet av gränsöverskridande kunskap har varit känt länge och tack vare Riksantikvarieämbetets forsknings- och utvecklingsmedel och Hantverkslaboratoriets engagemang, har författarna fått möjlighet att formulera och jämföra sina olika ingångar till materialet. Kunskapsbehovet har varit motorn i projektet. Dessutom har alla inblandade drivits av möjligheten att tillsammans reflektera över frågan hur vi bäst samverkar för att underhålla betongen och dess kvalitéer. Det är ett resurskrävande material som delvis förstör sig självt och har en begränsad teknisk livslängd. Samarbete mellan kompetenser är helt nödvändigt.

Det är redaktörernas förhoppning att boken ska komma till användning i alla de vård- och underhållsprojekt som efterkrigstidens enorma volym av betongbyggnader kräver. Den miljömässigt bästa betongen är den som redan är gjuten och som kan leva vidare genom ett väl genomfört och varsamt underhåll.

Sven Olof Ahlberg & Eva Löfgren

GJUTNING AV PELARE

I arbetet med att rekonstruera Havrekvarnen i Stockholm gjuts en pelare. Just i detta fall används en självkompakterande betong. Materialet är bra både av arbetsmiljöskäl och för att betongen fyller formen bra vid stora mängder armering.
Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.

6 KULTURVÅRD OCH BETONG

- 8 Minnesvård och nymodigheter
- 10 Kulturvård bidrar till hållbar utveckling
- 11 De små insatsernas filosofi
- 17 Hushållning som självklarhet
- 19 Referenser

20 BETONG – EN HISTORIA

- 22 Förindustriella bindemedel
- 23 Det första portlandcementet
- 25 En svensk cementindustri
- 56 Referenser och mer att läsa

58 BETONG ÄR EN BLANDNING

- 60 Cement, ballast och vatten
- 61 Betongens delmaterial – sammansättning och egenskaper
- 76 Betongens egenskaper och hur de utvecklats
- 82 Armering
- 84 Den omgivande miljöns påverkan på konstruktionen
- 92 Alltmer ökade kvalitetskrav
- 95 Betong i bevarad bebyggelse och i framtiden
- 96 Referenser

100 BETONG SOM KONSTRUKTIV OCH ARKITEKTONISK IDÉ

- 102 Betongens möjligheter och svårigheter
- 104 Skulpturalt och högteknologiskt
- 108 Svävande gallerverk
- 111 Modernistiska konstruktioner – Modern movement
- 114 Starkt och uttrycksfullt
- 117 Raffinerad konstruktion ger monolitisk tunnel
- 118 Stampbetong med len hud
- 120 De yttersta millimetrarnas betydelse
- 123 Gjutformad egenart
- 125 Konstruktion för maximal frihet
- 126 Betong ett vardagsmaterial
- 127 Betong som konstruktiv och arkitektonisk idé
- 128 Referenser

130 SPRICKOR I BETONG

- 131 Att läsa och förstå ett sprickmönster
- 138 Allmänt om orsaker bakom sprickor
- 146 Typologi – konstruktioner
- 151 Referenser

152 LAGAR, POLICY OCH STANDARDS INOM KULTURVÅRDEN

- 153 Kulturmiljövårdens lagar
- 155 Internationella överenskommelser
- 156 Standarder för bevarande av kulturarv

160 TILLSTÅNDSBEDÖMNING OCH SKADEMEKANISMER

- 162 Bedömningsstrategier
- 165 Undersökningsmetoder
- 180 Skador på betongkonstruktioner
- 195 Referenser

198 ÅTGÄRDA BETONG

- 199 Ställningstaganden inför åtgärder
- 203 Betongreparationer och reparationsmaterial
- 209 Skydd av ytan
- 215 Armeringsskydd
- 218 Förstärkning
- 220 Referenser

224 KONSERVERA BETONG

- 225 Konservera eller restaurera
- 226 Vilken betong konserveras
- 227 Konservatorns undersökning och tillståndsbedömning
- 227 När konservering inte är lämpligt
- 228 Konservatorns åtgärder, metoder och material
- 229 Exponerad betong
- 243 Dold betong – betong som stomme
- 250 Konservatorns roll
- 250 Referenser

252 INDEX



KULTURVÅRD OCH BETONG

Sven Olof Ahlberg och Eva Löfgren

Den här boken vänder sig till alla som hanterar historiska betongkonstruktioner i sin vardag och som vill vidga sina perspektiv. Den är också tänkt att fungera som läromedel i utbildningar vid universitetet, företag och organisationer. Författarna har olika bakgrund och kompetenser och betraktar betongkonstruktionerna utifrån sina fackspecifika perspektiv. I ett verkligt projekt hade deras kunskap efterfrågats vid olika tidpunkter och det är inte omöjligt att de aldrig hade mötts under arbetets gång. Att sakkunniga sällan träffas riskerar att leda till missförstånd och skepsis – med restaureringsarkitekten Ove Hidemarks ord blir byggnaden lätt ett slagfält i kampen om önskemål och krav som professionerna ställer upp [1]. Ett viktigt syfte med boken är därför att bidra till större förståelse mellan yrkesgrupper och på det sättet uppnå en mer hållbar förvaltning av historiska betongkonstruktioner.

Även om handboks författarnas kompetenser skiljer sig åt, är utgångspunkten gemensam. Den handlar om att låta kunskap, varsamhet och hushållning prägla hanteringen av den befintliga bebyggelsen. I följande kapitel beskrivs detta *kulturvårdande förhållningssätt* och hur det kan omsättas praktiskt i situationer som rör historisk betong.

Betong är ett kompositmaterial med närmast oändligt antal sammansättningar och egenskaper. Det medför ett stort antal frågor som uppstår i samband med restaurering eller renovering: Vilken precision i förundersökningarna kan krävas? Vilka krav på dokumentation behövs? Hur förhåller vi oss till bevarande av ursprungligt material när konstruktionen sprängs sönder inifrån på grund av rostande armering, eller när materialet vittrar och den ursprungliga formen inte längre går att se? Vad kan motivera *rekonstruktion* av hela element eller byggnader? Hur ska vi ställa oss i frågan om estetik och materialets egen kulör, när åldrad armerad betong fortsätter vara tekniskt funktionell men upplevs som misspyrdande? Flera av dessa frågor introduceras i det här kapitlet, för att återkomma och fördjupas i bokens senare delar.

1. Ove Hidemark (1931–2015) beskrev problematiken i fler sammanhang, här i förordet till Berggren, Krister & Humble, Olle (red.) (1990). *Aldre murverksbus: reparation och ombyggnad*. [handbok]. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning, s.10.

RENGÖRING

Den stora lokhallen är en del av Gamla Motala Verkstad. Byggnaden uppfördes 1919 med ett välvt och armerat innertak av betong. År 2022 genomfördes en säkring av det delvis avspjälkade betongskiktet i taket. Rengöringen skapade ett underlag för den senare pålimmade kolfiberförstärkningen, se sidan 17. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.



Figur 1.1. Universitetshuset i Lund invigdes 1882. Fasaden smyckades med antikens alla former och uttrycks-sätt, men materialet var modernt – gjuten betong. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.

MINNESVÅRD OCH NYMODIGHETER

Det kan verka märkligt, men modern betong och kulturminnesvård är på många sätt barn av samma tid. I Sverige började industriellt framställd portlandcementbaserad betong att användas i större omfattning i slutet av 1800-talet, framför allt till grunder och dekorativa element (se Ahlberg). Tidens nya läroverk, museer och lasarett uppfördes med stilelement hämtade från historien, men konstruktionerna visade på ingenjörskonstens framsteg och dekoren var ofta gjuten i betong.

Vid samma tid kom nya typer av byggnader och föremål att betraktas med antikvarisk blick. Landsbygdens levnadssätt ansågs hotat och runt om i Sverige engagerade sig människor för att bevara minnena från den ännu levande bondekulturen. Klappträ, besman och slagor samlades in och katalogiserades av museimän i de nygrundade museerna. Kända personer som Carl Larsson och Ellen Key ondgjorde sig över att masstillverkning ersatte lokala och traditionella hantverk. Svenska Slöjdföreningen bildades för att slå vakt om den inhemska slöjden och 1891 öppnade Skansen, vars ditflyttade stugor skulle visa på den svenska byggnadstraditionens rikedom. Vurmen för det gamla och tron på det nya utvecklades parallellt.

I det traditionella byggandet var hushållningsprincipen fortfarande en självklarhet och den vilade i första hand på ekonomisk rationalitet. Byggnadsmaterial hade ett andrahandsvärde och hela byggnader kunde säljas på auktion, som ett slags materialdepåer, för att användas i nya konstruktioner. Det industrialiserade byggandet som började utvecklas från slutet av 1800-talet innebar en stor förändring. Materialen blev med tiden allt billigare att producera och förlorade successivt sitt andrahandsvärde. Istället var det kostnaden för arbetskraften som ökade. Ibland ersattes ekonomiskt motiverad hushållning av kulturhistoriskt motiverad byggnadsvård. Ett exempel är de svenska medeltida kyrkorna som räddades från rivning kring sekelskiftet 1900. Hade kyrkorna inte bevarats av kulturhistoriska skäl hade de sannolikt sålts och återanvänts som byggnadsmaterial i än större utsträckning än vad som skedde.

Betong tog alltså plats i samhället vid ungefär samma tid som kulturminnesvården och till en början användes materialet både till nya byggnader och vid restaureringar av gamla [2]. Året 1930 brukar markera den armerade, industriellt framställda betongens verkliga genombrott i den svenska allmänhetens medvetande. Vid den närmast osannolikt välbesökta Stockholmsutställningen lyftes betongen fram och exponerades som ett material i sin egen rätt för de nästan fyra miljoner besökarna. Det var ett radikalt grepp och det välkomnades inte av alla. Året därpå fastställde den internationella kongressen för restaureringsarkitekter och tekniker i Aten att moderna material skulle tillåtas vid restaurering av kulturminnen. Armerad betong framhölls särskilt. I Sverige användes betong och cementhaltigt puts- och fogbruk vid restaureringen av bland annat Visby ringmur och fasaderna på Läckö slott.

2. Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments, antagen 1931 vid First International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments

Figur 1.2. Cement var så populärt under första halvan av 1900-talet att det ofta användes vid restaureringar. Fasaden på Läckö slott putsades till exempel med cementhaltigt putsbruk i stället för kalk. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2012.



Figur 1.3. Ikonisk betong från Stockholmsutställningen 1930. Gatubelysningsstolpe av betong med stora opalglober. Foto: Arkdes, ARKM.1976-107-0567, Public domain.



KULTURVÅRD BIDRAR TILL HÅLLBAR UTVECKLING

Kulturvård är ett universitetsämne och forskningsfält som handlar om vården av materiell och imateriell kultur [3]. Det har sina rötter i den äldre kulturminnesvården, som främst ägnade sig åt slott och kyrkor, men också i det sena 1900-talets miljödebatt och intresse för social hållbarhet. Ämnet är brett och omfattar allt från föremålskonservering och bygghantverk till landskapsvård och stadsplanering. Historisk betong är ett av forsknings-

3. Almevik, Gunnar & Christer Gustafsson (2021). *Kulturvård En introduktion*. Bokförlaget Korpen, Göteborg

fältets internationellt etablerade specialområden som samlar forskare och yrkesutövare i särskilda forum. Förhållningssättet som vi för fram i den här boken tar stöd i den forskning som pågår i dessa forum [4].

En utgångspunkt är det amerikanska Getty-institutets *Conservation Principles for Concrete of Cultural Significance* (2020) som tar ett helhetsgrepp på historiska betongkonstruktioner och är resultatet av ett mångårigt forskningsarbete lett av Susan Macdonald. År 2021 publicerade också Getty en engelsk översättning av de franska betongforskarna Myriam Bouichous and Elisabeth Marie-Victoires riktlinjer för rengöring av betong [5].

Vi har också följt arbetet som utförts av den internationella kulturvårdsorganisationen ICOMOS och som 2021 resulterade i riktlinjer för bevarande av kulturarv av betong, *The Cádiz Document InnovaConcrete Guidelines for Conservation of Concrete Heritage*. Det är en kort text som listar åtta faktorer för framgångsrikt bevarande av historisk betong. Viktiga utgångspunkter hämtade från den svenska kontexten är Stig Robertssons *Fem pelare – en vägledning för god byggnadsvård* (Riksantikvarieämbetet 2002) som bygger på ett regeringsuppdrag [6]. Den som är van att arbeta utifrån Robertssons pelare kommer direkt känna igen sig här.

Boken knyter också an till gällande lagstiftning och standarder och till den politiska debatten om hållbarhet. Än så länge har kulturvård och miljöarbete inte mötts på allvar, men omställningen av det svenska samhället till cirkulär ekonomi kommer på sikt att förändra situationen. Frågan om byggavfall är ett exempel som visar på möjligheten att göra gemensam sak. Vid sidan av gruvindustrin är byggbranschen samhällets största avfallsproducent [7]. Hittills har de politiska åtgärdsförslagen handlat mer om att förbättra avfallshanteringen än att minska avfallsmängden genom underhåll av det befintliga eller återbruk i nya former av redan producerat byggmaterial. I boken visar vi att det kulturvårdande förhållningssättet går i linje med de globala målen och att det dessutom kan tillämpas på byggnader och föremål av betong.

Exemplen vi kommer ta upp handlar främst om byggnader och föremål som definierats som estetiskt eller kulturhistoriskt värdefulla. Majoriteten av betongbyggnaderna i Sverige är inte klassade som värdefulla, även om många av dem har stora kvalitéer. Vårt mål är att boken bidrar till större eftertänksamhet också vid hanteringen av dessa byggnader.

DE SMÅ INSATSERNAS FILOSOFI

Det kulturvårdande förhållningssättet har som devis *mesta möjliga bevarande med minsta möjliga ingrepp*. Bevarande i det här sammanhanget innebär att byggnaden eller föremålet bibehålles och fortsätter att fylla en funktion. Ingreppen bör vara så små som möjligt i syfte att spara på materiella och mänskliga resurser och värna om befintliga kvalitéer. Det kan också

4. Se Macdonald, S. och Gonçalves APA (2020) *Conservation Principles for Concrete of Cultural Significance* och Custance-Baker et als. (2015). *Conserving Concrete Heritage. An annotated bibliography*, båda The Getty Conservation Institute; ICOMOS Charter (2003). *Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage* 2003; Docomomo "Concrete and modernism Technology and conservation" *Preservation Technology Dossier* 14-2018 Bussell, M.N. (2007). Conservation of concrete and reinforced concrete, *Structures and Construction in Historic Building Conservation*, (ed.) Forsyth, Oxford: Blackwell

5. Bouichous, Myriam och Elisabeth Marie-Victoire (2009) *Le nettoyage des bétons anciens: Guide des techniques et aide à la décision*. CPP, Paris

6. I regleringsbrevet 1999 anges att "Riksantikvarieämbetet skall föreslå och förankra generella principer för byggnadsvården inom kulturmiljösektorn. Riksantikvarieämbetet skall vara drivande i arbetet för att höja kvaliteten på statens insatser inom byggnadsvårdens område."

7. IVL Svenska Miljöinstitutet (2018) *Cirkulär ekonomi i byggbranschen Sammanfattande översikt av forskningsläget och goda exempel*. Rapport C338, genomförd på uppdrag av Kommittén för modernare byggregler, s.8; Åfreds, Johanna (2020). Nya regler ska minska avfall *Byggindustrin*, 5 mars 2020

konstateras att ju färre ingrepp desto mindre risk att rubba byggnadens tekniska funktion. Alla hus, men i synnerhet gamla hus är komplexa system. Förändringar i en del kan få oväntade och vittgående konsekvenser i en annan.

Vad mesta möjliga bevarande med minsta möjliga ingrepp innebär måste avgöras utifrån varje objekts unika förutsättningar. Vi framhåller fem handlingsprinciper i beslutsprocessen, samtliga anknyter till gällande lagstiftning och praxis, men har getts en delvis annan betydelse i det här sammanhanget.

- i. Kunskap föregår handling
- ii. Dokumentation: före–under–efter
- iii. Varsamhet om material och form i alla skeden av processen
- iv. Hänsyn till de historiska lagren – inte bara till slutresultatets yta
- v. Nya material och metoder skadar inte den äldsta konstruktionen.

I. KUNSKAP FÖREGÅR HANDLING

Oavsett om det är ett parkeringshus, ett konstverk, eller en enkel stödmur som står inför åtgärder krävs kunskap om objektet för att kunna fatta rätt beslut om insatsernas art och omfattning. Kunskapsunderlag krävs också för att kunna bedöma de troliga konsekvenserna av insatserna. Ibland finns tillräcklig kunskap för att gå vidare med planeringen av åtgärderna, ibland behövs ytterligare undersökningar.

De flesta gamla hus har byggts om och till, reparerats och restaurerats många gånger sedan byggåret. Att klarlägga förändringarna kan vara helt avgörande för vilka åtgärder som är möjliga och lämpliga att vidta. När det gäller byggnader som definierats som kulturhistoriskt värdefulla finns dessutom andra hänsyn att ta och lagstiftning att följa.

En *antikvarisk förundersökning* krävs när kommunens byggnadsnämnd bedömer att det inte finns tillräcklig kunskap om byggnaden, eller om den föreslagna åtgärdens konsekvenser för byggnadens kulturhistoriska värden, enligt Boverkets byggregler. Kunskapen behöver nämnden för att ta ställning till om plan- och bygglagens krav på varsamhet uppfylls och förvanskingsförbudet tillgodoses [8].

Enligt Boverket ska den antikvariska undersökningen ”tydliggöra byggnadens kulturvärden, kvalitéer och karaktärsegenskaper” och peka på så kallade *värdebärare* [9]. Begreppet syftar på de delar eller egenskaper som särskilt bidrar till att göra objektet värdefullt. I betongsammanhang kan det exempelvis handla om ytstruktur, konstruktion eller detaljutformning. En konsekvensbeskrivning bör också ingå, som anger hur plan- och bygglagens varsamhetskrav tillgodoses och hur avvägningar gentemot andra grundläggande tekniska egenskapskrav har skett. Utifrån konsekvensbeskrivningen bedömer byggnadsnämnden om de gjorda avvägningarna kan

8. Plan- och bygglag (2010:900)

9. Boverket Kunskapsbanken <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/teman/kulturvarden/kulturvarden-i-plan-och-bygglagen/lov-byggande-och-kulturvarden/kontroll-av-kulturvarden/> Hämtat 2021-10-20

anses tillgodose lagens krav.

Historiska fakta kan ge grundläggande insikter om objektet. Hur och när byggnaden uppfördes och vilka arkitektoniska element som ger byggnaden dess särprägel är exempel på frågor som den antikvariska förundersökningen besvarar. Utöver kraven som Boverket ställer finns annan information om historiska förhållanden som också bör ingå i kunskapsunderlaget. I arkiven kan finnas uppgifter om konstruktion, material och förändringar sedan byggåret, vilka kan ge viktiga ledtrådar till nutida problem. Teknisk kunskap är tidsbunden och det är inte säkert att en yrkesperson utbildad i dagens byggnadsteknik förstår en hundraårig konstruktion.

Befintliga byggnadshistoriska redogörelser behöver ofta kompletteras för att besvara de frågor som det specifika projektet kräver. Det är inte ovanligt att de saknar hänvisningar till ritningar och byggnadsprogram, inte minst gäller det sentida tillägg och ombyggnader. Det är också vanligt att byggnadshistoriska undersökningar behöver kompletteras med uppgifter om särskilda tillverkningsmetoder och materialsammansättningar. De går inte alltid att få fram, men lika ofta har frågorna aldrig ställts och informationen inte efterfrågats. Svårigheter med tolkning och bedömning av äldre fakta är ytterligare ett problem. Många av de produkter och lösningar som användes under det tidiga betongbyggandet, eller vid tekniksprången, var mycket kortlivade och sparsamt dokumenterade. Det förekom dessutom stora geografiska variationer kopplade till råvaror på respektive plats, logistik och entreprenörernas kunskap.

När omfattande utredningar, projekteringar och beräkningar genererar ny kunskap om äldre förhållanden, oavsett art, kan det ibland vara svårt att förmedla informationen till de olika yrkesgrupperna. Inte sällan bygger privata aktörer kunskapsbanker som hålls inom projekten och därmed blir svårtillgängliga för allmänheten och efterkommande generationer. Forskningen i Sverige inom det historiska betongområdet är av mycket liten omfattning och för den intresserade är det nödvändigt att vända sig till den internationella kunskapssenen.

ii. DOKUMENTATION: FÖRE-UNDER-EFTER

Systematisk dokumentation av åtgärderna som vidtas underlättar för nästkommande generationers arbete för att bevara med minsta möjliga ingrepp. Det gäller oavsett om åtgärderna görs på en timmerstuga eller en betongbyggnad. Dokumentation gör det också möjligt att i ett kortare tidsperspektiv utvärdera beslut och justera dåliga lösningar.

Utförlig information om insatserna, deras omfattning, material och metoder, ska alltid ingå i dokumentationen. Villaägaren tar före- och efterbilder och i bästa fall många bilder på arbetets alla steg däremellan. Förundersökningsrapporter, projekteringshandlingar och slutbesiktningssprotokoll fungerar som dokumentation i större projekt. Mycket skulle vinnas på att

Figur 1.4. Många gånger saknas detaljerad dokumentation av utförandet. Då kan det behövas en del försök för att hitta passande ballast, kulör och ytfinish etcetera. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2017.





Figur 1.5. Gjutformar och spår efter dem i betongen kan ge värdefulla teknikhistoriska ledtrådar till hur en byggnad uppförts. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.

också dokumentera det operativa arbetets kritiska moment, inte minst vid utvärdering av resultatet på längre sikt.

Förutom dokumentation av insatserna bör finnas en noggrann redogörelse för förhållningssättet som har styrt de många besluten. Särskilt viktigt är det att beskriva de beslutsgrunder, som inte enbart är av teknisk natur. Estetik och upplevelse, samspel med omgivande bebyggelse är exempel på aspekter som åldras och glöms bort. När det är dags för nästa restaurering kan vissa lösningar eller tillvägagångssätt framstå som obegripliga.

Betongen är ett kompositmaterial med oändliga variationer. Förutom ritningar, produktbeskrivningar och delar av utbytt originalmaterial är det av stort värde att kunna spara fysiska delar av konstruktionen på plats såsom gjutformar och provkroppar. Denna typ av objekt kan visa sig avgörande för utvärderingen över tid av gjorda insatser och bilda underlag för kommande projekteringar. Ett drömscenario är att hitta gjutformar till fasaddekorationer i en källare eller på en vind. Formarnas konstruktion och spår efter gjutningarna kan tillsammans säga avsevärt mycket mer än en teknisk beskrivning från tiden. Eftersom den tekniska utvecklingen inom analysområdet är snabb, kan tillgängliga delar av äldre konstruktioner dessutom utgöra ett forskningsbart material som inte ska föraktas.

iii. VARSAMHET OM MATERIAL OCH FORM I ALLA SKEDEN AV PROCESSEN

Att betong har varit ett förhållandevis lättillgängligt material innebär att många betongkonstruktioner betraktas och behandlas som om deras enda kvalitet är att de en gång var enkla att producera. Det påverkar och försvårar hanteringen av dem idag.

Ändringar av en byggnad ska enligt plan- och bygglagen alltid utföras varsamt. Hänsyn ska tas till byggnadens karaktärsdrag och dess tekniska, historiska, kulturhistoriska, miljömässiga och konstnärliga värden ska tas till vara. [10]. Kravet gäller alla byggnader och deras karaktärsdrag, inte bara de kulturhistoriska.

Varsamhetskravet påverkas av rådande estetiska normer. Även om det är tänkt att bromsa beslut som bara grundar sig på smak, spelar samtida trender stor roll för vad som bedöms vara av värde. Välbyggd arkitektur vars karaktärsdrag inte uppskattas av samtiden riskerar alltid att förvanskas. ”Ändring” enligt lagen gäller dessutom bara konstruktion, funktion, utseende och kulturhistoriskt värde. I praktiken innebär det att material och byggnadsdelar ofta ersätts, trots att de inte är uttjänta.

Varsamhet kräver att vi hanterar befintlig bebyggelse både som en materiell resurs vi är skyldiga att hushålla med, och utifrån dess kulturvärden. Det kulturvårdande förhållningssättet innebär att varsamheten utgår från en generell hushållningsprincip som också gäller vid vård- och underhållsåtgärder.

Att tillämpa varsamhet i alla skeden av processen ställer stora krav på samordning och kommunikation. I ett projekt med många inblandade aktörer måste alla yrkesgrupper sträva efter att göra minsta möjliga ingrepp i det befintliga. Beroende på projektets art innebär det olika utmaningar för olika yrkesgrupper.

Standarder hamnar ofta i klinch, vilket Boverket tar upp i sina allmänna

10. Plan- och bygglag (2010:900) 8 kap. 17§

Figur 1.6. Råa betongytor blir lätt fläckiga som här på Valtschielbrücke i schweiziska Donat efter en reparation 2013. Bron konstruerades av Robert Maillart och stod färdig 1926. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.



råd. Varsamhetskravet kan aldrig förhindra att tekniska egenskapskrav tillgodoses, men det kan påverka valet av åtgärder. I vissa fall kan även avsteg göras om synnerliga och välmotiverade skäl föreligger.

Uttjänta delar eller material kan ibland vara svåra ersätta och det kräver särskild samordning. Vilka ersättningsmaterial och metoder kan anses vara kulturhistoriskt, estetiskt och samtidigt tekniskt acceptabla? Hur påverkas upplevelsen av arkitekturen och miljöerna i stort, och vilka livslängdskonsekvenser får dessa avvägningar? Är det till exempel en bra lösning att måla reparerade betongytor som upplevs som fläckiga, eller ska man acceptera en viss färgskiftning för att det är ett dokument i sig? Ett färgskikt kommer kräva underhåll, det döljer de åldrade och naturligt vittrade betongytorna och ger ett ”dött” intryck väsensskilt från de naturliga variationer som alltid finns hos gamla betongkonstruktioner.

IV. HÄNSYN TILL DE HISTORISKA LAGREN

– INTE BARA TILL SLUTRESULTATETS YTA

I arbetet med kulturhistoriskt värdefulla byggnader och anläggningar är det väsentligt att förhålla sig medvetet inte enbart till den ursprungliga konstruktionen, utan också till tilläggen. I betongbyggnader är dessa oftast fullt synliga och därmed lätta att identifiera.

När nyare betongdelar är integrerade i äldre konstruktioner, är det viktigt att dels förstå orsakerna till det nya materialets tillkomst, dels förstå det statiska verkningssättet i strukturen. Tilläggen kan vara avgörande för hållfastheten, påverka möjligheten till en viss funktion eller ge en viss estetisk kvalitet.

Ett mycket vanligt spår av historiska händelser och förändringar är avsaknaden av material, det vill säga ingrepp som gjorts över tid i stommar och fasader. Detta måste beaktas redan i projekteringen och i vissa fall är orsakerna till denna typ av förändringar bärare av information som kan vara av stort värde.

Detsamma gäller adderingar av volymer där det huvudsakliga materialet är betong. I dessa fall kan det finnas exempel på flera generationer av betongbyggande på liten yta. Lagren vittnar om den tekniska utvecklingen, formbyggandet, estetiska preferenser och gjutteknik. Även äldre betonglagningar berättar något om de krav, ställningstaganden, hantverksmetoder och material som använts under olika tider. Om lagren måste avlägsnas är det viktigt att ägna dem noggrann analys och dokumentation.

Det är inte givet att antikvarier eller konservatorer är de som lättast hanterar de historiska lagren. En restaurering kan till exempel innebära krav på att sentida tillägg och ytskikt tas bort för att låta byggnaden framstå i sin ursprungliga version. Förutom att misshushålla med resurser kan sådana ingrepp försämra både funktionen och konstruktionen.

V. NYA MATERIAL OCH METODER SKADAR INTE DEN ÄLDSTA KONSTRUKTIONEN

För att uppnå största möjliga bevarande med minsta möjliga ingrepp krävs att nytillförda material, och moderna metoder inte skadar den äldsta konstruktionen. Det här låter sig lätt sägas, men kan vara svårt att tillämpa i praktiken. Reversibilitet är i dessa sammanhang ett nyckelord.

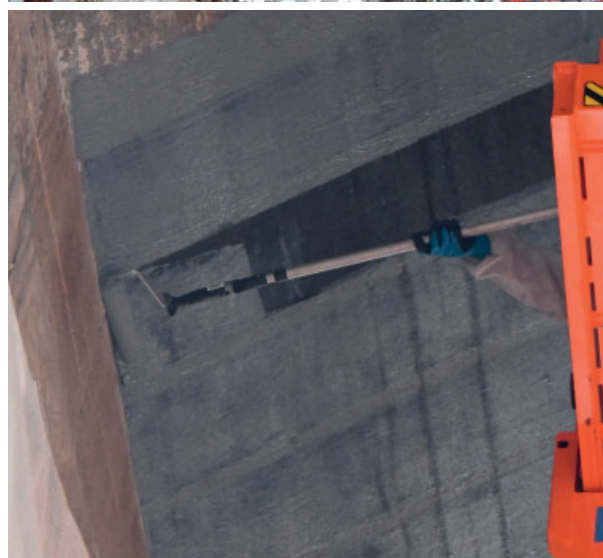
Betonglagningsprodukter, impregnering, hydrofobering med flera metoder är inte reversibla. De kan dock vara tekniskt motiverade, vilket gör att de trots allt kan komma ifråga. Det måste genomföras med stor försiktighet och endast efter noggrann analys av konsekvenserna. Materialet kan åldras annorlunda, bli svårt att åtgärda i framtiden eller kräva regelbundet och kostsamt underhåll.

Ett typexempel är förstärkning av lastbärande strukturer genom tillförsel av fiberarmerade polymerer (FRP). I praktiken limmas syntetfibrer, i form av kolfiberband eller stavar, inuti eller på betongytorna i till exempel en betongbalk, vilket förbättrar den lastupptagande förmågan. Ingreppet är kanske tekniskt nödvändigt för att konstruktionen ska hålla, men medför estetiska problem. Ingreppen syns och den cementslamma eller puts som läggs på för att kapsla in förstärkningarna ger ett helt nytt, vanligen misspydande utseende. I vissa fall kan dock även kulturhistoriskt viktiga strukturer behöva förstärkas på detta vis, men då krävs en noggrann analys och projektering.

HUSHÅLLNING SOM SJÄLVKLARHET

Bland yrkesverksamma som sysslar med historiska byggnader har betong länge varit ett kontroversiellt material, av olika skäl i olika perioder. Ett exempel är Uppsala domkyrkas renovering i slutet av 1800-talet och arkitekten Helgo Zettervalls betongtillägg som först ansågs rationella och i enlighet med modern teknisk standard, för att därefter helt rensas bort. Betonganvändning blev där en fråga om restaureringsideologi. Ett annat exempel är 1990-talets debatt om färgsättningen av de grå betongfasaderna i stockholmförorten Skärholmen. De boendes önskan om färg bestreds av Skönhetsrådet och Stadsmuseet som förespråkade att betongen bevarades grå av kulturhistoriska skäl. Här hamnade betongen i en debatt om stadsplanering och makt.

Mer än om estetik och kulturhistoria handlar dagens



Figur 1.7. Efter att betongtaket i Gamla Motala verkstads lokverkstad hade rengjorts, förstärktes betongen med remsor av pålimmad kolfiberväv, en icke reversibel åtgärd. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.

betongdebatt om materialets klimatpåverkan, och då främst cementets. Bara cementproduktionen står för närmare 5% av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser. När cement var dyrt i början av 1900-talet valde man ofta att dra ner på bindemedel i de betongdelar där hög cementhalt inte var konstruktivt nödvändigt. Så småningom blev istället tidsåtgången den kostnadsdrivande faktorn och att bygga snabbt blev viktigare än att spara på cement. Idag är vi tillbaka i en situation där vi vill hushålla med cement, nu av miljöskäl. Genom förbättrad byggplanering, receptoptimering och alternativa bindemedel görs försök att minska cementanvändningen där det är möjligt. I kombination med återbruk av uttjänt betong och ökad användning av andra material är målet att under en tioårsperiod halvera utsläppen från cementindustrin [11].

Som material betraktat, skriver arkitekturhistorikern Adrian Forty, är betong alltid både och. Det är både modernt och bakåtsträvande, både naturligt och konstgjort, globalt och lokalt, simpelt och besjälat [12]. I många sammanhang används rå betong för att illustrera förfall och otrygghet – som om materialet i sig markerar bristande kvalitet. I andra hyllas betongen för sina sällsamma egenskaper och de fantastiska möjligheter som de innebär. Oavsett hur vi väljer att beskriva materialet kan konstateras att stora delar av bebyggelsen vi har omkring oss består av betongkonstruktioner. Den befintliga betongen utgör en väldig samhällelig resurs som vi behöver förstå och underhålla om vi menar allvar med våra miljömål.

11. Pädam, Sirje, Daniel Balian, Stefan Uppenberg, Eva Wadström (2021). *Klimatneutral betong genom kravställning. Hinder och möjligheter* Rapport 6967, februari 2021 Naturvårdsverket

12. Forty, Adrian (2016). *Concrete and culture: a material history*, First paperback edition, Reaktion Books, London

Figur 1.8. Studentbostäderna i Kungshamra byggdes 1965-1967. Hårdgjorda markytor och fasader av rå betong karakteriserar området. Kulturhistoriskt värdefullt eller bara grått, åsikterna går isär. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2020.



REFERENSER

- Ahlberg, Sven Olof (2012). *Bevara betongen*. Stockholm: Svensk byggtjänst
- Ahlberg, Sven Olof (2015). *Att underhålla det underhållsfria*. *Byggnadskultur*. 2015:1, s. 32-36
- Ahlberg, Sven Olof & Nilsson-Tarkkanen, Ing-Marie (2007). Modernt kulturarv i vittrande betong. *Byggnadskultur* 2007:4, s. 28-31
- Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments*, 1931, First International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments
- Berggren, Krister & Humble, Olle (red.) (1990). *Äldre murverksbus: reparation och ombyggnad*. [handbok]. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning
- Bouchous, Myriam och Elisabeth Marie-Victoire (2009). *Le nettoyage des bétons anciens: Guide de techniques et aide à la décision*. CPP Paris
- Bussell, Michael N. (2007). Conservation of concrete and reinforced concrete. In *Structures and Construction in Historic Building Conservation*, edited by Michael Forsyth, s. 192-210. Historic Building Conservation. Oxford: Blackwell
- Custance-Baker, Alice, Gina Crevello, Susan Macdonald, Kyle Normandin (2015). *Conserving Concrete Heritage. An annotated bibliography*. The Getty Conservation Institute
- Forty, Adrian (2016). *Concrete and culture: a material history*. First paperback edition London: Reaktion Books
- ICOMOS International Scientific Committee on Twentieth Century Heritage (ISC20C) (2021). *The Cádiz Document InnovaConcrete Guidelines for Conservation of Concrete Heritage*
- IVL Svenska Miljöinstitutet (2018). *Cirkulär ekonomi i byggbranschen Sammanfattande översikt av forskningsläget och goda exempel*. Rapport C338, genomförd på uppdrag av Kommittén för modernare byggregler
- Macdonald, Susan (red.) (2003). *Concrete building pathology*. Oxford: Blackwell Science
- Macdonald, Susan och Gonçalves Ana Paula Arato (2020) *Conservation Principles for Concrete of Cultural Significance*. Getty Conservation Institute
- Pädam, Sirje, Daniel Balian, Stefan Uppenber, Eva Wadström (2021). *Klimatneutral betong genom kravställning. Hinder och möjligheter*. Rapport 6967, feb 2021 Naturvårdsverket
- Robertsson, Stig (2002). *Fem pelare – en vägledning för god byggnadsvård*, Riksantikvarieämbetet
- Åfreds, Johanna (2020). Nya regler ska minska avfall. *Byggindustrin*, 5 mars 2020



BETONG – EN HISTORIA

Sven Olof Ahlberg

Bakgrunden till varför betong blev ett av världens absolut vanligaste material låter sig inte lätt beskrivas. Inte nog med att själva begreppet "betong" omfattar ett intrikat kompositmaterial med mycket varierande sammansättning, ursprung och användningsområde. Det har dessutom haft skiftande betydelse på olika geografiska platser och över tid. För att beskrivningen av materialet inte ska bli allt för komplex krävs avgränsningar och tydliga definitioner. I det här kapitlet hanteras betong ur industrisamhällets synvinkel, kapitlet tar därmed sin utgångspunkt i det portlandcementbaserade materialet och berör inte mer än ytligt den rika flora av kalkbaserade betongvarianter, som använts under tusentals år fram till mitten av 1800-talet. För dagens yrkesverksamma hantverkare, antikvarier, arkitekter och konservatorer är det dock väsentligt att komma ihåg att tidsgränserna för när en variant av betong har använts är ytterst varierande. Därför krävs nästan alltid avancerade analyser av det aktuella materialet för att veta vad man egentligen kommer att hantera i sitt projekt.

Hur den moderna betongen kom att utvecklas kräver dock en kort introduktion till de viktigaste förindustriella stegen i främst utvecklingen av bindemedlet cement. I både svensk och internationell litteratur har betongens och cementets historia beskrivits i ett otal publikationer som på olika sätt går igenom de viktigaste utvecklingsstegen. Syftet med det här kapitlet är att genom presentation av historiska illustrationer och fotografier uppmärksamma läsaren på ett antal nyckelbegrepp och tydliga utvecklingssteg genom de drygt 170 år som materialet har använts i Sverige. Urvalet är baserat på både rent tekniska steg som standardisering, tillverkningsmetoder, provning och försöksverksamhet samt på stora avgörande moment där formning, armering, vibrering, beredning och gjutning presenteras. Det historiska bildmaterialet kompletteras i vissa fall med nytagna bilder som visar hur konstruktionerna ser ut idag. Kapitlet är i huvudsak kronologiskt upplagd och ger en relief till de kommande kapitlen samt är ett ramverk för förståelsen av materialets komplexitet och stora variation över tid.

TRÅNGT I FORMEN

En ögonblicksbild inifrån gjutformen vid uppförandet av järnvägsbron över Öre älv vid Tallberg 1919. Betongen matades ned i formen via den träränna som syns i mitten av bilden och fördelades därefter med hjälp av skyffel till alla skrymslen och vrår. Armeringen består i huvudsak av gles men grov huvudarmering i över- och underkant av det blivande valvet. Notera förmannens klädsel med stärkkrage och slips. Foto: Ditigaltmuseum JvmKDAE10344.



Alla Gudars Tempel

Figur 2.1. I nästan alla framställningar som behandlar betongens historia finns Pantheon i Rom med som ett av de färmsta exemplen på romersk betongbyggnadskonst. Byggnaden uppfördes år 119 e.Kr. och var ursprungligen ett tempel, senare ombyggt i flera omgångar till det nuvarande utseendet. Den imponerande kupolen med 43,3 meters spännvidd skapar ett spektakulärt rum som inte lämnar någon besökare oberörd. Byggnaden överträffades inte i storlek av någon annan betongkupol förrän bygget av den armerade Jahrhunderthalle i Breslau. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2017.

Kapitlet inleds med ett kort avsnitt om bakgrunden till bindemedlet portlandcement, följt av det tidiga industriellt framställda cementets utveckling och en beskrivning av den betong som görs av dessa bindemedel. Därefter sker en presentation av nyckelbegrepp inom de olika metoder som använts över tid. Här kommer de olika konstruktiva aspekterna in med utvecklingen av bärande system och armeringsteknikens historia. Mekaniseringen av betonggjutningen är en annan viktig aspekt som redovisas genom bildexempel från arbetsplatserna. I detta sammanhang beskrivs även de olika yrkeskategorier som var verksamma och hur arbetsförhållandena har förändrats. Exempelen är till största delen hämtade från Sverige men med vissa internationella inslag.

FÖRINDUSTRIELLA BINDEMEDEL

Den kalkbaserade betongens ursprung brukar vanligtvis härledas till de antika kulturerna runt Medelhavet med den första och enda kända skriftliga källan i Marcus Vitruvius Pollio (81 f.Kr–15 f.Kr.) *Tio böcker om arkitektur*, men har sannolikt även funnits i både Asien och Sydamerika långt före dess. Det bindemedel som beskrivs av Vitruvius bestod av bränd kalk med olika typer av tillsatser, främst vulkaniska bergarter till exempel Santorin, Puzzolan och Trass men även malt tegel. I och med det Västromerska rikets fall 476 e.Kr. försvann mycket av den kunskap som fanns inom ingenjörskonsten, och så även allt som hängde ihop med konsten att bygga i concretum, som var det romerska namnet på den hydrauliska kalken. Inte förrän renässansmannen Fra Giovanni Giocondo (1435–1515) gav ut *De Architectura* i en illustrerad och bearbetad utgåva lyftes på nytt den romerska byggtekniken fram i ljuset. Han använde sig av de romerska recepten för att blanda bruk till uppförandet av stöden till bron Pont Notre Dame över Seine i Paris (1500–1512), vilket kom att bli det första tillfället på ca 1 000 år som dessa bindemedel kom till användning.

DÅLIG PRECISION I TILLVERKNINGEN

I den här handboken ingår ingen genomgripande beskrivning av dessa historiska material, men det finns trots allt en indirekt koppling till de forskningsinsatser och fullskaleexperiment som genomfördes i Europa under förspelet till industrialismen. Utvecklingen av dessa bindemedel är starkt förknippade med ett antal ingenjörer och entreprenörer som kom att påverka både den teoretiska och praktiska utvecklingen inom väg- och vattenbyggandet. Det är dock viktigt att komma ihåg att förhållandena var mycket primitiva, råvarorna starkt varierande och metoderna för att kontrollera material, metod och resultat var ytterst begränsade. Med andra ord var det sällan som ett visst bindemedel kunde tillverkas med precision gång efter gång. Detta påverkade i sin tur hur konstruktionerna åldrades och hur väl de

fungerade för sina syften. I många fall fanns till och med flera olika material i samma konstruktion, vilket gör det svårt att idag hitta ersättningsmaterial vid till exempel restureringar. Åtskillig både svensk och internationell litteratur behandlar denna tidiga protoindustriella utveckling som ofta domineras av ett antal föregångsmän. Här lämnas de flesta av dessa utanför berättelsen, men för den intresserade finns åtskilligt att ta del av i den litteratur som listas sist i kapitlet.

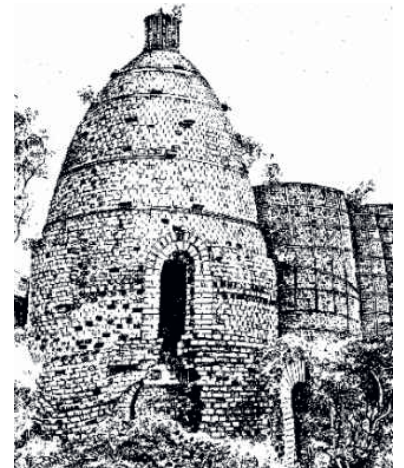
DET FÖRSTA PORTLANDCEMENTET

Engelsmannen Joseph Aspdin (1779–1855) brukar anges som portlandcementets fader, vilket är riktigt om man enbart går på namnet på den produkt han patenterade redan 1824. Genom bränning av krossad kalk och lermineral som maldes efter bränning framställde han ett cement som var mycket snabbhärdande och främst kom att användas till stuccoarbeten och olika typer av bruk. Bindemedlet fick en kulör som kraftigt påminde om den i England sedan länge väletablerade och ansedda byggnadsstenen från Portland i Dorset på engelska sydkusten. Namnet var med andra ord ett rent marknadsföringsgrepp och hade egentligen inget att göra rent tillverkningsmässigt med det portlandcement som framställs idag. Josephs andre son William Aspdin (1815–1864) fick 1829 anställning i sin fars företag men lämnade verksamheten 1843 då han startade en egen cementfabrik utanför London efter ett familjebråk. Han utvecklade sin fars recept och ökade bland annat kalkinnehållet i cementet och brände råvarorna vid högre temperatur. Han försökte att hålla verksamheten hemlig och tog aldrig ut något patent på sina förbättringar men cementet är allmänt betraktat det första portlandcement som konstant innehöll cementmineralet Alit.

BRÄNNING TILL SINTRING

Det var istället ytterligare en engelsman Isaac Charles Johnson (1811–1911) som genom praktiska försök lyckades bränna samma typ av råvaror (kalksten och lermineral) som Aspdin, men vid en så hög temperatur 1 450 °C att materialet sintrade. Upptäckten, att det framställda bindemedlet fick helt andra egenskaper än Aspdins produkt, ledde 1844 till ett patent som lade grunden till all efterföljande portlandcementtillverkning och då i ordets nuvarande mening. Namnet portlandcement användes även framöver trots att det egentligen handlade om två skilda produkter.

I mitten av 1800-talet råder en situation där det första egentliga portlandcementet kommer ut på marknaden från de på kontinenten och i England uppförda cementfabrikerna, samtidigt som en uppsjö av naturligt hydrauliska kalkbaserade bindemedel finns tillgängliga. Förvirringen var med andra ord stor när det gällde att bedöma vilka bindemedel som var lämpliga för



Ur Aspdins patent:

Figur 2.2. "I take a specific quantity of limestone, such as that generally used for making or repairing roads, after it is reduced to a puddle or powder; but if I cannot procure a sufficient quantity of the above from the roads, I obtain the limestone itself and I cause the puddle or powder or the limestone, as the case may be, to be calcined. I then take a specific quantity of argillaceous earth or clay »and mix them with water to a state approaching impalpability, either by manual labor or machinery. After this proceeding I put the above mixture into a slip pan for evaporation, either by the heat of the sun or by submitting it to the action of fire or steam conveyed in flues or pipes under or near the pan, until the water is entirely evaporated. Then I break the said mixture into suitable lumps and calcine them in a furnace similar to a limekiln till the carbonic acid is entirely expelled. The mixture so calcined is to be ground, beat, or rolled to a fine powder and is then in a fit state for making cement or artificial stone. This powder is to be mixed with a sufficient quantity of water to bring it into the consistency of mortar, and thus applied to the purposes wanted".

Oändlig variation av kulörer - en restaureringsteknisk förutsättning

På nästa sida finns en sammanställning över de cementfabriker som funnits i Sverige. Årtalen anger när de var i drift och med tanke på att råvarornas sammansättning är avgörande för både cementets egenskaper och kulörer, är variationsrikedomen närmast oändlig. Detta är viktigt att hålla i minnet då en åtgärd ska genomföras på en äldre konstruktion. Till det stora antalet fabriker kommer även all cement som importerats, vilket ytterligare spär på den rika floran av varianter.

Betong har cirka 30 viktprocent binde-
medel och resten i princip ballast.
Kulören på den färdiga betongen är
med andra ord även extremt avhängig
ballastens textur, gradation och kulör.
Eftersom nästan alla av de grustag med
naturligt rundade sand, grus och sten-
partiklar som har använts numera är
stängda, går det inte heller att utan
vidare få tag på ersättningsballast som
stämmer med ursprungsmaterialet.
Istället är man hänvisad till krossat
material, makadam, som har en helt
annan egenskap än naturstensprodukter.

olika typer av konstruktioner. I Sverige framkom ett allt större intresse för de olika produkterna och flera ingenjörer sändes ut på resor till bland annat England, Tyskland och Frankrike för att försöka lista ut vad som tillverkades, vilka egenskaper de olika bindemedlen hade, hur de kunde användas i betong och olika typer av bruksblandningar samt vilken typ av produkter och anläggningar som uppfördes. Intresset för vad som skedde i utlandet hade visserligen redan funnits under de tidigare decennierna då svenska ingenjörer och vetenskapsmän inhämtade kunskap för att bättre kunna uppföra kanaler, slussar och vattendrivna verk – inte minst i Bergslagen.

INDUSTRIN ETABLERAS

Från patentet 1844 som måste räknas som portlandcementets födelseår fram till etableringen av en storskalig cementindustri, tar det enbart ett tiotal år. Fabriker byggs i England under sent 1840-tal, Tysklands första portlandcementfabrik Stettiner Portland-Cement Fabrik uppförs 1852-55 i Stettin i dåvarande Preussen (idag i Polen) och Danmark får sin första fabrik vid Fredens Mølle på Amager redan 1861. Denna anläggning var i drift till 1867 och följdes av fabriker i Ringsted 1868 samt Rødvig 1870. All cement som förbrukades i Sverige importerades från bland annat dessa fabriker fram till 1873-74 då en blygsam tillverkning startades i Lomma.

SKIFTANDE KVALITET

Kvaliteten på det första portlandcementet skiljer sig avsevärt från de produkter som tillverkades under detta namn mot slutet av 1800-talet. Bland annat påverkades slutresultatet av tillgången på kemiskt enhetliga råvaror, varierande förbränningstemperatur i schaktugnarna, noggrannheten vid malning av cementklinkern och inte minst hur cementet skyddades mot fukt under transporter till arbetsplatserna. De första egentliga cementnormerna som styrde tillverkningen och utgjorde en likare för hur kvaliteten på cementet skulle bedömas utarbetas i Tyskland och antogs av Tyska Cementfabrikantföreningen redan 1877. I Sverige kom frågan att diskuteras på ett möte i Ingenjörföreningen i Stockholm redan året efter under rubriken »Om provning av cement och andra byggnadsmaterialier« och de första riktlinjerna för cementproduktion antogs av samma förening år 1881. Dock dröjer det ända till 1910 innan de första svenska normerna för cement fastställdes av Svenska Teknologföreningens avdelning för väg- och vattenbyggnadskonst.



EN SVENSK CEMENTINDUSTRI

Etableringen av en cementindustri i England och på kontinenten följdes noga av de svenska ingenjörerna. Vid ett omtalat framträdande i Svenska Ingenjörsföreningen 1870 redogjorde ingenjören och uppfinnaren Otto Fahnehjelm (1846-1911) för sin studieresa året innan till England och Frankrike. Han studerade alla möjliga varianter av bindemedel, både de traditionella hydrauliska kalkerna, Roman Cement och det nya Portlandcementet. Redogörelsen finns måleriskt publicerad i Ingenjörsföreningens förhandlingar 1870 där han visar på mångfalden av tillverkare i de olika länderna samt vikten av att analysera både råvaror och färdiga produkter för att säkreställa att endast de bästa kvaliteterna kommer till användning. Han ger bland annat exempel på hur de engelska tillverkarna exporterar lägre bränd sekunda portlandcement till Sverige och Ryssland för samma pris som de normalt skulle få för en prima produkt. Förutom presentationen av denna reseberättelse kom han att inta en ledande roll i lokaliseringen och uppförandet av flera cementfabriker i Sverige. Bland annat var han en av huvudingenjörerna bakom Lommafabriken och upprättade många av de ritningar som kärvdes för fabriksbygget. Under åren 1872-74 var han dessutom anställd vid firman Frühling, Michaëlis & Co i Berlin som föreståndare för den tyska cementfabriken i Stettin, vilket gav betydande kunskaper i det praktiska framställandet av portlandcement. Erfarenheterna omsattes i fabriker i Visby (1884), Degerhamn (1888) och Hellekis (1892).

TILLVERKNINGEN ETABLERAS I SKÅNE

Tillverkning av portlandcement i Sverige är starkt koncentrerad till södra delen av landet där berggrunden består av lämplig kalksten och lerhaltig mägersten. Det har redan tidigare nämnts att den första cementfabriken i Sverige etablerades i Lomma 1873 av det då nystartade företaget Skånska Cementaktiebolaget. Fabriken tillkom som en reaktion på den allt större importen av bindemedel och ett antal kapitalstarka interressenter såg här en möjlighet att få avkastning på sina investeringar samtidigt som man fyllde ett behov av cement. Att den första fabriken kom att ligga i Skåne var logiskt med tanke på tillgången på prima råvaror men även på grund av att alla tidiga cementtillverkare i princip hade samma produktionsutrustning som en tegelfabrik, vilket fanns tillgängligt i Lomma. I de första cementfabrikerna tillverkades råtegel av cementråvarorna – uppslammad mald kalksten och

Sveriges Cementfabriker

Sammanlagt har det funnits 15 platser i Sverige där cement har tillverkats under olika lång tid, med varierande råvaror och i olika typer av ugnprocesser. De skiftande förutsättningarna har resulterat i ett närmast oändligt antal varianter av cement – ofta med skiftande kulörer, kemiska egenskaper och kvalitet. Vid åtgärder på historiska betongkonstruktioner är det därför av stor vikt att analysera utgångsmaterialet så att reparationsprodukter, nya bindemedel eller anpassade produkter kan motsvara den ursprungliga betongen. Utöver det svensktillverkade cementet finns även tidvis en omfattande import, som ytterligare komplicerar situationen.

Lomma	1874-1905
Visby	1884-1940
Degerhamn	1888-2019
Limhamn	1890-1978
Hellekis	1892-1978
Maltesholm	1899-1928
Klagshamn	1902-1939
Bromölla	1908-1940
Rute, Valleviken	1916-1933
Skanör	1914-1919
Slite	1919-
Skövde	1925-
Hidinge	1932-1966
Köping	1941-1978
Stora Vika	1949-1980





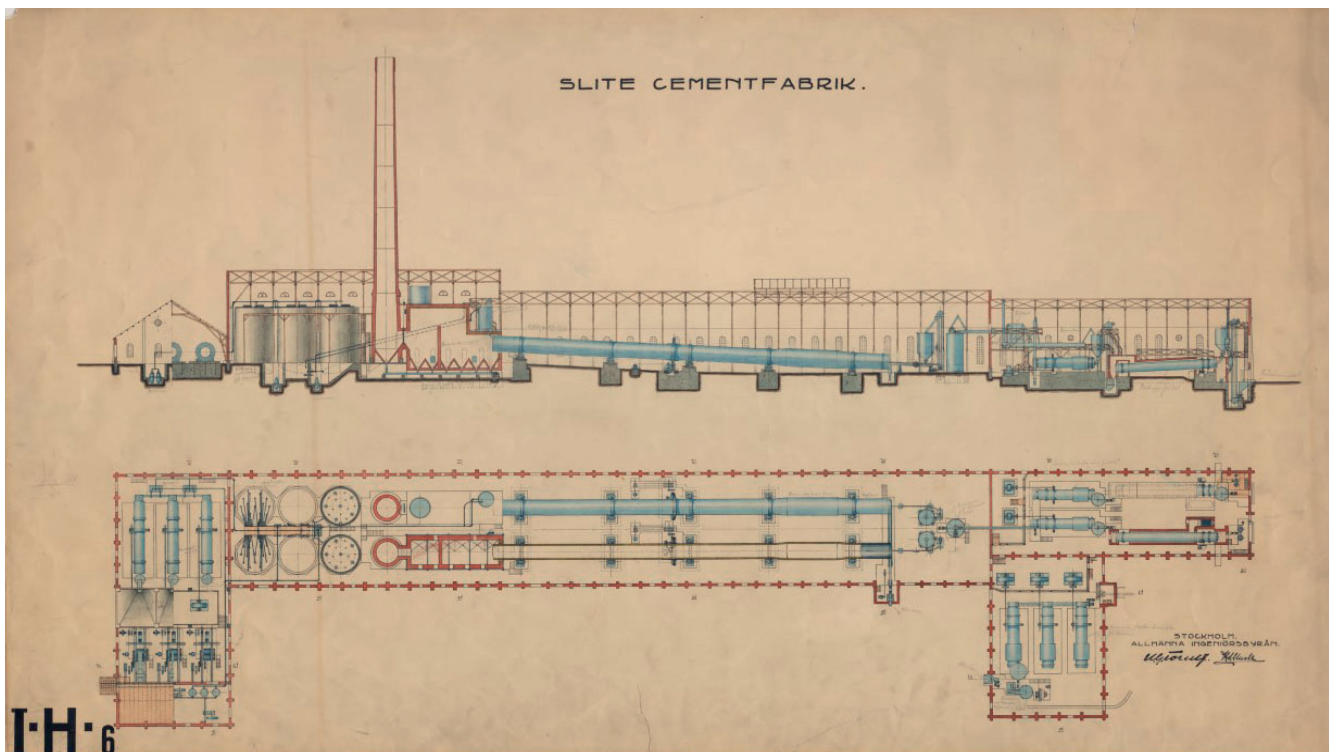
Figur 2.3. Fjorton skorstenar, tät rök, ljusgrått kalkstensmjöl överallt och en miljö som inte alltid var den mest hälsosamma. Så såg omständigheterna ut vid de första cementfabrikerna. Ugnarna eldades med kol och det var inte sällan som de boende i närheten fick all sin uthängda tvätt förorenad av nedfallande sot och damm. Idag har reningstekniken förfinats så långt att nedfall av stoff och utsläpp av svavel i stort sett är helt borta. Bilden visar Skånska Cementaktiefabrikets fabrik i Limhamn. Vykort i privat ägo.

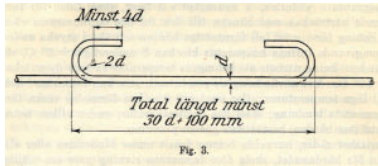
lermineral – på i stort sett samma sätt som praktiserats sedan länge i tegelbruken. Råteget torkades antingen i särskilda ugnar eller i det fria och brändes därefter till sintring, för att sedan krossas och malas. Bränningen skedde till en början satsvis i traditionella schaktugnar av en typ som använts sedan århundraden för tillverkning av bränd kalk. I takt med den tekniska utvecklingen byggdes ugnarna om till kontinuerlig drift, för att därefter successivt ersättas av roterugnar för tillverkning av cement enligt både torr- och våtmetoden. Antalet cementfabriker ökade under slutet av 1800-talet och sammanlagt har det funnits 15 anläggningar för tillverkning av portlandcement i Sverige. Idag återstår två av dessa – Slite (1919) och Skövde (1925). Det stora antalet fabriker är ännu en faktor att räkna med då vi idag ska åtgärda och ta omhand åldrade betongkonstruktioner. Variationen mellan fabrikenas tillverkningsprocesser och råvarusammansättningar gav ett närmast oändligt antal kulörer och egenskaper på det färdigmalda cementet. Lägg därtill den enorma variationsrikedomen i kulör och textur hos ballasten, och bilden blir än mer komplex.

NY UGNS- OCH KVARNTEKNOLOGI

Utvecklingen av ugnstekniken från schaktugnar till roterugnar och introduktionen av krossar samt rörkvarnar eller kulkvarnar medförde en avsevärt högre produktionskapacitet och en bättre kvalitet på cementet. Den första roterugnen patenterades redan 1877 av den engelske ingenjören Thomas Russel Crampton (1816-1888), men utvecklades vidare i flera steg fram till den ugnstyp som fortfarande används än idag. Ett framstående företag var danska F.L. Smidth & Co som introducerade kulkvarnarna för malning av både råvaror och det färdiga cementet. Företaget blev synonymt med hög kvalitet och tillförlitlighet och levererade kompletta ugnslinjer till flera av de svenska cementfabrikerna. Företaget blev även delägare i den danska cementfabriken i Aalborg där man använde produktionen som ett fullskalelaboratorium för utveckling av alla delar av processen.

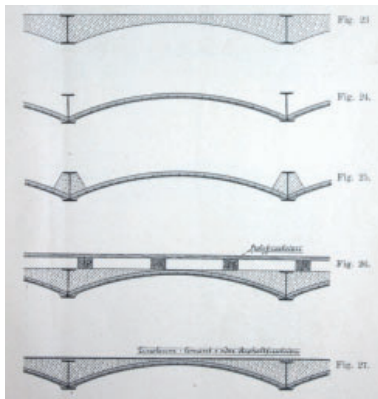
Figur 2.4. Den första cementugnslinjen vid Slite cementfabrik på Gotland togs i drift 1919. Ritningen visar uppställningen av fabriken med råverk, roterugnar och cementverk. I stora drag är det samma moment i en modern cementfabrik, dock med en enormt mer avancerad och förfinad process. Bild från Cementas arkiv, Slite.





Figur 2.5. Illustration som visar hur en armeringsskarv skulle utföras i enlighet med handlingen: Statliga Cement- och Betongbestämmelser 1934.

Figur 2.6. Illustrationen nedan är hämtad ur en katalog för företaget Wayss & Freitag från 1895 och visar olika varianter av valvkonstruktioner för bjälklag. Alla typer har förekommit i Sverige under olika tider och det översta oarmerade bjälklaget var särskilt vanligt. Denna bjälklagstyp kallas ibland felaktigt för Bremervalv, vilket dock alltid har en plan undersida. Korrekt benämning är Berlinervalv eller Berlinerbjälklag.



Figur 2.7. Bilden till höger visar ett Berlinerbjälklag vid tunnelbanestationen Spittelmarkt i Berlin. Stationerna längs den röda linjen ritades av den svenske arkitekten Alfred Grenander och är ett utmärkt exempel på det förra sekelskiftets byggteknik. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.

CEMENT- OCH BETONGNORMER

I Sverige har tillverkningen av cement och betong i olika grad styrts av statligt fastställda normer ända sedan 1910-talet. Betongbestämmelserna från 1910 betraktas allmänt som en av de första svenska normerna och dessa följdes av revideringar och kompletteringar 1924 och 1934 (SOU 1934:17 Statliga Cement- och betongbestämmelser av år 1934). I den förra infördes till exempel begreppet vattencementtal som ett mått på förhållandet mellan bindemedel och lösningsmedel i betongen. Begreppet infördes 1918 av den amerikanske professorn Duff A Abrams och kom att ligga till grund för en stor del av betongforskningen under mellankrigstiden. Bestämmelserna omfattade även ballastens kvalitet och gradering samt hur armering skulle utföras och dimensioneras. I Sverige var Kungl. Vattenfallsstyrelsen pådrivande i betong- och cementforskningen eftersom stora mängder höghållfast betong krävdes till den statliga vattenkraftutbyggnaden. Konstruktionerna i dammar och vattenvägar var ofta grova och skulle stå emot ensidiga vattentryck, vilket ställde speciella krav på både gjutegenskaper och hållfasthet. Åtskilliga av de specialcementsorter som togs fram för dessa ändamål kom att påverka hela den svenska cementtillverkningen och betonggjutningen.

BETONG UNDER 1800-TALET

Den stora delen av all betong som användes under 1800-talet hade primärt tre funktioner, antingen ingick materialet i olika typer av grundläggning eller i valvkonstruktioner där det endast förekom trycklaster, eller så användes det för att gjuta dekorationselement. Först mot slutet av 1890-talet breddades funktionen till armerade lastbärande konstruktioner i byggnadsstommar, broar och dammar. Tillverkningen av gjutna betongplattor i byggnader, källarväggar och oarmerade valvkonstruktioner var tämligen enkel jämfört med de ofta komplicerade dekorationselementens uppbyggnad. Till skillnad från den rena byggnadsbetongen var formsättningen en avgörande faktor för ett bra slutresultat vid tillverkning av delar till fasader, masverk till fönster samt betongföremål till trädgårdar och parker. I många avseenden handlade formning och gjutning om samma tekniker som använts av stukatörer sedan länge, vilket i praktiken var den yrkeskategori som lade grunden för den storskaliga prefabriceringen av dekorelement.





Prefabricering

Ett bra exempel på en prefabricerad byggnadsdetalj av betong är vattenutkastaren (se bild ovan) i form av ett lejonhuvud gjutet före 1882 till fasaden på Universitetshuset i Lund. Byggnaden ritades av arkitekt Helgo Zettervall (1831-1907) som var en av det då nya byggnadsmaterialet betongs färmsta förespråkare i landet. På bilden syns hur en av gipsformens delar passar till den gjutna detaljen och det var ett intrikat arbete med att få formdelningen på ett sådant sätt att den gjutna detaljen kunde tas ur formen utan att skada detaljen. Den gulaktiga hinnan på gipset är schellack som användes för att få en glatt yta att gjuta emot. Resten av formarna till utkastaren saknas men det går utmärkt att göra en ny gjutform från själva betongdetaljen. Notera betongens närmast porfria yta som skapats med låg vattenhalt och mycket fin ballast i en fet betongbladning. Zettervalls ombyggnader av de svenska domkyrkorna är en enda provkarta på hur betongen kunde användas i allt från strukturellt bärande delar till fönster och dekorationer. Alla var dock inte odelat positiva till det nya materialet och i Uppsala drevs en hård kampanj för att få bort betongen ur domkyrkan. Enligt AB Skånska Cementgjuteriets minnesskrift från 1937 myntades i den animerade diskussionen vid tiden bland annat uttrycket » Quem Deus perdere vult, cementat« Den Gud vill förgöra slår han med cement.

Figur 2.8. Två vattenutkastare till universitets- huset i Lund. Den färdiggjutna betongdetaljen i förgrunden har kvar delar av sin gipsform och bilden visar något av den komplicerade formbyggnaden, som krävdes då tredimensionella detaljer skulle gjutas. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2020.



Figur 2.9. Oarmerad betong eller konststen som det även kallades är möjlig att göra extremt finskuren och detaljerad om bara formen är tillräckligt exakt. Detta rikligt ornamenterade parti infärgad svart stampbetong sitter över en av sidoingångarna till S:t Johannes kyrka i Stockholm, uppförd 1890. Betongen är gjuten av AB Skånska Cementgjuteriet som ett av deras första arbeten i Stockholm. Trots att det har passerat 130 år sedan kyrkan invigdes är materialet i förvånansvärt gott skick med helt intakt cementskiva – den fina yta som bildas närmast gjutformen. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2020.

Formning och gjutning

För att kunna gjuta en serie identiska objekt krävdes till att börja med en förlaga, vanligtvis gjord av trä eller gips. Dessa framställdes av stukatörer, skulptörer och bildhuggare som utgick från egna eller arkitektens skisser och emellanåt även från de mönsterböcker som sedan länge var vanligen förekommande inom arkitekturen. Formerna var ibland komplicerade och krävde stor noggrannhet för att kunna överföras till betong vid gjutningen. Formarna tillverkades av gips efter den modellerade förlagan, eller av stål vid mycket enkla geometriska former som till exempel gångplattor. En avgörande faktor var delningen av formarna så att den färdiga detaljen kunde tas ur utan att förstöra originalformen. Även ytbehandlingen av gipsen inne i formen var väsentlig för att betongen skulle kunna släppa när den härdat. Vanligen schellakerades formarna upprepade gånger, vilket skapade en hård glatt yta där betongen inte kunde fastna. Vid komplicerade gjutningar bestod en form av ett ansevärt antal delar som hölls samman med tvingar eller särskilda ytterformar av trä under processen. Betongen var jordfuktig och pressades ned i formarna, vilket ställde stora krav på den konstruktiva delen av formbyggandet. Om allt gick enligt plan kunde en form användas till cirka tio gjutningar, vilket i sin tur betydde att formtillverkningen var en ansevärd del av gjutprocessen vid denna tid. Det var inte ovanligt att mycket stora serier av varje enskild detalj göts för bara ett enda bygge. Till exempel tillverkade Skånska Cementaktiebolaget tusentals betongdelar till fasaderna på Sankt Johannes kyrka i Stockholm under perioden 1884–1890. Beställningen blev helt avgörande för det då nybildade stockholmskontoret och från 1887 kom denna verksamhet att övergå i det nybildade Aktiebolaget Skånska Cementgjuteriet, idag Skanska. En kuriositet i sammanhanget var att Direktören R. F. Berg (1846–1907) vid Cementbolaget köpte Johannes gamla träkyrka och lät inreda den till fabrikslokal för gjutningarna. Denna primitiva serietillverkning vittnar om de inte sällan provisoriska förhållandena i slutet av 1800-talet, långt från den långt drivna massproduktion som kom att dominera betongbyggandet hundra år senare.

Dubbar och infästningsjärn

Trots att betongen i sig till största delen var oarmerad förekom järndetaljer i form av dubbar mellan olika delar i till exempel masverk i fönster, infästningsjärn för att hålla fast skulpturer på tak, förankringsjärn in i bakomliggande murverk vid väggmontering och emellanåt även grova järnprofiler som placerats inne i stora skulpturer. I takt med att betongen åldras har dessa järnföremål blivit vanliga orsaker till skador då rostsprängningar till och med har fått betongdelar att falla ned från fasaderna. Denna typ av skador är ofta mycket besvärliga och kostsamma att åtgärda med nytillverkning som ett av alternativen.

Bearbetning av ytan

Under det sena 1800-talet och i princip ända fram till funktionalismens intåg under slutet av 1920-talet, var alla synliga betongytor antingen helt släta som i fallet med dekorationerna, putsade för att dölja formavtrycken eller mekaniskt bearbetade för att efterlikna naturstensytor. Strävan efter att dölja eller omarbete det då relativt nya materialet drevs ofta långt med konstfull behuggning där stenhuggare helt enkelt använde sig av exakt samma kunskaper som vid berarbetning av sten. Betong kallades även ofta för just konststen, vilket indikerar hur materialet betraktades. För att kunna hugga i en betongyta utan att en grov ballast skulle komma fram i ytan, göts ofta detaljerna med två olika typer av betongblandningar: en bakomliggande konstruktionsbetong med grov ballast och en fin ytsats med mycket finkorning ballast samt med högt cementinnehåll. De två blandningarna göts samtidigt och materialen packades, stampades, ned i formarna på var sida om en plåt som sakta drogs upp i takt med att formen fylldes. Proceduren gjorde att de båda kvaliteterna kunde förenas kemiskt, vilket efter härdning bildade en solid konstruktion. Formarna lämnades vanligen kvar avsevärt mycket längre än idag, exempel finns på upp till 14 dagar, vilket förhindrade snabb uttorkning av ytorna. Samtidigt kunde betongen sätta sig ordentligt, vilket gjorde finsatsen extra hård och bearbetningsbar. Vid restaurering av behuggna ytor är det mycket svårt att återskapa stora partier på grund av svårigheter med att kopiera en stenhuggares handlag. Görs inte detta skiljer sig den nya ytans textur från originalet, vilket påverkar slutresultatet estetiskt. I vissa fall används därför en silikonavgjutning som matris vid återskapandet av de nya ytorna.

Figur 2.11. Krysshamrad betong på en frontmur vid betongvalvbron över järnvägen vid Norsholm. Varje spets på verktyget har lämnat en fördjupning i ytan, vilket fortfarande är klart avläsbart efter mer än 100 år. Bron byggdes 1918 med ett valv i konkretmurverk, ett oarmerat betongvalv med stora sparstenar i en konstruktion som närmast liknar ett fogat stenvalv. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2019.



Figur 2.10. En delvis reffelhuggen passbit av stampbetong mellan vanligt tegel och profiltegel på fasaden vid Östermals Saluhall byggd 1888. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.



SEKELSKIFTET 1900 – ARMERAD BETONG

Oarmerad betong har ungefär endast en åttondel av draghållfastheten jämfört med tryckhållfastheten. Under den oarmerade betongens epok fram till slutet av 1800-talet var därför konstruktionerna utformade på ett sådant sätt att tryckkrafterna var helt dominerande, vilket i praktiken betydde valvkonstruktioner av olika slag. När armeringen introducerades insåg ingenjörerna att genom rätt mängd stål placerad i konstruktionernas dragzoner kunde helt nya typer av bärande former gjutas i betong. Resultatet blev bärande konstruktioner med slankare form, större spännvidder och nya funktioner.

Till en början var armeringen i Sverige tillverkad av vanliga rundjärnsprofiler i en uppsjö varianter och dimensioner men alla tillverkade av vanligt stål. De släta profilerna bockades 180° i ändarna, vilket skulle säkerställa att armeringens friktion mot betongen kunde uppnås. Efterhand som allt mer krävande applikationer gjorde att styrkan på armeringen behövde ökas, utvecklades mer höghållfasta stålkaliteter, vilket i sin tur satte fokus på

Figur 2.12. En skog av armeringsjärn sticker upp ur den gjutna bottenplattan. Alla järn har en ändkrok för att säkerställa friktionen mellan armeringen och betongen. Notera hur gjutningen av silorören i bakgrunden sker från en kabelkran med upphängd transportbehållare, så kallad bask, som tappas i tratten vilken leder ned i störtrännen. Allt hanterat med enbart gravitation som drivkraft. Störtrännen kunde anpassas i längd och vinkel så att man nådde hela arbetsplatsen. Foto: Okänd fotograf. Teknik- och industrihistoriska arkivet / Tekniska museet, ARK-K393. Digitalt museum.



frågan om ändkrokarna verkligen hade avsedd effekt. Om lasterna blev så stora att vidhäftningen mellan armeringen och betongen minskade var ändkrokarna en klen tröst. Med andra ord kom de inte i full funktion förrän konstruktionerna var kritiskt nära sin maximala lastupptagande förmåga. Istället utvecklades i slutet av 1930-talet en ny typ av armeringsstål där ytan hade försetts med upphöjningar, så kallat kamstål. Tillverkningen inleddes vid Smedjebackens valsverk 1941 och blev snabbt mycket framgångsrikt, vilket gjorde att man tämligen snart avvecklade alla ändkrokar på armeringen och dessutom kunde tillgodogöra sig de nya högvärdiga stålsorter som utvecklades i stålverksindustrin. Hela processen påskyndades av den material- och bränslebrist som fanns under och strax efter andra världskriget.

Armeringen introduceras

Den armerade betongens historia startar ungefär samtidigt med att produktionen av portlandcement inleds på allvar under 1850-talet. Visserligen hade åtskilliga försök med olika typer av järn- och bronsarmering använts redan under antiken, men då utan egentlig kunskap om armeringens placering i konstruktionernas dragzoner. Helt avgörande för armeringens genomslag var dessutom de beräkningsteorier som utvecklades först under senare delen av 1800-talet. En presentation av armeringens historia blir en upprädnad av en lång rad med män som på olika sätt bidrog till utvecklingen. I syfte att göra framställningen något mera kompakt har endast de mest framträdande insatserna tagits med.

Monier-betong

En av de personer som normalt sett brukar lyftas fram i detta sammanhang var Joseph Monier (1823-1906) en trädgårdsmästare vid Versailles utanför Paris som 1867 fick patent på att armera trädgårdskrukor i betong med ett trådnät av järn. Hans banbrytande uppfinningar kom att överföras i generell betydelse till all typ av armerad betong genom användandet av hans namn i olika sammanhang: Monier Eisen, Monier System, Monierkonstruktion etc. Patentet för den tyska marknaden övertogs under 1880-talet av ingenjören Gustav Adolf Wayss (1851-1917) som tillsammans med bland andra teoretikern Mathias Koenen (1849-1924) i Berlin, genomförde ett stort antal experiment med armerad betong. Resultatet av undersökningarna publicerades i den skrift *Grundzüge der statischen Berechnung der Beton- und Eisenbetonbauten* som idag anses vara den första teoretiska beskrivningen av hållfasthetsberäkningen av en armerad betongbalk. Hans teorier utvecklades vidare av bland andra konstruktören och teoretikern Emil Mörch (1872-1950) som låg bakom den standardisering inom betongområdet som gradvis infördes i Tyskland och som så småningom även delvis bildade underlag för de svenska betongnormerna.



Figur 2.13. En annons för Centralbadets olika möjligheter med en stiliserad affisch inifrån badhusdelen.

Figur 2.14. Till höger: Interiörbild från den år 1906 uppförda industrin Dejeffors Pappersbruk, där alla bärande konstruktioner och bjällklag göts av AB Skånska Cementgjuteriet enligt Hennebiques system. Foto: Bild ur odaterad katalog från AB Skånska Cementgjuteriet.

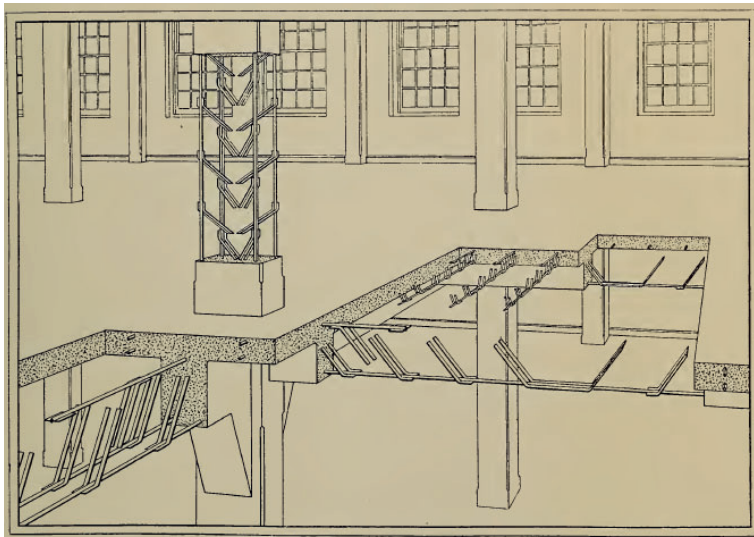


Hennebiques system

Uppfinnaren och ingenjören François Hennebique (1842–1921) var ytterligare en av föregångsmännen inom den armerade betongen. Han utvecklade ett system med armerade betongbalkar, -pelare och -plattor som tillsammans utgjorde en strukturell helhet, en komplett bärande stomme för olika typer av byggnader. Hans patent från 1892 fick snabbt spridning över hela världen och i Sverige kom det att från 1902 representeras av Aktiebolaget Skånska Cementgjuteriet, som uppförde ett stort antal byggnader och broar i detta system. Första Hennebiquekonstruktionen i Sverige var dock en industribyggnad för textilföretaget Bergsbro AB i Norrköping som uppfördes redan 1897–98. Armeringssystemet blev snabbt ett av de vanligaste i Sverige och fortfarande finns åtskilliga konstruktioner av denna typ kvar. Inte minst Centralbadet i Stockholm från 1902–04 är ett landmärke ur denna aspekt. Anläggningen ritades av arkitekt Wilhelm Klemming (1862–1930) och är det första exemplet på en armerad betongkonstruktion av Hennebiquetyp i huvudstaden. Byggnaden fick stor uppmärksamhet och stadens tjänstemän krävde omfattande garantier även från kontinenten på att systemet verkligen var något att lita på.

Kahnjärn

Ytterligare en ingenjör, uppfinnare och fabrikör som gjorde avtryck i armeringens historia, var den tyskländsfödde men i USA verksamme Julius Kahn (1874–1942). Hans bidrag till betongbyggandets strukturella utveckling genom det s.k. Kahn System som utgick ifrån ett armeringsjärn med bockade 45° vingar som i ett förtillverkat system anpassades exakt till den platsgjutna lastbärande betongstrukturen i en byggnad. Armeringsstålet tillverkades av företaget Trussed Concrete Steel Company och kom att bli en mycket viktig faktor i alla de industribyggnader som Julius bror arkitekten Albert Kahn (1869–1942) uppförde åt den Amerikanska bilindustrin. Inte minst Fords sammansättningsfabriker med en karaktäristiskt utformad pelare-balkstomme av armerad betong har gjort stort avtryck som ikoniska byggnadsstrukturer från 1900-talets första hälft. Armeringssystemet infördes i Sverige av industrimannen och ingenjören Ivar Kreuger (1880–1932) som efter sin examen i Väg- och vattenbyggnadsteknik på KTH i Stockholm år 1900 tillbringade flera år vid olika konstruktions- och byggföretag i USA. Han medverkade bland annat vid uppförandet av flera skyskrapor i New York och kom där i kontakt med armeringstekniken enligt Kahns system.

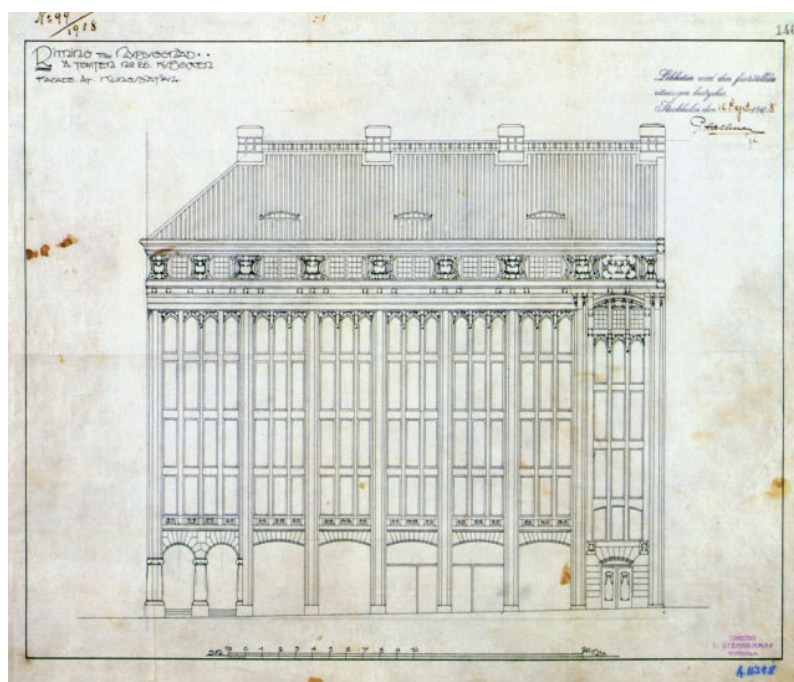


Figur 2.15. Ovan: Illustration ur en katalog för Kahn-systemet där de olika armeringsjärnens utseende och placering framgår. Källa: Kahn System of Reinforced Concrete, https://openlibrary.org/books/OL25129623M/Kahn_system_of_reinforced_concrete.

Figur 2.16. Till höger: En armerad betongplatta som rivits bort från en liten gångport under Frykenbanan strax söder om Sunne. Bilden visar Kahn-järn som exponerats under rivningsarbetet. Vingarna på armeringsstångerna påminner om en ryggradsliknande lämning från ett forntida djur. Foto: Trafikverket, 2021.

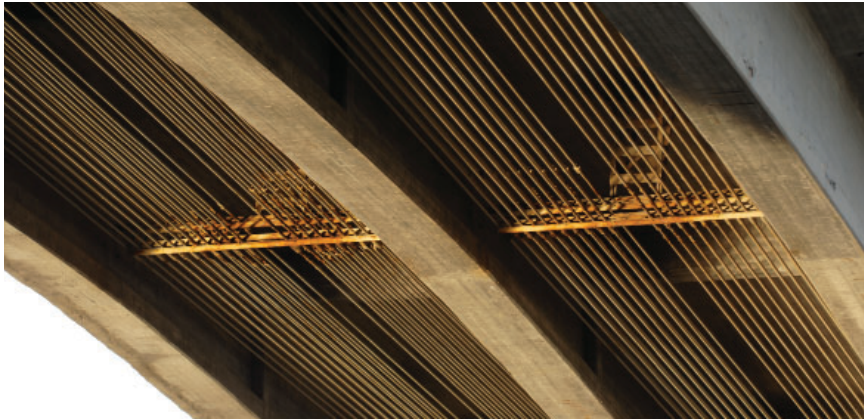


Efter att ha förvärvat patenträtten för Sverige och Tyskland återvände han till Stockholm 1907 och bildade året efter entreprenadföretaget Kreuger & Toll AB tillsammans med Paul Toll (1882–1946) från entreprenadfirman Kasper Höglund AB i syfte att exploatera armeringssystemet. Till sin hjälp vid avancerade beräkningar hade Torsten sin kusin Henrik Kreüger (1882–1953) som var verksam vid avdelningen för Väg- och vattenbyggnad på KTH där han sedermera blev professor i byggnadsteknik 1914. Efter ombildandet av bolaget till Kreuger & Toll Byggnads AB år 1917 fick Paul Toll ensam ansvar för företaget medan Ivar Kreuger ägnade sig på heltid åt sitt tändsticksimperium. Ända sedan starten visade man framfötterna och bolaget kom att uppföra åtskilligt med prestigefulla armerade betongbyggnader runt om i landet. Bland annat konstruerade och byggde man varuhuset Myrstedt & Sterns lokaler i korsningen Kungsgatan-Norrlandsgatan i Stockholm 1908–1910. Byggnaden ritades av arkitekt Ernst Stenhammar och räknas som den första armerade skelettkonstruktionen av armerad betong i Stockholm. Byggnadsättet möjliggjorde att fasaden utformades fritt från resten av byggnaden, vilket förbådade en av modernismens grundprinciper.



Figur 2.17. Elevation av Myrstedt & Sterns varuhus som det ritades av arkitekten Ernst Stenhammar. Stenfasaden har amerikanska drag och är ett av de första exemplen i Sverige på den så kallade Curatin-Wall tekniken, med en fasad helt frikopplad från den bärande stommen. Ritning intygad 1908, Stockholms stadsarkiv.

Figur 2.18. Till vänster syns en reklambild som visar företagets betongbyggnadsteknik vid Stockholmsutställningen 1909. Bild ur Kreuger & Tolls katalog, privat ägo.



Figur 2.19. Undersidan av Klockestrandsbron med spännstag likt strängar på en harpa. Den numera rivna bron var Sveriges första spännarmerade betongbro som uppfördes i slutet av 1930-talet. Skånska Cementgjuteriet fick då konstruktionshjälp från Danmark och kontinenten. Klockestrandsbron gick över Ångermanälvens östra gren vid Kramfors. En ny bro är uppförd strax nedströms det gamla broläget. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2010.

Spännarmering

All armering som introducerades i form av olika system och patenterade lösningar var fram till början av 1900-talet av så kallad slakarmerad typ, det vill säga inga spänningar var pålagda armeringsstålen vare sig före eller efter gjutning. I takt med betongbyggnadsteknikens utveckling startades dock försök med spännarmeringar på en helt ny nivå än tidigare. Visserligen hade mindre försök genomförts i både USA och Europa redan i slutet av 1800-talet, men det var inte förrän tillverkningen av höghållfast stål tog fart som tekniken kunde erövra mark ordentligt. Principen att spänna konstruktioner för att göra dem mer lasteffektiva är dock urgammal, sannolikt utnyttjad på ett intuitivt sätt och utan den teoretiska kunskap som tillförs under 1900-talets början. Välkända exempel är bland annat i vardagliga föremål som pilbågar, vridna lianer i hängbroar, tvinnade rep i egyptiska papyrusbåtar och senare i järnskodda hjul, cykelhjul samt fackverksbroar av trä och stål.

Utvecklingen av spännarmerade konstruktioner i Europa skedde i flera samtida spår utifrån fransmannen Eugène Freyssinet (1879–1962) och hans beslut 1928 att ägna hela sin yrkeskarriär åt spännarmerade betongkonstruktioner, vilket 1939 ledde fram till ett patent på ett komplett system för hur dessa konstruktioner skulle uppföras. Vid sidan av honom fanns österrikaren Fritz von Emperger (1862–1942) samt tyskarna Franz Dischinger (1887–1953) och Ulrich Finterwalder (1897–1988) båda anställda vid företaget Dyckerhoff & Widmann AG (Dywidag). Till skillnad från Freyssinets system med spännvagnar, specialtillverkade ankarhylsor och en komplicerad byggprocess kunde Dywidag:s system med massiva stag och enkel förankring med muttrar användas mycket smidigare, vilket gjorde att det blev en omedelbar succé. Den första svenska spännarmerade brokonstruktionen uppfördes 1938–43 över Ångermanälven vid Klockestrand med Dischingers system. Spännstagen var placerade under brobanan på den kontinuerliga balkbron och spännkrafterna uppstod så brons egenvikt belastade stagen i samband med demontering av gjutformarna. Bron är numera riven. Betongdammen från slutet av 1910-talet vid Älvkarleby's vattenkraftstation förstärktes även med spännstag 1937, vilket är en av de allra första fullskaleåtgärderna med denna teknik i Sverige.

Strängbetong

Ewald Hoyer (1898–?) var en tysk ingenjör som 1937 fick patent på armerad betong med förspänd armering. Genom att spänna tunna höghållfasta ståltrådar likt strängarna i en flygel före det att betongen hälldes i gjutformarna, kunde man med metoden tillverka nätta höghållfasta betongbalkar, järnvägssliper och betongplattor. Metoden att förspänna armeringen före gjutning licensierades 1939 till det svenska företaget AB Betongindustri där ingenjörerna Axel Eriksson (1888–1961) och Ulf Bjuggren (1908–1979) var verksamma. Efter ett möte med Hoyer i Berlin 1938 exploaterade de patentet och uppförde 1942 den första fabriken på Liljeholmen i Stockholm. Det nybildade företaget AB Strängbetong kom att leverera stora mängder prefabricerade betongbalkar och -pelare som användes vid bland annat utbyggnaden av den svenska industrin under efterkrigstiden.

En av Strängbetongs storsäljare var de långa spännarmerade takstolsbalkarna av betong. Konstruktionen möjliggjorde bygget av lokaler med stor fri golvyta, vilket var särskilt uppskattat i till exempel massaindustrin. Bilden till höger visar en av dessa balkar redo för transport till byggarbetsplatsen. Längden gjorde att de ofta fick transporteras på specialbyggda järnvägsvagnar medan kortare balkar levererades per lastbil. Notera att fabriksbyggnaden i Veddige i Halland, samma bild på motstående sida, (uppförd 1958) har denna typ av balkar i taket. Även pelarna i ytterväggarna är tillverkade av samma typ av spännarmerad konstruktion. Själva väggarna består dock av tråd- armerade gasbetongplank (Ytong eller Siporex) som staplats i ett rationellt system.

Den allra första leveransen av en strängbetongbalk skedde till ett bygge på Högalidsgatan 22 i Stockholm den 22 oktober 1939. En kuriositet i sammanhanget är att Axel Eriksson, en av männen bakom Strängbetong, även var uppfinnare till gasbetongen.

Idag ingår denna typ av balkar i många byggnader som är föremål för ombyggnader och kompletteringar. I detta sammanhang är det mycket viktigt att vara medveten om hur spännarmerade konstruktioner beter sig vid förändrade lastförhållanden och att betongbalkar av denna typ är känsliga för håltagning samt strukturella förändringar.



Figur 2.20. Interiör från tillverkningen av spännarmerade takstolsbalkar vid en av Strängbetongs fabriker i Veddige. Notera hur gjuthallens stomme är uppförd med liknande balkar och pelare. Den färdiga takstolen har lyfts ur formbädden (t.v. i bild) och på golvet ligger en bunt armeringsstål redo för nästa takstol. I den färdiggjutna konstruktionen syns hur spännstålen sticker ut längst ned på balken i en A-liknande form. Foto: John Hylterskog, SJ Press 1963. Järnvägmuseets samlingar, JvmKBDB12743:01. Digitaltmuseum.

Betognens yrken

Vilka olika kunskaper krävdes för de olika momenten vid uppförandet av en betongkonstruktion för ungefär hundra år sedan? Listan kan göras lång, och varierar något beroende på vad som skulle uppföras, men omfattar åtminstone följande yrkeskategorier:

Byggherre
Lantmätare
Konstruktör
Ingenjör
Arkitekt
Grovarbetare
Dykare
Timmerman
Snickare
Smed
Armerare
Betongblandare
Gjutare
Stampare
Hantlangare
Förmän
Kontrollant
Platschef
Stenhuggare
Murare
Modellsnickare
Stuckatör

I praktiken kom flera av ovanstående behov att lösas av en och samma person, men listan visar något av den mångfasetterade uppgiften att hantera denna typ av byggen. Detta återspeglar i sin tur vilka kompetenser som krävs vid dagens renoveringar av äldre betongkonstruktioner.

Arbetsmoment

På de följande sidorna presenteras utsnitt av den svenska betonghistorien genom ett antal bilder där väsentliga moment i arbetet skildras. Bilderna är hämtade från olika privata och offentliga arkiv och spänner över perioden sent 1800-tal fram till idag. Oavsett var gjutningarna gjordes och om det var på byggplatserna eller i fabriker återkom tydliga steg i processerna: formning, armering, blandning, transport, gjutmomentet, packning eller vibrering, efterbehandling och eventuell bearbetning av det färdiga resultatet. I möjligaste mån visar bilderna på den historiska utvecklingen, arbetsplatsernas utformning, villkoren för de olika yrkesgrupperna och de varierande tekniska förutsättningarna.

Gemensamt för det som skildras i de äldsta bilderna är att betongen var jordfuktig och stampades ned i formarna, vilket har gett namn till stampbetongen som var helt dominerande ända fram till 1930-talet då vibrering av betong infördes. Stampningen var en rejäl utmaning i de tätarmerade formarna och full packning runt järnen var svårt att uppnå. En viss förskjutning av armeringsjärnets plats i formarna var även vanligt, vilket emellanåt ledde till ytligt liggande armering med närmast obefintligt täcksikt. Detta påverkade livslängden kraftigt och frilagd armering är därför en vanlig skada på äldre betong.

En mycket viktig yrkeskategori som brukar förbises när man beskriver betongarbetet vid denna tid var smederna. I ofta primitiva fälttässjor tillverkades både en del av de föreskrivna ändkrokarna på de släta järnen och konstfult smidda skarvar på de ibland över 40 mm tjocka armeringsjärnen – ett digert arbete som var väsentligt för konstruktionernas hållfasthet och livslängd. Dessutom ansvarade smederna för skärpningen av de stenhuggeri-verktyg som användes för att bearbeta den färdiggjutna betongens yta, vilket var ett avgörande moment för önskat estetiskt slutresultat.

Formning – formbygge, avtryck, platsbyggt, systemform

Armeringen var ett omfattande arbete som ofta fick göras i trånga formar där ansenliga mängder med grova järn trängdes om utrymmet. För att kunna hålla något snär ordning på var järnen skulle vara och för att även separera dem under gjutningen, byggdes ibland ställningar av trä, från vilka man hängde upp armeringsjärnen med hjälp av ståltrådar. På motstående sida visas ett sådant arrangemang vid bygget av Torgbron i Lidköping 1914. Brokonstruktionen är en konsolbalkbro med längsgående balkar som utifrån landfästet i förgrunden sträcker sig ut över vattendraget. De smala balkformarna är fyllda med järn som är förenade med tunna plattjärn enligt system Hennebique och en skog av upphängningstrådar syns mellan träställaget och järnen.

Innan man kunde börja med armeringen skedde ett omfattande timmermans- och snickeriarbete vid själva bygget av formen. Sidotrycket i formarna säkrades med stämp mellan formväggarna och med mothåll på utsidan av de



Figur 2.21. Bilden visar uppförandet av Torgbron i Lidköping ca 1914. Arbetet är beskrivet i texten på motstående sida, men det är värt att notera alla de trådar som hänger ned från träställaget för att hålla armeringsjärnen på plats i rätt höjd i gjutformarna. Foto: Vänermuseet, Lidköping.

yttre balkarna. Det var vanligen lokala byggnadsfirmor som stod för både arbetskraften, materialet och själva utförandet medan entreprenadföretaget skötte utsättning, armering, gjutning och kontroll. Notera de två herrarna i ledande positioner som poserar i vit skjorta och kostym mitt i bild. Hierarkin var tydlig på arbetsplatserna och man höll strikt på de olika yrkesrollerna. I förgrunden arrangerar arbetarna de ramper som användes för att kunna skjuta ut skottkärror med betong till själva gjutställena. Man kan bara föreställa sig hur svårt det var att packa betongen runt alla järn så att inga luftfickor minskade konstruktionernas hållfasthet.



Figur 2.22. Fotografen har bemödat sig med att krypa in i gjutformen för Tallbergbron över Öre älv då gjutningen av stampbetongvalvet var i full gång. Bron stod klar 1919 och var då världens största betongvalvbro på normalspårig järnväg. Idag är bron ett statligt byggnadsminne. Foto: Okänd fotograf. Järnvägmuseets samlingar, JvmK-DAE10345, Digitaltmuseum.

Armering – släta järn och kamstål

Arbetsmiljön var inte den bästa inne i gjutformen för den mycket stora järnvägsbron över Öre älv vid Tallberg, se bild ovan. Bron stod färdig 1919 och var då världens största betongvalvbro för normalspårig järnväg. Bilden visar hur ett arbetslag med gjutare står uppställda för fotografen bland en skog av formstag som radiellt håller de båda formhalvorna samman. Huvudarmeringen syns längs formens ganska glest spikade träform. Betongen tippades ned i formen via den störträna i trä som sticker ned i bildens ovkant och för att kunna hålla koll på gjutningarnas tjocklek användes en skiva som underlag för den nedfallande betongen. När en lagom stor mängd hade tippats ned, skyfflades den ut i ett maximalt 30 cm tjockt lager, vilket packades noggrant före nästa lager kunde spridas ut i formen. Det går att se skillnad på den finare betongblandningen närmast ytterkanten på formen i bakre delen av bilden och den grovbetong som finns rakt under rännan. Metoden att gjuta med två olika betongkvaliteter samtidigt var mycket utbredd och gav släta, väl packade ytor närmast formen. Utförandet var en garant för att man både skulle få en hög detaljfinish på de synliga ytorna och dessutom möjliggjorde

den ca 50-70 mm tjocka ytbetongen att de synliga ytorna vid behov kunde bearbetas med stenhuggeriverktyg. I mitten av bilden syns en planstamp som användes för att packa grovbetongen. Längs formkanterna gjordes detta arbete med en smalare kantstamp.

Blandning – platsblandat och betongfabriker

Transporten av cement till arbetsplatserna skedde till en början i trätunnor och all blandning skedde direkt vid gjutstället. Tunorna vägde 180 kg och även jutesäckar om 57 kg (en tredjedels tunna) användes redan under 1870-talet. Successivt utvecklades mekaniska hjälpmedel för att väga, blanda, transportera och gjuta betongen, vilket avsevärt förändrade arbetsvillkoren för betongarbetarna. Det tunga jobbet med de olika stegen i processen fanns dock kvar länge trots alla hjälpmedel och att arbeta som betongare var länge direkt associerat till tungt manuellt arbete. Företaget Betongindustri etablerades 1932 i Stockholm och kom att stå för införandet av betongstationer där materialet fabriksblandades och därefter levererades till arbetsplatsen i speciella roterbilar. Hela idén med denna typ av rationalisering kom från USA via Danmark och det första lasset levererades den 1 april 1932. Stockholms stads stora byggen vid Slussen och Tranebergsbron samt det privata bostadsbyggandet blev direkt storkunder hos det nybildade bolaget som kunde leverera en jämn mängd betong av hög kvalitet.

Figur 2.23. Ett möjligen något poserande arbetslag vid en betongblandningsstation vid vägporten i Eslöv, maj 1923. Blandaren drivs sannolikt av en el- eller förbränningsmotor inne i skjuvet till höger och det vertikala handtaget med en monterad vikt indikerar att råvarorna portionerades med hjälp av en våg. Notera de tunga och otympliga skottkärrorna av trä som användes för att transportera betongen till gjutstället. Foto: Okänd fotograf. Järnvägsmuseets samlingar, JvmKDAE10610, Digitaltmuseum. Beskuren bild.





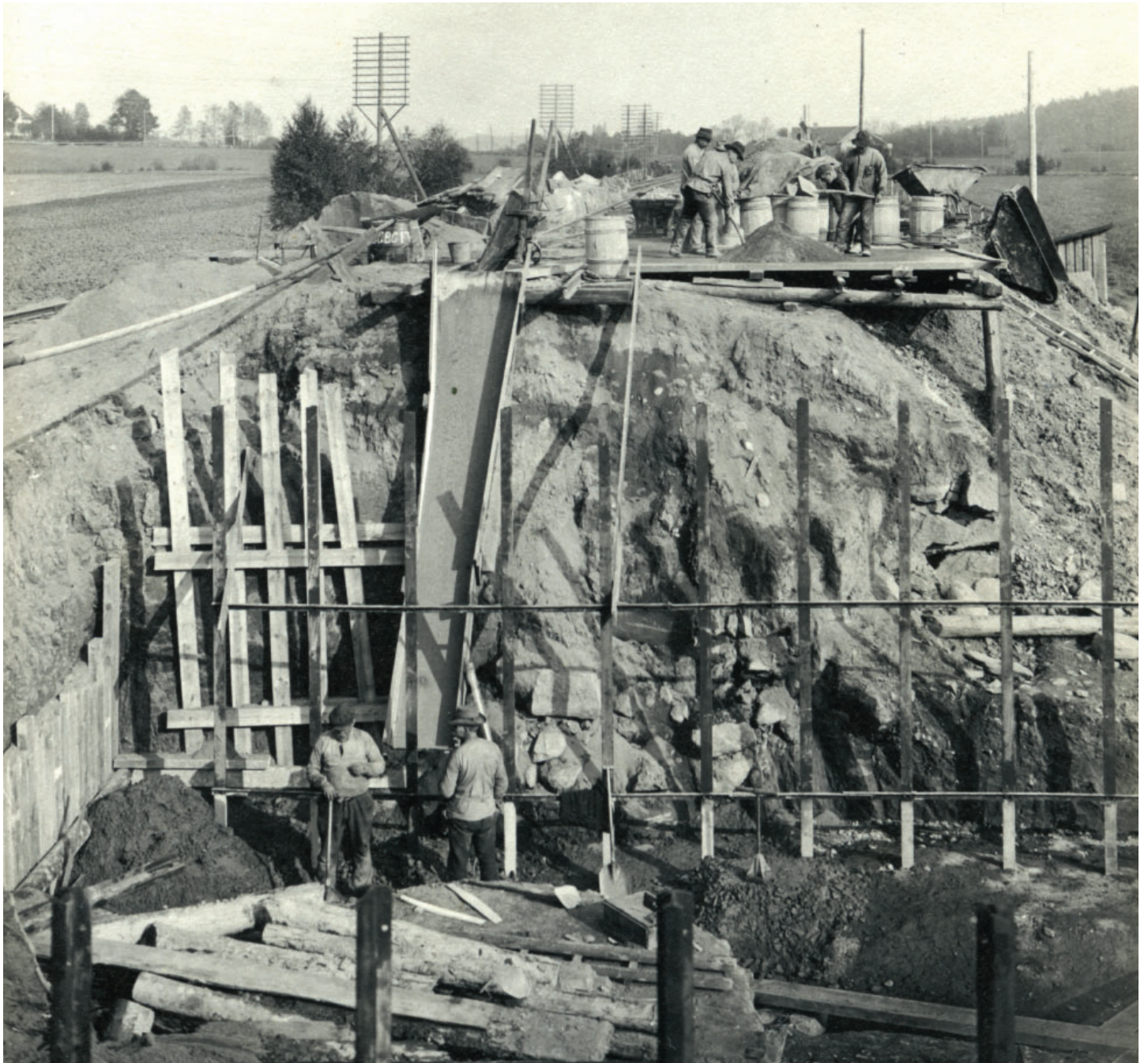
Figur 2.24. Tunga lyft – Det var inte helt enkelt att hantera cement-säckar på vikter upp mot 50 kg, här i Valbo, 1946. Foto: Carl Larssons Fotografiska Ateljé AB, Länsmuseet Gävleborg, XLM. CL016025-13. Digitalt museum.

Figur 2.25. Mängden manuellt arbete under betonghistorien är helt central. I stort sett alla moment har stora inslag av förflyttning, packning, blandning, bygge, rivning etc. där ren muskelstyrka var avgörande. Den som till exempel en gång har känt vikten från en fullastad skottkärra med betong, vet exakt vad det handlar om. I bilden till höger levereras betongen med en högtippande lastbil till en fördelningsficka från vilken betongen transporteras ut med hjälp av skottkärror till gjutstället. En gängse syn på de svenska byggena ända fram till 1970-talet. Foto: Dan Gunner 1958, Värmlands museum, 606-1-61. Digitaltmuseum.

Gjutning – från skottkärra till betongpump

Betonggjutningen under 1910-talet var i stort sett samma typ av arbete som då den moderna betongen introducerades 50 år tidigare. Betongen blandades på plats och det var inte ovanligt att det skedde helt för hand som på bilden till höger från ett brobygge längs Västra stambanan. Cementet har levererats i trätunnor som står uppradade på den träyta som byggts direkt ovanför gjutstället. Blandningen skedde genom att ballasten och cementet skyfflades runt i en så kallad torrblandning varefter man tillsatte det vatten som behövdes för att få en jordfuktig och stampbar betong. Transporterna av ballast skedde med hjälp av enkla tippvagnar som syns till höger om blandingsstället. När allt var färdigblandat tippades betongen ned via störtrännen till gjutstället där det fördelades åt lämpligt håll före stampningen tog vid. Mannen till vänster håller i en stamp och i mitten av bilden syns ytterligare en. Verktøget var enkelt utformat med en tung gjutjärnsnederdel med plan undersida, ett skaft och ett handtag på tvären. Principen var att verktygets tyngd skulle kompaktera betongen så att det bildades en homogen massa. Skikten som stampades var ca 20-30 cm tocka och i de färdiga konstruktionerna var det vanligt att gjutskarvarna kunde observeras i ytorna. Notera hur denna konstruktion har armerats med järnvägsräls som stukits ned i bakkant av det som ska bli landfästen. Rälerna är förbundna med horisontella järn som håller allt på plats i rätt läge. Att armera på detta vis var mycket vanligt under ett par decennier efter sekelskiftet 1900. Högen med timmer i mitten av bilden är sannolikt rester efter för långa träpålar som står för lastfördelningen i grunden till konstruktionen. Träpålarnas skallar göts vanligen in i en tjock betongplatta, som bildade underlag för resten av gjutningarna uppåt i konstruktionen.





Figur 2.26. Bilden föreställer en arbetsplats mellan Alingsås och Olskroken där en ny järnvägsbro av betong är under uppförande längs Västra stambanan, 1914. De olika momenten beskrivs i detalj i texten på motstående sida, men notera det primitiva och helt manuella arbetet med

trätunnor för cementet, blandning med skyfflar på en trägolv och störtrännen ned till de som packar betongen i formen. Foto: Okänd fotograf. Järnvägsmuseet, JvmKDAB00496. Digitalt museum.



Figur 2.27. En tidsbild från en arbetsplats vintertid i Gladabäckstrumman, år 1921. Foto: Okänd fotograf. Järnvägsmuseet, JvmKDAB01682. Digitaltmuseum.

Vintertid var både formning, armering och gjutning synnerligen besvärligt, vilket gjorde att enkla träskjul samt vindskydd uppfördes både runt formarna och som värmestugor för arbetarna. Värmen hölls uppe med hjälp av eldkorgar och det var ett omfattande arbete att hålla fyr i eldarna dygnets alla timmar. Spillvirke från formbyggena var ofta ett använt bränsle. Bilden ovan är tagen ca 1918 och kommer från samma brobygge vid Tallberg över Öre älv som presenterats tidigare i detta kapitel. Motivet ger en glimt av umbärandena vid ett stort betongarbete mitt i smällkalla Norrlandsvintern och man kan se hur presenningar, enkla brädväggar och gamla cementsäckar användes för att hålla kylan samt vinden ute.

Vibrering

Vibreringen av betongen kom att revolutionera gjutandet och påverkade väsentligt både styrkan och hållbarheten hos konstruktionerna. Betongvibratoren var en fransk uppfinning som landserades under 1920-talet och exploaterades i Sverige från 1934 av företaget AB Vibro-Betong, som tillhandahöll både maskinell utrustning och kompetens till

betongbranschen. Ledande person i denna utveckling var kemisten Donovan Werner (1902–1988) som inte enbart grundade företaget, utan även var inblandad i banbrytande cement- och betongforskning utifrån sin bas som överingenjör vid Skånska Cementaktiebolaget i Limhamn under åren 1940–48, där han även var teknisk direktör under perioden 1948–58. Hans artikel Om vibrering av betong i *Byggmästaren* 1934 är endast ett exempel på den rika flora av betongrelaterade texter från Ingenjörsvetenskapsakademiens Centrallaboratorium, vilket han även var med och grundade år 1928.

I huvudsak delades vibreringen in i två kategorier: fri-vibrering direkt i den gjutna betongen och formvibrering där vibratorerna fästes på utsidan av formarna. Trots att vibreringen medförde att nya maskiner introducerades på arbetsplatserna slog tekniken igenom snabbt och inte minst i de storskaliga byggena av vattenkraftverk, dammar, broar och vägar blev den vibrerade betongen en förutsättning för ett så bra resultat som möjligt. Nackdelen var de arbetsmiljöproblem som uppstod tämligen omgående, då betongarbetarnas händer utsattes för högfrekventa vibrationer på mer än 3 000 svängningar per sekund. Resultatet blev vita fingrar, domningar, stickningar och permanent känselbortfall. Trots utveckling av bättre maskinell utrustning är vibrationsskador fortfarande ett stort arbetsmiljöproblem. I viss mån har denna typ av skador reducerats i och med introduktionen av vibreringsfri betong (självkompakterande betong, SKB) i Sverige år 1997. Denna betongtyp utvecklades i Japan under 1980-talet och står idag för en allt större del av materialet vid bland annat platsgjutning av stommar till byggnader. Utöver de arbetsmiljömässiga fördelarna, är det även möjligt att gjuta komplexa former i avancerade formar och uppnå full fyllnadsgrad i konstruktioner med stora mängder armering.



Figur 2.28 och 2.29. Två bilder visande överst formvibrering vid tillverkning av betongrör och nederst stavvibrering av ett armerat bjälklag. Vibreringen var helt avgörande för kvaliteten på det gjutna men orsakade även stora bekymmer för arbetarna, som fick vibrationsskador på händer och armar. Foto överst: Carl Larssons Fotografiska Ateljé AB, Länsmuseum Gävleborg, XLM. CL016025-16. Foto nederst: Okänd fotograf. Teknik- och industrihistoriska arkivet / Tekniska museet, TEKA0124872. Digitaltmuseum.



Figur 2.30. Bygganden på John Ericssonsgatan på Kungsholmen i Stockholm är uppförd med en stomme av betong gjord på aluminatcement. Skicket är så dåligt att fastighetsägaren har tomställt huset och önskar riva byggnaden. Till vänster i bild syns en rad balkonger på det byggnadsminnesmärkta kollektivhuset ritat av Sven Markelius 1935. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.

Specialcement

I tillägg till de vanliga cementsorterna utvecklades ett stort antal specialvarianter anpassade för olika behov och lösningar. Bland annat framställdes varianter för gjutning där låg värmeutveckling var ett krav för att undvika sprickbildning. Detta bindemedel användes till exempel vid riktigt stora objekt som vattenkraftdammar och broar. Två av specialsorterna kom att sätta särskilda avtryck i betonghistorien: Aluminatcement och Ersättningscement.

Aluminatcement

Aluminatcement eller smältcement är ett bindemedel som består av i huvudsak kalciumaluminat. Produkten uppfanns av det franska företaget Lafarge 1908 och har den främsta egenskapen att betong tillverkad av detta bindemedel uppnår stor hållfasthet på mycket kort tid. Bindemedlet har även egenskaper som gör att det passade utmärkt för gjutning vintertid när vanlig betong riskerade att frysa. I Sverige tillverkades aluminatcement vid AB Vallevikens Cementfabrik 1929–1939, sex år efter den vanliga cementproduktionens upphörande vid fabriken. Under de senaste decennierna har dock stora problem uppdragats med konstruktioner i aluminatbetong. Den bärande förmågan kan plötsligt försvinna på grund av kemiska reaktioner utlösta av fukt och värme, vilket har gjort att ett flertal byggnader har fått rivas eller kraftigt förstärkas. Skadorna har i vissa fall till och med varit så stora att hela konstruktioner har kollapsat.

Ersättningscement

Under krigsåren på 1940-talet var det mycket svårt att få tag på kol till eldningen av cementugnarna i de svenska fabriken, vilket kraftigt påverkade produktionskapaciteten. Vanligt cement ransonerades och för att möjliggöra viss civil byggnation utan krav på extra stor hållfasthet infördes i april 1941 en ny sorts bindemedel kallat E-cement. Detta bindemedel bestod av vanlig A-cement som maldes ytterligare en gång tillsammans med ett inert tillsatsmaterial av till exempel obränd kalksten och masugnsslagg. Dubbelmalningen av A-cementet tillsammans med resten av produkterna gjorde att cementkornen minskade i storlek och därmed blev mer reaktiva. Produkten var inte på långa vägar lika stark som A-cement men kunde trots allt användas till enklare gjutningar. Vissa entreprenörer använde dock materialet på fel sätt, vilket gav E-betong ett tämligen dåligt rykte. Ersättningscement slutade tillverkas 1954.

Figur 2.31. Motstående sida: I takt med bostadsbyggandets rationalisering uppfanns ett stort antal tekniska hjälpmedel som underlättade många moment på arbetsplatserna. Olika varianter av kranar var ett sådant mycket påtagligt exempel. På bilden syns hur kranarna används för att lyfta både formvirke och betong till de olika bjälklagshöjderna. Notera kranbanan som är utlagd för att göra kranen flyttbar. Foto: Sune Sundahl, 1958. Arkitektur- och Designcentrum, ARKM.1988-111-X1068-3. Digitaltmuseum.

EFTERKRIGSTIDEN - STORSKALIGHET OCH MONTERING

Efterkrigstidens byggande i betong domineras av avancerad produktionsplanering, storskaligt gjutande i långa serier och utveckling av rationella monteringsystem. Efter en rad statliga beslut om hur bostadsfrågan ska lösas, tar processen fart under 1950-talet med ett omfattande experimenterande med allt från fältfabriker på byggplatserna, framtagandet av allt mer höghållfast armering, spännarmeringssystemens etablering och inte minst en massiv utveckling av maskinell utrustning.

Arbetsplatserna försågs bland annat med torn- och portalkranar, som gjorde monteringen av de prefabricerade elementen både enklare och snabbare. Betonggjutarna, formbyggarna, armerarna och de andra traditionella yrkesgrupperna fick successivt lära sig nya uppgifter – bland annat monteringen av element och avancerad monteringslogistik. Kranförarna blev allt viktigare och fick snabbt en central roll på byggena.

För att möta den allt högre byggtakten tvingades betonggjuterierna till utveckling av produktionslinjer, där allt större serier med element göts i snabb takt. De tidigare små betonggjuterierna konkurrerades ut eller utvecklades till stora fabriker med ytkrävande lagerplatser för elementen i väntan på att det kunde transporteras till byggplatserna. Mängden element som på kort tid ska transporteras från fabriken till arbetsplatserna kräver även helt nya transportmetoder samt specialbyggda lastbilar och järnvägsvagnar. I viss mån kom de transporttekniska begränsningarna att även avgöra hur stora respektive långa prefabelementen och balkarna kunde tillverkas.



Varianter av element

Tillverkningen av förtillverkade betongdelar delades in i ett antal huvudgrupper:

1. Bärande mellanväggselement
2. Ytterväggselement
3. Bjälklagselement (massivbjälklag, hålbjälklag, kassettbjälklag balkbjälklag)
4. Pelare och balkar

Elementtyperna och deras olika placering gör att man kan träffa på dessa på alla möjliga platser i en byggnad, alltså inte enbart som fasadelement.

Figur 2.32. En ögonblicksbild från en av Skånska Cementgjuteriets arbetsplats i slutet av 1960-talet. En transport av vinkellement har anlänt till bygget och med hjälp av en mobilkran lyfts delen på plats likt ett gigantiskt Legobygge. Foto: Kalmar Länsmuseum, KLMF.Cement00034. Digitalt museum.

Prefabricering och elementbygge

Den allt mer industrialiserade tillverkningen krävde precision i placeringen av armering, noggrannhet med gjutformar och försiktighet vid hanteringen av de tunga delarna. Inte sällan uppstod avvikelser i produktionen som med tiden har lett till karboniseringskador på armering, sprickbildningar vid stötskadade elementhörn etc. I vissa fall misslyckades man även med tätningen mellan elementen i själva byggnaderna, vilket i sin tur har lett till dragiga och otäta byggnader med dålig värmeekonomi. Eftersom rationaliseringarna inte genomfördes fullt ut, kom varje tillverkare att tvingas utveckla egna system för hur elementen skulle lyftas, fästas och fogas.

Företagsanpassade lösningar

Flera stora svenska anläggnings- och byggföretag ledde utvecklingen av dessa system. Projekteringen var inte sällan företagsspecifik, vilket gjorde att de önskade rationaliseringsvinsterna inte uppfylldes. Ett av de ledande företagen var Aktiebolaget Skånska Cementgjuteriet, som i synnerhet vid sin fabrik i Kalmar kom att introducera de så kallade vinkellementen, vilka möjliggjorde ett helt nytt sätt att bygga bostäder på. Istället för att enbart gjuta plana skivor av betong tog man fram en teknik för att tillverka L-formade element, som kunde användas till kombinationer av väggar, bjälklag eller hörn. Med dessa betongdelar kom en helt ny konstruktionsteknik och monteringslogistik, som medförde rationella byggen på kort tid.





En annan ledande aktör var byggnadsfirman Ohlsson & Skarne, som kom att bli kända för sitt System Skarne 66 – ett modulsystem för prefabricerade betongelement med tillhörande portalkranslösning. Man placerade helt enkelt en kranbana på var sida om huskropparna och lyfte upp alla delar som behövdes med en stor kran, vilken reste sig likt ett upp- och nedvänt U över arbetsplatsen. Bilden ovan visar en sådan arbetsplats där även en fältfabrik för gjutning av betongelement ingår i produktionsflödet. Formarna till elementen placeras ut inom räckhåll för kranen, armering placeras i formarna, betongen blandas i den stora betongblandaren till höger i bild och fördelas därefter i formarna. Tillverkningen på arbetsplatserna rationaliserade bygget samtidigt som det inte krävdes några transporter från gjuteriet.

Figur 2.33. Företaget Ohlsson & Skarne blev synonymt med teknisk utveckling. I bilden syns en av deras portalkranslösningar där kranen grenslade hela byggnaden som var under uppförande. På detta vis kunde alla betongelement lyftas upp till sina platser och bygget blev plötsligt mer en fråga om montering och logistik, än platsgjutning på det traditionella sättet. Foto: Uppsala-Bild, 1954. Upplands museum, UB032857. Digitaltmuseum. Digitalt museum.

I tillägg till de kompletta företagen, som stod för alla delar i kedjan, etablerades även underleverantörer i form av specialiserade betonggjuterier, som med licenstillverkning av olika typer av element kom att bli viktiga i inte minst miljonprogrambygandet. Ett av dessa var Strängbetong (se avsnitt om armering), som redan under 1930-talet hade startat tillverkning av industriellt tillverkade spännarmerade produkter. Deras takstolar med mycket stora spännvidder, pelare- och balksystem kan fås i spännvidder ända upp till cirka 35 meter och kom att bli ett viktigt inslag i särskilt det storskaliga industrihallsbygandet. Även olika typer av andra balklösningar och bjälklagsplattor utvecklades under denna tid. En av dessa – de så kallade håldäcken (HD) med plats för installationer i rörformade hålrum inne i plattorna – är vanliga upp till ca 20 meters spännvidd och är fortfarande i allra högsta grad en del av det moderna betongbygandet.

Figur 2.34. Ett urval bilder på bearbetade eller medvetet utformade betongytor. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2019-2022.



Frilagd ballast och matriser

Samtidigt med det industriella gjutandet introduceras storskaliga estetiska bearbetningsmetoder med friläggning av ballast, gjutning mot matriser och olika mekaniska bearbetningsmetoder. Ett led i denna process är att arkitekterna inleder experiment med olika gjutningstekniker, pigmentering och mekanisk bearbetning. Ambitionerna leder till en rik flora av olika estetiska uttryck under i synnerhet de första åren av rekordåren. Ett mycket vanligt exempel på storskalig produktion med estetiska ambitioner är gjutningen av olika varianter av trappsystem i terrazzo – en i grunden antik teknik där betongen slipas för att få fram cementpastans kulör i kontrast till ballastens egenskaper. Inte minst i allmännyttans bostadsbyggande kom denna typ av betongtytor att dominera trapphusen under flera decennier. Metoden fick en renässans under 1980-talet ibland annat ett antal tunnelbanestationer i Stockholm.



Figur 2.35. Fyra bilder med nya betongbyggnader: Sergelhuset, Norra tornen och Liljevalchs+ i Stockholm. Vattentorn i Helsingborg. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.

2000-tal med nytt estetiskt idéal

Runt millennieskiftet introducerades ett nytt estetiskt betongideal med infärgade gjutningar, avancerad formdesign och komplicerade platsgjutna konstruktioner uppfördes i allt större skala. På denna sida finns ett antal exempel från de senaste åren. De avancerade ytorna kommer sannolikt att bli en verklig utmaning för framtida betongspecialister, inte minst vid kontinuerligt underhåll, rengöring och reparationer.



Framtiden och miljön

Kravet på en klimatneutral produktion av betong är en verklighet i skrivande stund. Alla inblandade aktörer hanterar frågan om miljöbelastning på största allvar och flera aktörer har ambitiösa program för att kunna tillverka klimatneutral betong inom kort, medan andra redan utlovar denna typ av produkt. Omställningen omfattar både hanteringen av koldioxidutsläppen vid tillverkningen av cementet, återanvändning av krossad betong som ballast i nya konstruktioner samt minimering av betongens mängd – *att använda rätt material, i rätt mängd och på rätt plats*. I detta arbete finns även en naturlig plats för alla som eftersträvar att underhålla och förlänga livet på den betong som redan är producerad. Ett av de mest kreativa framtidsscenarierna är möjligheten att 3D-printa betong i olika materialeffektiva strukturer som avsevärt minskar mängden material i förhållande till de lastbärande egenskaperna. Ett av de mest uppmärksammade exemplen på detta är det arbete som genomförs inom ramen för betongforskningen på ETH i Zürich. I samband med arkitekturbienalen i Venedig 2021 uppförde forskargruppen en gångbro med additivt tillverkade prefabricerade betongelement. En konstruktion som rönt stor uppmärksamhet och visar vägen mot vad som kan komma att bli verklighet i stor skala inom kort. Materialåtgången i denna typ av konstruktion är kraftigt reducerad samtidigt som det endast är tryckkrafter inblandade, vilket gör att man inte behöver gjuta in någon armering. Med andra ord en återgång till de principer som gällde i den traditionella valvslagningstekniken.

Figur 2.36. Striatibusbron i Venedig. Konstruktionen består av 3D-printade oarmerade betongelement som vilar mot anfangar av stål. Upplagen är förbundna med ett X av stålprofiler i marknivån, vilket tjänar som dragband och mothåll för tryckkrafterna. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.



REFERENSER OCH MER ATT LÄSA

- Ahlberg, Sven Olof (2012). *Bevara betongen*. Stockholm: Svensk byggtjänst
- Ahlberg, Sven Olof (2015). Att underhålla det underhållsfria. *Byggnadskultur*. 2015:1, s. 32-36
- Ahlberg Sven Olof, Knutson Udd Lena (2009). *Slite cementfabrik. Industri- och kulturhistorisk dokumentation*. Rapport åt Heidelberg Cement. Lidköping
- Ahlberg, Sven Olof & Nilsson-Tarkkanen, Ing-Marie (2007). Modernt kulturarv i vittrande betong. *Byggnadskultur* 2007:4, s. 28-31
- Arkitektur* 1901–: tidskrift. Stockholm
- Betong* 1916–1956: tidskrift. Stockholm
- Betongelement för husbyggnad* (1967). Rapport från byggforskningen nr 29. Stockholm
- Bleazard RG (1998). *Reflections on the history of the chemistry of cement*. Society of Chemical industry. London
- Byggmästaren: tidskrift för arkitektur och byggnadsteknik* 1922–1984. Stockholm
- Cement och betong* 1926–1972: tidskrift. Stockholm
- Herzell Tage (2002). *Betongens yta - en handbok för arkitekter och andra*: Formas. Stockholm
- Kock Karin (1932). *Skånska cement aktiebolaget 1871-1931*: minnesskrift. Uppsala
- Krüger Henrik (1931). *De Tekniska Vetenskaperna*, DTV, Avdelning Byggnadskonst, Band IV, Husbyggnadsteknik. Stockholm
- Lamprecht H.-O. (1996). *Opus Caementitium*, Bautechnik der Römer: Verlag Bau+Technik. Düsseldorf
- Lindqvist Magnus (1999). *Formtryck av vibreringsfri betong*. En uppföljning av ett brobygge i vibreringsfri betong från framtagning av recept till färdig bro. Luleå tekniska universitet, institutionen för väg- och vattenbyggnad. Examensuppsats, 1999:282
- Redlund Margareta (2009). *Strängbetong – de första 70 åren*. Stockholm
- Rosenqvist Martin (2018). Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftutbyggnad: *Energiforsk rapport 2018:481*. Stockholm
- Rönnow Sixten (1937). *AB Skånska Cementaktiebolaget 1887-1947: historik utgiven med anledning av bolagets 60-årsjubileum 1947*. Stockholm
- Skarne Allan (1987). *Med kran och krok*. Uddevalla
- Teknisk Tidskrift* 1872–1977: tidskrift. Stockholm
- Åberg Alf (1972). *Cement i 100 år*. Malmö
- <https://www.wingardhs.se>
- <https://www.marge.se>

PASTISCH

Vissa betongfasader är mer intrikata än andra som denna prefabricerade fasad till Hotel Fouquet ett stenkast från Champs Elysée i Paris. Betongen är en tolkning av de typiskt hausmannska parisfasader som finns i hela centrala staden, men här i en något annorlunda tappning. Ett stort antal prefabricerade paneler är upphängda på en modern bakomliggande stomme och hotellrummens fönster är helt enkelt upptagna exakt där de behövs, utan hänsyn till betongfasadens symmetri och dekorationselementens läge. Kontrasten mellan de stora fönsteröppningarna och de igensatta äldre fönstren är dramatisk. Byggnaden ritades av arkitekt Édouard François och stod klar 2007. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.





BETONG ÄR EN BLANDNING

Elisabeth Helsing och Urs Müller

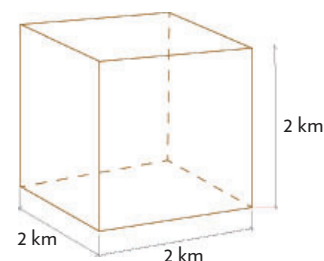
Betong är det mest använda byggnadsmaterialet i världen. Det beror på att betong är relativt billigt, att råvarorna finns över hela världen, att betongkvaliteten lätt kan varieras och anpassas till behoven i det enskilda fallet samt att den kan göras beständig för användning i de flesta miljöer. Varje år produceras cirka 20 miljarder ton betong över hela världen, vilket motsvarar en volym på omkring 8 km^3 , alltså en kub med en kantlängd på 2 km. En så stor mängd byggnadsmaterial kan inte enkelt ersättas med andra material, utan påtagliga konsekvenser.

För att framställa denna mängd betong går det åt stora mängder cement. Världsproduktionen av cement uppgår till ca 3,8 miljarder ton. Cementproduktionen står för ungefär 8 % av jordens koldioxidutsläpp. Största delen av de globala cementrelaterade koldioxidutsläppen orsakas av länder med en enorm efterfrågan på bostäder till rimliga priser. I Europa bidrar cementproduktionen till 3,0 % av de totala europeiska koldioxidutsläppen och i Sverige är bidraget till de totala svenska utsläppen 4,4 % (data från 2018), vilket är betydligt lägre än världsgenomsnittet 8 %.

Som tidigare nämnts utvecklades materialet betong under antiken men föll sedan i glömska. Betong återupptäcktes på 1800-talet och utvecklades därefter till att under 1900-talet bli det mest använda byggnadsmaterialet. Att på kort tid ersätta betong som byggnadsmaterial med andra material är inte möjligt och vi kommer förmodligen att använda betong under en lång tid framöver.

Betong är ett mycket komplext material när det gäller dess kemiska och mekaniska egenskaper. Egenskaper förändras med tiden, dels genom fortgående kemiska reaktioner i själva betongen, dels på grund av den omgivande miljöns påverkan på betongen. Betong är ett oorganiskt material med ett sprött beteende, det vill säga det har en låg draghållfasthet. För att ge betongkonstruktioner draghållfasthet används stålarmering i betongen. Detta ger konstruktionen en seghet som är viktig för säkerheten i betongbyggnader.

Armerad betong är som konstruktionsmaterial billigt och mycket formbart, vilket gör att det lätt kan ges önskvärda konstruktiva egenskaper, bland annat en god beständighet som kan säkerställa livslängder på 100 år eller mer, vilket är av stor vikt för samhällsviktiga större anläggningar och konstruktioner.



Figur 3.1: Varje år tillverkas cirka 20 miljarder ton betong i världen (European Cement Association, 2022). Det motsvarar en kub som sträcker sig två kilometer i alla riktningar. Illustration: Sara Höglund.

BETONG

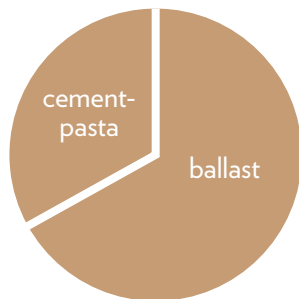
Består av cement, vatten, ballast samt eventuella tillsatsmedel och tillsatsmaterial.

GJUTNING

I arbetet med att rekonstruera Havrekvarnen i Stockholm gjuts ett av bjälklagen. I just detta fall används en självkompakterande betong som pumpas ut från en roterbil. Materialet är bra både av arbetsmiljöskäl och för att betongen fyller formen väl då man har stora mängder armering. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.

HYDRATISERAR

När cement reagerar med vatten.



Figur 3.3: I betong utgör ballasten ca. 2/3 vilket är sand, grus och/eller stenkorn. Bindemedel utgör cirka 1/3 och är cementpasta som består av cement, vatten och ev. tillsatsmaterial och tillsatsmedel.

TILLSATSMATERIAL

Tillsatsmedel eller klinkersättningsmaterial är oorganiska material med cementliknande egenskaper, såsom slagg, flygaska eller silikastoft. Tillsatsmaterial kan ersätta en del av cement i betongen.

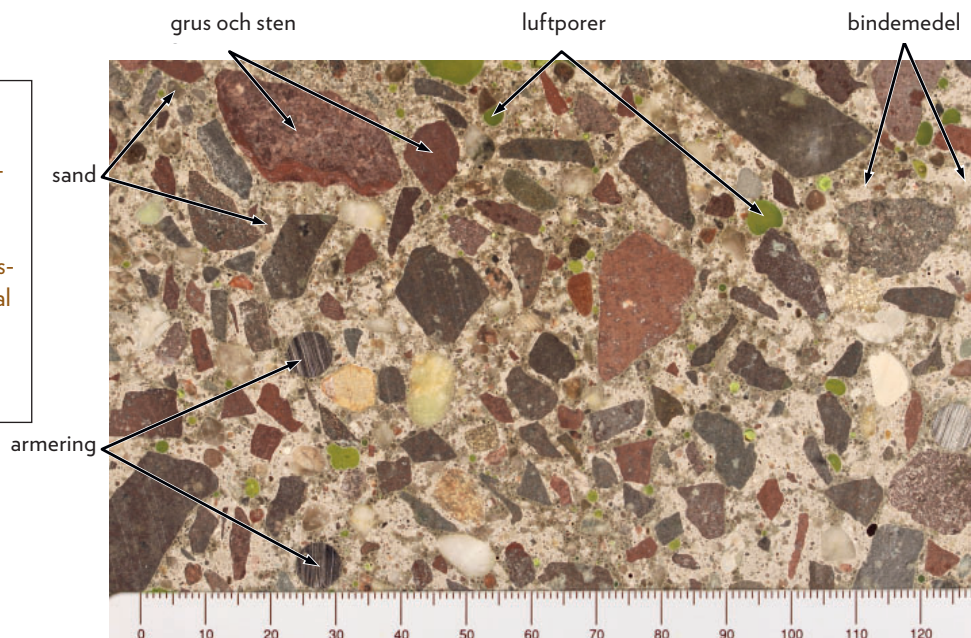
CEMENT, BALLAST OCH VATTEN

Betong för byggnadsändamål definieras som ett “material som utvecklar sina egenskaper genom hydratisering och som består av en blandning av cement, ballast och vatten samt eventuella tillsatsmedel och tillsatsmaterial”. Tillsatsmaterial är oorganiska material med cementliknande egenskaper som tillsätts när betongen blandas, och tillsatsmedel är kemiska ämnen som tillsätts i små mängder för att förändra betongens egenskaper i färskt eller hårdnat tillstånd.

Hydratisering innebär att ett material reagerar med vatten, och i detta fall är det cement och eventuella tillsatsmaterial som svarar för denna reaktion. En övergripande benämning på cement och tillsatsmaterial är bindemedel.

Omkring 2/3 av volymen i dagens betong utgörs av ballast, det vill säga ett kornformigt icke-reaktivt oorganiskt material vanligtvis sand/grus/stenkorn. Det är till för att ge betongen stadga och volymstabilitet. Den övriga volymen utgörs av cementpasta som binder den härdade betongen samman. Cementpastan består av cement, vatten, tillsatsmaterial och tillsatsmedel. Sammansättningen på cementpastan spelar en avgörande roll för betongens slutliga egenskaper.

Utöver själva betongen ingår i de allra flesta fall även armering i dagens betongkonstruktioner. Ett tvärsnitt av en armerad betong visas i figur 3.4, som visar de olika komponenterna.



Figur 3.4. Huvudkomponenter i betong är bindemedel, ballast (sand, grus och stenkorn) och armering. Lägg därtill luftporer som är viktiga för att göra betongen mer frostbeständig. Foto: Urs Müller.

BETONGENS DELMATERIAL – SAMMANSÄTTNING OCH EGENSKAPER

BINDEMEDEL

I betong är cement den viktigaste bindemedelskomponenten. En komplicerande faktor vid användning av begreppet cement är att det används med olika betydelser. När man pratar om cement, tänker man vanligtvis på det som kallas portlandcement, det vill säga finmald portlandcementklinker (i det följande benämnt klinker) som är den produkt som bildas då främst kalksten och lera bränns i en cementugn vid hög temperatur då koldioxid avgår. Men termen cement används också för fabriksstillverkade blandningar av portlandcement och andra mer eller mindre reaktiva oorganiska material som bidrar till betongens egenskaper.

De olika bindemedlen som förekommer kan ha olika reaktionssätt i betongen. Endera kan de vara **hydrauliska**, det vill säga reagera direkt med vatten och bilda hydrater eller så kan de dessutom reagera **puzzolant**. I en puzzolanreaktion reagerar det reaktiva materialet med kalciumhydroxid som frigörs vid reaktionen mellan portlandcement och vatten och hydrat bildas. Ett material kan också vara **latent hydrauliskt**, vilket innebär att ett material kan reagera långsamt med vatten men att det krävs en aktivator utöver vattnet för att hydratiseringen ska starta en snabb hydration.

Historiskt använda bindemedel

Ett betongliknande material tillverkat av kalk användes av etruskerna. Även i Romarriket användes en antik betong *opus caementicium*, med ett bindemedel



CEMENT

Cement är både finmald portlandcementklinker och fabriks-tillverkade blandningar.

TILLSATSMEDEL

Tillsatsmedel är kemiska ämnen som bland annat påverkar:

- konsistens
- härdningstid
- hur snabbt betongen binder
- luftporernas antal och storlek
- krympning

BETONGHANDBOK

Standardverket *Betonghandbok Material* finns i två delar.

Del I: Delmaterial samt färsk och hårdnande betong [21:1].

Del II: Hårdnad betong, fysikaliska egenskaper och beständighet [21:2].

Figur 3.5. Resterna av romersk betong, *opus caementicium*, i en valvkonstruktion i Cefalu på Sicilien. Tegelvalvet användes som en kvar-sittande form för den ovanliggande betong-fyllningen. Bindemedlet i den antika betongen, bruket och putsen bestod av bränd kalk och pulveriserat material som innehöll kiselsyra, till exempel pulveriserat tegel eller vulkanaska, så kallad puzzolan. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2012.

Figur 3.6. Den här fastigheten i korsningen Vasagatan och Vasaplatsen i Göteborg från 1880-talet har en fasad av betong där delar av ornamenten är gjutna med romancement. Byggnaden är restaurerad i omgångar och är sannolikt en av få i landet där den ursprungliga betongen inte är målad. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2012.



som bestod av bränd kalk och pulveriserat material som innehöll kiselsyra, till exempel krossat tegel eller vulkanaska så kallad puzzolan från Pozzuoli utanför Neapel. Romarna använde denna antika betong till byggnader, akvedukter, amfiteatrar, hamnar, dammar och så vidare. Efter Romarrikets fall (476 e Kr) hamnade betongbyggnadstekniken i glömska.

Inte förrän runt år 1800 utvecklades en första patenterad föregångare till våra dagars portlandcement, så kallad **romancement**. Romancement producerades initialt för tillverkning av oarmerad stampad betong. Det ersattes så småningom av portlandcement. Trots det användes romancement fortfarande fram till 1930-talet [1].

Råmaterialet till romancement var naturlig mörgel. Mörgel är en jord- eller bergart där kalksten och lera förekommer tillsammans. Kalkmörgel är mörgel där kalk är huvudkomponenten och lera är en sekundär komponent. I lermörgel är det tvärtom. Kalkmörgel krossades och brändes sedan vid upp till 1200 °C i schaktugnar. Detta resulterade i ett bindemedel som för det mesta bestod av dikalciumsilikat och kalciumaluminat. Efter kylningen maldes cementet och man kunde använda det direkt på byggarbetsplatsen. Cementet härdade relativt snabbt och måste därför bearbetas snabbt. Den snabba härdningen gav en hög tidig hållfasthet, men sedan bara en långsam ytterligare hållfasthetstillväxt.

Romancement användes ofta från mitten av 1800-talet i putsbruk för fasader. Under andra hälften av 1800-talet växte stadskärnorna i Europa

MÄRSEL

Jord- eller bergart där kalksten och lera förekommer tillsammans. Det var råmaterialet till romancement.

mycket snabbt och gjordes delvis om helt, till exempel i Paris och London.

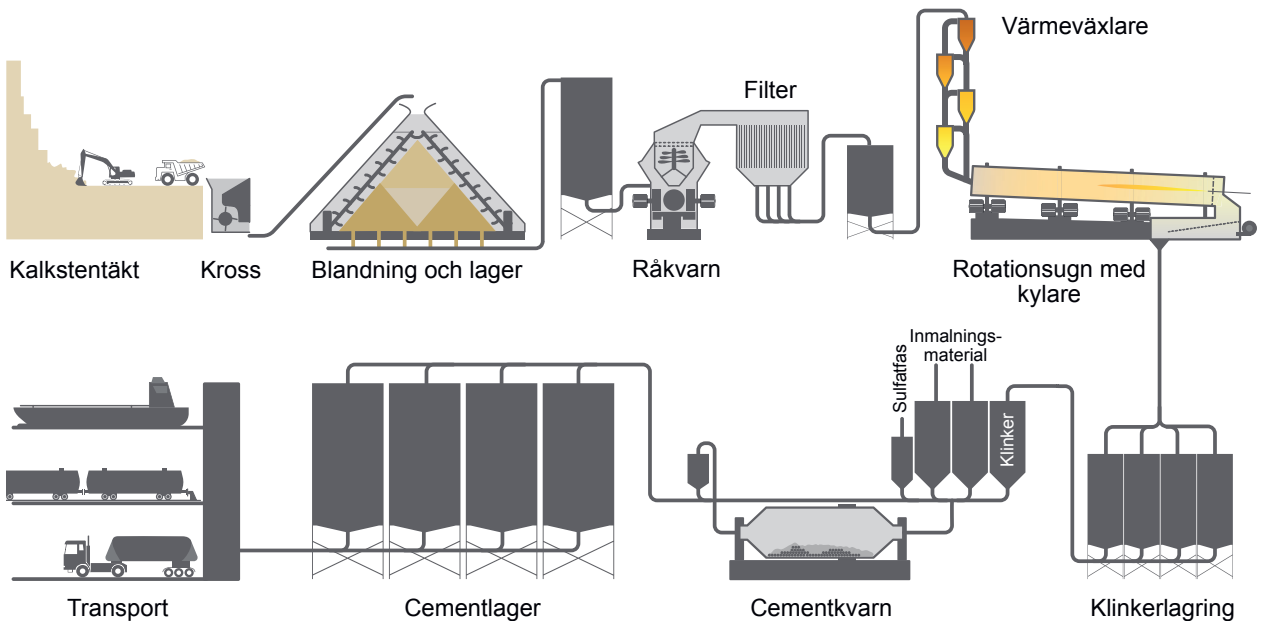
De lastbärande konstruktionerna utgjordes oftast av murverk med tegel. Tegelfasader var dock inte alltid önskade och en täckning av murverket med natursten var mycket dyrt. Ett lågkostnadsalternativ var att täcka tegelfasaderna med ett putsbruk baserat på romacement [2-4]

Den typ av cement som vi idag kallar **portlandcement** föddes år 1824 då patent togs på denna produkt. Portlandcement tillverkas av kalksten och lera [5, 6]. Råvarorna måste innehålla kalciumoxid (CaO), kiseloxid (SiO₂), aluminiumoxid (Al₂O₃) och järnoxid (Fe₂O₃). För att reglera den kemiska sammansättningen tillsätts ibland silikatsand. Blandningen mals i en råkvarn, vilken upphettas till mellan 800 och 900 °C då koldioxid drivs ut ur kalkstensmjölet, så kallad kalcinering. Den faktiska omvandlingen av det kalcinerade råmjölet till cement sker genom termisk behandling upp till cirka 1400 ° till 1450 °C, då kalciumoxiden från kalkstenen reagerar med kisel- och aluminiumföreningar i leran till kalciumsilikater och kalciumaluminater. Den produkt som kommer ur cementugnen kallas klinker och utgörs av sfäriska kulor som kyls snabbt (figur 3.7).

Klinkern mals sedan tillsammans med gips, och förpackas och saluförs som ett portlandcement. Under 1900-talet var portlandcement det helt dominerande bindemedlet i betong. Figur 3.8. visar ett förenklat flödesschema av framställning av portlandcement. I ett senare avsnitt fortsätter berättelsen om historiskt använda bindemedel. Men först mer om tillsatsmedel, ballast och vatten i betong.



Figur 3.7. Kulor av portlandcementklinker. Portlandcement tillverkas av kalksten och lera. Råvarorna måste innehålla kalciumoxid, kiseloxid, aluminiumoxid och järnoxid. Blandningen mals i en råkvarn och hettas upp. Den produkt som kommer ur cementugnen kallas klinker och utgörs av sådana här sfäriska kulor som kyls snabbt. Foto: Urs Müller.



Figur 3.8. Förenklad illustration av tillverkningen av portlandcement. Källa: Urs Müller.

TILLSATSMEDEL

Tillsatsmedel är kemiska ämnen som tillförs betongen i små mängder för att uppnå vissa egenskaper i den färska eller den härdade betongen. Här är några exempel [21:1]:

Vattenreducerande tillsatsmedel: (flyttillsatsmedel, superplasticerare): Förbättrar betongens konsistens så att den kan bearbetas och komprimeras lättare, varigenom man kan minska mängden av vatten i betongblandning.

Retarderande tillsatsmedel: Förhindrar att betongmassan härdar för tidigt, till exempel om betongen måste transporteras över längre avstånd innan den gjuts.

Accelererande tillsatsmedel: Lägg till när betongen behöver binda snabbt eller härda snabbare. Används till exempel för sprutbetong som sprutas på tunnelväggarna, och vid vintergjutning för att öka värmeutvecklingen i tidig ålder och förhindra frysning

Luftporbildare: Tillsätts för att göra betongen mer frostbeständig.

Krympreducerande tillsatsmedel: Tillsätts för att minimera betongens krympning. Detta kan vara viktigt om betongen innehåller hög andel bindemedel, vilket ökar krympningen och risken för sprickbildning.

I historisk betong tillverkad före 1950-talet användes i princip inga tillsatsmedel, istället förlitade man sig på att genom lämpligt val av betongsammansättning och lämplig bindemedelstyp kunna styra betongens egenskaper både i färskt och hårdnat tillstånd. År 1965 infördes krav i Sverige på att betong utsatt för frysning skulle tillföras extra luftporer med hjälp av luftporbildare för att förbättra frostbeständigheten. Idag finns det knappast någon betong som tillverkas utan tillsatsmedel.

BALLAST

De mindre kornstorleksfraktionerna har i Sverige traditionellt utgjorts av sand- och grusfraktioner som extraheras antingen från fluviala eller glaciala avlagringar som vid behov krossas och delas upp i fraktioner (kornstorlekar). Numera används mer och mer krossad finkornig ballast eftersom de naturliga sandavlagringarna är begränsade och behövs för andra ändamål, till exempel som grundvattentäkt. De grövre fraktionerna (≥ 4 mm) utgörs i de flesta fall av bergmaterial så som granit, gnejs eller basalt, som krossats i stenbrott och sorterats. Ballasten måste ha en för betongproduktion lämplig kornstorleksfördelning. Detta säkerställer att betongen får god arbetsbarhet och lätt fyller ut formar, så att bindemedelsmängden kan hållas så låg som möjligt.

Den ballast av urbergsursprung som vi använder i Sverige är av så pass god kvalitet att den normalt inte påverkar den vanliga konstruktionsbetongens egenskaper nämnvärt. Den har hög hållfasthet och mycket lite porer. Vid tillverkning av höghållfast betong (tryckhållfasthet över 100 MPa) är det

dock nödvändigt att även välja en ballast med hög hållfasthet.

En lättare betong kan också tillverkas med porös lättballast, till exempel lättklinker eller pimpsten. En sådan betong kan inte uppnå samma hållfasthet som en betong med vanlig ballast.

Det är också möjligt att använda återvunnen ballast. Det kan vara ballast som består av krossad betong ur rivna konstruktioner, restbetong i betongfabriker eller från krossade redan använda stenmaterial. För ballast av återvunna rivningsmaterial finns särskilda krav i den produktstandard som behandlar ballast till betong. Av ekonomiska skäl och brist på politiskt tryck används dock inte denna typ av ballast ännu i någon högre grad i Sverige.

VATTEN

En mycket viktig parameter som styr många av den härdade betongens egenskaper och dess kvalitet är hur mycket vatten som tillsätts i förhållande till cement- eller bindemedelsmängden. Detta beskrivs genom betongens vattencementtal, *vct* (vikt vatten per vikt cement), eller vattenbindemedelstal, *vbt*, (vikt vatten per vikt bindemedel) [21:1]. *Vbt* används när man tillsätter slagg, flygaska eller silikastoft som tillsatsmaterial vid betongblandningen. Då dessa tillsatsmaterial inte bidrar till hållfastheten och strukturen i samma grad som portlandcement, har man även definierat effektivitetsfaktorer (*k*-värden) för dessa material, vilket ger en uppfattning om deras reaktivitet jämfört med portlandcements. Ett *k*-värde på 0,5 indikerar att tillsatsmaterialiet är hälften så reaktivt som cement. Det har därför också definierats ett ekvivalent vattencementtal, vct_{ekv} , i vilket hänsyn tas till *k*-värden. [21:1]

DELMATERIALENS VOLYM

Det är volymandelarna av de olika delmaterialen i betong som bestämmer betongens egenskaper. Eftersom det är mycket svårt att mäta exakta volymer av kornformiga material, omvandlas volymfraktionerna för de enskilda komponenterna till massor med hjälp av korndensiteter [21:1].

$$\text{Volym betong} = 1 \text{ m}^3 = m_B/\rho_B + m_C/\rho_C + m_V/\rho_V + m_{TM}/\rho_{TM} + m_{TL}/\rho_{TL} + \text{Volym}_{LP}$$

m = massa ρ = korndensitet

Index: B = ballast V = vatten TL = tillsatsmedel
C = cement TM = tillsatsmaterial LP = luftporer

Om ingen luftporbildare har tillsats är vanligtvis lufthalten i en betong mellan 1 och 2 volyms-%. Om en luftporbildare används för att förbättra frostbeständigheten krävs normalt en lägsta lufthalt på mellan 4 och 5 volym-%. Betongsammansättningar är oftast normaliserade till kg per m³ betong och delmaterialen vägs.

VATTEN I BETONG

Vattencementtal (*vct*)

Vikt vatten per vikt cement.

Vattenbindemedelstal (*vbt*)

Vikt vatten per vikt bindemedel.

K-VÄRDE

Tillsatsmaterialen slagg, flygaska och silikastoft bidrar inte till hållfastheten och strukturen i samma grad som portlandcement. Därför har man definierat effektivitetsfaktorer (*k*-värden) för dessa material. Det ger en uppfattning om materialens reaktivitet jämfört med portlandcement.

Ekvivalent Vattencementtal

(vct_{ekv}) Vattencementtal där hänsyn tas till *k*-värdet

$$vct_{ekv} = \frac{m_{vatten}}{m_{cement}} + k \cdot m_{tillsatsmaterial}$$

För flygaska tillämpas k -värden mellan 0,4 och 0,7, för silikastoft k -värden mellan 1 och 2 och för masugnsslagg masugnsslagg k -värden mellan 0,6 och 0,9.



Figur 3.9. Granulerad masugnsslagg har använts som ersättning för portlandcement sedan 1800-talets slut. Masugnsslagg är en restprodukt vid framställning av tackjärn i masugnar. Foto: Urs Müller.

Om tillsatsmaterial, med undantag av silikastoft, ingår är alltså vbt -värdet alltid mindre än vct -värdet. vct_{ekv} -värdet ligger i de flesta fall däremellan, ju lägre k -värde ju närmare vct -värdet. k -värden används inte då samma klinkerersättningsmaterial ingår i ett fabriksstillverkat cement, enbart då de används som ett tillsatsmaterial som tillsätts separat i blandaren. I ett betongrecept anges vanligtvis mängd cement, ballast och tillsatser (om sådana används) samt vct eller vbt .

MER OM HISTORISKT ANVÄNDA BINDEMEDEL

Under 1930-talet fanns i Sverige flera typer av portlandcement som genom lämpligt val av kemisk sammansättning och malfinhet fick olika egenskaper.

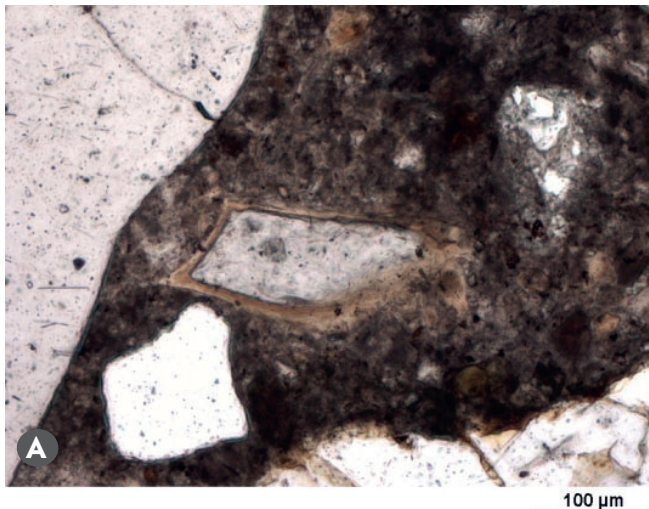
Specialcement var snabbhärdande och hade en hög värmeutveckling,

A-cement var ett vanligt portlandcement och det så kallade **silikatcementet** hade en långsam härdning och låg värmeutveckling. Dessa cementsorter fanns i två hållfasthetsklasser. Klass A med en lägsta tryckhållfasthet efter 28 dygn på 42 MPa (425 kP/cm²) och klass B med en lägsta tryckhållfasthet på 24,5 MPa (250 kP/cm²) [7]. 90-95 % av de cement som tillverkades under den tiden var klass A [7].

Klinkerersättningsmaterial

Redan i slutet av 1800-talet fann man att det gick att ersätta en del av portlandcementet med andra oorganiska material i ett cement och ändå få liknande egenskaper. I Tyskland har man använt masugnsslagg (hyttsand) i större mängder som en ersättning för klinker sedan 1882.

Masugnsslagg är en restprodukt vid framställning av tackjärn i masugnar [8].



Figur 3.10. En betong med slaggcement. Bild A har ett slaggkorn i bildmitten som visar en hydratiseringsrand. Bild B visar samma slagg-

korn under UV-ljus med en stark rosa fluorescensfärg. (Tunnslipbild, A=Planpolariserade ljus och B=UV-ljus). Foto: Urs Müller.

För användning i cement eller betong kyls slaggen snabbt med vatten, vilket resulterar i ett millimeterstort glasigt granulat, se figur 3.9. Vid tillverkning av slaggcement mals granulatet tillsammans med klinker i klinkerkvarnen. Granulerad masugnsslagg förkortas ofta GGBS, ground granulated blast-furnace slag. Masugnsslagg innehåller 30-45 % kalciumoxid (CaO), 30-45 % kiseloxid (SiO₂), 5-15 % aluminiumoxid (Al₂O₃), 4-17 % magnesiumoxid (MgO), 0,5-1% svavel (S) och spår av andra element.

I Sverige användes slagg under tidigt 1900-tal i **slaggcement** (figur 3.10) som till 85 % bestod av slagg eller **järnportlandcement** som innehöll 30 % slagg. Ingen av dessa cement fick dock någon större användning och tillverkningen upphörde snart [9]. År 1954 började Cementa tillverka ett slaggcement som kallades **vulkancement**. Detta användes mest i vattenanläggningar, broar, bostadshus och dammar, till exempel vattenkraftverken i Lindbyn 1953 och Trängslet 1955-1960, båda i Dalälven. Slagginnehållet i vulkancementet varierade mellan 25 och 50 % [9]. Slagg minskar cementets värmeutveckling, vilket ger mindre risk för sprickbildning i betongen men förlänger härdningstiden. Vintertid innehöll cementet lägre halter slagg och sommartid högre halter. Tillverkningen av vulkancement pågick till 1972 med en topp omkring 1962 [9]. Från 1978 till 1982 tillverkade Cementa ett annat slaggcement, **massivcement** med en slagghalt på 65 % [9]. Massivcementet användes i vattenanläggningar och kraftverksbyggnader, till exempel Matfors (ombyggnad 1982) och Skallbölle (ombyggnad 1982) – båda i Ljungan. Betong med detta cement visade dock i vissa fall tecken på sprickbildning som sattes i samband med en alltför långsam hållfasthetsutveckling i tidig ålder.

Det har i Sverige även funnits andra blandcement. **Pansarcement** tillverkades av Skånska Cement AB i två varianter, den ena *Pansar A* innehöll 0-25 %

KLINKERERSÄTTNINGSMATERIAL

Material som ersätta cementklinker: **Industriella restmaterial** som exempelvis masugnsslagg, kiselrik flygaska från kolförbränning eller silikastoft.

Malda bergmaterial som till exempel kalkstenmjöl, vulkanisk aska (t.ex. trass och suevit) och kalcinerade leror.

Figur 3.11. Krångede kraftverk i Indalsälven byggdes 1933-1936. Betongen är gjord av pansarcement som gav en ljusare beigeartad kulör. Foto: Sven Olof Ahlberg.



MODERNA CEMENTTYPER

-
- omkring år 1800 — Romancement börjar tillverkas.
- 1824 — Portlandcement börjar tillverkas.
- tidigt 1900-tal — Slaggcement börjar tillverkas.
Produktionen upphör tämligen omgående.
- 1926 — Aluminatcement som härdar snabbt börjar användas.
- 1930-tal — Romancement slutar användas.
- mitten 1930-tal — Pansarcement börjar tillverkas.
- 1940-tal — E-cement introduceras som ersättning till A-cement som inte kunde tillverkas p.g.a. stenkolsransonering.
- 1954 — Vulkacement börjar användas med en försäljningstopp omkring 1962. Tillverkningen upphör 1972.
- 1960 — Aluminatcement förbjöds i lastbärande konstruktioner.
- 1978 — Massivcement börjar tillverkas men produktionen upphör redan 1982.
- 1980-tal — Tillåtet att använda cement med andra hydrauliska eller puzzolaniska klinkerersättningsmaterial än masugnsslagg.

ANDRA VIKTIGA HÄNDELSE

-
- mitten av 1800-talet — Armeringsjärn av stål introduceras.
- 1930-tal — Vibrerad betong introduceras.
1930-tal — Fram till dess används s.k. våt- & blötbetong i konstruktioner med armeringsstål.
- 1950-tal — Stampbetong ersätts helt av vibrationsbetong.
- 1965 — Ny regel att tillsätta luftporbildare i frostutsatt betong.
- omkring 1990 — Den första versionen av Europeisk Cementstandard ges ut.
- 2000 — CE-märkning av olika cementtyper.

kalcinerad kaolinlera och den andra *Pansar silikat* 10-15 % kalcinerad kaolinlera. Pansarcement hade en låg värmeutveckling men var mer känsligt för utlakning av kalciumhydroxid än portlandcement. Pansarcementet gav betongen en ljusare, beigeartad färgton. Betong med pansarcementet har använts för dammar, kraftverksanläggningar och broar, exempelvis Krånge kraftverk 1933-1936 i Indalsälven och Malforskraftverk 1933-1936 i Motala ström.

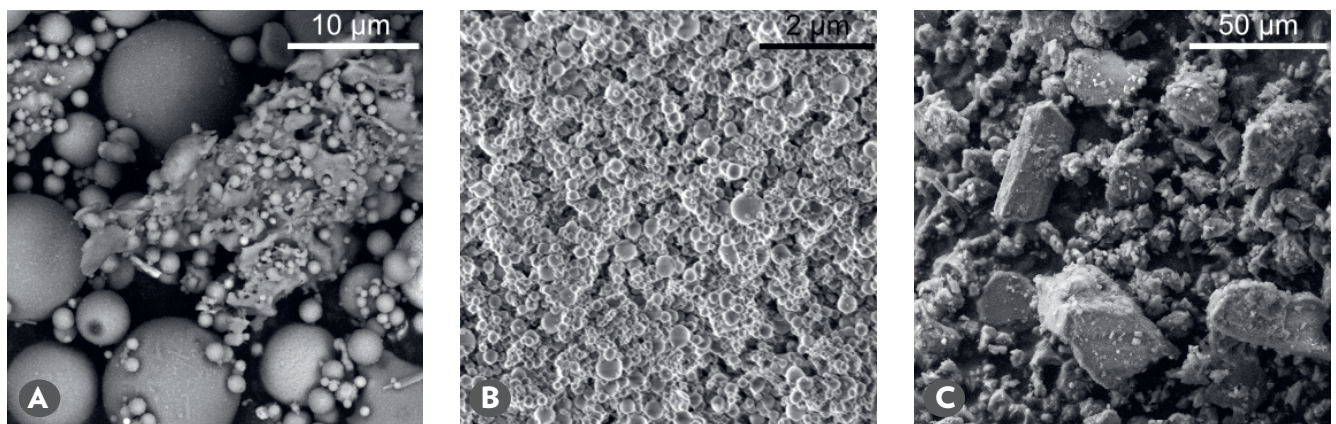
Under andra världskriget fanns i Sverige en temporär brist på stenkol som var huvudbränsle för cementugnarna vid cementtillverkningen. Cementtillverkarna blev därför tvungna att försöka uppehålla produktionen vid den minskade bränsletillgången [10]. De utvecklade därför ersättningscement. **Ersättningscement** eller **E-cement** innehöll mindre klinker vilket ersattes av mellan 30 och 50 % av inmalad slagg, sandsten, kalksten, skifferaska eller andra material [10]. Cementet uppfyllde hållfasthetskravet för klass B. E-cement tillverkades vid sex olika cementfabriker och sammansättningen och typen av inmalningsmaterial varierade mellan olika fabriker [10]. Klinkern i E-cement utgjordes av A-cementklinker. Hållfasthetsutvecklingen var lägre hos E-cement än hos A-cement, och berodde dels på typ av ersättningsmaterial och dels på malfinheten. [9, 10]. Att använda E-cement bedömdes inte ge upphov till någon större risk i byggnader, i vilka ändå A-cementets hållfasthetsegenskaper inte utnyttjades fullt ut.

Nya klinkerersättningsmaterial börjar användas

Under 1980-talet gav de svenska cementbestämmelserna möjlighet att även använda cement med andra hydrauliska eller puzzolaniska klinkerersättningsmaterial än masugnsslagg.

Runt 1990 kom den första versionen av den europeiska cementstandarden ENV 197-1 ut, och började tillämpas i Sverige. Sedan år 2000 är den harmoniserad standard som är basen för CE-märkning av cement. I den definieras sammansättning och kvalitetskriterier för olika typer av ordinära

Figur 3.12. Tre exempel på klinkerersättningsmaterial. Bild A är kiselrik flygaska, B är silikastoft och C är vulkanisk aska. Fotografierna är tagna med svepelektronmikroskop (SEM). Foto: Urs Müller.



portlandcementbaserade cement, det vill säga cement som innehåller mer eller mindre klinker. År 2021 kompletterades denna med den icke-harmoniserade EN-standarden SS EN 197-5 [12] där ytterligare cementtyper definierades. Enligt dessa båda standarder finns det sex huvudgrupper av ordinära cement:

CEM I – Portlandcement. Består av minst 95 % klinker och kan innehålla upp till 5 % odefinierade mineraliska mindre beståndsdelar.

CEM II – Sammansatta portlandcement: I vilket upp till 35 % av klinkern ersätts med andra huvudbeståndsdelar (masugnsslagg, flygaska, silikastoft, kalksten m.fl.). Kan innehålla mer än en annan huvudbeståndsdel än klinker.

CEM III – Slaggcement: Mellan 35 och 95 % av klinkern ersätts med mald granulerad masugnsslagg.

CEM IV – Puzzolancement: Mellan 11 och 55 % av klinkern har ersatts av ett puzzolant material som kan vara silikastoft, flygaska, naturlig puzzolan eller kalcinerade leror.

CEM V – Kompositcement: Mellan 18 och 50 % av klinkern kan ersatts av masugnsslagg och minst ett av materialen flygaska eller puzzolan.

CEM VI – Kompositcement: Mellan 36 och 50 % av klinkern har ersatts av masugnsslagg och minst ett av materialen kalkstenmjöl, flygaska eller puzzolan.

Blandcementtyperna CEM II till CEM VI innehåller större eller mindre mängder av en eller flera andra huvudbeståndsdelar än klinker; masugnsslagg, kiselrik eller kalkrik flygaska, silikastoft, naturliga eller kalcinerade puzzolaner, bränd skiffer eller mald kalksten. Kraven på dessa andra huvudbeståndsdelar anges i cementstandarden.

De vanligast förekommande naturliga puzzolanerna utgörs av vulkaniska askor. Trass är en vulkanisk aska från Eifel i Tyskland som har använts sedan romartiden för produktion av hydraulisk kalk och kalkbetong. Suevit är ett sediment som bildas när en meteorit slår ned. Den består huvudsakligen av stenar som vid kollisionen krossas, kastas upp i luften och delvis smälts och regnar tillbaka till marken. Båda formerna av puzzolaner används främst vid cementproduktion.

Flygaska är en restprodukt vid förbränning av kol [13]. Flygaska deponeras från rökgaserna från koleldade kraftverk via elektriska filter. Den behöver inte malas eftersom den är tillräckligt fin. Kiselrika flygaskor har högst 10 vikt-% kalciumoxid (CaO) och den innehåller i övrigt 50-60 % kiseloxid (SiO₂), 30-40 % aluminiumoxid (Al₂O₃), ≤5 % natriumoxid, kaliumoxid (Na₂O, K₂O). Kalkrik flygaska som har > 10 % kalciumoxid (CaO) och kommer från brunkol eller förbränning av biomassa. Cement med kalkrik flygaska har dock inte varit tillåtet i Sverige.

Silikastoft är en restprodukt som separeras ur rökgaserna från elektriska ugnar när kvarts (SiO_2) smälter och reduceras till kisel med elektrofilter [14]. Silikastoft har en kiseloxidhalt på över 85-90 % och är grå på grund av kolförorening. Kol används som ett reducerande medel vid produktion av kisel. Silikastoft är extremt finkornigt och uppvisar en puzzolanisk reaktion.

I Sverige har fram till idag främst cement med masugnsslagg och cement med högst 20 % kalksten eller flygaska använts. Detta beror dels på att klinkerersättningsmaterialen påverkar betongens beständighetsegenskaper, dels på att man reglerar nationellt i vilka exponeringsmiljöer de får användas.

Utöver att använda blandcement så är det också möjligt att blanda vanligt portlandscement med flygaska, silikastoft eller mald granulerad masugnsslagg i betongblandaren. Vid denna tillämpning benämns de tillsatsmaterial typ II till betong [15], vilket står för att de är reaktiva tillsatsmaterial. Tillsatsmaterial typ I är däremot inerta material till exempel pigment och filler. För användning som tillsatsmaterial typ II finns särskilda produktstandarder som fastställer kraven på materialen. Materialen fungerar på i princip samma sätt när de ingår i cementet som de gör då de blandas in i betongblandaren och i stort sett samma regler för användning med hänsyn till beständighet gäller för båda fallen i Sverige. I fortsättningen används termen klinkerersättningsmaterial som ett samlingsbegrepp för dessa reaktiva material både då de ingår som en huvudbeståndsdel i ett fabriksstillverkat cement eller om de blandas i betongblandaren separat.

Även om vi i Sverige tidigt började använda den europeiska cementstandardens som initialt definierade 27 olika cementtyper så har inte alla ansetts vara beprövade för användning i svenskt klimat, på grund av att klinkerersättningsmaterialen påverkar betongens beständighet. Se vidare under rubriken *Alltmer ökade kvalitetskrav*.

När man först började använda klinkerersättningsmaterial var det endera för att lösa problem med brist på någon råvara som var nödvändig för produktion av portlandcement eller för att bidra till att lösa avfallsproblem inom vissa andra industrier. Det gällde att till exempel få en meningsfull avsättning för masugnsslagg från järnverk, flygaska från kolkraftverk eller silikastoft från kisel fabriker. Varefter kunskapen om inverkan av dessa material på betongens egenskaper utvecklades har de omdefinierats från avfall till biprodukter. När det gäller silikastoft så kunde man i princip få det gratis i början, men idag är det ungefär dubbelt så dyrt som portlandcement. I takt med att klimatfrågan blivit allt viktigare, har drivkraften för att minska andelen portlandcementklinker i betong varit att minska koldioxidutsläppen och erhålla en betong med bättre ekologisk hållbarhet. Numera råder det brist på dessa material på grund av ökad efterfrågan på dessa ersättningsmaterial, på grund av minskad koleldning och förändrade tillverkningsprocesser för de primära produkterna som till exempel stål, vilket ger mindre mängd biprodukter. I stället strävar man idag efter klinkerersättningsmaterial med mer obegränsad tillgång, till exempel *kalcinerade leror*. Kunskapen om deras

KEMISKA PROCESSER

Cement ett mycket komplext material och att styra den härdade betongens egenskaper är endast möjligt om man har en djupare förståelse för de kemiska processerna.

Figur 3.13. Sportpalatset vid Sankt Eriksbrons sydöstra sida i Stockholm är byggt av aluminat- cementbaserad betong. Byggnaden uppfördes 1929-1930 efter ritningar av arkitekt Jean Sigfrid Adrians. Problemet med aluminatcement som bindemedel är att hållfastheten minskar och porositeten ökar med tiden. I Sverige var aluminatcement vanligt mellan 1926 och 1941 mestadels i pelare och balkar samt i bjälklag och väggar. Materialet förbjöds i lastbärande konstruktioner från och med 1960. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.



inverkan på betongens egenskaper är dock ännu inte lika djup som för slagg, flygaska eller silikastoft.

Under första delen av 1900-talet användes även ibland **aluminatcement**, se figur 3.13 [5]. Aluminatcement består huvudsakligen av kalciumaluminater till skillnad från portlandcement som innehåller högre halt av kalciumsilikater [5]. I Sverige har aluminatcement även benämnts **smältcement** [16]. Aluminatcement tillverkades av en blandning av kalksten och bauxit (ett sediment som består av en stor andel av aluminiumhydroxider) som brändes i en ugn med temperaturer mellan 1450° och 1600 °C tills de smälte. Smältan togs ur ugnen och efter kylning maldes materialet [5, 16]. En alternativ produktionsmetod för aluminiumcement är i en rotationsugn, där råvaran inte smälter men reaktionsprodukterna sintras ihop, på ungefär samma sätt som för liknande klinker.

Aluminatcement härdar snabbt och ansågs idealiskt för tillämpningar där man behövde kunna riva formarna snabbt. Priset för aluminatcement var tre gånger högre än för portlandcement, vilket gjorde att det inte fick någon bredare tillämpning [17]. I Sverige användes aluminatcement mellan 1926 och 1941 i över 4000 byggnader, mestadels i pelare och balkar samt i bjälklag och väggar [18]. Efter hand observerade man att hållfastheten minskade och porositeten ökade i byggnadsdelar där man använt betong med aluminatcement. Detta berodde på en omvandling av inte helt stabila kalciumaluminat-hydrat som har en lägre densitet (högre volym) till stabila hydrat med en högre densitet (mindre volym). Omvandlingen kan inträffa efter upp till 30 år [5] i fuktiga miljöer. På grund av detta förbjöds användning av aluminatcement i lastbärande konstruktioner från och med 1960. Aluminatcement tål höga temperaturer (1 500–1 600 °C) och används vid gjutning av eldfasta

C-S-H

Kalciumsilikathydrat (C-S-H) är resultatet av reaktioner mellan portlandcement och vatten.

komponenter till eldstäder och insatser i värmepannor och i eldfast bruk. Dessutom används det i avjämningsmassor och i reparationsbruk. Det är också möjligt att blanda aluminatcement med portlandcement i olika proportioner.

Det finns andra typer av cement, som **calciumsulfoaluminatcement**, **supersulfatcement**, **magnesiacement** och **fosfatcement**. Dessa har särskilda användningsområden och tillverkas inte i någon större omfattning.

Bindemedlens hydratisering eller reaktion

De olika cement- och bindemedelstyperna som beskrivs ovan har olika kemiska sammansättning. Deras sätt att reagera och härda, reaktionshastighet och värmeutveckling skiljer sig därför åt.

Hydratisering av Portlandcement

Klinkern består av fyra kemiska huvudkomponenter: kalciumoxid (CaO), kiseldioxid (SiO_2) och mindre mängder av aluminiumoxid (Al_2O_3) och järnoxid (Fe_2O_3). Dessa förekommer i klinkerns fyra huvudmineral [19, 21:1]:

Alit, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$

Belit, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$

Kalciumaluminat, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$

Ferrit, $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$

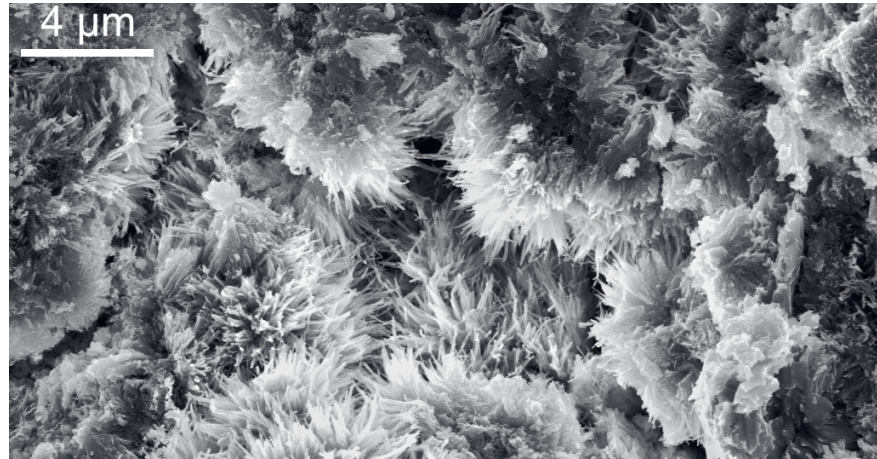
Dessutom förekommer andra mineral i mindre mängder ($< 5\%$), som fri kalk (CaO), magnesiumoxid (MgO) och alkalisulfater.

När portlandcement kommer i kontakt med vatten reagerar de fyra mineralen med vatten genom komplexa reaktioner. Reaktionsprodukterna är olika hydrater. Man talar därför om hydratisering (eller hydratation) av cement. Det är främst **alit** och **belit** som bidrar till den hydratiserade slutprodukternas styrka och beständighet:

Alit + vatten \rightarrow C-S-H + kalciumhydroxid
(kalciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ även kallad portlandit)

Belit + vatten \rightarrow C-S-H + kalciumhydroxid

C-S-H är en vanlig beteckning för de huvudsakliga kalciumsilikathydraterna. C-S-H har en nanostruktur men ingen kristallstruktur i klassisk mening, se figur 3.14 på nästa sida. Den exakta kemiska sammansättningen varierar beroende på förhållandet mellan kalcium och kisel och förekomst av aluminium. I alla kalciumsilikatreaktioner frigörs kalciumhydroxid som tillsammans med alkalisulfater ger ett pH-värde på 13–14 i betongens porlösning. Alitreaktionen sker snabbt, inom några timmar upp till en månad, medan belitreaktionen sker långsammare men håller på längre.



Figur 3.14. Kalciumsilikhydraters (C-S-H) struktur i ett hydratiserat portlandscement. Foto: Urs Müller.

Kalciumaluminat reagerar med kalciumhydroxid och vatten till kalciumaluminathydrat. Det är en mycket snabb reaktion, vilken kan skapa en alltför hastig bindning av cementet (inom några minuter) vilket inte är önskvärt. För att undvika detta och reglera bindetiden blandar man i gips i portlandscement. Då bildas initialt i stället ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$). Under de första 4-6 timmarna, formas korta prismor av ettringit runt cementkornen, vilket håller den färska betongen plastisk och formbar. Senare omvandlas de korta ettringitprismorna till långa nålformiga kristaller som bidrar till bindemedlets bindning. När hydratiseringen fortsätter, reagerar ettringit med kalciumaluminat till kalciumaluminatmonosulfat (monosulfat). Omvandlingen från ettringit till monosulfat kan ta flera veckor till månader, men vanligtvis finns små mängder ettringit kvar i det hydratiserade cementet [19].

Den önskade hållfasthetsnivån uppnås främst genom C-S-H-faserna efter en hydratiseringstid på fyra veckor. Andra hydratiseringsprodukter, som kalciumhydroxid, monosulfat eller ettringit, bidrar inte till den slutliga hållfastheten men är viktiga för bindemedlets stabilitet. Normalt hydratiserar inte all cement, utan mellan 20 och 40 % av klinkern förblir ohydratiserad. Det innebär att betong alltid innehåller cementkorn som inte är helt hydratiserade. Som framgår av reaktionerna är cement ett mycket komplext material och att styra den härdade betongens egenskaper är endast möjligt om man har en djupare förståelse för de kemiska processerna.

Hydratiseringen av cement är exoterm, det vill säga värme frigörs under reaktionerna. Den frigjorda värmen leder till en ökning av temperaturen i betongen, se figur 3.15. Sprickor kan bildas i massiva betongkonstruktioner om temperaturen stiger för mycket. I sådana betongkonstruktioner som dammar eftersträvas därför ett cement med låg värmeutveckling och den nygjutna betongen kyls via kylspolar som är ingjutna i betongen.

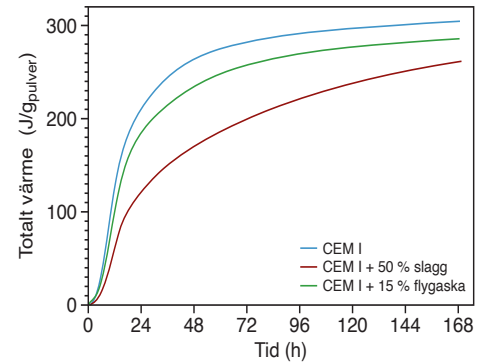
Reaktion av mald granulerad masugnsslagg

Mald granulerad masugnsslagg (GGBS) kan användas både som huvudbeståndsdel i cement eller som ett tillsatsmaterial typ II till betongen. Den snabba nedkylningen vid produktionen av slaggen gör att den inte hinner kristallisera utan får en glasig amorf struktur. Glasig slagg är ett latent hydrauliskt material som behöver en aktivator för att hydratisera tillräckligt snabbt [20]. När GGBS används tillsammans med portlandcement fungerar kalciumhydroxiden och de alkalier som frigörs vid cementreaktionen som aktivator. De reaktionsprodukter som bildas är snarlika de som fås vid portlandcementreaktionen, men förhållandet kalciumoxid/kiseldioxid är lägre och det bildade materialet innehåller mer aluminium- och magnesiumföreningar.

Slaggen reagerar initialt långsammare än portlandcement, vilket leder till lägre värmeutveckling i tidigt skede och minskar risken för tidig sprickbildning i massiva konstruktioner, se figur 3.15.

Reaktion av flygaska

Den viktigaste faktorn för reaktiviteten är mängden glasfas. Den mest väsentliga reaktionen är kiseldioxidreaktionen med den från cementet frigjorda kalciumhydroxiden, puzzolanreaktionen. Reaktionsprodukterna utgörs av samma typ av cementgel som bildas med portlandcement, men med lägre kalciumoxid/kiseldioxidförhållande i gelen [20]. Alkali och sulfater bidrar till att reaktionen startar, men den är initialt betydligt långsammare än portlandcementreaktionen och även långsammare än masugnslaggens reaktion, se figur 3.15.



Figur 3.15. Värmeutveckling av tre olika bindemedel: Portlandcement (CEM I) och Portlandcement blandat med masugnsslagg respektive flygaska. Kurvor tagna med en isotermisk kalorimeter. Källa: Urs Müller.

Figur 3.16. Gjutning av ett betongbjälklag kräver en ordenlig arbetsinsats med utportionering av betongen, avjämning, inmätning av höjder och slutlig justering av eventuella misstor. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2020.

Reaktion av silikastoft

Silikastoft är ett starkt reaktivt puzzolant material. Det reagerar med den kalciumhydroxid som bildas när portlandcement reagerar, och bildar en C-S-H med lägre kalciumoxid/kiseldioxidförhållande än portlandcement. Den reagerar även kemiskt med alkalierna i porvattnet, och reaktionen startar i princip omedelbart och är snabb. Reaktionshastigheten är starkt temperaturberoende, vilket är typiskt för puzzolanreaktioner.

Aluminatcements hydratisering

Kalciumaluminatcement (CAC) består av kalciumoxid (CaO) och aluminiumoxid (Al_2O_3), med en mindre mängd av kol (C) och en viss andel kiseldioxid (SiO_2) vanligtvis under 10 %. De kristallina huvudmineralen i vanlig CAC är monokalciumaluminat ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) och mindre mängder ferrit ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) [19]. Om aluminiumhalten är hög, kan cementet också innehålla andra aluminatmineral [19].

CAC är ett snabbt härdande cement. Aluminatmineralen reagerar snabbt med vatten till kalciumaluminiumhydrater, i de flesta fallen till $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ och mindre mängder av andra mineral [19]. Värmeutvecklingen liknar den hos portlandcement men den uppstår under en kortare tidsperiod. Hållfasthetsutvecklingen är alltså snabbare än hos portlandcement.

Vissa av hydratiseringsprodukterna är metastabila under vanliga förhållande och kan vid temperaturer över 23 °C omvandlas till aluminatföreningar med mindre andel H_2O . Volymerna av dessa omvandlingsprodukterna är mycket mindre, vilket medför att betongens porositet ökar vilket minskar hållfastheten. Omvandlingen inträffar efter flera år, och främst i betong med låga cementmängder och större porositet. Det ledde, som nämnts tidigare, till att aluminatcement inte längre får användas i betong för lastbärande konstruktioner.

BETONGENS EGENSKAPER OCH HUR DE UTVECKLATS

DEN FÄRSKA BETONGENS EGENSKAPER

När betongen gjuts spelar konsistensen hos den färska betongen en viktig roll. Konsistensen måste vara tillräckligt lös för att betongen ska flyta ut och fylla formen men samtidigt inte så lös att betongens delmaterial separerar från varandra och gör betongen inhomogen, eller att betongen blöder, det vill säga att blandningsvattnet tränger upp och lägger sig på betongytan. Betongen måste ha en sådan konsistens under en tidsperiod som är tillräcklig för att betongen ska hinna transporteras till gjutplatsen, gjutas och bearbetas.

Fram till första hälften av 1900-talet gjordes betongkonstruktioner ofta

med jordfuktig betong [22]. För att uppnå denna konsistens justerades vatten- och bindemedelsinnehållet, och den färska betongen hade praktiskt taget inte någon plasticitet. Den färska betongen måste då stampas i formen med stor kraft, därav namnet "stampbetong". En fördel är då att formen kan tas bort efter relativt kort tid utan att den nygjutna betongen flyter ut. För massiva konstruktioner med låga hållfasthetskrav som dammar eller fundament har man traditionellt använt en mager jordfuktig betong med en låg halt av cement, vanligtvis en cementhalt under 250 kg/m^3 betong och ett *vct* mellan 0,55 till 0,80. Fördelen med en så mager betong är att värmeutvecklingen blir låg liksom kostnaden per m^3 betong. Men beständigheten mot frostnedbrytning, karbonatisering och urlakning, vilket är av vikt för i synnerhet vattenkraftanläggningar, var låg. Stampbetong med en cementhalt mellan 250 och 400 kg/m^3 användes fram till 1950-talet. Stampbetong lades ut i jämna lager med 12 till 20 cm tjocklek och bearbetades med en plan- eller kantstötare.

För betongkonstruktioner med armeringsstål använde man fram till 1930-talet en våt- och blötbetong [22]. Cementhalten i denna var ungefär densamma som i stampbetongen, men man använde ett *vct* på mellan 0,70 till 0,90. Denna betong fick ofta en ojämn kvalitet med blödning av vatten, separation och ballastansamlingar. Jordfuktig konsistens används fortfarande idag vid tillverkning av betongprodukter som betongblock eller betongrör, eftersom formen kan avlägsnas omedelbart efter att den fuktiga blandningen har hållits in i formen och bearbetats kraftigt mekaniskt, vilket innebär att stora mängder betongvaror kan produceras på kort tid.

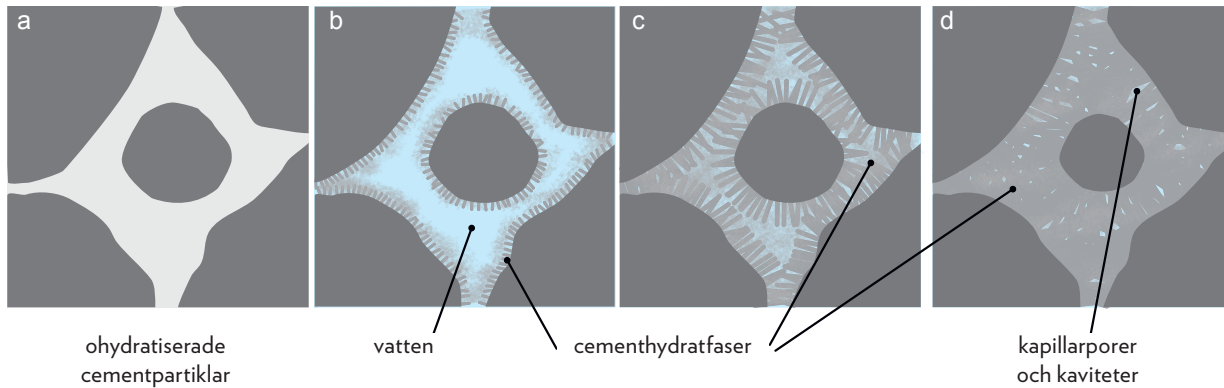
Den färska betongen som används mest idag har en plastisk konsistens, vilket betyder att betongen i viss mån breder ut sig i formen av sig själv, men måste fördelas och komprimeras med hjälp av vibrationer, till exempel med vibratorstavar [15, 23]. Vibrerad betong har använts sedan 1930-talet. En typisk cementhalt i vibrerad betong är i dagsläget mellan 320 kg/m^3 och 420 kg/m^3 med ett *vct* av 0,40 till 0,60. Men under till exempel 1950-talet var cementhalten lägre (210 till 360 kg/m^3) [23]. För att få rätt konsistens används idag konsistensreglerande (vattenreducerande) tillsatsmedel.

En teknik som har funnits i ungefär 15 år är att med hjälp av kemiska ämnen ge betongen en konsistens som gör att den helt flyter ut av sig själv och inte behöver vibreras, så kallad självkompakterande betong [24]. Sådan betong är dock inte lika robust som vanlig betong, det vill säga den är mer känslig för variationer i sammansättning, och för förhållandena vid gjutning och härdning. Den används därför främst i förtillverkade betongelement som tillverkas i fabriksmiljö.

För att täcka in ett stort intervall av konsistenser hos betong, från mycket styva betonger via vanlig plastisk konstruktionsbetong till självkompakterande betong, krävs flera provningsmetoder. För vanlig konstruktionsbetong är den i särklass mest använda klassificeringsmetoden sättmått, d.v.s. ett mått på hur mycket en kon av den färska betongmassan sjunker ihop då den avformas.

KARBONATISERING

Innebär att koldioxid från luften reagerar med kalciumhydroxid och C-S-H-faser i härdad betong vilket sänker pH-värdet och kan få armeringen att korrodera. Processen sker i all betong som utsätts för koldioxid, det vill säga reaktionen sker inte på betong under vatten eller betong med ett lufttätt ytskikt.



Figur 3.16. Principiellt utseende hos strukturen hos portlandcementpasta där a är direkt vid blandningen, b efter några minuter, c vid bindning och d efter några månader. Illustration: Urs Müller.

Denna metod utarbetades i början av 1900-talet. Den fungerar dock varken på mycket styv betong eller självkompakterande betong, för vilka andra mätmetoder har utarbetats. I den europeiska betongstandarden SS-EN 206 [15] anges lämpliga provningsmetoder för olika konsistensintervall och därtill hörande klassificeringssystem.

VART TAR VATTNET VÄGEN?

Vattenmängden som man blandar i betong är alltid större än vad som kommer att reagera med bindemedlet. Det vatten som inte reagerat bildar porer, vilka i tidigt skede är vattenfyllda. Det vatten som reagerat ökar mängden fast material i strukturen, vilket gör att volymandelen porer minskar [25]. De porer som bildas är av olika storlek. I C-S-H-gelen som bildas vid hydratiseringen är hydratiseringsprodukter intimt sammankopplade med extremt små gelporer ($< 10 \text{ nm}$). Den resterande vattenvolymer ger upphov till betydligt större kapillärporer och kaviteter ($10\text{-}1000 \text{ nm}$). Med ökande hydratisering minskar den totala andelen porer och porstorleksfördelningen blir successivt finare. Hur porstrukturen ser ut vid olika tillfällen visas schematiskt i figur 3.16.

Bindning motsvarar det tillstånd då betongen går från att vara en formbar massa till att hydratiseringsprodukterna ger betongen en viss styvhet så att betongen inte längre är formbar. Detta inträffar för portlandcement normalt efter 2-4 timmar vid rumstemperatur. Bindningstiden kan påverkas av bindningsaccelererande eller bindningsretarderande tillsatsmedel.

Ju mindre porstorlek desto hårdare kommer det vatten som finns i dem att vara fysiskt bundet med ytspänningskrafter [26]. Porstrukturen i härdad betong är så pass fin att en mycket stor del av porerna förblir vattenfyllda på grund av ytspänningskrafter när betongen exponeras för relativa luftfuktigheter (RF) som förekommer normalt i vår omgivning, alltså är högre än ca 50 % RF [22, 27]. Vid en omgivande fuktighet på ca 98 % är nästan alla porer i betongen vattenfyllda.

Betongens hållfasthet bestäms till största delen av cementpastans porositet [27]. Porositeten beror dels på hur mycket vatten som tillsattes från början (*vbt*), dels på hur långt hydratisering och puzzolanreaktioner har nått (hydratiseringsgraden). Tillsammans med porstorleksfördelningen är porositeten även avgörande för betongens permeabilitet, som i sin tur är av avgörande betydelse för betongens beständighet och livslängd.

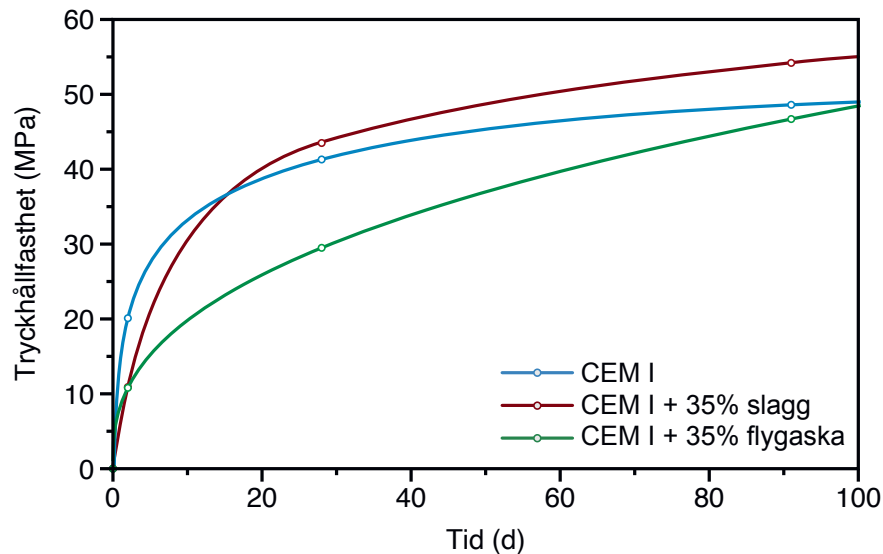
De kemiska reaktionernas utveckling

För att betongen ska få de egenskaper som eftersträvas krävs att bindemedlen reagerar. Efter att bindning inträffat sker de kemiska reaktionerna snabbt i början och sedan alltmer långsamt och kan om förhållandena är gynnsamma fortsätta under mycket lång tid. Hydratiseringen/reaktionen är beroende av tillgång på vatten. Hur god vattentillgången i betongen är vid en viss tidpunkt beror på hur mycket vatten som tillsats från början i förhållande till mängden bindemedel (*vbt*), hur mycket av vattnet som har reagerat och om betongen har varit utsatt för uttorkning eller tillskott av vatten utifrån. Vattentillgången i en betong brukar beskrivas genom att den relativa fuktigheten (RF) i dess porsystem anges. Fullständig vattenmättnad motsvarar 100 % RF och lägre RF anger att en viss del av porerna är luftfyllda. Reaktionshastigheten sjunker med sjunkande RF, och om RF i betongen sjunker under ca 75 % så avstannar de kemiska reaktionerna helt.

I den färska betongen är tillgången på fritt vatten god, men för att säkerställa en fortsatt god vattentillgång under den tidsperiod när reaktionerna sker som snabbast och permeabiliteten är så hög att uttorkning lätt kan ske, bör en nygjuten betong lagras fuktigt eller skyddas från uttorkning under denna kritiska period, vilket vanligtvis är första veckan efter gjutning. Efter denna period är permeabiliteten så låg att uttorkning på grund av lågt RF i omgivningen mest påverkar det betongens ytlager medan RF det inre av betongkonstruktionen ligger kvar på en nivå väl över 75 % under ansevärd tid. När portlandcement reagerar med vatten så får reaktionsprodukterna en något mindre volym än ursprungsmaterialen. Om inget vatten tillförs utifrån så fylls denna volym med luft, och man får en viss kemisk uttorkning (självuttorkning) av betongen som sänker RF i betongen och leder till en viss krympning. Vid höga *vbt* är påverkan av självuttorkning minimal men effekten ökar med sjunkande *vbt*. Vid riktigt låga *vbt* kan RF sjunka så lågt att hydratiseringen avstannar även om det tillförs vatten utifrån eftersom permeabiliteten blir så låg att vattnet har svårt att tränga in. Betong med *vbt* lägre än 0,32 brukar därför kallas självuttorkande.

En annan faktor som påverkar hydratiseringen/reaktionerna är temperaturen. Vid 0 °C sker ingen reaktion alls medan högre temperatur höjer reaktionshastigheten. Högre temperaturer ger i och för sig en snabbare tillväxt i början men betydligt långsammare tillväxt senare i processen. Vid temperaturer över ca 60 °C kan dock andra reaktionsprodukter bildas, vilka kan påverka

Figur 3.17. Hållfasthetsutveckling hos vattenlagrad betong med portlandcement (CEM I) och portlandcement med 35 % flygaska respektive 35 % slagg, med i övrigt samma delmaterial ($v_{bt} = 0,45$). Källa: Elisabeth Helsing [37].



betongens egenskaper och beständighet negativt. Klinkersätningsmaterialen är vanligtvis mer temperaturkänsliga än portlandcement.

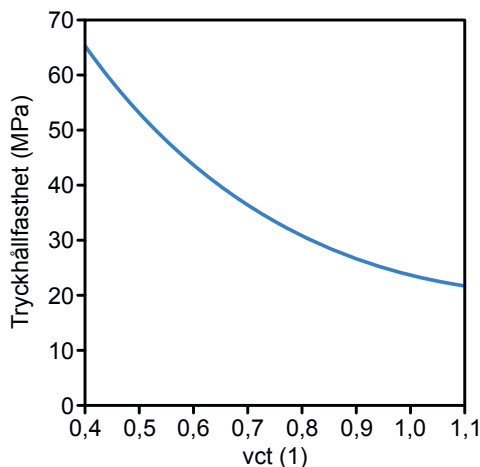
Hydratiseringshastigheten är även beroende av typ av cement och bindemedel. För att reglera utvecklingshastigheten hos ett portlandcement kan malningsgraden och den kemiska sammansättningen varieras. Klinkersätningsmaterial påverkar också hastigheten hos hydratisering/puzzolanreaktion och strukturutveckling. Flygaska och slagg ger långsammare utveckling i tidigt skede men mer långtgående hydratisering/reaktion på längre sikt (> ca 90 dygn). De mycket små kornen i silikastoft ger däremot snabbare utveckling tidigt i förloppet, men endast marginell inverkan därefter.

Hållfasthetsutveckling

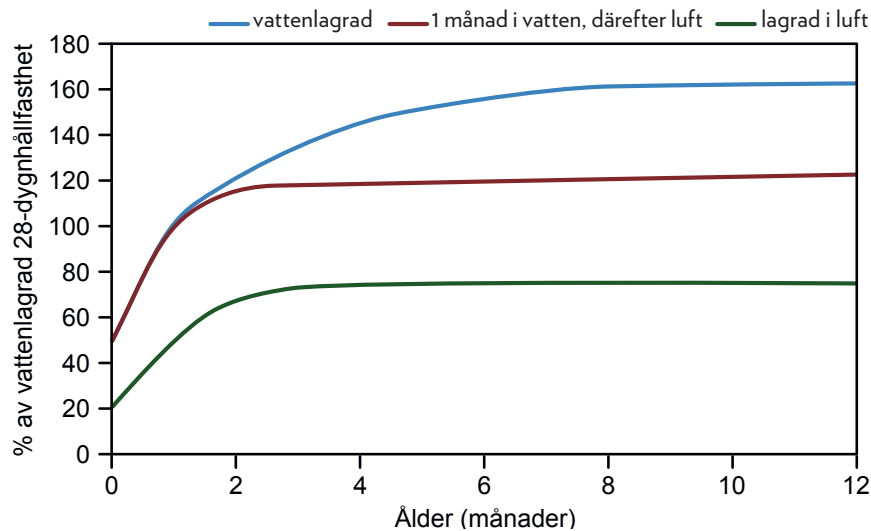
Den ur konstruktionssynpunkt viktigaste egenskapen hos betong är dess tryckhållfasthet, som utgör en viktig parameter för att säkerställa att ett byggnadsverks av betong får tillräcklig bärförmåga och stabilitet. Hållfasthetsutvecklingen följer i princip de kemiska reaktionernas förlopp, och den inverkan som klinkersätningsmaterial har på de kemiska reaktionerna (föregående avsnitt) återspeglas i hållfasthetsutvecklingen, vilket framgår av exemplet i figur 3.17 [21:1].

Hos en färsk betong är hållfastheten försumbar fram till att bindning inträffar. I takt med att de kemiska reaktionerna sker ökar hållfastheten kontinuerligt under mycket lång tid om de yttre förutsättningarna är gynnsamma.

Den hållfasthet man utgår från för att bestämma en konstruktions bärför-



Figur 3.18. Principiellt förhållande mellan vct och tryckhållfasthet hos en portlandcementbetong. Källa: Betonghandbok Material Del 1, [21:1].



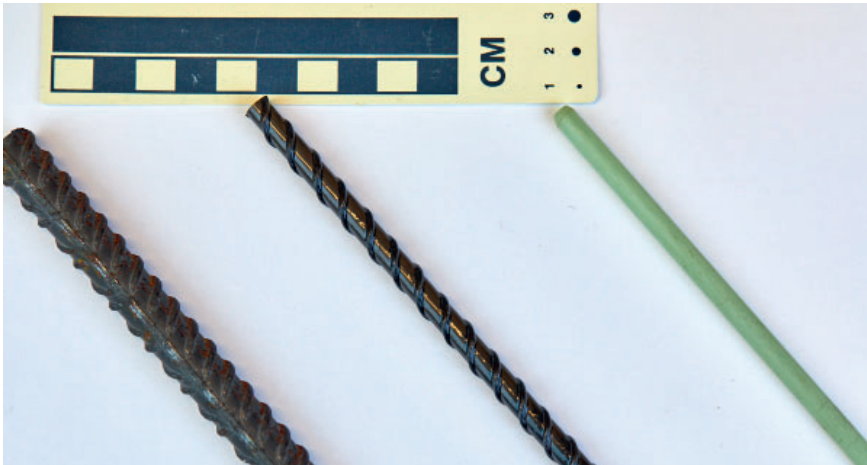
Figur 3.19. Inverkan av olika lagrings betingelser på hållfasthetsutvecklingen hos en portlandcementbetong med relativt högt vattencementtal (vct). Källa: Figur baserad på Gonnerman and Shuman, 1928 [29].

måga är hållfastheten hos provkroppar efter 28 dygns vattenhärdning vid $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nivån på 28-dygnshållfastheten är starkt beroende av vct/vbt eller vct_{ekv} . Ju lägre vct/vbt eller vct_{ekv} , desto högre blir 28-dygnshållfastheten. Ett samband mellan vct och tryckhållfasthet vid 28 dygn framgår av figur 3.18. Observera att denna figur bara ska tolkas principiellt eftersom ett flertal faktorer påverkar kurvans läge i höjdlid, bland annat skillnader i ingående bindemedel och ballast, och inte minst provningsmetodik [21:1].

Betong delas in i hållfasthetsklasser baserade på 28-dygnshållfastheten. Klasserna betecknas med två olika värden, t.ex. C8/10, där det första anger lägsta hållfasthet provad på vattenlagrad cylinder och det andra lägsta hållfasthet provad på vattenlagrad kuber. I SS-EN 206 [15] anges klasser för vanlig betong från C8/10 till C100/115. Det finns även klasser för betong med lättballast från LC8/9 till LC80/88. Hållfasthetsvärdet är inte ett medelvärde från flera provkroppar utan det karakteristiska värdet, alltså ett värde som 95 % av alla provresultat klarar. Detta kan vara av vikt att känna till när gammal betong ska klassificeras enligt de gällande hållfasthetsklasserna.

I verkliga konstruktioner har man sällan tillgång till fritt vatten, vilket ju är den förlagring som gäller vid lagring av provkroppar för hållfasthetsprovningen. Den karakteristiska 28-dygnshållfasthet som bestämts på vattenlagrade provkroppar av en betong reduceras därför vid beräkning av konstruktioners säkerhet mot brott. Dessutom tillkommer ett antal andra säkerhetsfaktorer vid beräkning av betongkonstruktioner, för att säkerställa att risken för kollaps minimeras.

Hur hållfastheten hos en betongkonstruktion med relativt högt vct påverkas av fuktillgången i den omgivande miljön beskrivs schematiskt i figur 3.19.



Figur 3.20. Olika typer av armering. Från vänster: kamstång (stål), profilerad stång av kolfiberarmerad polymerer (CFRP) och slätstång av glasfiberarmerad polymerer (GFRP). Foto: Urs Müller.



Figur 3.21. Släta armeringsstänger av stål som i regel hittas i konstruktioner uppförda före andra världskriget. Foto: Urs Müller.

ARMERING

Armering används i betong för att ge den bättre egenskaper när den utsätts för böjning och dragning. Betongens tryckhållfasthet styrs av mängden vatten i förhållande till mängden bindemedel, vattencementtalet (*vct*) eller vattenbindemedelstalet (*vbt*). Betongens draghållfasthet är dock ca 10 till 15 gånger lägre än dess tryckhållfasthet. Dessutom har oarmerad betong, som alla andra mineraliska byggnadsmaterial, ett sprött mekaniskt beteende vilket innebär att materialet utan förvarning kan kollapsa vid en viss belastning. Armeras betongen fås ingen plötslig kollaps, utan den kan fortfarande tillsammans med armeringen ta upp last även om själva betongen spruckit. Brottet blir segt. Detta är av stor vikt för säkerheten i en byggnad som kan utsättas för extrema laster, t.ex. vid olyckor.

Härdad betong innehåller porer som i tidig ålder är mer eller mindre vattenfyllda. När detta porvatten torkas ut krymper betongen något. Sprickor kan uppstå om betongen inte kan krympa fritt utan är utsatt för ett yttre tvång. Det kan till exempel vara en komponents geometri. Sprickor finns alltid i betongen, men med armering kan man begränsa antalet sprickor och sprickbredden.

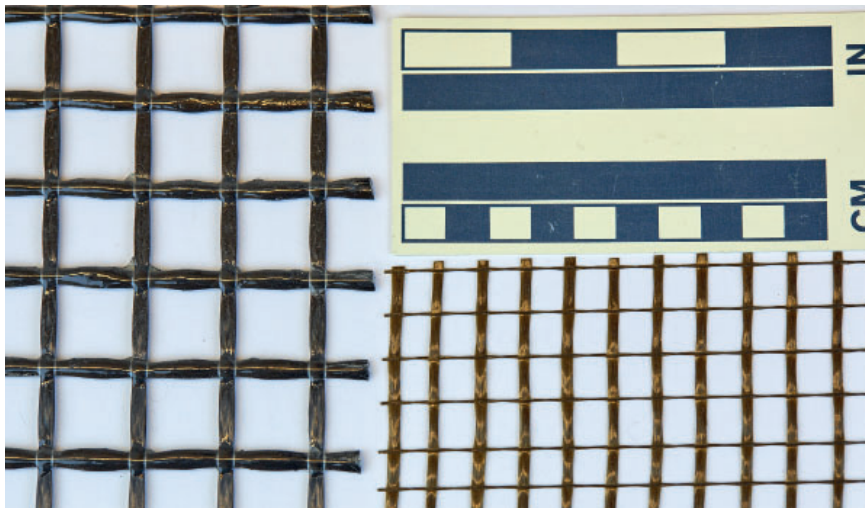
Armering av stål eller järn har använts sedan mitten av 1800-talet. Dagens armeringsstänger och armeringsnät är ribbade, det vill säga de har tvärgående eller sneda kammar eller profiler, se figur 3.20. Profileringen förbättrar avsevärt vidhäftningen mellan armering och betong. Före andra världskriget användes släta stänger (figur 3.21), mattor eller plattjärn [22]. Det var då önskvärt att armeringen var något korroderad innan den placerades i formen, eftersom den korroderade ytan gav bättre vidhäftning mot betongen.

Armeringen kan placeras i formen och bara gjutas in. Denna typ av armering, som är den absolut vanligast förekommande kallas slakarmering. Armeringen kan också spännas innan den gjuts in (förespänd armering), eller läggas i speciella rör i konstruktionen och spännas efter att betongen härdat till viss del (efterspänd armering). Detta förfarande tillämpas främst på förtillverkade betongelement eller konstruktioner med stora spännvidder, som broar, eftersom det höjer den lastbärande förmågan hos betongkonstruktionen.

På senare tid används även glas- eller kolfiberförstärkt plast (GFRP eller CFRP) som armering, för det mesta i form av stavar. GFRP- eller CFRP-stavar är vanligtvis inte ribbade, men har antingen ett pålimmat sandlager, eller så har en tråd eller ett glasfiberpaket spirallimmats på ytan för att förbättra vidhäftningsegenskaper, se figur 3.20. GFRP-armering har inte samma egenskaper som stål och är dyrare. I vissa fall, till exempel vid reparation av historiska byggnadsverk, kan dock denna typ av armering vara fördelaktig då den inte korroderar och det är svårt att få till ett tillräckligt täckande betongskikt.

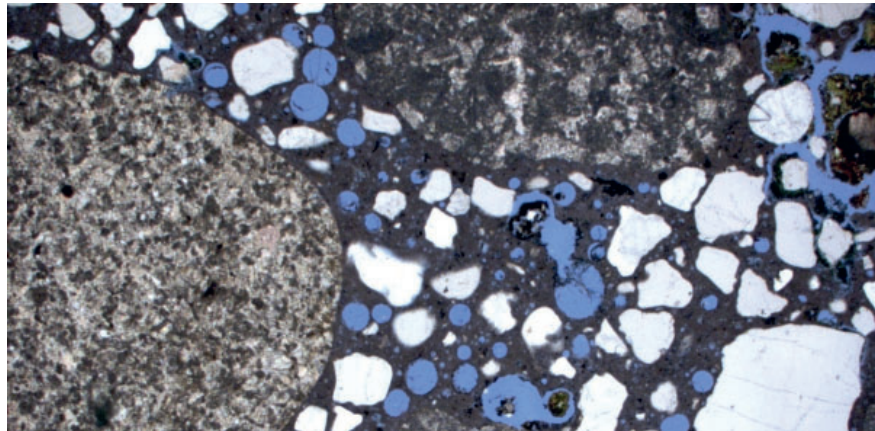
Förstärkning av betong med korta fibrer vinner också mark, särskilt för golv, sprutbetong och förtillverkade byggnadsdelar. Förutom stålfibrer används plastfibrer i allt högre grad, främst för att minska betongens sprickbildningstendens.

Slutligen skall förstärkningar i form av väv nämnas, se figur 3.22. Textilarmering används i allt högre grad där komponenterna måste vara tunna och ha lägre vikt [28]. Textilarmering används till exempel i fasadelement, men också vid varsam renovering i kombination med finkornigt bruk kan vävarmering vara lämpligt. Vävarna består av glas-, eller kolfibrer som har doppats i epoxi eller styren butadien-gummi (SBR).



Figur 3.22: Två typer av textilarmering i form av ett kolfibertextilnät, impregnerade med epoxiharts (vänster) och ett glasfibertextilnät (höger). Foto: Urs Müller.

Figur 3.23. Tunnslipsbild av en betong med luftporbildare. Det blå är luftporer fotograferade i polarisationsmikroskop med planpolariserade ljus. Foto: Urs Müller.



DEN OMGIVANDE MILJÖNS PÅVERKAN PÅ KONSTRUKTIONEN

Varje betongkonstruktion påverkas av den omgivande miljön. Miljöpåverkan är oftast negativ. Den kan utgöras av ett direkt angrepp av aggressiva ämnen i den yttre miljön som bryter ned betongen eller frysning som spränger betongen. Det kan också vara fråga om angrepp som gör att armeringen korroderar, som inträngning av klorider eller karbonatisering av betongen på grund av koldioxid i luften. Det kan också röra sig om spontana strukturförändringar inne i betongen vilka stimuleras av yttre faktorer. Sådana förändringar är exempelvis ballastreaktioner och sekundära cementreaktioner, stimulerade av fukt och värme. Miljöpåverkan kan i vissa avseenden också vara positiv och ge upphov till fortsatt hydratisering av cementkorn och självläkning av sprickor och andra defekter.

I måttligt aggressiva miljöer överväger de positiva effekterna och betongkonstruktionens kvalitet och hållfasthet ökar under i stort sett hela brukstiden. Armerade betongkonstruktioner är mer känsliga för långtidspåverkan än oarmerade konstruktioner, eftersom armeringskorrosion förr eller senare initieras trots att betongen är intakt. I mer aggressiva miljöer bryts dock även betongen ned.

Beständighetsproblem i Sverige orsakas oftast av frostangrepp eller armeringskorrosion. Andra typer av angrepp är olika typer av kemiska angrepp; slulfatangrepp, havsvattenangrepp, saltangrepp, urlakning och cement–ballastreaktioner.

De faktorer som främst avgör beständighet och livslängd hos betongkonstruktioner är följande:

- Betongmaterialets täthet, vilken främst bestäms av *vbt*, bindemedelstyp och härdningsbetingelser
- Cementpastans kemiska sammansättning, vilken bestäms av bindemedelstypen

- Ballastens mineralogiska sammansättning
- Luftporstrukturen

Av dessa faktorer är troligtvis tätheten den mest betydelsefulla. Vid tillräckligt tät struktur spelar de övriga faktorerna mindre roll.

FROSTBESTÄNDIGHET

Hårdnad betong har en total porositet varierande mellan ca 12 och ca 20 %. Den allra största delen av dessa porer utgörs av fina porer som vattenfylls mycket snabbt vid normal utomhusanvändning av betongen. När betongen fryser övergår en viss del av porvattnet till is, och då sker en expansion som kan orsaka spänningar i betongen som skadar den [29, 21:2]. Skaderisken ökar med ökad fuktbelastning och om vattnet innehåller salter. Frostskador kan vara inre och observeras på betongytan som ett sprickmönster som löper i alla riktningar. Frostskador visar sig dock oftast i form av avflagningar från betongytan [31]. Denna typ av frostskador är särskilt vanliga och djupa då det finns avisningssalter eller havsvatten på betongytan.

Ju lägre permeabilitet betongen har, d.v.s. ju tätare den är, desto större är motståndet mot frostskador. Betong med lågt *vbt* är tätare än betong med högre *vbt*. En betong som fått härda längre tid är också tätare än nygjuten betong. Bra härdningsförutsättningar (t.ex. tillgång på fukt) ger också tätare betong [21:1].

För att höja frostbeständigheten hos betong tillsätter man luftporbildare vid gjutningen som gör att små sfäriska luftporer bildas som fungerar som expansionsutrymmen för det frysande vattnet, se figur 3.23. I Sverige har det varit krav på att använda luftporbildare i frostutsatt betong sedan 1965. För att luftporerna ska fungera som tänkt måste de vara väl dispergerade i betongmassan och medelavståndet mellan porerna bör inte överstiga en kritisk avståndsfaktor, som är ca 0,20 mm. Lufthalten i en frostbeständig betong bör vara minst 4-5 % [32].

För att differentiera kraven på betong med avseende på frostbeständighet delas omgivningsmiljöerna in i fyra klasser, XF1-XF4 enligt SS-EN 206 [15]. XF1 och XF3 avser miljöer utan salt och XF2 och XF4 med salt. XF1 och XF2 är måttligt fuktiga miljöer och XF3 och XF4 är miljöer med hög fuktbelastning. I Sverige räcker det normalt med att göra betongen tillräckligt tät i klass XF1. För XF2 och XF3 krävs en viss minsta lufthalt erhållen med luftporbildare. För att påvisa att betongen klarar XF4 ska den i Sverige frysprovas enligt svensk standard SS 137244 [33]. För samtliga exponeringsklasser anges dessutom ett lägsta vct_{ekv} . De nationella reglerna anges i SS 137003 [34].

Vilket bindemedel som används påverkar porstorleksfördelningen hos de porer som bildas av det vatten som inte binds kemsikt i betongen. Detta beror på skillnader i kemi och hur grovmalet bindemedlet är. Detta gäller för olika

portlandcement och i synnerhet när klinkersättningsmaterial används. Slagg i höga halter (> 35 %) har en högre karbonatiseringshastighet (i en optimal karbonatiseringsmiljö) [35] som har en negativ inverkan på frostbeständigheten, främst saltfrostbeständigheten [36, 37]. I praktiken mildras denna inverkan i fuktiga miljöer då de flesta porerna då är vattenfyllda, vilket förhindrar koldioxid från att tränga in i betongen.

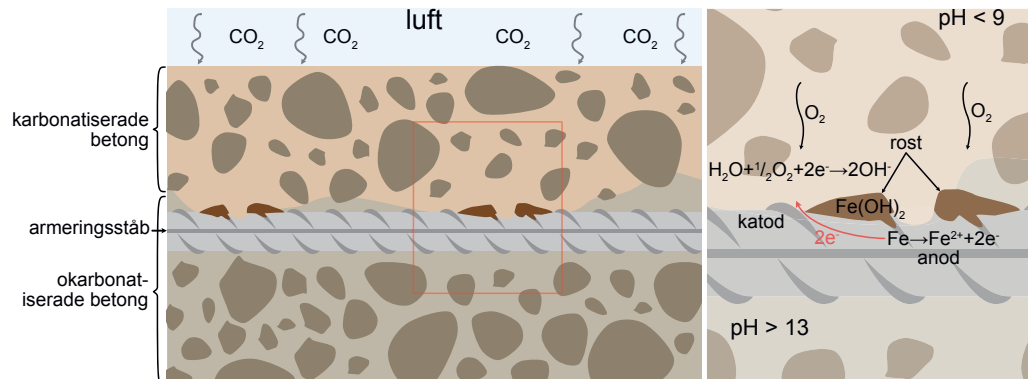
Med silikastoft får man normalt en minskad avflagning vid saltfrostprovning under de 56 salt-frostcykler som en normal provning varar. Med silikastofthalter på över 10 % har man dock uppmätt en plötsligt ökande avflagning vid saltfrostprovning som inträffar efter 56 cykler. Därför krävs salt-frostprovning i 112 cykler när silikastoft ingår i betongen.

Flygaska innehåller kol som stör luftporbildningen, och mängden luftporbildare måste ökas. Den initialt långsamma strukturtillväxten gör att flygaskabetong är särskilt känslig för frysning i tidig ålder.

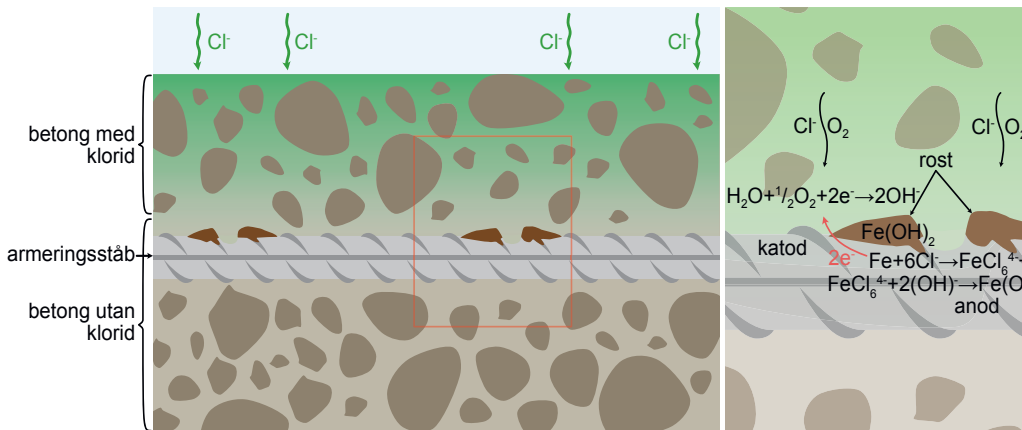
ARMERINGSKORROSION

Korrosion är en elektrokemisk process där laddningar transporteras mellan en anod och en elektrod drivna av en potentialskillnad. Vid katoden sker en reaktion mellan elektroner, syre och vatten där bland annat järnoxid (rost) bildas. Korrosionen orsakar en minskning av armeringsarean samtidigt som produkten innebär en expansion som kan spränga loss täckande betong [38].

I härdad nygjuten betong är pH-värdet 13-14. Vid så höga pH-värden bildas ett tätt, skyddande oxidskikt som passiverar stålets yta och drar ner korrosionshastigheten till nästan noll. Sjunker pH-värdet under c:a 9 försvinner passiviteten och stålet kan börja korrodera om luft och syre finns tillgängligt. Betongytor som utsätts för omgivningsluft som innehåller koldioxid, börjar karbonatisera (kalciumhydroxid samt C-S-H-faser i betongen reagerar med koldioxid och kalciumkarbonat bildas). Detta sänker pH-värdet i betongen, se figur 3.24. För att skydda armeringen ser man därför till att dra ner på karbonatiseringshastigheten genom att sänka betongens permeabilitet (krav



Figur 3.24: Mekanismer för armeringskorrosion initierat av karbonatisering.
Illustration: Urs Müller.

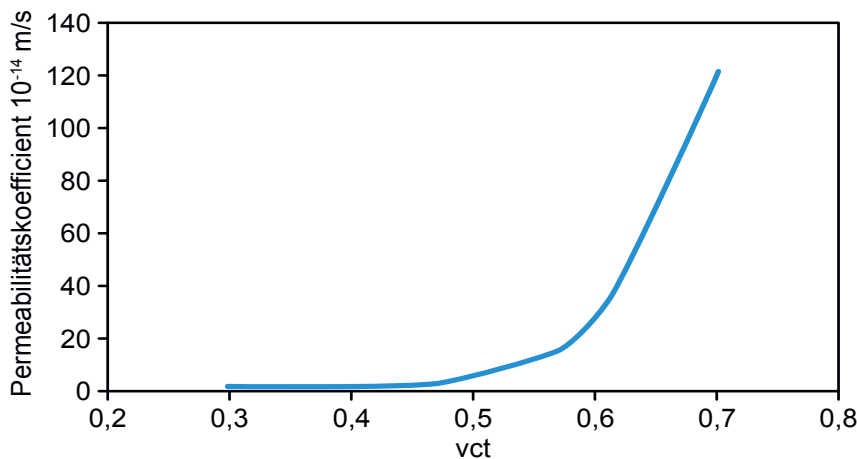


Figur 3.25. Mekanismer för armeringskorrosion initierad av kloridinträngning. Illustration: Urs M ller.

på lågt *vbt*) samt genom att se till att täckskiktet över armeringen  r så tjockt att karbonatiseringsfronten inte når ner till armeringsstålet under konstruktionens avsedda livslängd.

Kloridjoner har en förmåga att tr nga igenom det passiverande ytskiktet och starta armeringskorrosion n r kloridjonkoncentrationen n r ett kritiskt värde, tröskelvärdet, se figur 3.25 [38, 39]. Klorider tränger normalt in från betongens yta från till exempel havsvatten eller avisningsalter. Åtgärderna för att minska risken för denna typ av korrosion  r detsamma som f r karbonatiseringskorrosion, minskad permeabilitet och tillräckligt täckskikt.

Silikastoft i de mängder som används idag ($\leq 10\%$) påverkar inte karbonatiseringshastigheten mer än marginellt, även om kalciumoxidhalten minskar så domineras inverkan på korrosionen av att permeabiliteten sänks betydligt. Den sänkta permeabiliteten med silikastoft ger en positiv inverkan både på motståndet mot korrosion orsakad av karbonatisering och orsakad av kloridinträngning.



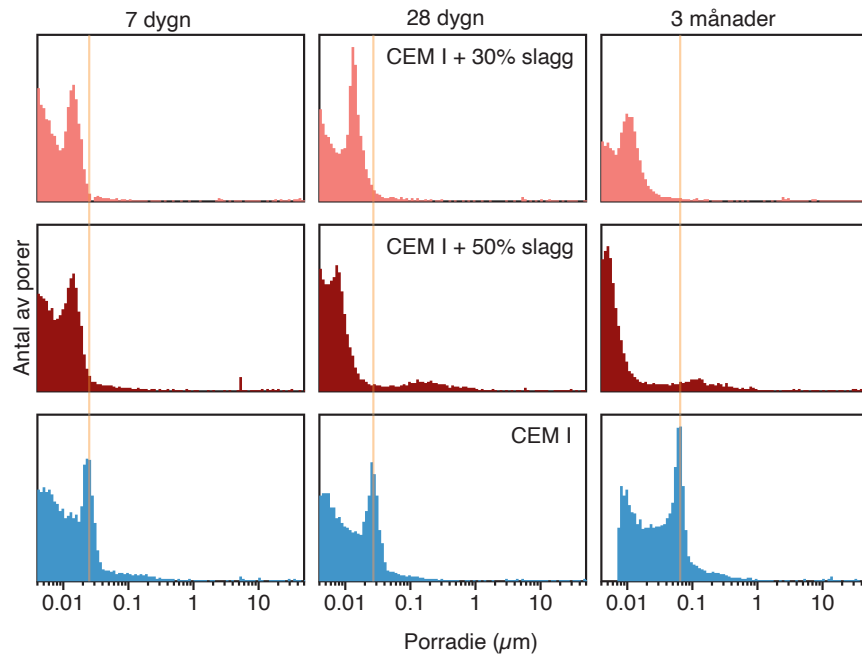
Figur 3.26. Förhållande mellan permeabiliteten (betongens genomtränglighet för vatten) och vattencementtal (vct) hos portlandcementpasta med hydratiseringsgraden 0,93. Illustration: Urs M ller. Källa: T.C. Powers, Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, J. Am. Ceram. Soc. 41 (1958) 1-6.

Slagg höjer karbonatiseringshastigheten, speciellt vid högre ersättningsnivåer vilket ökar risken för korrosion, samtidigt som den sänkta permeabiliteten verkar i motstående riktning. Vid högre ersättningsnivåer dominerar den negativa effekten av slagg. Det ställs därför i SS 137003 [34] krav på lägre *vbt* (tätare betong) när slagghalten eller flygaskehalten är över 20 %, för att uppnå samma beständighet mot karbonatiseringsinitierad korrosion. När det gäller kloridinitierad korrosion så är tillsats av både slagg och flygaska odelat positivt om betongen fått härda ordentligt.

PERMEABILITET - VATTENTÄTHET

Betongens permeabiliteten styrs av mängden porer och porstorleksfördelningen samt hur porerna är sammanbundna med varandra [40]. Endast sammanhängande porer kan leda vätska. Porerna utgörs av det utrymme som det ursprungliga blandningsvattnet upptog initialt minskat med det utrymme som tagits i anspråk för deponering av hydratiseringsprodukter. Den primära faktorn för att uppnå låg permeabilitet hos en härdad betong är att tillsätta så lite blandningsvatten som möjligt, alltså ett lågt *vbt*, se figur 3.26.

I tidig ålder är alltså mängden porer stor och porstorleksfördelningen är grov och porerna sammanbundna. Varefter hydratiseringen fortsätter minskar porvolymen och porstorleksfördelningen blir finare och kanalerna mellan porerna trängre [41]. I portlandcementbetong blir porstrukturen grövre och permeabiliteten högre när ett mer grovkornigt cement används. Den kemiska sammansättningen på cementet kan också påverka porstrukturen.



Figur 3.27. Porrhistorier av portlandcement (CEM I) och portlandcement med 30 % och 50 % masugnsslagg. Blandningarna med slagg visar fler porer med liten radie jämfört med rent portlandcement. Källa: Müller, Lundgren, Malaga, 2015.



Figur 3.28. Betongyta efter syraangrepp. Den första millimeter av bindemedlet har lösts upp och skapade då friliggande ballastkorn (bildbredd 50 mm). Foto: Urs Müller.

Sprickor i betong ökar genomströmningen av vatten väsentligt. Vikten av en sprickfri betong är således uppenbar när vattentätethet önskas. Härdningsförhållanden i praktiken måste därför säkerställa att sprickbildningen minimeras, och konstruktionen måste utformas så att inte onödig sprickbildning initieras, t.ex. på grund av tvångskrafter.

Välhärdad betong med flygaska och slagg (figur 3.7) får en finare porstruktur jämfört med ren portlandcementbetong, vilket ger en lägre slutlig permeabilitet. Detta förutsätter dock att betongen fått en god fukthärdning.

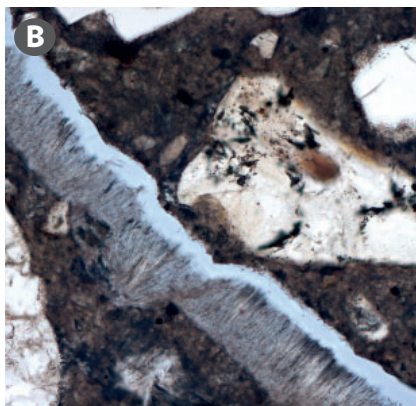
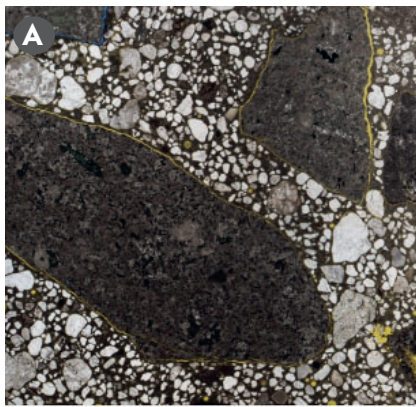
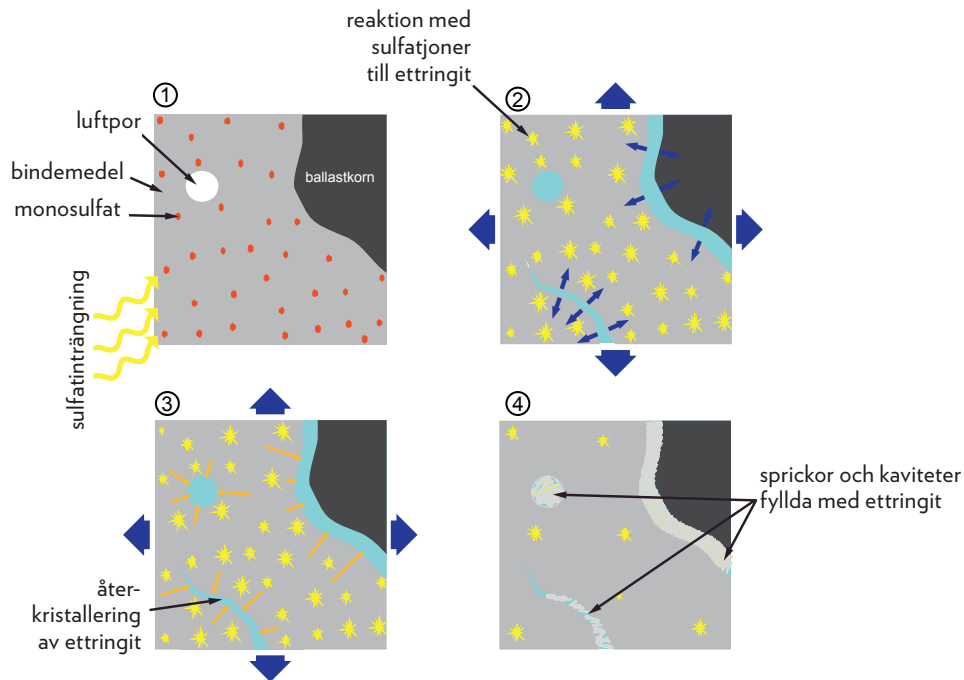
Silikastoft reducerar betongens permeabilitet. Inverkan på permeabiliteten är större än ökningen av hållfastheten. Detta beror inte på ändrad porositet utan på att porsystemet förfinas.

FÖRMÅGA ATT MOTSTÅ AGGRESIVA ÄMNEN

En betongs förmåga att motstå aggressiva ämnen i sin omgivning avgörs dels av betongens kemiska uppbyggnad, dels dess fysikaliska struktur och då främst dess permeabilitet, som styr inträngningshastigheten av aggressiva ämnen som syror, mjuk vatten, magnesium- eller ammoniumlösningar [42]. Alla dessa kemiska ämnen lakar ut eller byter ut kalciumjoner från bindemedlet vilket ökar betongens porositet och bidrar till nedbrytningen av bindemedlet. Vid syraangrepp [43] upplöses bindemedlet som står i direkt kontakt med syran och skapar friliggande ballastkorn, se figur 3.28.

Inträngande sulfatlösningar kan utlösa en skademekanism som kallas för sulfatangrepp [44]. En av hydratfaserna i cementpastan, monosulfat (se avsnittet *Hydratisering av Portlandcement*), kan omvandlas till ettringit om det finns en extern sulfatinträngning i betongen. Monosulfat kan reagera med sulfatjoner till ettringit som har 2,3 gånger större volym än monosulfat [44].

Figur 3.29. Mekanismer för sulfatangrepp initierat av externa sulfatjoner. I steg 2 och 3 finns en volymexpansion som leder till sprickbildning i bindemedlet (efter [47]). Illustration efter: Lundgren, Babaahmadi, Müller, 2018.



Figur 3.30. Exempel på inträngande sulfatlösningar i betong. Bild A visar sulfatangrepp i betong med sprickor kring ballastkornen.

Bild B visar en spricka i betong fylld med ettringitkristaller i form av nålar. Båda bilderna är tagna med ett polarisationsmikroskop med planpolariserade ljus. Foto: Urs Müller.

Volymexpansionen i bindemedlet orsakar mikrosprickor med en kraftig förlust av betongens hållfasthet. En principskiss av den mekanismen finns i figur 3.29 och ett exempel på detta i figur 3.30.

Betongens kemiska resistens mot betongaggressiva ämnen (främst sura ämnen) förbättras genom tillsättning av silikastoft eller slagg. Till detta bidrar den minskade permeabiliteten, minskad kalciumhydroxidhalt och att hydratiseringsprodukterna är mer stabila. Detta gäller också specifikt för sulfatbeständigheten [45, 46]. Slaggcement med slagghalter över 65 % anses vara naturligt sulfatresistent.

MOTSTÅND MOT SKADLIGA ALKALIBALLAST-REAKTIONER

Vissa ballasttyper reagerar under ogynnsamma omständigheter med alkalier (natrium och kalium) som frigörs från hydratiserande cement till porlösningen, varvid svällande reaktionsprodukter bildas (figur 3.31). Alkalireaktiv ballast finns i Sverige främst i delar av Skåne, fjällkedjan, Mälardalen, Dalarna, Göteborgsområdet och Småländska höglandet [48].

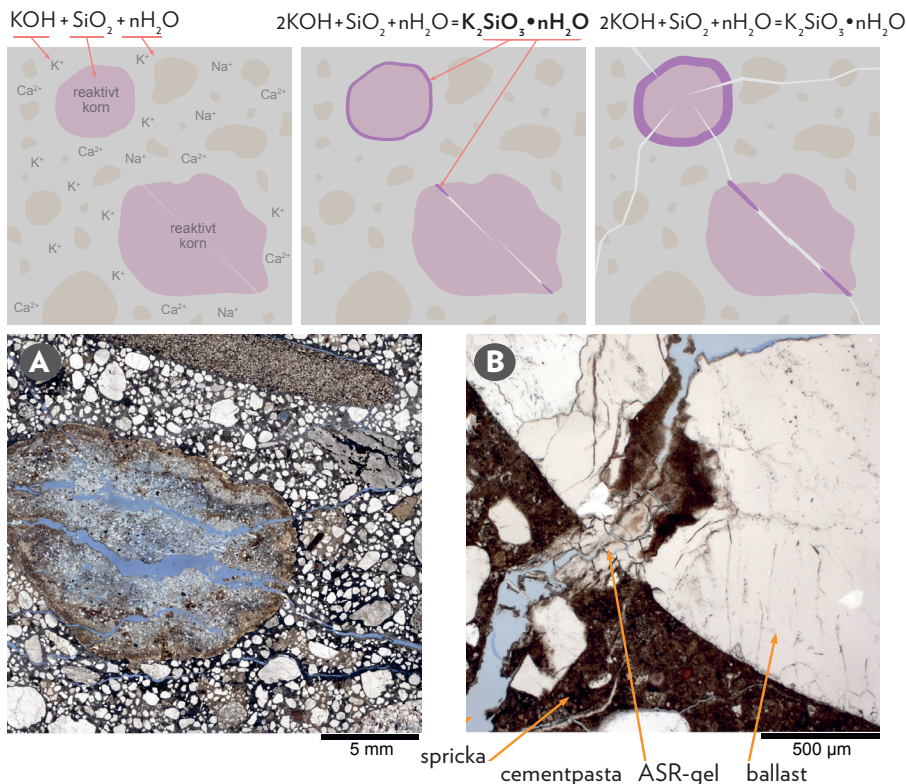
Svällningen kan orsaka sprickbildning och förstörelse av betongen. Sprickbildningen kan i sin tur leda till sekundära skador av typ frost- och armeringsangrepp. I en torr konstruktion (under ca 75 % relativ fuktighet) sker ingen svällning [49]. För att undvika denna typ av skador i konstruktioner som är lokaliserade till en fuktig omgivning kan man [48]:

- välja ballast som påvisats vara ofarlig, via provningsmetoder för att bestämma ballastens alkalireaktivitet
- hålla alkalihalten i betongen låg genom att använda ett lågalkaliskt cement.
- välja en bindemedelssammansättning som minskar risken för alkalisilikareaktioner (även för detta finns det provningsmetoder)

Inblandning av silikastoft och flygaska minskar risken för skadliga alkalisilikareaktioner. Detta gäller under förutsättning att silikastoftet är väl dispergerat (finfördelat).

Slagg och flygaska kan minska risken för skadliga alkalisilikareaktion [48, 50]. Detta gäller trots att de kan innehålla alkalier, på grund av att alkalierna i högre grad binds i hydratiseringsprodukterna och den mängd alkalier som är lösta i porvattnet och tillgängliga för reaktion med ballasten minskar.

Länge ansågs Sverige vara relativt förskonat från problem med skadliga alkalisilikareaktioner, då ballast från vissa områden undvikits. Till viss del beror avsaknaden av problem på att i många större anläggningsbyggnader användes under lång tid ett portlandcement från Limhamn som hade mycket låg alkalihalt (ca 0,4 %). Det tillverkades från 1889 till 1978. Under 1980 utvecklade Cementa ett nytt portlandcement med låg alkalihalt (< 0,6 %), ett så kallat anläggningscement som fortfarande tillverkas. Det har på senare år kompletterats med ett sulfatbeständigt, lågalkaliskt portland-flygaskecement.



Figur 3.31. Mekanismen med alkaliska reaktioner (ASR) i betong. De översta bilderna visar alkalikänsliga ballastkorn.

Bild A visar ett exempel på ASR i betong med sprickbildning i ballastkornen. Bild B visar en spricka med ASR-gel. Båda fotografierna är tagna med ett polarisationsmikroskop med planpolari-serade ljus. Foto och illustration: Urs Müller.

ALLT MER ÖKADE KVALITETSKRAV

Hur svenska krav på cement och senare även på betong utvecklats

EXEMPEL PÅ INVERKAN AV MILJÖN

- armeringskorrosion på grund av havsvatten
- armeringskorrosion på grund av avsningsalt
- kemsikt angrepp på grundvatten
- kemsikt angrepp från jord etc ...

ÅR	VAD HÄNDE
1926	de första reglerna angående cement ges ut av Kommunikationsdepartementet: <i>Statliga cementbestämmelser</i> . Tre typer av cement specificeras: portlandcement, slaggcement med max 30 % slagg samt aluminatcement. Sistnämnda började användas under vissa betingelser efter särskilt godkännande. Inga klinkersättningsmaterial förutom den slagg som ingick i slaggcementet tilläts. Krav började ställas – relaterat till inverkan av miljön – att täcksikt skulle vara större i utsatta miljöer.
1934	ny utgåva av statliga cementbestämmelser gavs ut. Tre klasser av portlandcement introduceras: A, B och "special" med olika hållfasthetsnivåer. Även slaggportlandcement och aluminatcement specificeras. Även andra icke specificerade "cementliknande bindemedel" får användas efter särskilt godkännande och med restriktioner. Med avseende på inverkan av miljön ställs krav på minsta cementmängd i tre olika nivåer och på täcksikt i fyra olika nivåer.
1943	ytterligare en utgåva av de statliga cementbestämmelserna ges ut. Följande cementtyper godkänns: <ul style="list-style-type: none"> • standard portlandcement • snabbt hårdnande portlandcement • långsamt hårdnande portlandcement • E-cement (ersättningscement som innehåller icke specificerade tillsatsmaterial och har lägre hållfasthet) • aluminatcement • slaggportlandcement <p>Reglerna i föregående utgåva för användning av klinkersättningsmaterial och inverkan av miljön kvarstod oförändrade.</p>
1949	ges <i>Statliga Betongbestämmelser</i> ut av Kommunikationsdepartementet. Kraven för cement och klinkersättningsmaterial från 1943 års cementbestämmelser behålls. Nya restriktioner för användning av E-cement. Betongens hållfasthetsklasser standardiseras. Krav på täcksikt i olika konstruktionsgrupper och täcksikt i ett antal täcksiktclasser samt krav på provning av frostresistens.
1960	ges <i>Statliga Cementbestämmelser - B1</i> ut av Statens Betongkommitté, som tagit över regelskrivandet. Skillnaden från 1943 års regler är att aluminatcement och E-cement tas bort och slaggcement specificeras till att ha mellan 25 och 60 % slagg.
1965	ges <i>Bestämmelser för betongkonstruktioner - Material och utförande - B5</i> ut av Statens betongkommitté. För cement gällde 1960 års B1 fram till 1982. Kraven relaterade till inverkan av miljön på betongen hade utvecklats vidare. Krav på betongens hållfasthetsklass, vattentäthet och lufthalt för sex olika miljöer infördes. Täcksiktskraven behålls, men revideras 1968 samtidigt som B5 revideras.
1978	reglerna om lufthalt nyanseras.

1979	<p>ges <i>Bestämmelser för Betongkonstruktioner, BBK 79</i> ut av Statens Betongkommitté. För cement hänvisas till B1 från 1960. Endast cementersättningsmaterial som ingick i cement accepterades. Krav på betongens hållfasthet, lufthalt, vattentäthet och vattencementtal, <i>vct</i>, anges för 6 olika miljöklasser. Dessutom anges krav på täcksikt och sprickvidd.</p>
1982	<p>ges utgåva 2 av <i>B1 – Statliga cementbestämmelser</i> ut. Kraven på cement uppdateras. Följande cement specificeras:</p> <ul style="list-style-type: none"> P: Portlandcement M: Modifierat portlandcement (max 35 % hydrauliska eller puzzolaniska tillsatsmaterial) B: Blandcement (20–65 % portlandcementklinker) <p>Betongkraven relaterade till miljöns påverkan i BBK 79 gäller fortfarande. Inga klinkersättningsmaterial förutom de som ingick i cementet accepteras.</p>
1988	<p>ges utgåva 2 av <i>BBK 1979</i> ut. För cement gäller fortfarande <i>B1-1960</i>. Användning av tillsatsmaterial tillsatt vid betongblandningen introduceras. Följande material behandlas:</p> <ul style="list-style-type: none"> Flygaska A och B (k-värde = 0,3 respektive 0) Slagg Silikastoft (max 10 %, k-värde = 1) <p>Tillsatsmaterial ska vara typgodkända och användningen måste godkännas av "behörig myndighet".</p> <p>Genom en hänvisning till Planverkets föreskrift PFS 1985:2 anges kvalitetskrav på flygaska och silikastoft och deras användning (max 35 % respektive max 10 % beräknat på mängden portlandcement).</p> <p>Krav relaterade till inverkan av miljön modifieras genom att kravet på hållfasthetsklass ersattes med ett krav på <i>vbt</i>. Lufthaltskravet skärptes också. Täcksiktsskraven förblev dock desamma som tidigare.</p>
1994	<p>markerar det år då Sverige börjar träda in i ett europeiskt sammanhang vilket påverkar tidigare svenska reglerna för cement och betong. <i>BBK 94</i> ges ut. För krav på cement hänvisas till den europeiska förststandard för cement, <i>ENV 197-1</i>, till vilken ett nationellt anpassningsdokument <i>NAD</i> utarbetas. Av de 27 cementtyper som specificeras i <i>ENV 197-1</i> anses, enligt <i>NAD</i>, följande nio vara beprövade för användning i Sverige.</p> <ul style="list-style-type: none"> CEM I Portlandcement CEM II / A-S portland slaggcement (6–20 % slagg) CEM II / B-S portland slaggcement (21–35 % slagg) CEM II / A-V portland flygaskecement (6–20 % FA) CEM II / B-V portland flygaskleceement (21–35 % FA) CEM II / A-LL portland kalkstenscement (6–20 % kalksten) CEM II / A-LS portland kalksten slaggcement (6–20 % kalksten + slagg) CEM III / A slaggcement (35–65 % slagg) CEM III / B slaggcement (66–80 % slagg)

1994 ff	<p>Kvalitetskrav på tillsatsmaterial och maxmängder (beräknat på portlandcementmängden) och k-värde anges i <i>BBK 94</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Silikastoft max 10 %. I de aggressivaste miljöklasserna dock max 5 %, k-värde = 1 • Flygaska max 35 %, k-värde = 0,3 • Slagg max 100 %, k-värde = 0,6 <p>I <i>BBK 94</i> definieras totalt åtta miljöklasser, A1-A4 för armeringsaggressiva miljöer och B1-B4 för betongaggressiva miljöer. I vilka av miljöklasserna enligt <i>BBK</i> de olika cementen fick användas regleras i <i>NAD</i> till <i>ENV 197-1</i>. Krav på vct_{ekv} införs. Täcksiktsskrav och sprickviddskrav skärps och det ställs krav på frostprovning.</p>
2003	<p>ytterligare steg tas mot en harmonisering med Europa. <i>Boverkets Konstruktionsregler BKR</i> hänvisar till den europeiska betongstandarden <i>SS-EN 206-1</i> och en svensk tillämpningsstandard till denna <i>SS137003 [51]</i> för krav på betong och cementstandarden blev en fullvärdig <i>EN</i>-standard (<i>SS-EN 197-1 [11]</i>).</p> <p>Den beprövade cementtypen <i>CEM A-LS</i> försvinner och följande två cementtyper tillkom:</p> <p style="margin-left: 40px;"><i>CEM II /A-M</i> portland kompositcement (6-20 % klinkersättningsmaterial) <i>CEM II /B-M</i> portland kompositcement (21-35 % klinkersättningsmaterial)</p> <p><i>EN</i>-standarder för silikastoft och flygaska för användning som reaktivt tillsatsmaterial (typ II) till betong. k-värden för tillsatsmaterialen anges i <i>EN 206-1</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Silikastoft, materialkrav enligt <i>EN 13263</i>, k-värde 1 och 2. • Flygaska, materialkrav enligt <i>EN 450</i>, k-värde 0,2 och 0,4 <p>Materialkrav och k-värde på slagg som tillsatsmaterial typ II behandlas i <i>SS137003</i>. Miljöklasserna enligt <i>BBK</i> ersätts med exponeringsklasser enligt <i>EN 206-1</i>, för att reglera krav relaterade till miljöns påverkan. De består av fyra klasser relaterade till armeringskorrosion på grund av karbonatisering, tre klasser för armeringskorrosion på grund av havsvatten och tre för avsnings salt (används i <i>EN 206</i> och <i>SS137003</i>). För frostangrepp ingår fyra klasser och för kemiskt angrepp från grundvatten och jord tre klasser. Vilka cementtyper och hur mycket tillsatsmaterial som fick användas i respektive exponeringsklass regleras i <i>SS137003</i>. Där anges även krav på vct_{ekv} i de olika exponeringsklasserna. Krav på täcksikt och sprickvidd i de olika exponeringsklasserna skärps och anges i en separat <i>SS</i>-standard.</p>
2004	ges en reviderad version av <i>SS137003</i> ut med enbart marginella ändringar.
2008	genomgripande revidering av <i>SS 137003</i> . Användningen av cement med klinkersättningsmaterial i de olika exponeringsklasserna utvidgas. För att dra bättre nytta av klinkersättningsmaterialen när de användes som tillsatsmaterial typ II, införs en möjlighet att räkna med högre k -värden än de den europeiska betongstandarden angav.
2015	ytterligare en revidering av <i>SS137003</i> genomförs då <i>EN 206</i> reviderats. Det ges utökade möjligheter att använda större mängder klinkersättningsmaterial i en del exponeringsklasser och möjlighet att bättre utnyttja dessa materials effektivitet som bindemedel.

En ny version av SS137003 gav ut 2021, genom vilken utvecklingen mot att kunna använda mer klinkerersättningsmaterial har fortsatt.

Trafikverket var efter 1983 – genom sina tekniska kravdokument – mer restriktiva till användande av klinkerersättningsmaterial i sina broar och tunnlar än vad SS137003 [51] tillät. Detta motiverades dels av att Trafikverket förväntar sig en längre livslängd (120 år) än vad som förutsätts för byggnader (50 år), dels på vissa negativa erfarenheter av främst slagg under 1900-talet. Skillnaderna mellan Trafikverkets krav och kraven i SS 137003 i det hänseendet är numera undanröjda.

Trafikverket tillämpar dock en högre grad av kontroll av utförandet genom att kräva att vissa egenskaper, till exempel hållfasthet samt salt–frostbeständighet hos betongkonstruktioner utsatta för den mest krävande exponeringsklassen, även ska provas på provkroppar från den färdiga konstruktionen. De har också sedan 1988 haft krav på att de cement som används i broar och tunnlar ska vara sulfatresistenta, ha låg alkalitet och inte för hög värmeutveckling, det vill säga låg eller moderat värmeutveckling.

BETONG I BEVARAD BEBYGGELSE OCH I FRAMTIDEN

Sedan betong började användas på allvar i Sverige i slutet av 1800-talet har utvecklingen gått från att huvudsakligen använda rena portlandcement till ökad användning av klinkerersättningsmaterial. Tre faktorer har drivit på denna utveckling. I början var det ett sätt att kunna minska mängden avfall som måste deponeras från vissa industrier. Brist på råvaror för portlandcementtillverkning under krigsåren var också en bidragande faktor. Drivkraften under senare delen av 1900-talet och under 2000-talet har varit att av miljöskäl minska koldioxidavtrycket från betong.

Rätt sammansatt portlandcementbetong ger erfarenhetsmässigt en betong som har god beständighet och lång livslängd i de flesta miljöer. Användning av klinkerersättningsmaterial påverkar beständigheten, ibland negativt och ibland positivt. Introduktion av dessa material måste därför baseras på ett omfattande forskningsarbete när det gäller beständighet för att inte konstruktionernas livslängd ska äventyras. För de etablerade klinkerersättningsmaterialen slagg, silikastoft och flygaska har forskningen varit omfattande. Tillgången på dessa material är dock begränsad, och numera pågår intensiv forskning världen över på att finna andra potentiella klinkerersättningsmaterial och kartlägga deras inverkan på betongens beständighet. För svenskt vidkommande är det främst brända kalcinerade leror som är aktuella.

Samhällets krav på betongkonstruktioner har också utvecklats i takt med att man observerat skador på betongkonstruktioner, ibland direkt men oftast efter att de under lång tid utsatts för mer eller mindre aggressiva miljöer och att kunskapen om hur dessa ska kunna undvikas successivt har byggts på genom forskning. Med fler involverade material ökas också kravens komplexitet. Hur omfattande och strikta krav man behöver ställa beror dels på den förväntade livslängden på en konstruktion och hur pass aggressiv den omgivande miljön är.

REFERENSER

- [1] Varas M.J, de Buergo M.A, Fort R. (2007). The origin and development of natural cements: The Spanish experience. *Construction and Building Materials*, Volume 21, Issue 2, pp. 436-445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.011>
- [2] Hughes D, Swann S, Gardner A. (2007). Roman Cement-Part One: Its Origins and Properties, *Journal of Architectural Conservation*, Volume 13, pp. 21-36. doi.org/10.1080/13556207.2007.10784986
- [3] Hughes D, Swann S, Gardner A. (2007). Roman cement: Part Two: Stucco and decorative elements, a conservation strategy, *Journal of Architectural Conservation*, volume 13 (3), pp. 41-58. doi.org/10.1080/13556207.2007.10785008
- [4] Hughes D.C, Weber J, Kozlowski R. (2010). Roman cement for the production of conservation mortars, in: *Preprints of 2nd Historic Mortars Conference & Rilem TC 203-RHM Repair Mortars for Historic Masonry Final Workshop*, Prague, pp 22-24. http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/aboutus/Hughes_Praga_2010.pdf.
- [5] Locher F. W. (2006). *Cement: principles of production and use*. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik
- [6] Taylor H. F. W. (1997). *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford.
- [7] N. Danielsen (1935). Om cementtillverkningen. *Teknisk tidskrift* (1935-1943). Norrköping: Svenska teknologföreningen, sid. 57-64.
- [8] Yuksel I. (2018). Blast-furnace slag. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, pp. 361-415. [doi:10.1016/B978-0-08-102156-9.00012-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00012-2).
- [9] Rosenqvist M. (2018). Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad. *Energiforskrapport 2018-481*.
- [10] Bergström M. (1941). Vad är E-cement?, *Teknisk tidskrift* (1935-1943). Norrköping: Svenska teknologföreningen, sid. 218-219.
- [11] SS-EN 197-1, *Cement – Del 1: Sammansättningar och fordringar för ordinära cement*, senaste utgåva 2011 (Första utgåva 2000, med tillägg från 2004 och 2007)
- [12] SS EN 197-5 (2021). *Cement – Del 5: Portland-kompositcement CEM II/C-M och kompositcement CEM VI*.
- [13] Lothenbach B, Scrivener K, Hooton R.D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 41, pp. 1244-1256. [doi:10.1016/j.cemconres.2010.12.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001).
- [14] Lewis R.C. (2018). Silica Fume. *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials, RILEM State-of-the-Art Reports*, pp. 99-121. [doi:10.1007/978-3-319-70606-1_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_3).
- [15] SS-EN 206 *Betong -Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse*, senaste utgåva 2013, med tillägg från 2016 och 2021. (Utgavs först år 2001 som SS-EN 206-1 med tillägg från 2004 och 2005)

- [16] Bährner V. (1931). Smältcement och specialcement – två förnämliga svenska cementtyper, *Teknisk Tidskrift* 61, ss. 10–12. <http://runeberg.org/tektid/1931a/0019.html>.
- [17] Scrivener K.L. (2001). Historical and present day applications of calcium aluminate cements. *Calcium Aluminate Cements 2001*, pp. 3–23.
- [18] Redlund M. (2008). Över 4 000 fastigheter i riskzonen på grund av aluminatbetong. *Byggindustrin*, Byggförlaget.
- [19] Taylor H. F. W. (1997). *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford.
- [20] Müller U, Lundgren M, Babaahmadi A. (2017). Hydration of concrete binders blended with ground granulated blastfurnace slag, fly ash and metakaolin, *RISE Report: 2017:6*, Borås, Sweden. doi:10.13140/RG.2.2.11577.08809.
- [21:1] *Betonghandbok Material Del 1 – Delmaterial samt färsk och hårdnande betong* (2017), Svensk Byggtjänst
- [21:2] *Betonghandbok Material – Del 2 – Hårdnad betong, fysikaliska egenskaper och beständighet* (2021), Svensk byggtjänst
- [22] Ahlberg S.O. (2012). *Bevara betongen*. Stockholm: Svensk byggtjänst.
- [23] *Statliga betongbestämmelser. D. 1, Materialdelen: (föreskrifter beträffande material, arbetsutförande och tillåtna spänningar)*. (1950). Stockholm.
- [24] De Schutter G, Bartos P, Domone P, Gibbs J. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volyme 1, pp. 5–15. doi:10.3151/jact.1.5.
- [25] Scrivener K.L, Juilland P, Monteiro P.J.M. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement, *Cement and Concrete Research* 78(10), pp. 38–56. doi:10.1016/j.cemconres.2015.05.025.
- [26] McDonald PJ, Rodin V, Valori A. (2010). Characterisation of intra- and inter-C–S–H gel pore water in white cement based on an analysis of NMR signal amplitudes as a function of water content. *Cement and Concrete Research* 40(12). pp. 1656–1663. doi:10.1016/J.CEMCONRES.2010.08.003.
- [27] Beaudoin J.J, Feldman R.F, Tumidajski P.J. (1994). Pore structure of hardened portland cement pastes and its influence on properties, *Advanced Cement Based Materials Volume 1, Issue 5*, pp. 224–236. doi.org/10.1016/1065-7355(94)90028-0
- [28] Müller U, Williams Portal N, Chozas V, Flansbjerg M, Larazza I, da Silva N, Malaga K. (2016). Reactive powder concrete for facade elements – A sustainable approach, *Journal of Facade Design and Engineering* 4(1-2): pp. 1-14. doi:10.3233/FDE-160051
- [29] Gonnerman H.F, Shuman E.C. (1928) *Compression, flexure and tension tests of plain concrete*, Major Series 171, 209 and 210, Report of the Director of Research, Portland Cement Association.
- [30] Janssen D.J, Snyder M.B. (1994). Strategic Highway Research Program (U.S.), Resistance of concrete to freezing and thawing, *Strategic Highway Research Program*, National Research Council. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=405696> (accessed October 17, 2017).

- [31] Boubitsas D, Tang L, Fridh K, Müller U, Utgenannt P. (2018). Frost Resistance of Concrete – Experience from Long-Term Field Exposure, *CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute*, Built Environment, RISE - Research Institutes of Sweden. <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1282289/FULLTEXT01.pdf>.
- [32] Powers T.C, Willis T.F. (1950). The air requirement of frost resistant concrete, *Highway Research Board Proceedings*, volume: 29, pp 184-211. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=101611> (accessed October 17, 2017).
- [33] SS 137244 *Hårdnad betong – Avflagnings vid frysnings*, utgåva 5 (2019)
- [34] SS 137003, *Användning av EN 206 i Sverige*, senaste utgåva (2021) (2001 gavs denna standard ut första gången och har tidigare reviderats 2004, 2006 och 2013).
- [35] Lundgren M, Babaahmadi A, Müller U. (2017). On the porosity development in cement pastes containing slag: influence of curing conditions and the effect of carbonation, *XXIII Nordic Concrete Research Symposium*, Aalborg, Denmark, pp. 89.
- [36] Utgenannt P. (2004). *The influence of ageing on the salt-frost resistance of concrete [Elektronisk resurs]*. Diss. Lund: Univ. 2004. Tillgänglig på Internet: <http://www.lu.se/o.o.i.s?id=12588&postid=21902>
- [37] Helsing E. (2017) *Salt-frostprovning av betong med slagg och flygaska*, Stockholm. CBI-rapport nr 2017:3, RISE Research Institutes of Sweden, <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1197030>
- [38] Ahmad S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review. *Cement and Concrete Composites*, Volume 25, Issues 4–5, pp. 459-471. doi:10.1016/S0958-9465(02)00086-0.
- [39] Tang L, Boubitsas D, Utgenannt P, Abbas Z. (2018). *Chloride Ingress and Reinforcement Corrosion - After 20 years' field exposure in a highway environment*, CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Built Environment, RISE - Research Institutes of Sweden, 2018. <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1282287/FULLTEXT01.pdf>.
- [40] Basheer P.A.M, Rankin G.I.B, Long A.E, Russell D. (2001). Effect of relative humidity and air permeability on prediction of the rate of carbonation of concrete, *Proc. ICE - Structures and Buildings*, Volume 146 Issue 3, pp.319–326. doi:10.1680/stbu.2001.146.3.319.
- [41] Müller U, Lundgren M, Malaga K. (2015). Development of pore structure and hydrate phases of binder pastes blended with slag, fly ash and meta-kaolin – A comparison. *14th International Congress on the Chemistry of Cement*. Beijing, China.
- [42] Anand B, Sharma S. (2016). *Recent Advancements in Mineral and Water Resources Leaching Corrosion of Concrete Due to Soft Water Attack*. Recent Adv. Miner. Water Resour. ISBN 978-93-84935-84-9. 155–161.

- [43] Hill J, Byars E.A, Sharp J.H, Lynsdale C.J, Cripps J.C, Zhou Q. (2003). An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete, *Cement and Concrete Composites* 2003:25, pp. 997–1003. doi:10.1016/S0958-9465(03)00123-9.
- [44] Chabrelie A, Müller U, Scrivener K. (2011). Mechanisms of degradation of concrete by external sulfate ions under laboratory and field conditions, *13th International Congress on the Chemistry of Cement*. doi:10.5075/epfl-thesis-4597
- [45] Babaahmadi A, Lundgren M, Müller U. (2017). Durability of slag blended binder systems towards sulphate ingress. *XXIII Nordic Concrete Research Symposium*. Aalborg, Denmark, pp. 93–96.
- [46] Lundgren M, Babaahmadi A, Müller U. (2018). *Exposure experiments in sulfate containing solution, including exposure at low temperature*, CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Built Environment, RISE - Research Institutes of Sweden. <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1240318/FULLTEXT01.pdf>.
- [47] Pelletier-Chaignat L, Winnefeld F, Lothenbach B, Le Saout G. , Müller C.J, Famy C. (2011). Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement–calcium sulphoaluminate clinker–calcium sulphate binders, *Cement and Concrete Composites* 33(5):551–561. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.03.005.
- [48] Trägårdh J, Nordström E, Appelquist K, Hassanzadeh M, Helsing E, Kalinowki M, Al-Ayish N, Janz M. (2019). *ASR i svensk betong - vägledning för nya och befintliga konstruktioner*, Stockholm, Svenska Betongföreningen. doi:10.13140/RG.2.2.33525.29926.
- [49] Garcia-Diaz E, Riche J, Bulteel D, Vernet C. (2006). Mechanism of damage for the alkali – silica reaction, *Cement and Concrete Research* 36 (2). pp. 395–400. doi:10.1016/j.cemconres.2005.06.003.
- [50] Schmidt K, Hilbig H, Heinz D. (2007). ASR in Concrete with Supplementary Cementitious Materials Effect of Pore Solution Composition on Damage, *12th International Congress on the Chemistry of Cement*, pp. 1–12.
- [51] Powers T.C. et al. (1954). Permeability of Portland cement paste, *J. of Amer. Concr. Inst.*, 51 pp 285–298.



BETONG SOM KONSTRUKTIV OCH ARKITEKTONISK IDÉ

Lone-Pia Bach

Restaurering av betong fokuserar ofta på de materialtekniska, handgripliga aspekterna. Det finns alltid tekniska frågor som måste hanteras, i synnerhet eftersom betongens sammansättning och utförande har förändrats påtagligt över tid. Det som ger betongbyggnaden dess särpräglade framtoning och identitet, den *arkitektoniska och konstruktiva idén*, riskerar ibland att hamna i bakgrunden och i värsta fall fördärvas. Den här texten handlar om just dessa egenskaper, och hur vi kan förhålla oss till dem vid en restaurering.

En arkitektonisk idé omfamnar kompositionen av rumslig organisation, volymer och arkitektoniska uttryck i syfte att lösa livets funktionella behov. Estetiska värden som ska stimulera våra sinnen ingår också, såsom detaljutformning, materialitet, textur, taktilitet, ljusföring och rumsakustik. En arkitektonisk idé föds i korsbefruktningen mellan kreativt skapande och gedigen analys av behov och förutsättningar. Arkitektens kreativa skapande bygger på en införlivat erfarenhet av arkitektur som i arkitektens kreativa skapande omvandlas till en återfödd idé i all ny arkitektur. Förståelse för platsen, omgivningarnas karaktär, funktionella och logistiska behov, projektets ekonomiska villkor och önskemål i projektet analyseras till en syntes som blir utgångspunkten för det kreativa skapandet av arkitekturen. Man kan säga att det arkitektoniska uttrycket är en konstnärlig transformation av de strikta förutsättningar som utgår ifrån arkitektens formvärld. I arbetet med befintlig arkitektur behöver arkitekten arbeta med kunskap och sin kreativa förmåga för att i en baklängesanalys tolka de ursprungliga idéer.

Den konstruktiva idén hanterar last och kraftspelet mellan byggnadsdelar, och precis som den arkitektoniska tar den avstamp i en analys och tolkning av förutsättningarna. Ofta löser den en idé om arkitektoniskt uttryck. Till exempel kan konstruktörens intrikata beräkningar göra det möjligt att förverkliga den arkitektoniska idén om solida volymer som ser ut som de svävar eller bärs upp av en tunn glasskiva.

Ibland smälter arkitektonisk och konstruktiv idé ihop till ett fullständigt verk och går inte att särskilja, i andra fall är den konstruktiva idén svaret på en problematisk teknisk förutsättning i omgivningen. Den arkitektoniska och konstruktiva idé som formar en betongbyggnad eller -anläggning innefattar allt från materialets kulör, ballast, textur, mönsterteckning till sammanfogningsteknik och övergångar.

BÄRANDE BURET

Nordiska paviljongen i Venedig byggdes för Venedigbiennalen 1962 efter ritningar av Sverre Fehn. Lek med flödigt dagsljus och samspel med naturen är ett markant drag i den moderna nordiska arkitekturen. Den idén manifesterar Sverre Fehn med hjälp av den formbara betongen. Ett perforerat tak låter indirekt ljuset flöda in, och byggnaden omfamnar några träd som redan stod på platsen. I taket har han utnyttjat betongens förmåga att bära egen last, med långt tillbakadragna primärbalkar som bär två lager av korsvis lagda sekundärbalkar som skapar det transparenta taket
Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.

Figur 4.1. Krigskonst från 1960-talet. Den arkitektoniska och konstruktiva idén är här funktionell i kalla kriget-bunkern *Regan Vest* i Danmark. Konstruktionen, armeringen, gångens kurvatur och bearbetningen av ytan är utformad för att ge största möjliga skydd vid ett bombanfall – hit skulle den danska drottningen fly tillsammans med ministrar och några tjänstemän om kriget blev verklighet. Foto: Lone-Pia Bach, 2015.



BETONGENS MÖJLIGHETER OCH SVÅRIGHETER

Den armerade betongen revolutionerade byggtekniken och byggproduktionen vid sekelskiftet 1900 och gav möjligheter till helt nya arkitektoniska idéer. Materialet, som är både slitstarkt och ömtåligt, främjade experimentlustan hos såväl beställare som arkitekter och ingenjörer. De utmanade varandra i sökandet efter nya uttrycksformer eller för att uppnå större effektivitet och generalitet. Byggnadsverk och landskapselement formades efter nya konstruktiva principer och möjligheten till ökade spännvidder gav upphov till byggnadstyper med kraftfulla arkitektoniska uttryck.

Betongen gav också möjlighet att infria önskan om bättre boendekvalitet för alla. Byggnadstekniken kunde rationalisera byggandet och det blev möjligt att uppföra många bostäder på kort tid, det så kallade miljon-



programmet. Under 10 års tid byggdes närmare en miljon bostäder och många familjer fick för första gången tillgång till ljusa och luftiga lägenheter med moderna faciliteter som badrum och kök med rinnande vatten och avlopp. Det var en exceptionell höjning av boendestandarden för den breda befolkningen som uppnåddes på kort tid.

Mycket möda lades ner på att förbättra konstruktiva lösningar och materialets tekniska egenskaper för att kunna uttrycka den arkitektoniska idén i form och textur. Gjutformen blev en nyckelfråga och den utvecklades i otaliga varianter. Konstfärdiga ytor skapades genom bearbetning av materialet; huggning eller blåstring av den torra ytan eller krattning av den nygjutna betongen. Olika typer av ballast innebar stor variation, liksom ingjutning av annat material, tillsättning av pigment och bemålning.

Figur 4.2. Biblioteket i Norrköping är en modernistisk byggnad som ligger infogad i en rad av villor från sekelskiftet 1900. Den har sitt eget uttryck men underordnar sig villornas skala och överordnade grammatik. Den har en stark arkitektonisk idé som uttrycks i formen men också i betongytans yttersta milimeter. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2020.

Restaurering är en kvalificerad samarbetsuppgift som kräver att olika aktörers kunskap, intressen och tekniska analyser vägs mot varandra. Att betong alltid är en kombination av många ingående delar innebär särskilt stora utmaningar eftersom det saknas standardlösningar. För arkitekten gäller det att analysera och beskriva den arkitektoniska och konstruktiva idén för att säkerställa att de bevaras genom projektet. Här gäller att förstå vilka verkningsmedel som har använts, hur de kan hanteras och eventuellt kompletteras så att byggnaden svarar mot dagens behov.

I många restaureringsprojekt är den viktigaste uppgiften att visa på materialets subtila verkningsmedel. Som exemplen kommer visa kan det finstämda vara svårt att restaurera. Om en rå betongyta har en bearbetad struktur är den vanskelig att rengöra utan att orsaka skador. En fasadren-göring som nöter på de yttersta fem millimetrarna kan helt förändra det arkitektoniska uttrycket. Då gäller det att beskriva storheten i den bearbetade ytan och föreslå lösningar som tar fasta på arkitekturens kvalitéer, exempelvis en anpassad och mer varsam rengöringsmetod. Arkitekten har en pedagogisk uppgift och måste möta beställaren i respektfull dialog för att hitta bästa möjliga lösning.

Estetiskt tilltalande lagningar av exponerad betong kan också vara svåra att åstadkomma. De lagade delarna riskerar att framträda som fläckar, även om man använder samma kulör på cementen eller ballasten som den ursprungliga blandningen, och även om det görs stora ansträngningar för att återskapa formavtrycket genom att tillverka en likadan gjutform. Effekten av lagningarna kan bli en negativ upplevelse av verket i sin helhet. Ibland kan det vara motiverat att avfärga hela ytan, men ett sådant beslut måste väga in att den målade ytan kommer att ge ett helt annat uttryck än den råa betongen.

Bakom många betongbyggnader ligger stor ingenjör- och konstruktörskonst som bidrar till att förverkliga arkitektoniska idéer och uppfylla funktionella behov. Ingenjörens kreativa skapande kan åstadkomma stora spännvidder, komplexa former och konstnärliga uttryck. Att vid restaurering och ombyggnad utgå från gedigen kunskap om den konstruktiva principen handlar inte bara om konstruktion, utan om att slå vakt om verkets samlade idé. Små förändringar kan förvanska ursprungsidén, men genom lyhördhet och val av metoder kan den lyftas fram på nytt vid en restaurering.

SKULPTURALT OCH HÖGTEKNOLOGISKT

Väl inpassad i tallskogen strax intill Gävles skogskyrkogård ligger Skogsljus begravningskapell och krematorium. Byggnaden har en nästan metafysisk karaktär, där taket till synes svävar fritt ovan en konstfullt utformad mur av betong. De omsorgsfullt utformade, bärande betongpelarna är placerade i den brytningspunkt där taket verkar lyfta sig inför mötet med naturen. Pelarna ser ut att ingå i tallskogens själsliga logik med höga smala stammar. Mellan den vackert bearbetade betongen och taket löper ett nästintill



osynligt fönsterband som leder ljuset att leka med skuggorna på de subtilt skulpterade väggytorna.

Denna enastående byggnad ritades av ELLT arkitektkontor 1954 och togs i bruk 1960. De arkitektoniska verkkningsmedlen är få men noggrant komponerade för en andaktsfull samhörighet med naturen utanför. Skönheten ligger i den arkitektoniska kompositionen, i byggnadens placering i tallskogen och i detaljernas precisa utformning. Varje detalj är noggrant genomtänkt och har en betydelse för helheten liksom produktionsmetoden och gjutformen är vald för att uppnå precision.

Ytterväggen är en tvåsidig, formgiven monolit, gjuten i betong med in-gjutna värmerör. För att uppfylla den arkitektoniska ambitionen genomfördes ett noggrant arbete med formsättningen. Hyvlat, fin- eller ramsågat virke placerades i formen efter ett fastlagt schema. [1] All cement kom från en och samma bränning och formen fick sitta tills den släppte av sig själv.

Figur 4.3. Skogsljus begravningskapell och krematorium utanför Gävle är välinpassat i tallskogen. Taket förefaller svävar fritt ovan en konstfullt utformad mur av betong. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2020.

1. Hertzell, Tage (1984). *Betongens yta*, sid. 94.



Figur 4.4. Skogsljuskapellet grafiska form står fortfarande skarp samtidigt som den modulerar och lekar med ljuset. Foto: Andy Liffner.

Figur 4.5. Betongens yta är avgörande för den arkitektoniska kompositionen. Exteriör med detalj av fasad. Foto: Sven Olof Ahlberg.

RESTAURERINGENS UTMANINGAR

I byggnader som Skogsljusets kapell är konstruktionen och betongens sinnliga yta avgörande för upplevelsen av byggnadens skönhet. Att restaurera är en svår utmaning eftersom den nakna betongens fina textur riskerar att förstöras även vid små ingrepp.

Alla nya installationer måste utföras med stor medvetenhet och kreativitet för att inte orsaka onödig skada. Den råa betongens yta är känslig för infästningar, kabeldragningar och ställningsförankringar. Till och med ett hål med plugg för upphängning av ett föremål kan göra bestående skada. Ytan är svår att laga, även efter något så litet som ett skruv- eller spikhål.

Om lagningar ändå måste göras krävs samma typ av ballast, kulör och



cementtyp för att minimera lagningens estetiska påverkan. Även med samma cementtyp och kulör finns alltid en risk att lagningen åldras och avvikelser uppstår eller ökar över tid. Därför är det alltid riskabelt att infärga lagningsbruket som kan åldras på ett annat sätt än det ofärgade bruket. Här är det också särskilt viktigt att förstå detaljens verkan i förhållande till betraktarens avstånd och texturens karaktär.

I Skogsljus är betongen endast lätt påverkad av tidens gång. Patinan som tiden har skänkt byggnadens utsida får den än mer att förena sig med sin omgivning. Det är emellertid lätt att konstatera att den dag de ingjutna värmerören uppnått sin tekniska livslängd kommer de bli en särskilt uppfordrande uppgift att hantera.

Figur 4.6. Ett vackert komponerat rum med metafysisk karaktär som på en och samma gång samlar och skyddar samtidigt som taket lyfter sig, släpper in ljuset och skogen till tröst. Blicken kan alltid vila i en väl omhändertagande detalj. Foto: Andy Liffner.



Figur 4.7. Den danska kontorsbyggnaden till glasgrossisten Glas Aalstrup uppfördes 1965-1966. Byggnadens tak hålls upp av ett 4000 m² stort gallerverk av betong som samtidigt silar ned ljuset till arbetsplatserna. Foto: Peter Gramstrup/Realdania By & byg, 2018.

SVÄVANDE GALLERVERK

Betong har ofta använts i olika former av självbärande konstruktioner vilket innebär att byggnaden är dimensionerad så att den klarar belastningen den själv ger upphov till, och kan även ibland lyfta ytterligare byggnadsdelar utöver vanliga laster som vind och snö. I danska kontorsbyggnaden Glas Alstrup, uppförd i slutet av 1960-talet, gav en stark konstruktiv idé arkitekten en särpräglad, nästan naturlagsstridig framtoning. I mötet med byggnaden förundras man över det kvadratiske gallerverket av betong som till synes svävar fritt i luften. Det ser ut som om byggnaden hänger ner från det robusta men öppna gallerverket, som om tyngdlagen var upphävd.

Administrationsbyggnaden är ett uttryck för 1960-talets experimenterande med grafiska former i betong. Det 1,8 meter höga gallersystemet utgör en självbärande konstruktion som hålls upp av tillbakadragna skrivpelare. Ljuset reflekteras ner genom det skulpturala taket och ger fint skuggspel som understryker kontrasterna.



Betongen fick redan från start en grå cementslamning för att dölja lagningar och färgvariationer i betongen. Arkitekten Knud Blanch Petersen arbetade nära ingenjören Thomas Bentsen som fick briljera i ingenjörskonstens beräkningsmetoder när det mer än 4000 m² stora taket på projekterades.

RESTAURERINGENS UTMANINGAR

I arbetet med denna typ av byggnader är både den ingenjörsmässiga och den arkitektoniska kompositionen central för upplevelsen. Konstruktiva och arkitektoniska tillägg kan göra det omöjligt att förstå byggnadens idé och framtoning. Därför är tillbyggnader snarare än restaurering den största utmaningen.

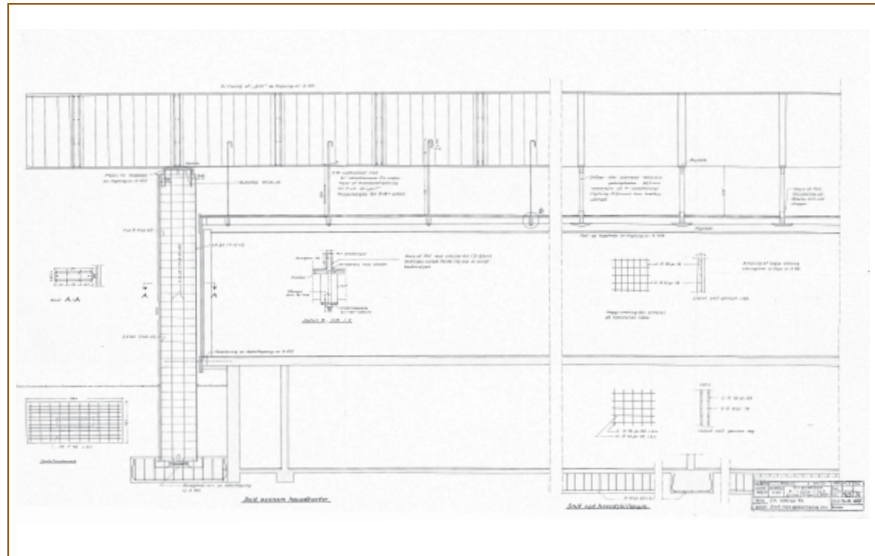
När en betongyta redan är slammad från början, såsom i det här fallet, finns goda möjligheter att åtgärda exempelvis frostsprängda punkter så länge reparationen utförs med rätt sammansättning av betong, rätt färgtyp och att gjutformen utförs lika som original.



Figur 4.8. Det manshöga gallerverket svävar till synes fritt i luften samtidigt som den lätta glasbyggnaden är upphängd i den. Foto: Poul Petersern/Realdania By & Byg, 1960-tal.

Figur 4.9. Ett exceptionellt dagsljus flödar in i det stora kontorslandskapet. Historisk bild från 1960-talet. Foto: Poul Petersern/Realdania By & Byg, 1960-tal.

Figur 4.10. Konstruktionsritning som visar ett snitt genom kontorsbyggnaden Glas Alstrup. Gallerverket bärs upp av tillbakadragna pelare som taket på kontorsbyggnaden pendlas ner ifrån. Byggnaden framträder som en lek med tyngdkrafterna samtidigt som konstruktionen skapar en 4000 m² sammanhängande kontorsyta utan bärande pelare eller väggar. Konstruktionsritning: Civilingenjör Th. Bentsen, 1965.



Figur 4.11. Det stora takgriddet som bärs upp av tillbakadragna pelare, bär kontorets tak. Foto: Poul Petersen/Realdania By & Byg, 1960-tal.

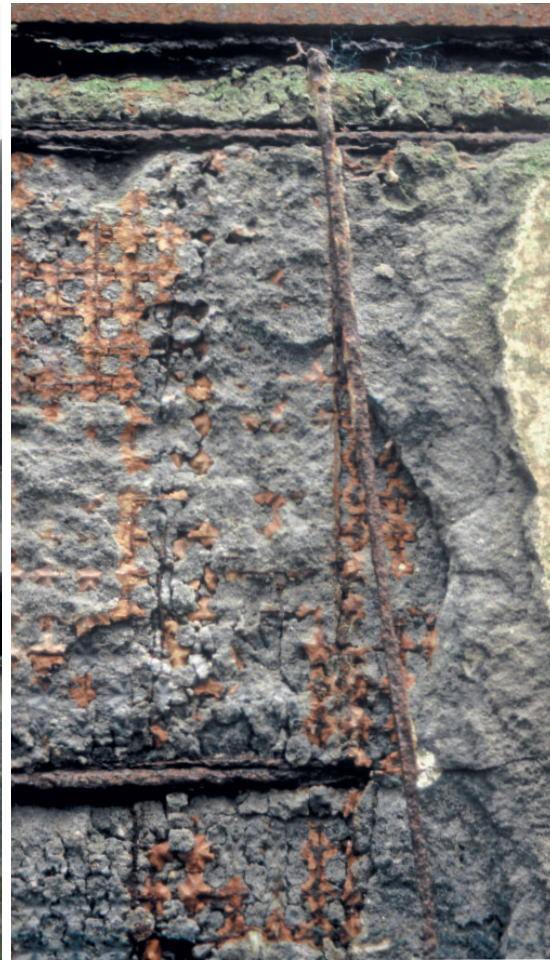
MODERNISTISKA KONSTRUKTIONER – MODERN MOVEMENT

Det finns betongkonstruktioner som på grund av sin arkitektoniska och konstruktiva idé är särskilt svåra att restaurera. Idén var god i sin samhälleliga kontext då den uppfördes, men svarar inte mot nutidens krav och behov.

Sanatoriet Zonnenstral i Hilversum, Nederländerna, måste ha upplevts som en hägring av framtiden när den stod klar, med lätta och ljusa paviljonger och en huvudbyggnad som mest liknar en futuristisk maskin. När arkitekterna och ingenjören fick i uppdrag att rita det nya tuberkulossanatoriet lades stor vikt vid arkitektonisk form och organisation. Byggnaderna placerades medvetet i landskapet med behandlingsbyggnaden centralt placerad i en



Figur 4.12. När sanatoriet Zonnenstraal i Hilversum, Nederländerna ritades 1925 gavs den en för tiden helt nytt arkitektoniskt uttryck. Byggnaden formgavs av arkitekterna Jan Duiker och Bernard Bijvoet samt ingenjören Jan Gerko Wiebenga. Geometriska former i olika storlekar sköts in i och placerades ovanpå varandra. Den armerade betongen skapade förutsättningar för att ersätta bärande ytterväggar med glaspartier. Byggnaderna kunde förses med långa sammanhängande fönsterband som gav patienterna med tuberkulos mycket dagsljus. Ljus var en viktig del av dåtidens behandlingsform. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2018.



Figur 4.13. När sanatoriet Zonnestraal tomställdes utan underhåll förföll byggnaderna snabbt. Anläggningen präglades av den nya materialoptimerade betongbyggnadstekniken, och hade ytligt liggande armeringsjärn som rostade och sprängde materialet inifrån när betongen hade karboniserat. Foto: Lone-Pia Bach 1998.

Figur 4.14. Efter bara några år utan användning träder byggnaden fram i en ruinromantik som nästa liknar ett kopparstik av de romerska ruinerna ritade av Piranesi. Foto: Lone-Pia Bach 1998.

anläggning av patientlängor. Fokus låg på patienterna och på den tidens främsta behandlingsform – ljus och frisk luft. De skröpliga patienterna omslöt av nästintill transparenta byggnader med tunna, precisa detaljer och luftiga rum.

Anläggningen var rationell och kostnadseffektiv, tänkt utifrån idén att byggnaden endast skulle behövas några få årtionden tills man blivit kvitt tuberkulosen. Utifrån det perspektivet samarbetade arkitekter och ingenjörer för att använda resurssnåla material såsom ogalvaniserat stål till fönstren och det relativt nya materialet, armerad betong, till de skarpskurna byggnadsvolymerna [2].

Ett samtida, också nederländskt exempel på mästerlig betongarkitektur, där arkitektonisk och konstruktiv idé samverkar, är Van Nelle-fabriken i Rotterdam. Känslan av effektiv logistik strålar från byggnaden som idag framstår som en poetisk skulptur. Den ritades av arkitekterna Leendert van der Vlugt och Johannes Brikman och även i det här fallet av byggnads-



ingenjör J.G. Wiebenga. Fabriksanläggningen uppfördes 1925–31 för att rymma paketering av importerat kaffe, te och tobak.

För att förstå den arkitektoniska och konstruktiva idéen bakom Van Nelle behöver man se till logistik, produktion, arbetsmiljö, betydelsen av dagsljus liksom betydelsen av den transparenta glasfasaden som blev möjlig av den tillbakadragna betongkonstruktionen. Byggnaden är sinnebilden av en optimerad maskin som tar emot råvaror vid hamnen, transporterar dem till lagret för att sedan via transportband fördela dem till rätt våningsplan där den specifika råvaran stuvats i små förpackningar.

Konstruktionen är självbärande och frikopplad från de tunt glasade fasaderna och byggnaden speglar himlen i en tunn "curtainwall" av stål och glas. Konstruktionen är optimerad utifrån varornas logistik och för bästa möjliga dagsljus i byggnaden. På taket av kontorsbyggnaden ligger ett runt, glasat "penthouse", likt en kommandobrygga på ett stort fartyg varifrån allt kan övervakas.

Figur 4.15. Van Nelle-fabriken i Rotterdam från 1925-1931 är också ett Nederländskt modernistiskt exempel där arkitektonisk och konstruktiv idé går hand i hand. Byggnaden som en futuristisk produktionsmaskin som utstrålar process, effektivitet och framtidstro. Här kan man följa varornas väg från båten i hamnen till färdig produkt. Foto: Lone-Pia Bach, 1998.

2. Van Zuijlen, Lucas och Ronald Stenvert (2018). Schokbetong: Zwijndrecht/The Netherlands/ International. I Docomomo Concrete and modernism Technology and conservation Preservation Technology Dossier 14 – 2018.

RESTAURERINGENS UTMANINGAR

När sanatoriet Zonnenstraal tömdes på verksamhet på 1980-talet omvandlades det snabbt till moderna ruiner. En viktig anledning var den ytliga placeringen av armeringen, som rostade och sprängde sönder konstruktionen. Ett annat skäl var de ogalvaniserade ståldetaljerna i fönster och dörrar, som utan målningsunderhåll rostade och deformerades.

Inför restaureringen genomfördes grundliga analyser utifrån tekniska, sociala och idémässiga perspektiv. Frågan ställdes om det var viktigast att rekonstruera konstruktions- och materialtekniken eller att säkra den arkitektoniska formen. Eftersom byggnaderna varit putsade valde man slutligen en teknisk lösning som var mer hållbar än den ursprungliga. Därmed kunde man bevara byggnaderna och den arkitektoniska idéns pregnans. Målet var att byggnaderna efter restaureringen skulle hålla längre än som ursprungligen var tanken.

Anläggningen beskrivs idag som ett ”ikoniskt nationalmonument”, högt värderad för sin arkitektur och som symbol för en epokgörande arkitektonisk utveckling och för tidens behandlingsform av tuberkulos [3]. Idag fungerar anläggningen som ett slags företagshotell.

Van Nelle fabriken upphörde 1996 och byggdes också om för att rymma kontorsarbetsplatser enligt ”co-working” modellen. Inför restaureringen anlätades en av Nederländernas skickligaste restaureringsarkitekter när det gäller modernismens byggnader. Före restaureringen utfördes en analys av anläggningens idé och en teknisk utredning av byggnadens status. Den sammanvägda analysen ledde fram till att möjliga användningsområden och åtgärder definierades och det blev utgångspunkt för såväl restaurering som tillägg.

Utgångspunkten var att Van Nelle skulle återbrukas i en ny funktion som respekterade den arkitektoniska idén och de kulturhistoriska värdena. För att få ekonomi i projektet valdes moderna arbetsstudios för kreativa yrken. Både sanatorieanläggningen och fabriken restaurerades av den nederländske arkitekten Wessel de Jonge, som parallellt med sin arkitektpraktik är professor vid Delft University of Technology. De Jonge är också en av grundarna till den internationella organisationen *Docomomo* som värnar om det modernistiska kulturarvet.

STARKT OCH UTTRYCKSFULLT

Under första hälften av 1900-talet inrättades en mängd friluftsbad och många av den fick hopptorn av armerad betong. Hopptornen reser sig idag som landmärken, ofta med en stark och uttrycksfull form som materialet bidrar till att skapa. De framträder som en symbol för det fritidsliv som allt fler förunnades vid den här tiden.

3. Uppgifter från hemsidan för Zonnenstraal Hilversum <https://zonnenstraal.nl/en/> 2022-04-02.



Figur 4.16. Hopptornet vid Ingierstrandbad öster om Oslo. Det så kallade stupetårnet byggdes 1931 av armerad betong. Fotograf okänd. Foto: Arbeiderbladet / Arbeiderbevegelsens arkiv og bibliotek, 1950.

Ett fint exempel är hopptornet på Ingierstrand bad öster om Oslo, ritat av Ole Lind Schistad och Eyvind Moestue 1931, och byggt av AS Høyer Ellefsen 1933 [4]. Arkitekternas utgångspunkt var att badanläggningen skulle inordna sig i det storslagna landskapets skönhet och anpassa sig till den kuperade terrängen utan att, som man sade, övermöblera området. Paviljongen för omklädning och friluftsserveringen underordnar sig landskapet medan hopptornet reser sig spänstigt över vattenytan likt ett enormt vattendjur.

Tornet uppfyllde tidens internationella krav på tävlingshopptorn och hade avsatsar på fem och tio meters höjd, lång ansats och sviktbräddor [5]. Som äldre fotografier visar hade varje avsats ursprungligen bågformade räcken i anslutning till tornet, men inga räcken som sträckte sig ut på avsatserna. En flaggstång, eller mast, accentuerade landmärket ytterligare. Sammantaget är tornet med sin stringenta och smäckra form ett avgörande inslag i badanläggningen och manifesterar människans uppfinningsförmåga och djärva lek med elementens krafter.

4. Akershus fylkeskommune, avdeling for regional utvikling (2006) *Ingierstrand bad, GNR 32, BNR 29, Oppgård kommune Forslag om fredning. Dokumentsjonsvedlegg*, Tillgänglig via norska Riksantikvarens hemsida: 2022-02-19 <https://www.riksantikvaren.no/fredninger/ingierstrand-bad-i-oslo-fredet/>; Hemsidan för Ingierstrandbad: 2022-03-15 <https://www.ingierstrandbad.no/>

5. Akershus fylkeskommune avdeling for regional utvikling (2006) *Ingierstrand bad, GNR 32, BNR 29, Oppgård kommune Forslag om fredning. Dokumentsjonsvedlegg*, s.8.



Figur 4.17. Hoppetornet vid Ingierstrandbad efter 2009-2010 års restaurering. Konstruktionen reser sig över vattenytan som ett mäktigt sjödjur och skapar ett landmärke i den bergiga terrängen utanför Oslo. Foto: Filip Hammarlund.

RESTAURERINGENS UTMANINGAR

Anläggningen vid Ingierstrand räknas i Norge som ett monument över modernismen och inför restaureringen genomfördes en analys av anläggningens värden och tekniska tillstånd. Hoppetornet hade stora karoniserings-skador och den lätta formen hade över tid tyngts av moderna räcken på avsatserna. Ställningstagande vid restaureringen var i huvudsak att bevara och rekonstruera arkitektoniska kvaliteter, bevara originalsubstans så långt som möjligt och att synliggöra åldern. Vid restaureringen 2009–2010 låg fokus på att vidmakthålla badanläggningens komposition och bibehålla hoppetornets både övergripande arkitektoniska uttryck och de minsta detaljerna. Restaureringen, som utfördes av Arkitektskap och WSP, inbegrep en rad metoder såsom traditionell mekanisk betongrehabilitering.

Skador åtgärdades genom att varje rostade armeringsjärn frilades för att antingen bytas eller rostskyddsbehandlas. Därefter lagningsgöts delar av betongen. En hel del av konstruktionen behövde gjutas om, som de långa bärande balkar ut till hoppetornet. Nya säkerhetskrav innebar att plattformarna försågs med räcken som ansluter till den ursprungliga formgivningen.

Badanläggningen, som skyddas enligt norsk kulturminneslag, är idag ett känt besöksmål och beskrivs som ett av Norges främsta exempel på funktionalistisk arkitektur [6].

6. Riksantikvaren (2012) Ingierstrand bad - Ingierstrandveien 30, gnr/bnr 32/28 i Opppegård kommune - Vedtak om fredning etter kulturminneloven § 15 2012-08-16.

7. Uppgifterna om Mattssons rideskoles historia är hämtade från ridskolans egen hemsida 2022-02-20, <https://mattssons-rideklub.dk/om-os/historie/grundlaeggelsen>.

RAFFINERAD KONSTRUKTION GER MONOLITISK TUNNEL

I utkanten av Köpenhamns friluftsområde Dyrhaven ligger Mattssons ridskola som grundades år 1909. Ridning ansågs vid tiden som en mondän aktivitet och verksamheten växte snabbt ur sina gamla träbyggnader [7]. År 1936 fick arkitekten Arne Jacobsen i uppdrag av ägaren Axel Mattsson att rita vad som skulle bli Nordens största ridhus. Byggnaden uppfördes i betong med utanpåliggande bärande betongbågar som göts ihop med betongskalet. Konstruktionen fick insidan att framstå som en monolitisk tunnel där gjutformens bräder ger en lätt struktur i betongens obehandlade yta. På utsidan, mellan bågarne, placerades en tunn isolering täckt med takpapp.

Betongen formade en vackert komponerad hall bestående av ett slätt tunnvalv i rå betong med glasbetong i valvhjässan som det föränderliga dagsljuset silades igenom. Dagsljuset var påtagligt och lyfte fram den strama formen samtidigt som känslan av en utomhusmiljö infann sig. Ridhuset räknades som en betydande och nydanande byggnad redan när den uppfördes.

RESTAURERINGENS UTMANINGAR

Det fuktiga inomhusklimatet, med kondens och ånga från hästarna urin, bidrog med tiden till att karbonatiseringen nådde den ytligt placerade armeringen i ridhusets tunnvalv. Armeringsjärnet rostade och sprängde sönder betongen. Inför restaureringen 1998 definierades en strategi som gick ut på att bevara byggnadens konstruktiva och arkitektoniska idéer, som bland annat kom till uttryck i brädformens avtryck på den råa betongens yta. De rostiga armeringsjärnen ersattes därför med rostfritt stål innanför betongytan, som sedan återställdes genom injicering av betong bakom den specialtillverkade brädformen. Man försökte även återskapa glasbetongen i taket men det blev för kostsamt så det ersattes av ett glastak

När alla skador var lagade stod man inför ett nytt dilemma. Trots all tankemöda visade det sig att varje lagning syntes som en fläck på den stora monolitiska strukturen. Fläckarna framstod som ett iögonfallande och obegripligt mönster. Lösningen på problemet blev att måla samtliga ytor varvid byggnaden i någon mån förlorade sitt signum, som var just den råa betongen.

Restaureringen visar hur svårt det är att åtgärda naken betong som präglas av gjutformens bräder, och hur lagningar kan resultera i ett nytt uttryck. Ibland kan det vara den enda rimliga lösningen, men det behöver vara ett moget beslut utifrån en noggrann analys av helheten.



Figur 4.18. Armeringen i ridhusets tunnvalv hade rostat och sprängt bort det tunna betongskiktet. Betonglagningarna utfördes med stor omsorg, nya gjutformar formades efter den befintliga strukturen och betongen injicerades in bakom formen. Till vänster i bilden ansas provmålning för att få en enhetlig yta. Foto: Lone-Pia Bach 1998.

STAMPBETONG MED LEN HUD

Med tekniken att stampa och packa halvtorr betong i formar kunde man i slutet av 1800-talet tillverka dekor i komplexa sammansatta mönster till ett överkomligt pris. Det gav tidens stileklectiker möjlighet till perfektion i både form och kulör. Efter Stockholmsutställningen 1930 växte kritiken mot den formstampade betongdekoren som avlägsnades från många byggnader.

Allkonstverket S:t Johanneskyrkan i Stockholm är ett bra exempel på hur stampbetong användes för att efterlikna det ”ädlare” materialet sandsten. Kyrkan är en av Sveriges mest intakta nygotiska kyrkor och varje detalj är noggrant uttänkt och gestaltad för att förverkliga den nygotiska idén. Arkitekten Carl Möller var endast 24 år gammal när han vann tävlingen 1883. Han gestaltade S:t Johannes i tidens stilideal och den byggdes med tidens nya teknik och material såsom stampbetong och formpressat tegel i olika kulörer. Socklar, pelarfundament, masverk och fasaddekor som fialer och dekorerade listverk utfördes i oarmerad stampbetong. Till ballast valdes lokal natursand med röda inslag som gav betongen en mjuk varm färgton.



Figur 4.19. S:t Johannes kyrka i Stockholm uppfördes 1883-1890 med många byggnadsdetaljer av oarmerad stampbetong. Foto: Fredric Boukari.



RESTAURERINGENS UTMANINGAR

Vid åtgärder på naken stampbetong är det viktigt att betongen bibehålles utan färgskikt eller annan ytbehandling. Målar man betongen förlorar den sin fina, naturstenslika karaktär. S:t Johanneskyrkans betongdetaljer är fortfarande, efter 140 år, i mycket bra skick tack vare att de är oarmerade. Skador har i huvudsak uppstått där materialet har utsatts för salter eller påverkats av infästningsjärn eller fönstrens stormjärn som rostade. Skicket är så gott att den lina cementskivan fortfarande finns kvar på många ställen. I vindutsatta lägen har den tunna huden blåsträts bort så att betongen liknar sandsten än mer. På ett ögonblick skulle man kunna förstöra denna mäktiga kyrkas värdighet genom att måla betongen. Här krävs omsorg och eftertanke!

Figur 4.20. De dekorativa nygotiska elementen är utförda i stampbetong. Trots sin höga ålder är de välbevarade och har i många lägen sin lina cementskiva kvar. Tack vare att betongen är oarmerad har den bevarats så väl. Foto: Sven Olof Ahlberg.

DE YTTERSTA MILLIMETRARNAS BETYDELSE

Betong framträder på olika sätt beroende typen av ballast, cementens kulör, betongens ytstruktur och ytbehandling. Uttrycken kan vara så olika att det knappt går att tala om ett enda material. De stora variationerna försvårar både lagning, rengöring och reparation och särskilt svårt att arbeta med är den nakna, råa betongen. Något så enkelt som fasadrengöring kan förstöra ett verks signifikans, då den nakna betongens yta ofta har bearbetats. Dess estetiska uttryck ligger ofta i det allra yttersta skiktet av den exponerade ytan.

Sten Samuelson och Fritz Janeke ritade Norrköping stadsbibliotek som en tredimensionell skulptur med subtilt bearbetad ytstruktur i exponerad betong. Byggnaden är ett framstående exempel på medvetna subtila betongdetaljer som är svåra att rengöra. Byggnadens rumsligheter är uppbyggda utifrån en dynamisk princip med vertikala och horisontella ut- och inblickar i nära samverkan med världen utanför. Alla de element som inredning, belysning och byggnadsdelarnas utformning är betydelsefulla för upplevelsen av biblioteket som ett välkomnande rum i staden. Både den invändiga och den utvändiga obehandlade betongen är gjuten i geometriska mönster, med överraskande detaljrikedom som utgör en viktig del av helhetskompositionen.

För att uppnå den precisa grafiska formen med tydliga avtryck av träets ådring sandblästrades allt formträ kraftigt så att vårveden urholkades och den tåligare vinterveden framträdde tydligare. Därefter fogades brädorna ihop till gjutformen.

Figur 4.21. Gjutformens formbrädor blästrades för att få ett tydligare träavtryck i den gjutna betongen vid Norrköpings stadsbibliotek. Träfiber som blev kvar i formen ger betongen en mjuk gulaktig kulör som i synnerhet kan upplevas i interiören. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2020.





RESTAURERINGENS UTMANINGAR

När byggnader som Norrköpings bibliotek får smutsavlagringar, kalkutfällningar och algpåväxt tycker de flesta att betongytan behöver rengöras. Den upplevs som sjaskig. För att värna den starka arkitektoniska idén måste rengöringen göras skonsamt, så att fasadens yttersta millimeter bibehålles

Figur 4.22. Norrköping stadsbibliotek är modulerat över en ganska rationell grundstruktur, men genom att tillföra olika element blir byggnaden dynamisk och understödjer bibliotekets olika aktiviteter. Med hjälp av ljus och rums-olika element leds besökaren naturligt mellan olika funktioner och aktiviteter. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2020.

Figur 4.23. Kungsholms gymnasium är ett bra exempel på att det vid restaurering är viktigt att ställa frågan på vilket avstånd en lagning kommer att betraktas. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.



intakt. I praktiken innebär det att de flesta idag kända metoder går bort, i varje fall de som anses ekonomiskt försvarbara. Eftersom rengöringen främst motiveras av estetiska skäl är det relevant att fråga sig om vi istället borde acceptera betongens smutsiga yta. Patina har en fin klang, men är i regel bara smuts. Kan vi lära oss se betongens smuts och alger som patina?

Det tidigare S:t Görans gymnasium, ett modernistiskt mästerverk med intrikat mönster sträcker sig mot himmel. Med grafisk precision formgav den fransk svenska arkitekten Léonie Geisendorf byggnaden som stod klar 1960. Byggnaden kan vid en första anblick te sig likartad, men är fylld med variation, små förskjutningar i mönstret, mönsterbearbetad naken betong och subtilt placerade element. Inför transformationen från gymnasium till studentbostäder och restaureringen av fasaden fanns ett resonemang om betraktelseavståndet kan ha betydelse för en lagnings utförande. Efter fullskaliga prov kom man fram till att det hade betydelse och därmed bestämde man sig för en lagningsmetodik där lagningarna utfördes i förhållande till hur högt uppe de satt på fasaden. Detta var ett sätt att få till en rimlig ekonomi och tidplan för restaureringen av fasaden. Resultatet blev så vällyckat att när man står på gatan idag är det ytterst svårt att se lagningarna.

GJUTFORMAD EGENART

På sätt och vis byggs en betongbyggnad alltid två gånger, först som gjutform och sedan som färdiggjuten byggnad. Gjutformen är ofta ett stycke ingenjörskonst i sig. Spåren av den kan både ge förståelse för byggnaden som arkitektoniskt verk och fungera som förklaring till tillverkningsprocessen.

Ett tydligt exempel på hur viktig gjutformens utformning är för helheten är Arne Jacobsens ikoniska bensinstation på Strandvejen norr om Köpenhamn, byggd 1937 som ett signum för framtidstro och bilens självklara plats i den moderna människans liv. På foton från tiden ser vi bensinstationens perfekt rundade baldakin, med tunn kant, teckna sig mot en molnfri himmel. Den högblanka färgen avslöjar gjutformens korta bräder och visar därmed vilket precisionshantverk själva formbygget var och att avtrycket av formen var en del av gestaltningen.

RESTAURERINGENS UTMANINGAR

På 1990-talet började bensinstationens baldakins stolta form att långsamt sacka ihop och små delar lossnade, vilket till sist avkrävde en restaurering. Inför restaurering diskuterade man två alternativ: det ena var att förstärka

Figur 4.24. Fulländad arkitekt- och ingenjörskonst i det lätta taket på bensinstationen i Skovshoved hamn norr om Köpenhamn. Notera brädformens avtryck på undersidan och den tunna kanten på gjutningen. Foto: Det Kgl. Bibliotek - Kunstbiblioteket, Danmark.



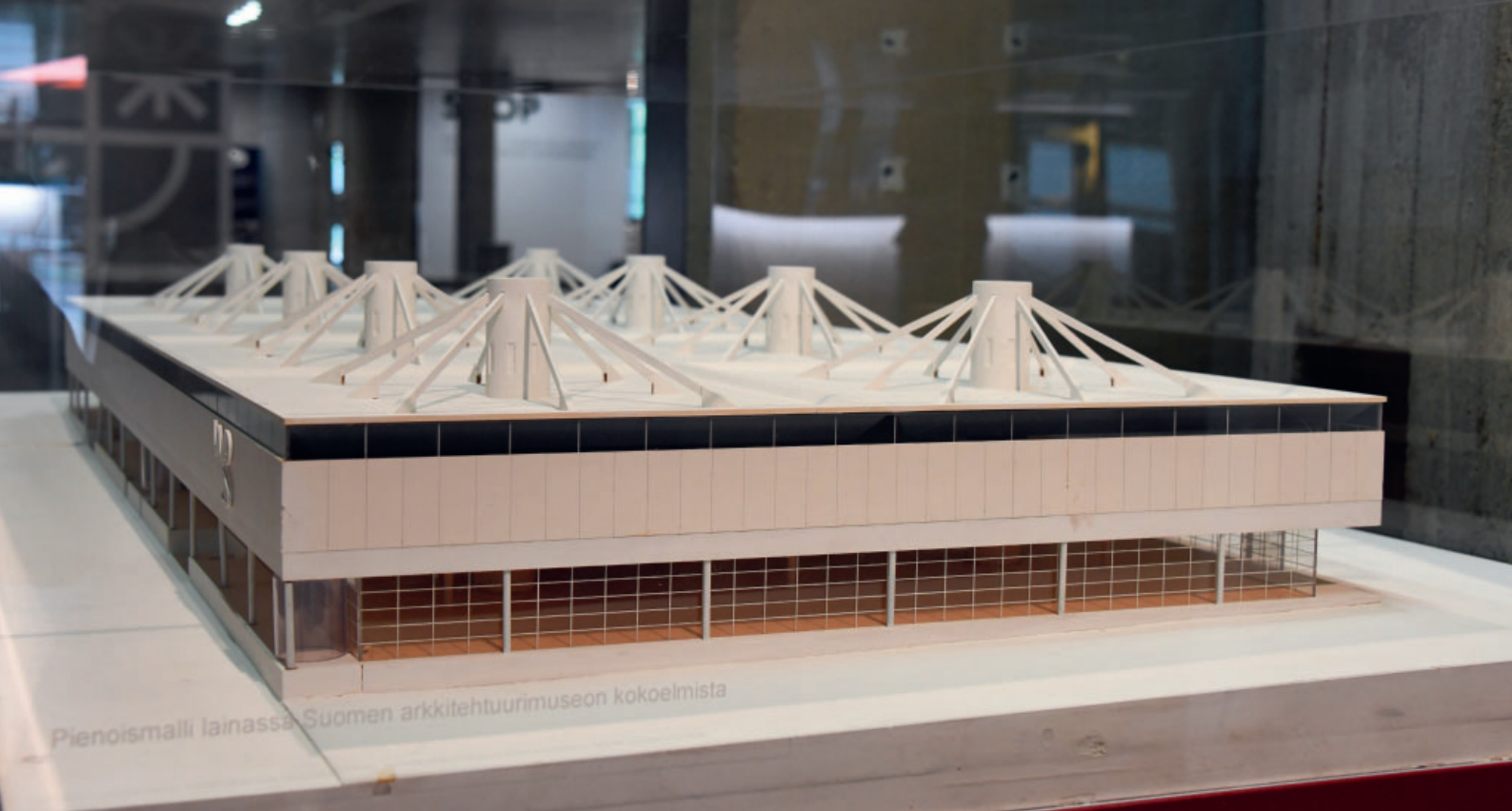


Figur 4.25. Bensinstationens tak efter rekonstruktion. Pelaren är original medan taket göts nytt. I stället för en gjutform av korta formbrädor göts det nya taket mot stora släta skivor. Berättelsen om den ursprungliga gjutformen utseende raderades. Foto: Lone-Pia Bach, 2015.

originalbaldakinen med kolfiber, det andra att demontera delar för att gjuta en ny. Kostnadsberäkningar visade inte på någon större skillnad, men det fanns en osäkerhet om huruvida baldakinen skulle behålla sin smäckra form i alternativet med kolfiber. Därmed beslutades att ersätta den. Baldakinen demonterades till pelarens topp och en ny göts med ambitionen att uppnå tekniska förbättringar. Mycket arbete lades på analyser av betongkvalité och att återskapa baldakinens lätthet och det lyckades man med, men var kanske lite överambitiös när man vill åstadkomma en helt slät undersida.

Som gjutform användes stora skivor vilket ger en helt slät undersida. Valet resulterade i en något förändrad form varvid baldakinen förlorade lite av sin spänst. Framför allt försvann originalgjutformens avtryck och spåren av den eleganta gjutkonstruktionen, och därmed försvann berättelsen om den ursprungliga gjutformen.

Vid restaureringen hade det varit möjligt att bygga en gjutform enligt samma principer som originalformarna. Tankstationen tillhör en av de riktiga pionjerverken vid restaurering av betong och man var mycket noggrann, kanske alltför noggrann – eller värderade man inte avtrycket av bräddgjutformen? Allt fokus låg på att återskapa den svävande baldakinen. Tankstationens tak lockar än idag besökare att förundras över det arkitektoniska mästerverk som pekar mot den frihet som förknippas med automobilen. I restaureringsssammanhang pekar den på att varenda val av material, gjutform, form och gestaltning är viktig när vi arbetar med detta formbara material, som betong är.



KONSTRUKTION FÖR MAXIMAL FRIHET

Betongen introducerar en helt ny arena av formfrihet och nya konstruktiva principer som gör upp med den traditionella arkitekturens konstruktiva princip om det bärande och burna. Det ger helt nya förutsättningar för arkitekter och konstruktörer, som ofta samverkar för att skapa funktionella mästerverk, och ett sådant är tryckeriet Weilin & Göös i finska Esbo. Arkitekten Aarno Ruusuvuori och konstruktören Bertel Ekengren fick i början av 1960-talet i uppdrag att skapa ett stort sammanhängande utrymme för tryckpressar utan för många bärande pelare.

Utmaningen löste de med hjälp av ingenjörskonst. Tillsammans skapade arkitekt och konstruktör en lösning med fyra enheter om 27x27 m. Varje enhet bars av en centralplacerad pylon som det ursprungligen 11 000 kvadratmeter stora taket hängdes i. Varje pylon bär åtta stag som sträcker sig ut från toppen för att hålla taket och golvytan fri från störande pelare och andra konstruktioner. Redan efter ett par år genomfördes en tillbyggnad med fyra moduler till, så att anläggningen totalt kom att bestå av åtta enheter. Pelartornen tecknar sig mot horisonten likt åtta dansande gestalter som bär upp en fritt hängande betongkub. Tunna glaspärtier ansluter mot takets tunna linje, mot bjälklag och marken.

Tryckeriet flyttade från byggnaden 1992. Idag ägs byggnaden av Esbo stad och har byggts om till WeeGee utställningscentrum med bibehållen konstruktiv princip [8].

Figur 4.26. Modell av tryckeriet Weilin & Göös i finska Esbo från 1960-talet. Här briljerar ingenjörskonsten! Det stora taket medger ett stort rum utan störande bärande strukturer utöver de åtta pelarna. Sedan 1992 inrymmer byggnaden WeeGee-utställningscentrum. Foto: Sven Olof Ahlberg.

8. Uppgifter om utställningscentret WeeGee hämtade från centrets hemsida, 2022-02-15 <https://www.espoo.fi/sv/utställningscentret-weege>.



Figur 4.27. Det gamla tryckeriet inrymmer numera utställningscentret WeeGee och sekundära rumavskiljare har byggts i rummet. Notera den stora pelaren och hur taket lyfter vid fasaden för att släppa in ljuset långt in i lokalen.

Utvändigt markerar sig taket elegant som ett tunt streck ovanför fasaden som är utformad som kontinuerligt glas.

Effektivitet, rationalitet och framtidstro lyser ur den arkitektoniska formen. Arkitekturen, ingenjörskonsten och betongtekniken förenar sig i ett modernistisk monument. Fotografier: Sven-Olof Ahlberg.

RESTAURERINGENS UTMANINGAR

När en byggnad som WeeGee-huset i Esbo ska restaureras, måste alla typer av åtgärder utgå från insikten att den arkitektoniska idén är synonym med den konstruktiva. Byggnaden är ett bra exempel på betongens konstruktiva möjligheter och den upphöjda ingenjörskonsten i samverkan med det arkitektoniska verket. Storheten ligger just i det stora fria sammanhängande ytor som möjliggörs av pylonerna och vid förändringar är det avgörande att principen är avläsbar och att den inte byggs bort med rumsavdelningar och pelare. Förståelsen för byggnadens arkitektoniska och konstruktiva princip är avgörande när byggnader av denna typ återbrukas.

BETONG ETT VARDAGSMATERIAL

Betongen framträder ibland på oväntade platser och i oväntade former, det man tror är sten kan i själva verket vara betong. Den kan vara bearbetad fysiskt så det ser ut som sten genom exempelvis huggning, men kan också bemålas och poleras med vax så det ser ut som sten. Därför är det nödvändig med noggranna analyser innan ett arbete påbörjas. En arkitektonisk idé kan gömma sig i formatet av en detalj och det är därför viktigt att vara lyhörd för det arkitektoniska verk man har framför sig.

BETONG SOM KONSTRUKTIV OCH ARKITEKTONISK IDÉ

Mästerverk likaväl som vardagliga objekt av betong har skapats av arkitekter, ingenjörer och konstnärer som inspirerats av materialets formvillighet till sinnrika och sinnliga former. Betong har förfört till skaparglädje liksom löst bostadsbrist med rationell byggt teknik. Betong är mångsidigt och laddat med både möjligheter och svårigheter. Det saknar egen form, men följer villigt gjutformen och arkitektens eller konstruktörens fantasi. Det håller länge och tål slitage, men kan också vara mycket ömtåligare än traditionella byggnads-material.

Många uppfattar byggnader uppförda i naken betong som oestetiska och omänskliga, i synnerhet när tiden satt sitt avtryck med smuts, missfärgning, algpåväxt och sprickor. Materialets dåliga rykte är en svår utmaning som måste hanteras – om ingen ser byggnadernas kvalitéer går de lätt förlorade. Förutom förlusten av arkitektoniska värden, är rivning av betongbyggnader minst sagt problematiskt ur ett hållbarhetsperspektiv. Betong är ett ytterst resurskrävande material som består av ändliga naturresurser i form av kalksten, sand och olika typer av ballast. Dessutom är det mycket energi-krävande att producera. Materialets beståndsdelar går inte att separera i samband med återanvändning och ofta används det som fyllnadsmassa – även om man numera ibland försöker återbruka byggnadsdelar i ny bebyggelse.

Figur 4.28. Exklusiv takterrass i en modernistisk fastighet från 1938. Terrassens golv var ursprungligen ett betonggolv format som 1x1 m stora plattor. Originalfoto: Lennart af Petersens, 1942. Foto: Lone-Pia Bach.

Terrassens betonggolv återskapades vid en restaurering 2022. Här efter precisionsgjutning och uppsågning i väntan på varsamt blästring. Foto: Lone-Pia Bach.



Det finns med andra ord många anledningar att vårda den befintliga betongarkitekturens särdrag och sinnrikedom, men för att vårda behöver vi kunna tolka och förstå de idéer och kvaliteter som gömmer sig i byggnaderna. Första steget är att vara nyfiken och sätta sig över förutfattade meningar. Kanske är ett av de största hoten mot betongbyggnaderna att det inte hunnit gå tillräcklig lång tid för att vi ska se deras värde? Snart, när tidens minnesklocka har slagit tillräcklig länge blir deras storhet självklar i historiens stora uppslagsbok.

REFERENSER

- Akershus fylkeskommune, avdeling for regional utvikling (2006) *Ingierstrand bad*, GNR 32, BNR 29, Oppegård kommune Forslag om fredning. Dokumentasjonsvedlegg.
- Docomomo (2018) *Concrete and modernism: Technology and Conservation, Preservation Technology Dossier 14* – 2018.
- Hertzell, Tage (1984). *Betongens yta: en handbok för arkitekter och andra*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning.
- Ingierstrandbad* (2022) <https://www.ingierstrandbad.no>, hämtad 2022-03-15
- Mattssons ridskola* (2022) <https://mattssons-rideklub.dk/om-os/historie/grundlaeggelsen>, hämtad 2022-02-20.
- Van Zuijlen, Lucas och Ronald Stenvert (2018). Schokbetong: Zwijndrecht / The Netherlands / International. *Concrete and modernism: Technology and Conservation, Preservation Technology Dossier 14* – 2018.
- Riksantikvaren (2012) *Ingierstrand bad - Ingierstrandveien 30, gnr/bnr 32/28 i Oppegård kommune - Vedtak om fredning etter kulturminneloven § 15* 2012-08-16.
- Zonnestraal Hilversum* (2022) <https://zonnestraal.nl/en>, hämtad 2022-04-02.

Figur 4.29. Betongkrön på en stenmur som ser ut att vara utförd av exklusiv sandsten, men som är av blåstrad betong. Utförd av Fasadkultur. Foto: Lone-Pia Bach.





SPRICKOR I BETONG

Karl-Gunnar Olsson

När vi möter materialet betong i en byggnad eller artefakt uppfattar vi olika nyanser av vad betong är och kan vara: Betongens mjuka tredimensionalitet eller den prefabricerade betongstrukturens strama ordnande av en byggnad. Ytans detaljrika och av form-sättningen givna karaktär, betongens upplevda råhet eller den åldrade betongens patina. Känslan av trygghet inför ett robust och stabilt material men som kan övergå i otrygghet vid upplevelsen av sprickor och skador. Alla dessa aspekter är av betydelse när man ställs inför en skadad historisk betongkonstruktion och ska ta ställning till åtgärder. De kan inte separeras.

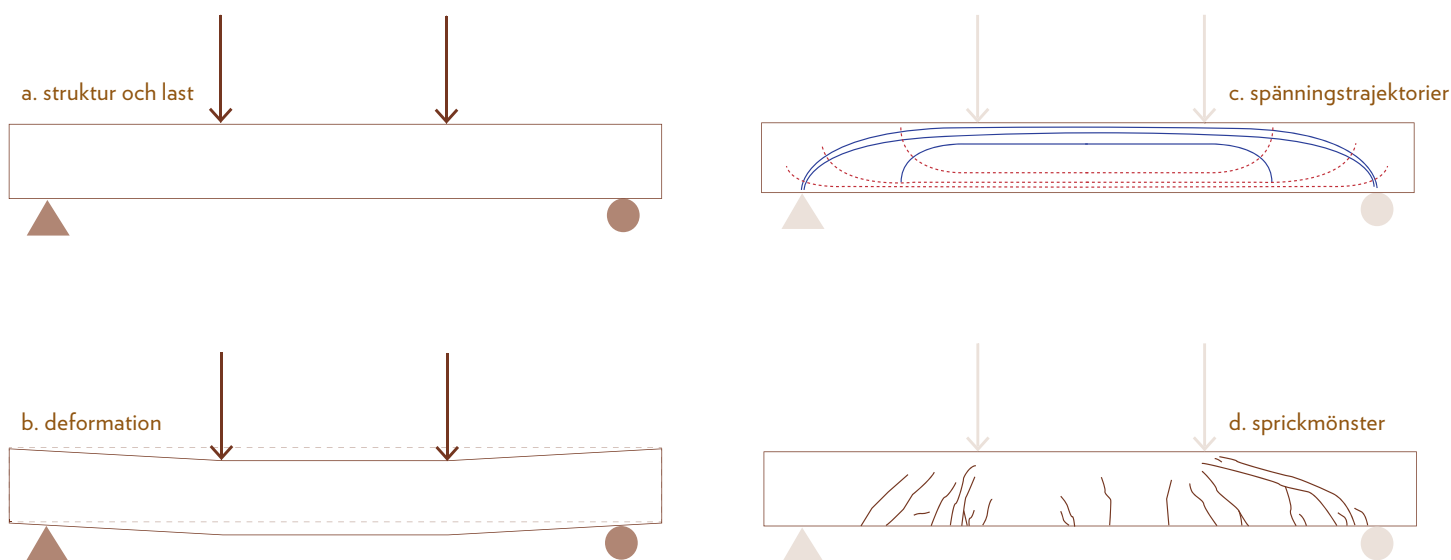
För att initierat ta sig an den skadade betongen behövs en teori och en förklaringsmodell som hjälper oss att förstå det vi ser och kan mäta. Gängse förklaringsmodeller tar sin utgångspunkt i bedömningar av de lokala materialens tillstånd och i hur de kan relateras till regelverk kring funktionalitet och lokal bärförmåga. I det här kapitlet har teorin ett annat fokus. Utgångspunkten är de grundläggande mekanismer som styr den oarmerade och den armerade betongkonstruktionens inre kraftmönster och hur vi kan avläsa dessa mönster som sprickmönster i betongen. Kan vi på ett kvalitativt sätt träna oss i att känna igen och förstå orsakerna bakom dessa mönster har vi ett kraftfullt verktyg att bidra med för att diagnosticera skador och göra kvalificerade åtgärdsförslag. Dessutom får vi ett stöd för att bättre förstå den konstruktiva princip som kan ligga bakom den historiska konstruktion vi står inför – också ett kulturhistoriskt värde. Behöver man av någon anledning ersätta de befintliga materialen med andra material så kvarstår den konstruktiva principen som en yttring av historisk kunskap – något i sig värt att bevara.

ATT LÄSA OCH FÖRSTÅ ETT SPRICKMÖNSTER

Ett sprickmönster i en betongkonstruktion uppstår i mötet mellan en specifik **belastning** och den **konstruktion** som belastningen verkar på. Figur 5.1a och 5.1b, på nästa sida, visar en fritt upplagd balk belastad av två punktlaster och hur denna belastning deformerar balken. Till det **deformationsmönster** som

AVSPJÄLKNING

Betongfasaden på Bergshamra kyrka i Solna församling. Den exakt utformade betongytan på fasadelementen har gjutits mot en noga designad brädform. Delar av betongen har lossnat genom avspjälkning beroende på att infästningsjärn har korroderat. Den lösa biten riskerar att falla ner och är en risk för tredje man. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.



Figur 5.1. En betongkonstruktion med en specifik belastning ger upphov till sprickmönster. De varianter av sprickmönster som visas i det här kapitlet illustreras med figurer för struktur och last, deformation, spänningstrajektorier samt det sprickmönster som uppstår. Illustration: Sara Höglund.

BETONG

Betong har hög tryckhållfasthet och låg draghållfasthet.

skapas hör ett **inre spänningsmönster** av drag- och tryckspänningar, figur 5.1c. Här visas med röda och blå linjer, så kallade **spänningstrajektorier**, hur materialet i balken tänjs ut i drag (rött) och pressas samman i tryck (blått). Då betongmaterialet har en relativt låg draghållfasthet kommer sprickor att uppstå redan vid låga dragspänningar. Ett **sprickmönster** bildas vinkelrätt dragspänningarna, figur 5.1d.

En betongkonstruktion kan belastas av olika yttre laster som orsakar olika sprickmönster. De sprickmönster vi ser kan även vara ett resultat av en inre belastning orsakad av att betongen krymper vid uttorkning eller av att andra material inneslutna i betongen, till exempel armering eller inneslutet vatten, av olika anledningar expanderar. Det vi uppfattar som sprickor kan också vara orsakat av att betongmaterialet i sig bryts ned som vid karbonatisering. Alla konstruktioner har i verkligheten tre dimensioner men när vi ska avläsa ett sprickmönster ser vi det oftast på en 2-dimensionell yta. I exemplen nedan redovisas främst 2-dimensionella ytmönster, men i några fall också antytt en 3-dimensionell utbredning.

NÅGRA GRUNDLÄGGANDE BEGREPP: TRYCK- OCH DRAG- SPÄNNINGAR, STYVHET OCH HÅLLFASTHET

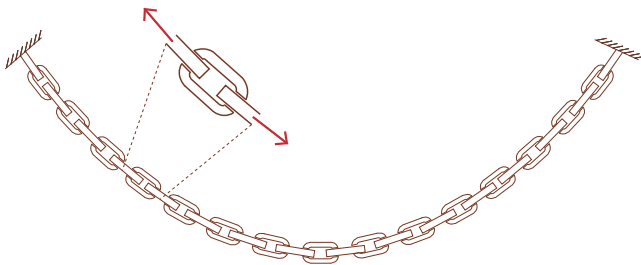
När en konstruktion belastas kommer också materialet i konstruktionen att belastas. Vi kan uppfatta och beskriva denna materialbelastning genom att i konstruktionen läsa in hur inre materialkedjor länkas samman och antingen

bli dragna eller tryckta. I figur 5.1c visas på ett förenklat sätt hur dessa materialkedjor bildar sammanhållna drag- och trycklinjer.

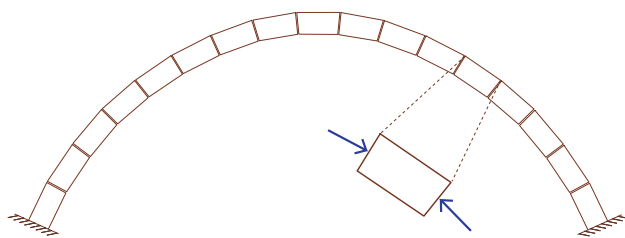
Att de två grundläggande konstruktionstyperna, lina och den ideala bågen också är de mest materialeffektiva beror på att här kan dessa materialkedjor renodlas. I en hängande kedja (lina), figur 5.2a, belastas materialet i rent drag. En stående båge med samma lastfördelning och en spegelvänd geometri belastas materialet på motsvarande sätt i rent tryck. Mot denna bakgrund kan man förstå den fritt upplagda balken i figur 5.1c som flera överlagrade materialkedjor i form av tryckbågar och draglinor.

SPÄNNING

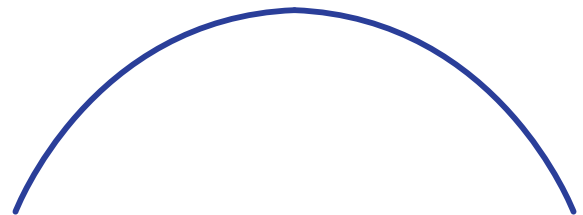
Röd streckad linje: dragspänning.
Blå heldragen linje: tryckspänning.



a. dragspänning i en lina (kedja)



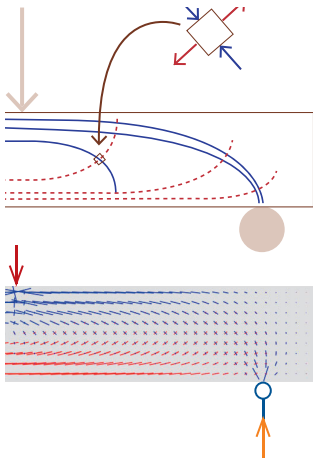
b. tryckspänning i en båge



Figur 5.2. I en lina respektive en båge blir drag- och tryckspänningarna renodlade. Illustration: Sara Höglund.

Till det spänningsmönster som visas i figur 5.1c hör några förutsättningar, begrepp och egenskaper som vi innan vi går vidare behöver reda ut:

- Figuren i sig är en förenkling där många olika materialkedjor har sammanfattats i några få med syftet att renodla och tydliggöra själva mönstret av tryck- och draglinjer. I verkligheten bidrar varje materialpunkt i balken till att vara en länk i sådana kedjor. Ett i äldre litteratur vanligt namn på dessa tryck- och draglinjer är spänningstrajektorier.
- De visade spänningarna kallas huvudspänningar och illustrerar konstruktionens spänningar som rena tryck- och dragspänningar. Men



Figur 5.3. Ett annat sätt att illustrera spänningslinjerna är som i den nedre av dessa två balkutsnitt. Den kommer från när huvudspänningar beräknas med den numeriska beräkningsmetoden FEM (Finita Elementmetoden), då är det vanligt att i varje finit element redovisa de spänningarna som verkar på en liten tänkt kvadrat men utan att man ser kvadraten. Det visade huvudspänningsmönstret är beräknat i datorprogrammet ForcePAD. Open source: Källa: Open source, <http://forcepad.sourceforge.net>.

Figur 5.4. Alla materialpunkter utsätts för spänning som kan vara tryck, drag eller båda. I figuren visas en materialpunkt där de tryckta sidorna är (något överdrivet) vinklade mot varandra. Detta för att illustrera trycklinjens krökning. Tryckspänningarna på materialpunkten kommer då att tillsammans generera en utåtriktad kraft som balanseras av den inåtriktade dragkraften i figuren. Illustration: Sara Höglund.

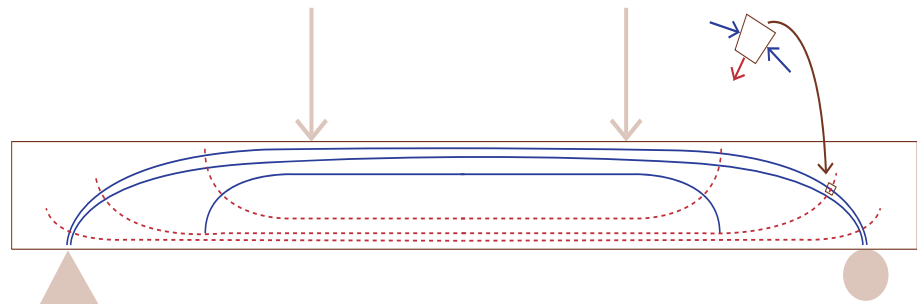
SPÄNNING

Spänning är ett kraftmått med enheten; kraft per ytenhet.

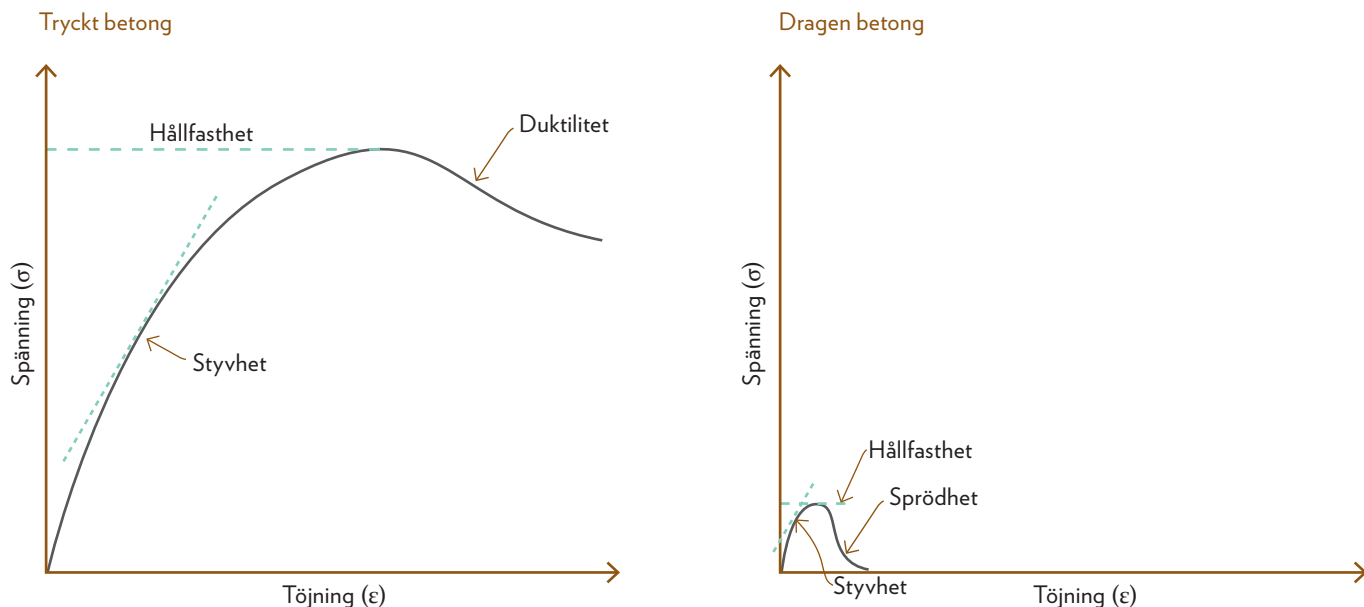
spänningsmönster kan också redovisas på andra sätt. Bland ingenjörer är det vanligare att visa spänningarna som normal- och skjuvspänningar i balkens längd- och tvärriktning. Det kan historiskt kopplas till de beräkningsmetoder som varit dominerande och som fortfarande normer och gängse provningsmetoder relaterar till. Fördelen med att i stället visa huvudspänningar är att dessa direkt kan kopplas till de sprickmönster vi ser.

- Spänning är ett kraftmått med enheten kraft per ytenhet. Detta gör att belastningen på olika materialpunkter kan jämföras med varandra och vi kan mäta och direkt jämföra olika materialpunkters belastning. I äldre texter används i stället för spänning ofta begreppet **påkänning**, ett begrepp som levandegör det drag och/eller tryck som materialet i sig självt uppfattar och ska ge motstånd mot. Från Newtons första lag har vi att samtliga spänningar (krafter) som verkar på en materialpunkt måste balansera varandra – vara i jämvikt, se den lilla kvadraten i figur 5.3.

Huvudspänningar möts i en materialpunkt alltid vinkelrätt mot varandra. I figuren nedan visas ett 2-dimensionellt sådant möte och man kan i figuren se att både tryck och drag samtidigt kan verka på en materialpunkt. Man ser i figuren också hur både de två tryckspänningarna och de två dragspänningarna balanserar varandra. I figuren visas själva materialpunkten som en liten kvadrat. En materialpunkt har ingen utsträckning, inga dimensioner, och kan därför representeras på olika sätt. Nedan kommer också andra representationer att förekomma.



Tryck- och dragspänningar kan genereras och växa till på två sätt. I punkter där yttre belastningar verkar på konstruktionen uppstår spänningar för att balansera dessa yttre krafter. I figur 5.3 ser man detta tydligast vid balkens upplag. Men spänningar uppstår och förändras också när en eller flera spänningslinjer i konstruktionens inre har en krökning. I figur 5.4 visas krökningen genom att en materialpunkts tryckta sidor är något vinklade mot varandra. Det ger ett nettetryck mot materialpunktens konvexa sida som måste balanseras – här med en dragspänning på den konkava sidan enligt figuren.



Figur 5.5. Två arbetskurvor där den vänstra visar att betong klarar tryckspänning väl medan den högra visar att dragspänningen är väsentligt lägre. Illustration: Sara Höglund.

När en materialpunkt belastas reagerar betongmaterialet med ett inre motstånd. Detta motstånd har tre karakteristika som kan mätas genom provning: styvhet, hållfasthet och duktilitet/sprödhet. I figur 5.5 visas exempel på resultat från provningar där materialet på ett kontrollerat sätt har belastats så att sambandet mellan spänning (kraft per ytenhet) och töjning (längdändring per längdenhet) har kunnat mätas. Den uppmätta kurvan kallas arbetskurva då ytan under kurvan är ett mått på det töjningsarbete som successivt utförs under provningen. En del av detta arbete lagras som töjningsenergi och frigörs när materialet avlastas. Andra delar av arbetet går förlorat när materialet bryts ned och då oftast genom att friktion omvandlas till värmeenergi.

Den uppmätta kurvas lutning kallas styvhet. Styvheten för betong är relativt lika i tryck och drag. Vi använder oftast styvheten för att kunna förutsäga betongkonstruktioners deformationer vid olika belastningar. Men styvheten har också en annan och nog så viktig betydelse för förståelsen av konstruktioners verkningssätt, inte minst armerade betongkonstruktioner. Det är styvheten som avgör hur tryck- och dragmönster organiserar sig i en konstruktion. Man säger att "styvhet leder last" och menar då att om det finns styvare lastvägar så söker sig tryck- och draglinjerna till dessa styva lastvägar (kedjor av materialpunkter). Om till exempel betong och armering finns parallellt i en konstruktion så bärs den dominerande delen av lasten av armeringen då den är mycket styvare än betongen. Vid komplexa tredimensionella konstruktioner använder vi ibland det formrelaterade begreppet "förstyvning" som har en motsvarande innebörd.

DUKTILITET

"Tänjbar" – mått på materials förmåga att utsättas för plastisk deformation. Motsatsen till duktilitet är sprödhet.

Arbetskurvans högsta punkt visar det provade materialets hållfasthet. Som kurvorna visar så har betong en betydligt större tryckhållfasthet än draghållfasthet. Betongmaterialets dåliga draghållfasthet gör att betong fungerar som bäst i rena tryckkonstruktioner. Det är också i sådana konstruktioner som betong har kunnat bibehålla sin funktion i historiska byggnadsverk. Tre av betongmaterialets främsta egenskaper är beständighet i vatten, fri formbarhet och en enkel gjutprocess. Som nämnts tidigare var det från senare delen av 1800-talet som kunskap och tekniker succesivt utvecklats för att med armering kompensera betongmaterialets dåliga draghållfasthet. Först med denna kunskap har betongens i övrigt goda egenskaper som byggnadsmaterial kunnat utnyttjas fullt ut. Den armerade betongen kom därigenom att bli ett av våra mest använda byggnadsmaterial.

Men betongmaterialets dåliga draghållfasthet finns kvar. När en armerad betongkonstruktion belastas så spricker den, trots armering, i de dragna zonerna. Oftast är dessa sprickor små och inte synliga för ögat, men vid grövre armeringsdimensioner och/eller vid grov ballast kommer sprickorna att koncentreras, och då bli större och synliga. Här kan vatten och salter tränga in och orsaka skador på såväl armering som betong. Ett ofta använt grepp för att undvika sprickor i dragna zoner är att före- eller efterspanna betong. Principen är att man i dragna zoner överlagrar en självbalanserande kombination av drag och tryck. Genom att öka draget i armeringen pressas samtidigt den omgivande betongen samman och dragsprickorna i betongen tätas.

Efter att maximal hållfasthet har uppnåtts bryts betongmaterialet succesivt ned. För den tryckta betongen sker detta med relativt bibehållen hållfasthet och med en låg negativ styvhet vilket ger konstruktionen en potential att hitta nya alternativa lastvägar (materialkedjor) och fortsatta ha en lastbärande förmåga. Man kallar ett sådant materialbeteende för duktilt. De flesta konstruktioner har en förmåga att inom sig omfördela belastningen på de olika materialkedjorna. För duktila material, som betong i tryck, kan en materialkedja som uppnått sin maxkapacitet (hållfasthet) då fortsätta att bära samtidigt som andra materialkedjor med outnyttjad kapacitet kan hjälpa till. Trots att betongmaterialet i delar av konstruktionen är på väg att brytas ner besitter konstruktionen som helhet en förmåga att bära ytterligare last. När betongmaterialet utsätts för stora belastningar bryts materialet sönder. Detta beror på att det cement som fungerat som lim i betongen då mister sin funktion. Att hållfastheten ändå bibehålls på en hög nivå kan förklaras av att trycket möjliggör friktion mellan de mindre betongstycken som bildas, och då med en relativt stor kapacitet att ersätta cementlimmet. Motsvarande fenomen uppstår vid karbonatisering av åldrande betong som trots att betongmaterialet bryts ned på kemisk väg ändå i sina tryckta zoner har en relativt hög bibehållen förmåga att bära last.

FÖRSPÄND BETONG

Förspänd betong kan vara förespänd eller efterspänd. Vid förespänning spänns armeringsjärnen innan de gjuts in i betongen. När de sedan avlastas trycks betongen samman. Vid efterspanning dras armeringen genom rör i konstruktionen och spänns sedan mot betongen i konstruktionens ytterkanter då betongen har härdat tillräckligt.

MED MATERIALEN SOM UTGÅNGSPUNKT

Cement, ballast och vatten är betongens viktigaste beståndsdelar. Av dessa är det cementet som binder ihop den härdade betongen. Materialets egenskaper varierar beroende av vilken typ cement som använts samt om tillsatsmaterial och tillsatsmedel ingår i den så kallade cementpastan. Vanligen används någon typ av portlandcementklinker men tillsatsmaterial innebär att delar av klinkern ersätts med andra oorganiska material som ger liknande egenskaper. Tillsatsmedel är kemiska ämnen som påverkar till exempel koncistens, härdningstid, hur snabbt betongen binder, luftporernas antal och storlek samt krympning. Betongens egenskaper ändras utifrån de ingående delmaterialen och deras proportionering. Egenskaperna är också historiskt betingade då olika cementtyper har använts vid olika tider, vilket beskrivs i kapitlet *Betong är en blandning*.

I samma kapitel beskrivs även armering som behövs för att betong ska klara dragspänning. Armering av stål har använts sedan 1800-talet. Före andra världskriget var armeringen slät medan dagens armeringstänger och armeringsnät har tvärgående eller sneda kammar eller profiler. Efterhand har nya typer och nya material också prövats för armering där speciella egenskaper eftersträvas.

I golv, sprutbetong och förtillverkade byggnadsdelar är numera korta fiber av stål eller plast vanligt förekommande. Denna typ av armering minskar sprickbildningen i betongen. Ibland används till exempel kolfiberarmering i form av mattor som förstärkning eller säkring av skadade betongytor. Armeringen kan placeras i formen och bara gutas in. Denna typ av armering som är den absolut vanligaste kallas **slakarmering**. Armeringen kan för olika syften spännas genom att den med domkrafter eller på annat sätt dras ut i samband med gjutningen. Man talar då om spännarmering eller förspänning. Sker detta före gjutningen kallar man det **förespänd armering**. Motsatsen, **efterspänd armering**, är då armeringen läggs i rör och spänns efter att betongen till viss del härdats. Förspänning användas för olika syften. Genom förspänning skapas ett överlagrat spänningsmönster som klokt designat kan öka den lastbärande förmågan – främst genom att betongens tryckkapacitet bättre utnyttjas. Ett annat syfte är att genom förspänning reducera/eliminera betongens dragzoner och på så sätt minska risken för sprickbildning. En förutsättning för att armeringen ska kunna verka tillsammans med betongen är att båda materialen har samma längdutvidningskoefficient.

ALLMÄNT OM ORSAKER BAKOM SPRICKOR

Ett vanligt sätt att sortera orsaker till sprickor är att skapa kategorier av situationer/händelser som initierat sprickbildningen. Man kan grovt tala om två typer av sådana situationer:

Sprickor som uppstått under tillverkningsprocessen

- Sprickor orsakade av betongblandning och vibrering, expansion vid värmeutveckling, krympning vid härdning/uttorkning etc.
- För förspända konstruktioner förekommer sprickor med orsaker kopplade till interaktionen mellan det förspända stålet och betongen.
- Sprickor uppkomna i samband med avformningen, till exempel att betongen fäst för starkt mot formen – ofta vid lokala geometri-ändringar.
- Sprickor uppkomna under transport och montering, till exempel av belastningar som skapats vid transport, lagring/stapling, lyft och stagnering av betongelement, stötar mot kanter och hörn mm.

Sprickor som uppstått efter tillverkning

- Sprickor orsakade av kemiska reaktioner som korrosion av armering, alkalisilikareaktioner (ASR) och sulfatangrepp.
- Termiska sprickor uppkomna efter temperatur-relaterad expansion/krympning.
- Sprickor av frostsprängning vid inlagrat vatten.
- Strukturella orsaker som oförutsedd överbelastning, stödsättningar och/eller spänningsomlagringar orsakade av att materialegenskaper ändras när de under lång tid utsätts för höga laster (krypning och relaxation).

Därtill kommer skador som ger sprickliknande mönster men som egentligen ska kopplas till en lokal nedbrytning av materialet med bara försumbar påverkan på konstruktionens spänningstillstånd (försumbar kontraktion/expansion samt försumbar påverkan på materialets styvhetsegenskaper).

Sett ur ett strukturmekaniskt perspektiv behöver denna orsaksrelaterade sortering inordnas under delvis andra kategorier, kategorier som direkt kan härledas till hur sprickmönster uppkommer som en följd av växel-spelet mellan en specifik belastning och hur konstruktionens inre materiella struktur är ordnad. Med hjälp av denna kategorisering kan också sprickmönster typologiseras och erbjuda en guide för diagnosticering av observerade mönster:

Sprickor som orsakats av att den materiella konstruktionens egenskaper över tid har förändrats. Här inkluderas både konstruktionen och dess yttre stöd.

- Sprickor orsakade av delar i en konstruktion skadats, tagits bort eller lagts till.

- Sprickor orsakade av att den yttre formen lokalt har förändrats.
- Sprickor orsakade av att materialegenskaper hos delar av eller hela konstruktionen har förändrats.
- Sprickor orsakade av att egenskaper hos yttre stöd har förändrats, till exempel stödsättningar eller tillagda lokala förstävningar.
- Över tid förändrade inre spänningstillstånd / spänningsrelaxation.

Sprickor som uppkommer efter en inre expansion eller kontraktion

- Sprickor orsakade av en inre expansion/utvidgning hos hela eller avgränsade delar av den armerade betongen inklusive inneslutet material som vatten i hålrum.
- Sprickor som orsakats av en inre krympning av betongen.

Sprickor som uppkommer som en följd av yttre belastningar

- Sprickor uppkomna under transport och montering, till exempel av belastningar som skapats vid transport, lagring/stapling, lyft och stagning av betongelement, stötar mot kanter och hörn etc.
- Strukturella orsaker efter konstruktionens uppförande till exempel förutsedd lokal eller global överbelastning

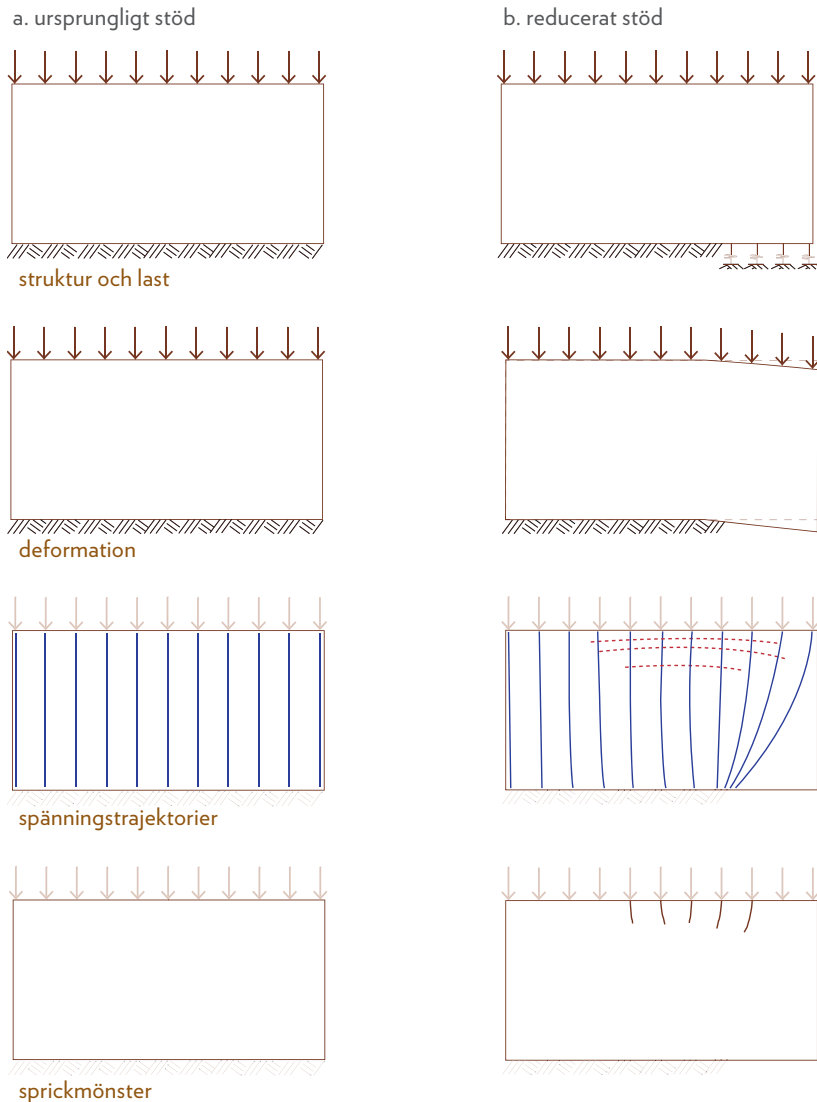
SPRICKOR SOM ORSAKATS AV ATT KONSTRUKTIONENS EGENSKAPER HAR FÖRÄNDRATS ÖVER TID

När en konstruktion belastas svarar konstruktionen genom att internt organisera sitt material för att bära lasten. Vi kan se denna organisation genom spänningsmönstrets drag- och trycklinjer – materialpunkter som bygger kedjor av motstånd genom att antingen vara dragna eller tryckta. Hur detta mönster ser ut avgörs av olika materialkedjors relativa styvhet. Generellt skapas styvheten av fyra grundkomponenter:

- De yttre stödets läge och styvhet
- Den sammansatta konstruktionens topologi
- De ingående elementens form och materialegenskaper
- Det inre spänningstillståndet

Om någon av dessa komponenter förändras över tid kommer nya spänningsmönster att uppstå.

En vanlig förändring är att egenskaperna hos materialens yttre stöd ändras över tid. Om ett yttre stöd mister hela eller delar av sin styvhet kompenseras detta av att de inre materialkedjorna söker nya lägen att ta stöd i. I figur 5.6 visas en stödsättning hos en vertikalt belastad vägg. Fjädrarna i den översta högra figuren illustrerar ett vekare stöd än det ursprungliga vilket gör att denna del av väggen ”sätter sig”. Nya materialkedjor aktiveras och skapar

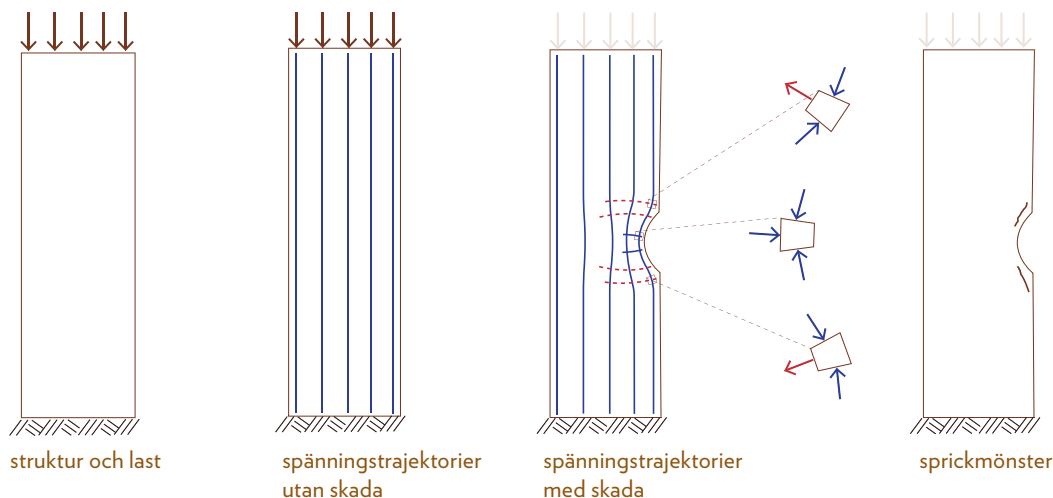


Figur 5.6. Figur b visar en sättnings-skada som gör att det vertikala stödet under väggens högra sida minskar. Stödet blir successivt vekare. Tidigt växer dragspänningar till i väggens överkant medan tryckspänningsmönstret endast påverkas marginellt. I ett långt framskridet skede, när stödet helt är borta, så söker sig trycklinjerna mot den del av väggens upplag där stöd fortsatt kan ges. Då uppstår ytterligare dragspänningar vinkelrätt mot de krökta tryckspänningarna. Nya sprickor kan då uppstå i samma riktning som de krökta tryckspänningarna, vilket inte visas i figuren. Illustration: Sara Höglund.

draglinjer som kompenserar sättningen genom att lyfta upp den del av konstruktionen som tidigare burits underifrån. Synliga sprickor i väggens överkant är ett tecken på detta.

En annan förändring kan vara att man på strukturnivå tar bort eller lägger till delar. Det kan också handla om att sammanfogningar mellan delement förändras och ges nya egenskaper. Man säger då att konstruktioners topologi har förändrats. Detta kan leda till omfattande spänningsomlagringar men trots ibland stora synliga sprickor innebär det inte alltid att konstruktionens bärförmåga har försämrats. Konstruktionen har bara hittat ett nytt jämviktstillstånd för att bära sin belastning.

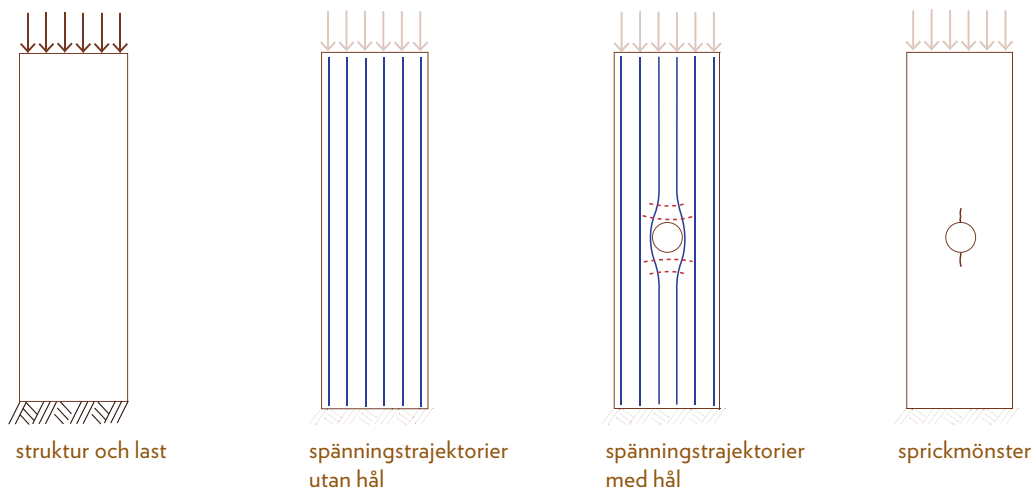
Ytterligare en typ av förändring är när en konstruktions form och/eller materialegenskaper förändras över tid. Figur 5.7 visar en lokal skada i en tryckt pelare (eller vägg). Skadan tvingar trycklinjerna att löpa runt den skadade delen. Det innebär att de tryckta materialkedjorna kröks. För att



Figur 5.7. En tryckt pelare har skadats. Trycklinjerna går då runt skadan så att trycklinjerna kröks. Nya drag- och tryckspänningar bildas vinkelrätt mot trycklinjerna för att hålla konstruktionen i balans. Illustration: Sara Höglund.

upprätthålla den enskilda materialpunktens kraftbalans (jämvikt) behöver en ny kraft skapas vinkelrätt trycklinjen. I det här fallet hittar materialet inget motstånd mot den fria kanten. Motståndet skapas i stället inåt i konstruktionen och den balanserande kraften kommer här att stödja ”inifrån”. I skadans mitt är trycklinjerna konvexa och den balanserande kraften kommer att trycka mot materialpunkterna. I skadans ytterkanter har vi det omvända. Här är trycklinjen konkav och en dragspänning behövs för att hålla materialkedjan (trycklinjen) på plats. Det gör att sprickor tenderar att uppstå i skadans ytterkanter och då spjälka av ytterligare material.

Ett motsvarande exempel på när bärande materialkedjor tvingas ta nya vägar är om man bilar ett hål eller en öppning i en betongkonstruktion. Det kan vara i en vägg, i en balk eller i en pelare. Figur 5.8 visar hur ett bilat hål i en pelare tvingar de befintliga bärande materialkedjorna (trycklinjerna) att söka sig runt hålet. När som i det här fallet trycklinjerna kommer att organisera sig symmetriskt runt hålet kommer draglinjer att bildas i hålets över- och underkant för att balansera trycklinjernas krökning. Sprickor uppstår då vinkelrätt draglinjerna. Har ett hål skarpa hör tenderar sprickorna att

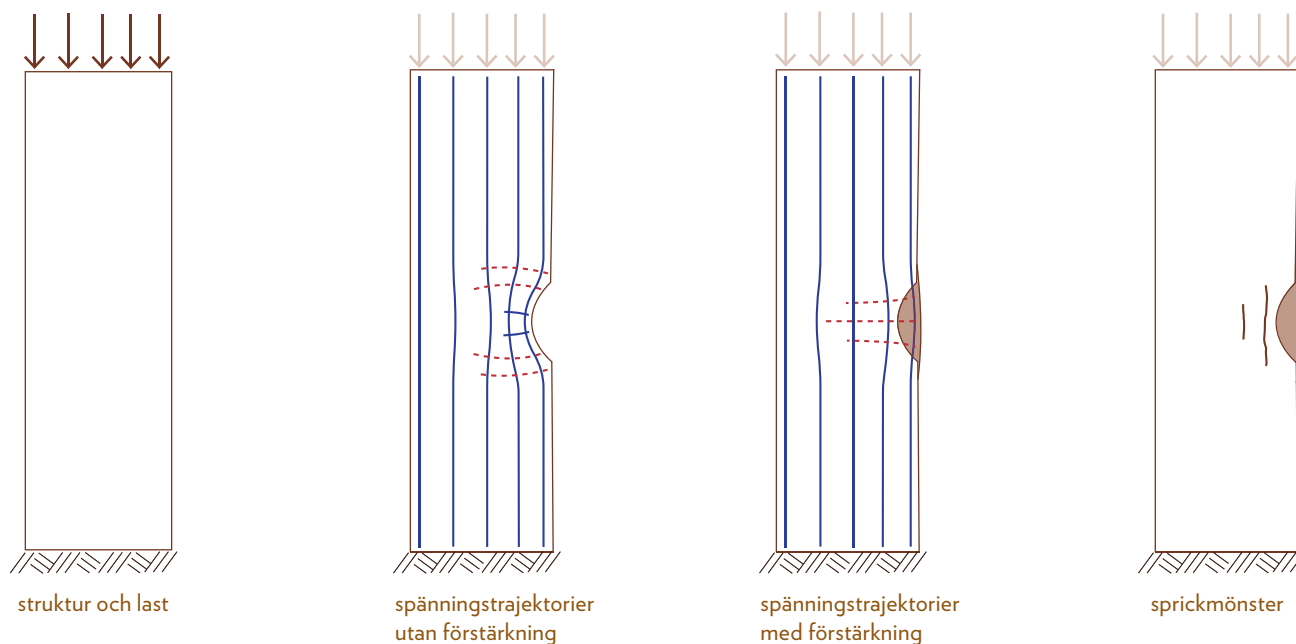


Figur 5.8. När ett hål borras i en pelare söker sig trycklinjerna till materialkedjor runt hålet. För att materialet längs de krökta trycklinjerna ska vara i balans behöver också dragna materialkedjor skapas enligt figuren. Illustration: Sara Höglund.

lokaliseras i hörnet där trycklinjerna får sin största krökning.

Ett ofta mer svårtolkat fall är när en konstruktion har olika styvhet i olika delar. Det kan vara att en från början relativt homogen del av en betongkonstruktion förändras över tid på grund av betongmaterialets åldrande och/eller att en del av konstruktionen "förstärkts" med ett nytt styvare material. Det kan också vara initialt skapade svaghetszoner till exempel gjutfogar. När styvheten är eller blir olika i olika delar av konstruktionen uppstår oförutsedda och ibland svårtolkade lastvägar (materialkedjor) – "styvhet leder last". En önskad förstärkning av en konstruktion riskerar att bli till en reell försvagning.

Figur 5.9 visar en pelare med en lokal förstärkning utförd av ett styvare material än det omgivande. De vertikala trycklinjerna kommer att söka sig mot det styvare materialet. Den krökning av trycklinjerna som uppstår skapar dragspänningar vinkelrätt trycklinjerna. De sprickor som kan uppstå behöver i sig inte vara farliga, men om de till exempel fylls med vatten som fryser och expanderar så riskerar hela förstärkningen att spjälkas av.



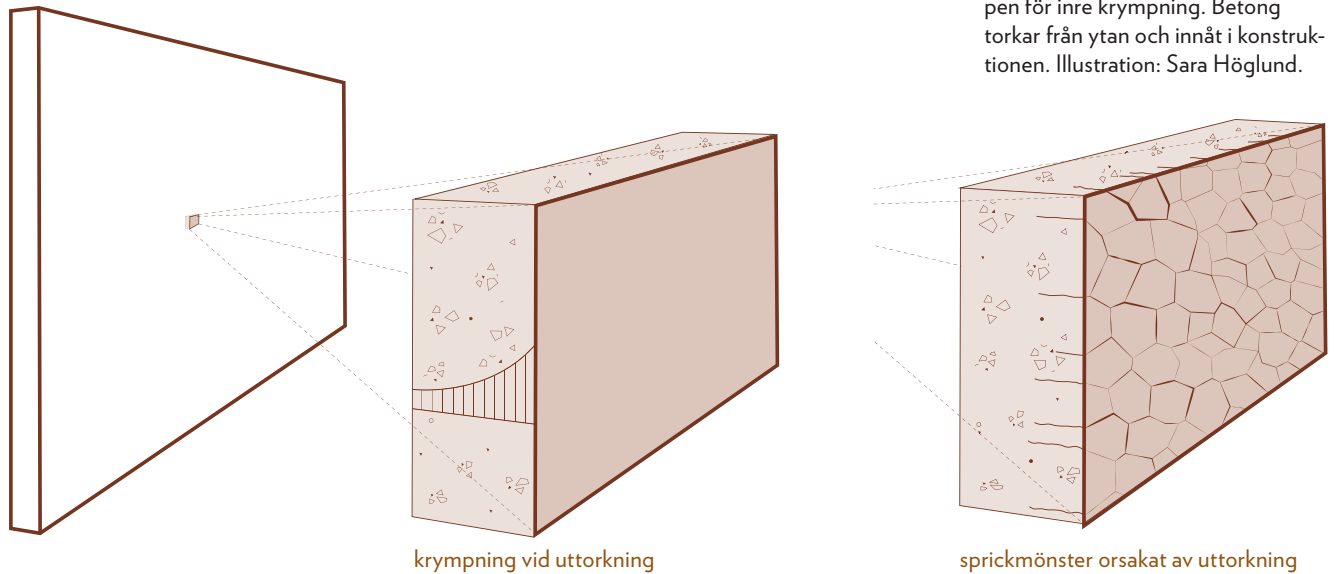
Figur 5.9 En skadad pelare som lokalt förstärkts med ett styvare material. Lagningen resulterar i att dragspänningar uppstår vinkelrätt mot trycklinjerna med vertikala sprickor innanför lagningen. Det är detta fenomen som gör att styvare lagningar så ofta faller av konstruktionen. Illustration: Sara Höglund.

SPRICKOR SOM UPPKOMMER EFTER EN INRE KONTRAKTION ELLER EXPANSION

Många av de vanligaste sprickmönster vi ser har sin orsak i att material har expanderat eller krympt. Nedan ges exempel på sådana sprickmönster. Att en betongvolym krymper beror oftast på den uttorkningsprocess, ibland i kombination med värmeutveckling, som sker i samband med betongens härdning.

Ett vanligt exempel på krympsprickor är de som uppstår nära en betongyta på grund av en snabbare och mer omfattande uttorkning av ytskiktet. Den

mellersta bilden i figur 5.10 visar hur krympningen är störst vid ytan för att successivt avta inåt i konstruktionen. Krympningen orsakar ett homogent drag i alla riktningar och det sprickmönstret som uppstår får därför också en övergripande homogen karaktär. Lokalt påverkas mönstret av ballastens och armeringens struktur nära ytan. När betong gjuts och härdar mot gränsytor av material som inte krymper blir spänningsmönstret särskilt komplext och kommer att relatera till de icke-krympande materialets form.

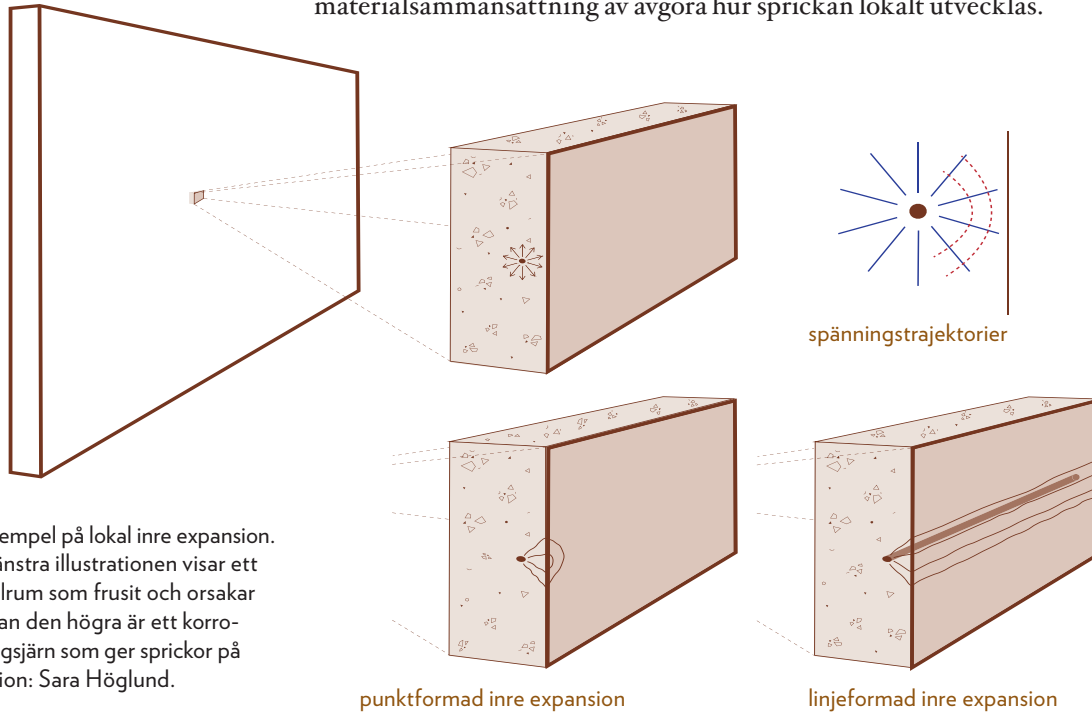


Figur 5.10. Illustrationen visar principen för inre krympning. Betong torkar från ytan och inåt i konstruktionen. Illustration: Sara Höglund.



Figur 5.11. Torksprickor i ytan av en betongplatta. Mönstret har sannolikt uppkommit direkt vid gjutningen då materialet inte har haft tillräckligt mycket vatten för den kemiska reaktion som sker då cement hydratiserar. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.

Sprickor som uppstår på grund av en inre expansion kan ha flera orsaker. Figur 5.13 visar dels en lokaliserad punktformad inre expansion, till exempel ett vattenfyllt hålrum där vattnet fryser till is, dels en linjeformad expansion, till exempel ett rostande armeringsjärn. I båda fallen uppstår ett från punkten /linjen utåtriktat tryck. Inåt kan flera materialkedjor bildas och balansera detta tryck men utåt, mot den fria ytan, kan balanserande krafter bara skapas av draglinjer som likt kedjekurvor stödjer och bär det utåtriktade trycket. Vinkelrätt dessa draglinjer kommer sprickmönster att uppstå enligt de nedre figurerna. På samma sätt som vid krympning så kommer betongens lokala materialsammansättning av avgöra hur sprickan lokalt utvecklas.



Figur 5.12. Exempel på lokal inre expansion. Den nedre vänstra illustrationen visar ett vattenfyllt hålrum som frusit och orsakar sprickor medan den högra är ett korroderat armeringsjärn som ger sprickor på ytan. Illustration: Sara Höglund.

Figur 5.13. Betongskada orsakad av korroderande armering som expanderat. Detta är en av de vanligaste skadetyperna hos äldre betongkonstruktioner med ytligt liggande armering. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.



SPRICKOR SOM UPPKOMMER SOM EN FÖLJD AV YTTRE BELASTNINGAR

Skador av yttre belastningar kan vara av två slag. Det kan vara lokala skador uppkomna vid lagring transport och montering, men också skador i utsatta lägen i den färdiga byggnaden. Dessa skador kan tolkas som förändringar av konstruktionens egenskaper över tid och analyseras med hjälp av detta avsnitt ovan.

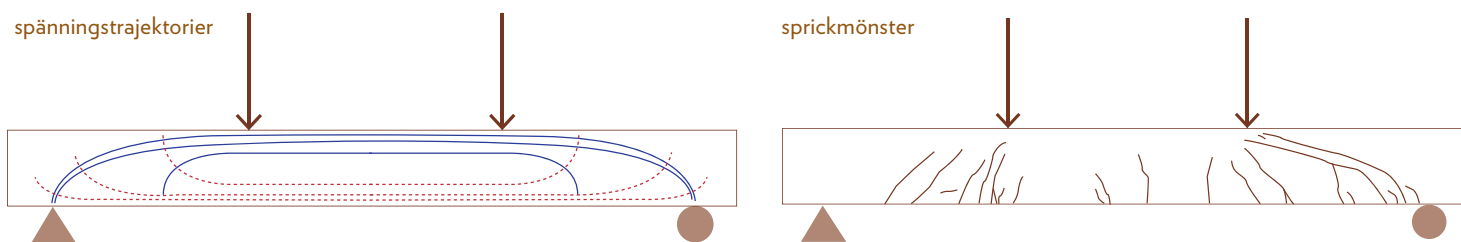
Det kan också vara skador som har sin grund i de dragsprickor som uppstår i betongens dragna zoner och där armeringen finns för att ersätta betongens bristande draghållfasthet. Oftast är dessa sprickor mycket små, så kallade mikrosprickor. De kan dock visa sig som synliga sprickmönster om grov armering eller grov ballast nära ett ytskikt gör att sprickorna, i stället för att vara många, små och utspridda, blir få, stora och lokaliserade. Dessa sprickmönster följer då olika konstruktionstypers inre tryck- och drag-mönster. En teknik för att eliminera dessa sprickor är att överlagra ett tryck och sluta sprickorna genom att före- eller efterspanna konstruktionen.

I typologin på nästa sida visas en översiktlig sammanställning av olika konstruktionstyper. Varje konstruktionstyp består grundelement med en 1-, 2- eller 3-dimensionell utsträckning. Beroende på hur de belastas – axiellt, transversellt eller i vridning – så kommer de att deformeras på olika sätt och olika sprickmönster kommer att uppstå. Genom att kombinera elementen får vi bärande konstruktioner. Den högra kolumnen visar några vanligt förekommande konstruktionstyper i armerad betong. Nedan ska vi titta närmare på sprickmönster i några av dessa: en fritt upplagd balk, en konsolbalk, en kontinuerlig balk och en ram.

Fritt upplagd balk

En fritt upplagd balk karakteriseras av att den är understödd av två vertikala stöd och att den kan expandera fritt horisontellt, se figur 5.14. Materialet i balken organiserar sig som flera överlagrade tryck- och draglinjer. Primärt läggs armering in för att verka där betongens egen draghållfasthet inte räcker till. I äldre betongbalkar följer armeringen nära draglinjernas riktningar medan senare tiders balkar har en längsgående och en tvärgående armering. Sprickmönstret uppstår vinkelrätt draglinjerna. Om en balk skulle vara horisontellt låst mot expansion på sina båda sidor kommer trycklinjerna att ta stöd mot den yttre låsningen. Behovet av draglinjer (och armering) kommer då att minska.

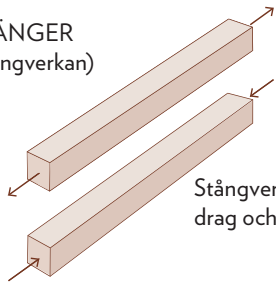
Figur 5.14. En fritt upplagd balk som kan expandera fritt i sidled. När den belastas bildas flera tryck- och draglinjer som möts vinkelrätt. Illustration: Sara Höglund.



TYOLOGI - KONSTRUKTIONER

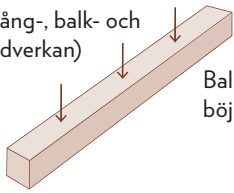
Grundelement

STÄNGER (stångverkan)

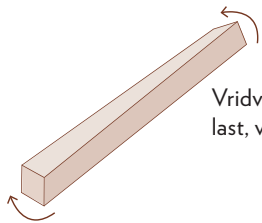


Stångverkan - axiell last, drag och tryck.

BALKAR (stång-, balk- och vridverkan)

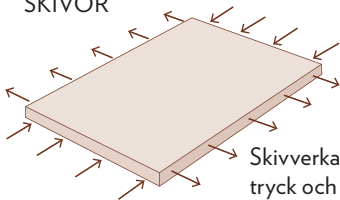


Balkverkan - transversell last, böjning och skjuvning.



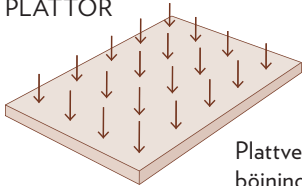
Vridverkan(torsion) - vridande last, vridning

SKIVOR



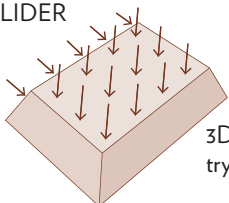
Skivverkan - last i skivans plan, tryck och drag.

PLATTOR



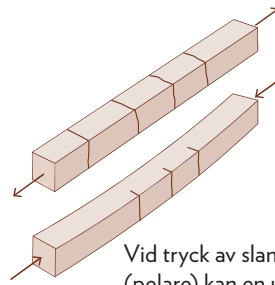
Plattverkan - transversell last, böjning, skjuvning och vridning.

SOLIDER

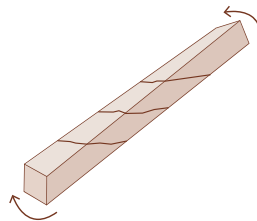
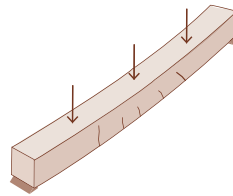


3D solid, tryck och drag.

Typiska sprickmönster



Vid tryck av slanka stänger (pelare) kan en utböjning ske och ge böjsprickor.

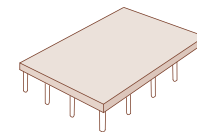
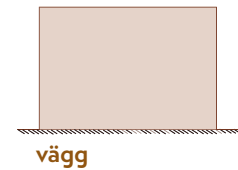
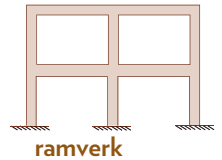
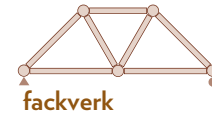


Last, form och upplagsvillkor avgör spänningsmönster och tillhörande sprickmönster. Vid tryck av slanka skivor kan en utböjning i tryckta zoner ske och ge böjsprickor.

Last, form och upplagsvillkor avgör spänningsmönster och tillhörande sprickmönster. Brottlinjeteori (yield line theory) ger en bra bild av hur sprickmönster kan se ut beroende på hur plattan är upplagd [Schodek et al. 2013].

Last, form och upplagsvillkor avgör spänningsmönster och tillhörande sprickmönster.

Vanliga konstruktioner



Från 3D-detaljer till stora infrastrukturer, t.ex. dammar.

Konsolbalk

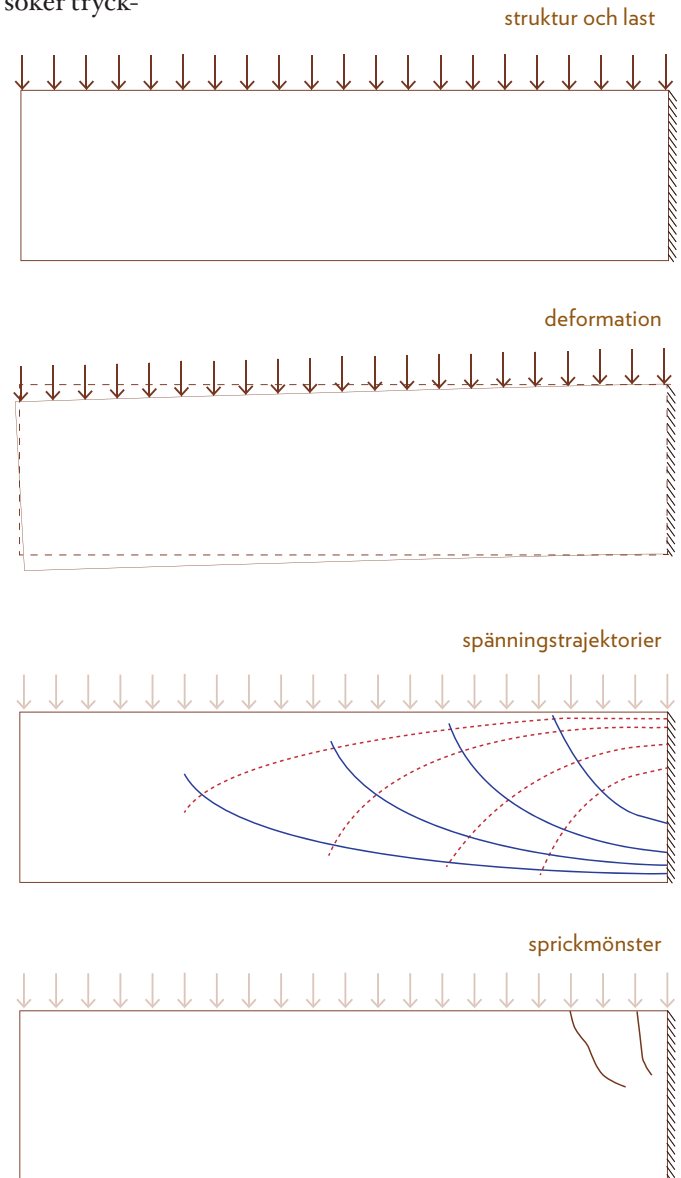
En konsolbalk är inspänd i sin ena ände och fri i den andra. Tryck- och dragmönstret lokalt vid inspänningen beror då på hur denna är utformad. I Figur 5.17 visas en konsolbalk där hela den vänstra sidan är kontinuerligt inspänd. Draglinjerna bär här balken genom att vara inhängda i infästningens övre del. Skulle infästningens övre del vara lokaliserad till en enda punkt så skulle alla draglinjer söka sig till denna. På motsvarande sätt söker trycklinjerna stöd i infästningens nedre del.



Figur 5.15. Balkonger med konsolerande betongplattor vid Bauhausskolan i Dessau. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.



Figur 5.16. En bro av armerad betong vid Stavreviken i Medelpad. Konstruktionen är möjlig enbart på grund av att konsolbalkarna är armerade och klarar av lasterna från mötande konstruktionsdelar. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2021.

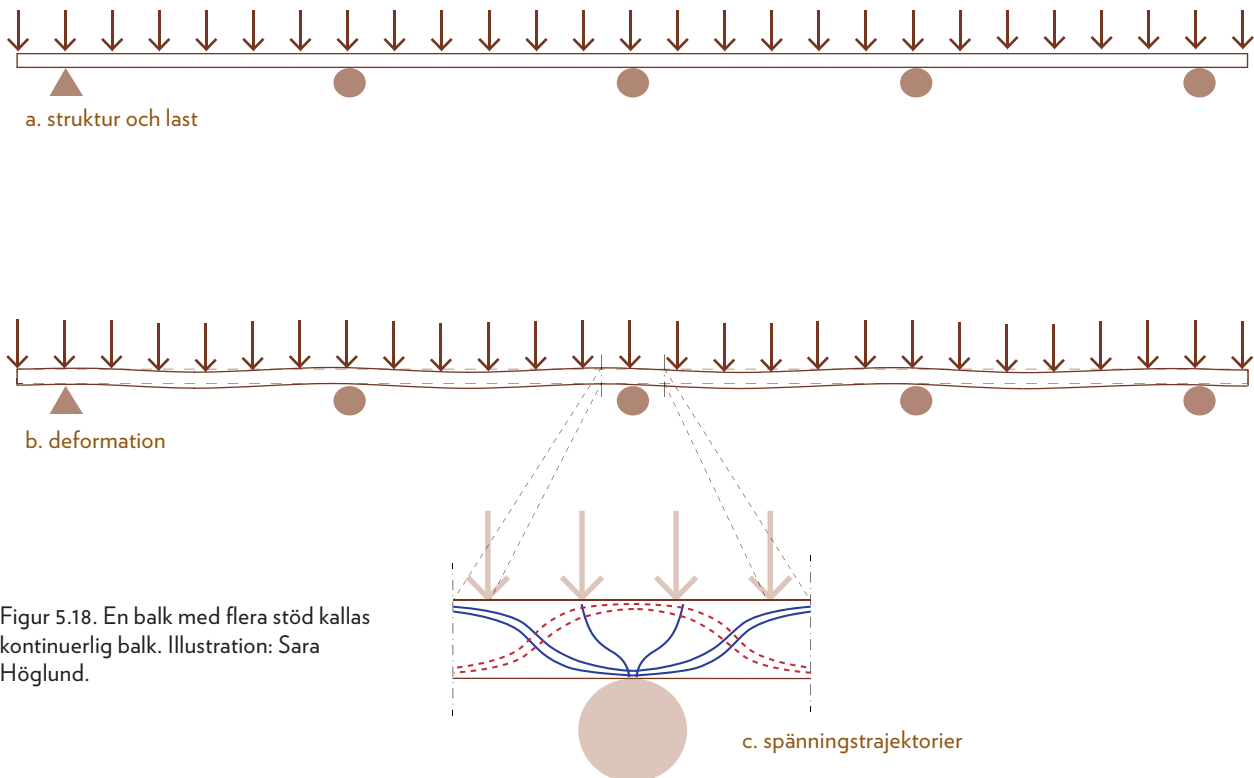


Figur 5.17. En konsolbalk infäst i sin högra sida. Draglinjerna orienterar sig till infästningens övre del medan trycklinjerna mot den nedre delen av infästningen. Illustration: Sara Höglund.

Kontinuerlig balk

En kontinuerlig balk är sammanhängande över flera stöd. När den belastas deformeras den i ett vågformat mönster. Dragspänningarna med tillhörande risk för sprickbildning kommer mellan stöden att finnas i balkens underkant och över stöden i balkens ovkant.

Tryck och draglinjerna som visas i figur 5.18c är de som uppträder för en balk med samma styvhet i hela balken. När armering med väsentligt större styvhet läggs in kommer i viss mån tryck- men framförallt draglinjer att söka sig till de materialkedjor som armeringen utgör.



Figur 5.18. En balk med flera stöd kallas kontinuerlig balk. Illustration: Sara Höglund.

Figur 5.19a visar François Hennebiques patent från 1897 för en armerad kontinuerlig betongbalk. Under visas två ForePAD-beräkningar. I beräkningarna är upplaget modellerat som ett punktstöd att jämföra med upplaget i Hennebiques patent som har en viss utsträckning. I figur 5.19b ser man det mönster av tryck- och dragspänningar som uppkommer om allt material har samma styvhet. Det är också detta mönster som mer schematiskt visas med hjälp av spänningstrajektorier i figur 5.19c. Med den tillförda armeringen, som har en väsentligt högre materialstyvhet jämfört med betongens, så kommer spänningarna att söka sig till de lägen där armeringen är placerad.

Fig. 5.

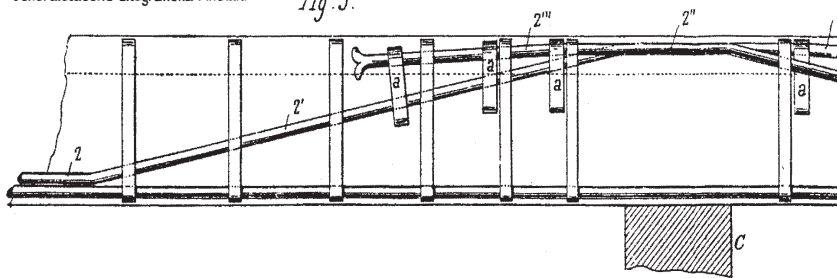
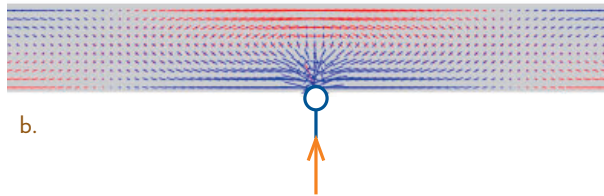
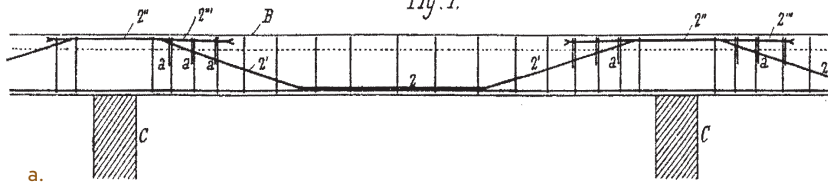
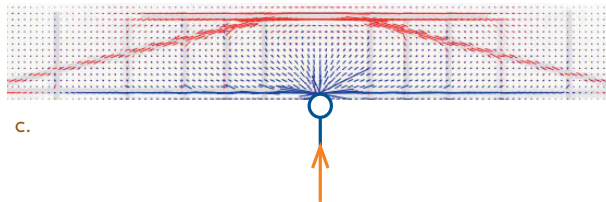


Fig. 1.



b.

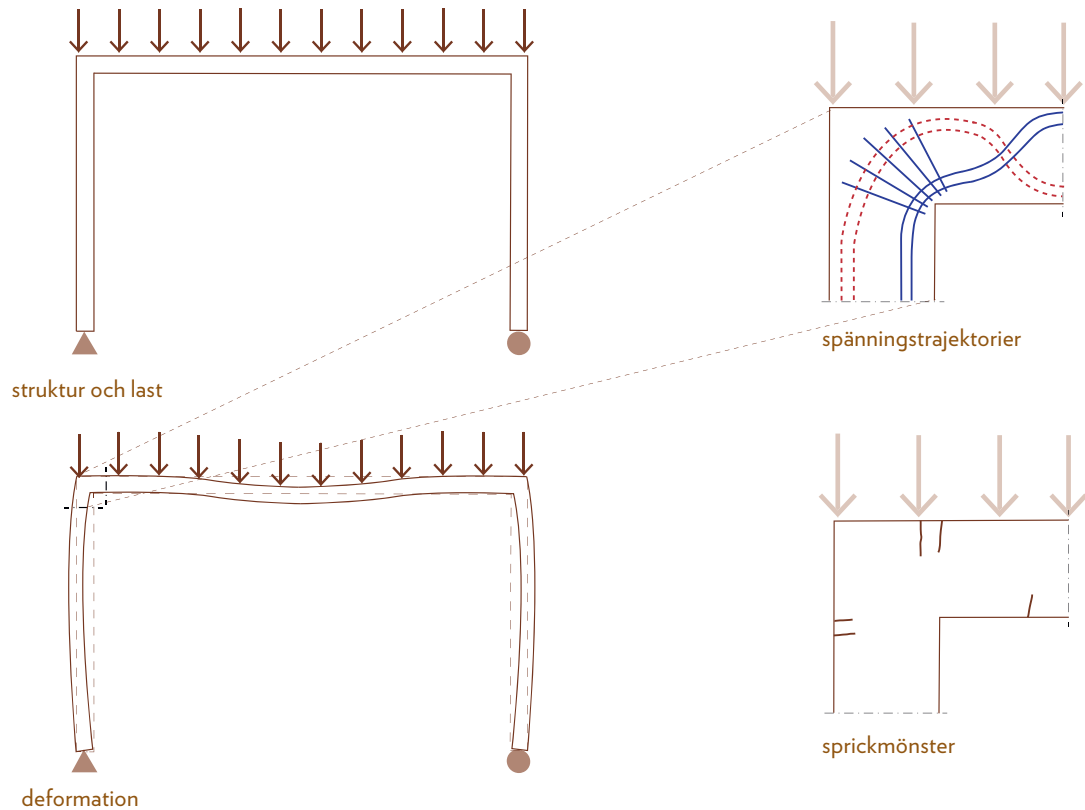


c.

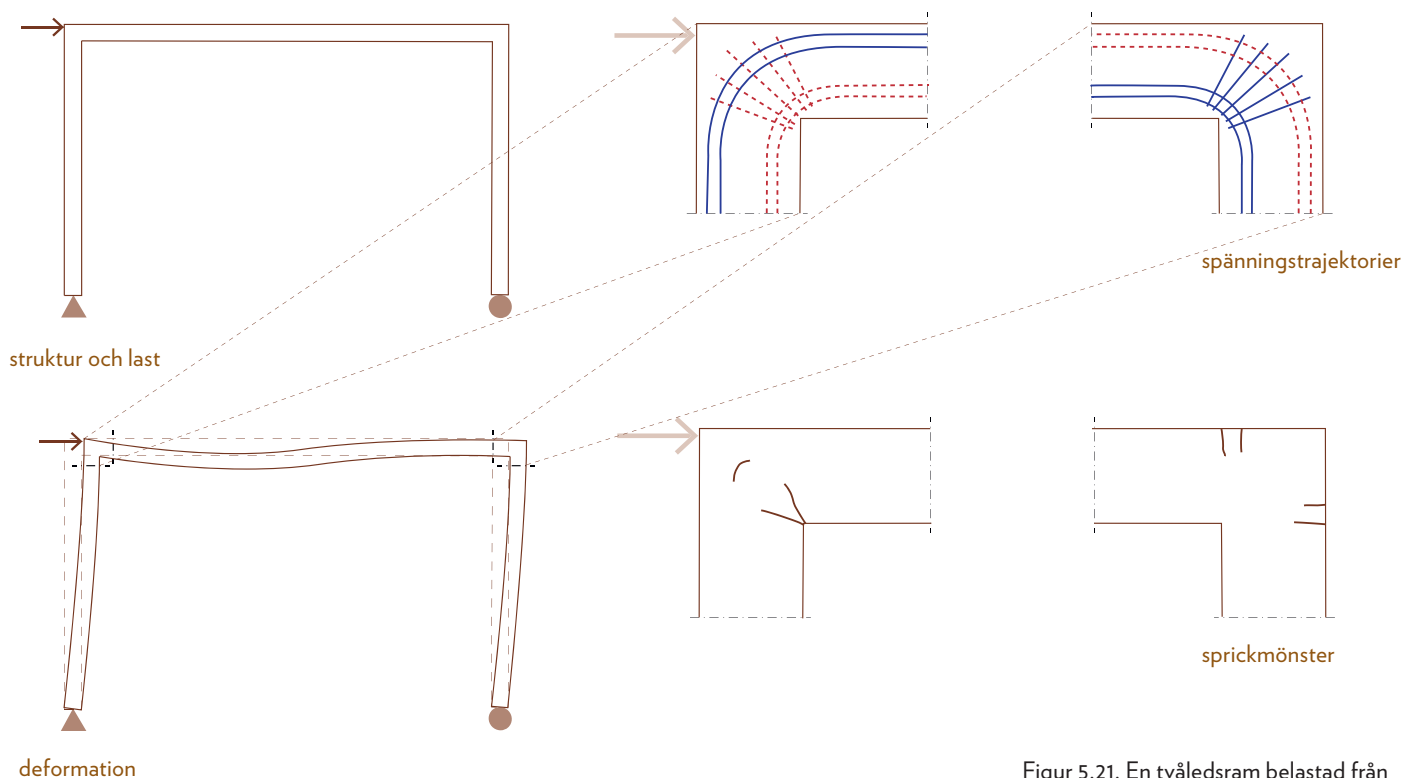
Figur 5.19 a-c. Överst a: François Hennebiques svenska patentskrift från 1897 för patent på armerade kontinuerliga balkar. Figur b visar när balken görs om för att visa en ForcePAD-beräkning med tryck- och dragspänningar som uppkommer om allt material har samma styvhet. Figur c motsvarar Hennebiques patent. Källa: Open source, <http://forcepad.sourceforge.net>.

Ramkonstruktioner

Kombineras balkar till 2- eller 3-dimensionella konstruktioner får vi det bärverk som kallas för en ram. Ramar kan formas på många olika sätt men har det gemensamt att stora spänningar ofta uppkommer i ramarnas hörn och i andra lägen där balkar med olika riktningar gjuts samman. Nedan visas spänningsmönster och tillhörande sprickmönster i hörnen på en tvåledsram belastad vertikalt, figur 5.20, respektive horisontellt figur 5.21.



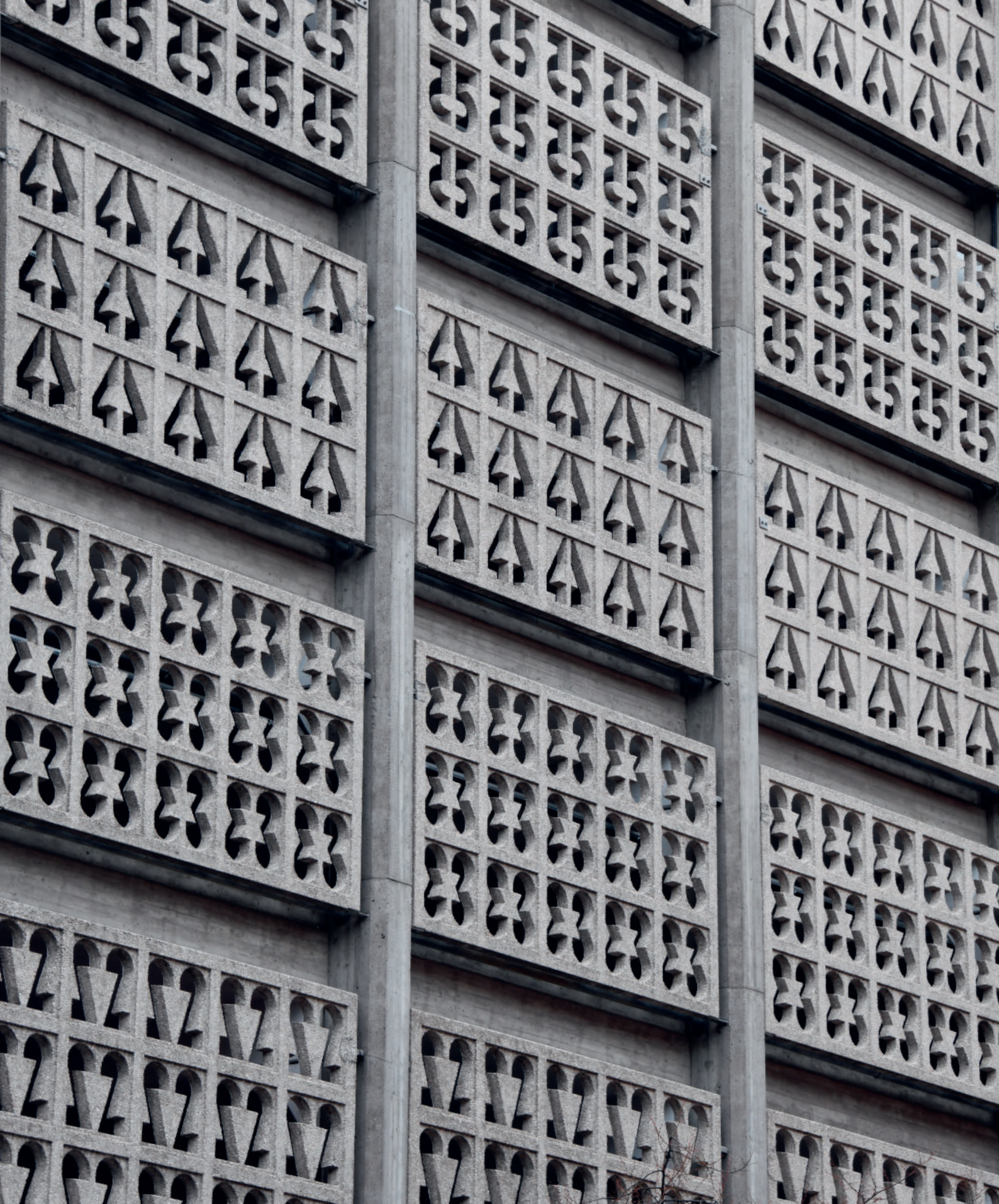
Figur 5.20. Vertikal belastning på en tvåledsram. Illustration: Sara Höglund.



Figur 5.21. En tvåledsram belastad från sidan. Spänningstrajektorier och sprickor bli olika i vänster respektive höger hörn. Illustration: Sara Höglund.

REFERENSER

- Engel, Heino (2009). *Structure Systems*. Verlag Gerd Hatje, Ostfildern-Ruit.
- ForcePAD (2022). <http://forcepad.sourceforge.net>, hämtad 2022-07-25
- Johansen, Knud Winstrup (1968). *Pladeformler*. Polyteknisk Forlag, 3 udg. 2 opl. Copenhagen, 1968.
- Johansen, Knud Winstrup (1972). *Yield-line formulae for slabs*. London: Cement and Concrete Association.
- Kungliga patent- och registreringsverket (1897). *Patent no. 8910, Anordningar vid bjelkar af betong med metallinlägg, François Hennebique*. Kungliga Boktryckeriet, Stockholm.
- Schodek, Daniel L. & Bechthold, Michael (2013). *Structures: Pearson*. New International Edition. 7 Pearson Education, Inc.



LAGAR, POLICY OCH STANDARDER INOM KULTURVÅRDEN

Gunnar Almevik och Sara Höglund

Restaurering och ombyggnad av kulturhistoriskt värdefulla byggnader eller konstruktioner ställer särskilda krav utöver konventionella byggnormer. I det här kapitlet nämns några svenska lagar som är viktiga i detta sammanhang. Det finns även en rad internationella överenskommelser inom det kulturmiljövårdande relevanta för bevarande av betongbyggnader. Det är i första hand ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) som arbetat fram de olika överenskommelserna. Att utarbeta standarder är ytterligare ett sätt att höja kvalitén på bevarandet av kulturhistoriskt värdefulla byggnader [1]. Det är ett sätt att standardisera lösningar på ofta förekommande problem och utmaningar. Här kommenteras några av standarderna inom området *Bevarande av kulturarv* som är relevanta för restaurering, ombyggnad och konservering av betong.

KULTURMILJÖVÅRDENS LAGAR

Plan- och bygglagen fastslår att alla ändringar av en byggnad ska utföras varsamt så att man tar hänsyn till byggnadens karaktärsdrag och bevarar byggnadens kvalitéer och värden. Varsamhetskravet gäller alla byggnader och vid alla ändringar, och oavsett om åtgärden omfattas av krav på bygglov eller byggnämnan.

För byggnader som pekats ut som kulturhistoriskt värdefulla finns ett förbud mot förvanskning. Att förvanskningförbudet uppfylls sker genom att en sakkunnig kontrollant av kulturvården medverkar i byggprocessen. Den sakkunnige ska kunna sätta in, analysera och tolka byggnadsverk i ett kulturhistoriskt sammanhang.

Byggherren ska se till att det finns en plan för kontrollen av en byggåtgärd. Det kan bland annat innebära att byggnadsnämnden begära att byggherren anlitar en antikvarisk sakkunnig

Utöver plan- och bygglagen finns det fler lagar där särskilt kulturmiljölagen (KML 1988:950) och miljöbalken (1998:808) styr bevarandet av kulturmiljöer och byggnader. Byggnadsminnen och kyrkliga kulturminnen skyddas genom kulturmiljölagen eller förordningen (1988:1229) om statliga byggnadsminnen m.m. (FSBM).

BEVARA BETONGEN

Vissa av de mest konstfullt utförda eller tidstypiska betongbyggnaderna i landet är värda att bevara antingen som byggnadesminne, genom utpekande i kommunala bevarandeprogram eller som i detta fall genom en kulturhistorisk värdering och klassning. Parkeringshuset Parkaden i Stockholm byggdes 1962-1965 och är så värdefullt att det har fått den högsta graden av uppmärksamhet: "blåmärkning", vilket motsvarar kriterierna för byggnadsminne enligt KML. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2022.

KULTURMILJÖVÅRDENS LAGAR

Plan- och bygglagen (PBL) 2010:900

- Reglerar planläggningen av mark, vatten och byggande.
- Innehåller föreskrifter om exempelvis bygglov.
- Anger att alla byggnader ska hållas i vårdat skick och underhållas så att deras utformning och tekniska egenskaper bevaras (8 kap.14§).

VARSAMHETSKRAVET

Enligt plan- och bygglagen (2010:900) 8 kap. 17 § ska ändring av en byggnad alltid göras varsamt [1].

Kravet gäller:

- Inom och utanför detaljplanelagt område.
- Alla sorters hus, inte bara utpekade kulturhistoriskt värdefulla.
- Både invändiga och utvändiga ändringar.

Hänsyn ska tas till byggnadens karaktärsdrag och dess tekniska, historiska, kulturhistoriska, miljömässiga och konstnärliga värden ska tas till vara.

Karaktärsdrag avser byggnadens utseende såväl som den teknik och material med vilket det har åstadkommit.

FÖRVANSKNINGSFÖRBUDET

Plan- och bygglagen (2010:900) 8 kap. 13 § anges att en byggnad som är "särskilt värdefull" inte får förvanskas. Det är ett starkare skydd än varsamhetskravet och det gäller för byggnader som är särskilt värdefulla från historisk, kulturhistorisk, miljömässig eller konstnärlig synpunkt.

Kravet är generellt och gäller oberoende av om byggnaden är utpekad i någon form av dokument eller inte. I de flesta kommuner framgår det av kulturmiljöprogrammet vilka byggnader som vid en inventering bedömts vara särskilt värdefulla.

Miljöbalken (MB) 1998:808

- Syftar till att främja en hållbar utveckling.
- Ska tillämpas så att värdefulla natur- och kulturmiljöer skyddas och vårdas.
- Ska tillämpas så att hushållning med material, råvaror och energi främjas så att kretslopp uppnås.

Kulturmiljölagen (KML) 1988:950

- Omfattar grundläggande bestämmelser till skydd för viktiga delar av kulturarvet.
- Läger fast att ansvaret för kulturmiljön delas av alla och anger att den som planerar eller utför ett arbete ska se till att skador på kulturmiljön undviks eller begränsas.
- Innehåller bestämmelser om byggnadsminnen (3 kap.) och kyrkliga kulturminnen (4 kap.).

1. Boverkets hemsida. <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/teman/kulturvarden/kulturvarden-i-plan--och-bygglagen/krav-pa-byggnadsverk-och-tomter/varsamhetskravet/> Hämtad:2022-07-13.

INTERNATIONELLA ÖVERENSKOMMELSER

ICOMOS Venedig-chartret (1964)

- 16 artiklar sorterade under 6 rubriker: Definitioner, Bevarande, Restaurering, Historiska områden, Arkeologiska undersökningar, Dokumentation
- Betonar
 - varsam hantering av samtliga historiska lager
 - hänsyn till byggnadens sammanhang
 - vikten av kontinuerligt underhåll

ICOMOS Australia – ‘The Burra Charter for places of cultural significance’ (1979, 2013)

- Introducerar begreppet ”cultural significance” som på svenska brukar översättas med kulturvärde.
- Understryker vikten av att tolka och anpassa internationella principer till lokala förhållanden.
- Betonar platser med kulturvärden och definierar bevarande som alla de vårdinsatser som syftar till att upprätthålla platser med kulturvärde.
- Beskriver kulturvård som en process och förespråkar planering av förvaltning och styrning.

ICOMOS – ‘Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage’ (2003)

- 38 principer som syftar till att förbättra analysen, bevarandet och restaureringen av det arkitektoniska kulturarvet, där normer och standarder för nybyggande saknar relevans.
- Betonar vikten av evidensbaserade åtgärder och tvärvetenskapligt samarbete.
- Jämför bebyggelsevård med medicin, och förordar en process som inbegriper anamnes (sjukdomshistoria), diagnos, behandling och uppföljning.

ICOMOS – ‘Principles for the preservation and conservation restoration of wall paintings’ (2003)

- Förespråkar förebyggande insatser (preventive conservation), kontroll och kontinuerligt underhåll.
- Vid konservering och restaurering ska väggmålningen analyseras och åtgärder planeras utifrån ett helhetsperspektiv på byggnaden och den omgivande miljön.
- Arbetet ska dokumenteras, samverkan med forskning prioriteras och den som utför vård och konservering av väggmålningar ska ha specialiserad professionell kompetens och utbildning.

ICOMOS – TICCIH ‘Principles for the conservation of industrial heritage – sites, structures, areas and landscapes’ (2011)

- Dokumentet, även benämnt ’Dublin principels’, uppmärksammar industriarvets mångfald av materiella uttryck och betonar även de immateriella aspekterna av minnen, berättelser, kunskaper och färdigheter.
- Betonar vikten av att industriarvens pågående användning och verksamhet ska kunna fortleva.
- Kommunikation och berättande är en viktig del av bevarandearbetet.

ICOMOS – ‘European quality principles for EU-funded interventions with potential impact upon cultural heritage’ (2019)

- Dokumentet utarbetat i samarbete med EU syftar till att säkerställa kvalitet i kulturarvsprojekt som finansieras av EU-medel.
- Dokumentet är omfattande men fokuserar på upphandling, genomförande och kontroll av projekt med avseende på kulturarvets kvalitet.

Sammanfattning av ICOMOS etiska och tekniska rekommendationer för kvalitet

- Respektera platsens karaktär och dess värden.
- Analys och diagnos av kulturtillgången är en förutsättning för varje åtgärd.
- Brukande är ett bevarande som förlänger kulturtillgångens livslängd.
- Prioritera alltid förebyggande vård
- Beakta äkthet och tillgångens integritet även i fall av kompatibel och respektfull återanvändning
- Kollektivt och öppet beslutsfattande
- Utforska alternativ
- Minsta ingripande: "gör så mycket som nödvändigt och så lite som möjligt".
- Försiktighet vid design: särskilt om kunskap är otillräcklig eller oöverkomlig.
- Kompatibilitet mellan designlösningar: "använd lämpliga material, tekniker och detaljering"
- Reversibilitet ska övervägas i alla ingrepp.
- Tvärvetenskaplig: "kalla på skicklighet och erfarenhet" relevanta discipliner
- Effektivitet: de önskade resultaten måste formuleras och överenskommas i förväg.
- Samhällsengagemang och allmänintresse
- Tillgänglighet och inkludering

STANDARDER FÖR BEVARANDE AV KULTURARV

Det finns ett stort antal normer och standarder som är viktiga och användbara i den konkreta bevarandesituationen. I det här kapitlet nämns några standarder för bevarande av kulturarv som är relevanta för restaurering, underhåll och konservering av betong.

I boken refereras till en rad andra standarder som också är relevanta för betong men som inte ingår i serien Bevarande av kulturarv. Det är eurokoder och standarder för cement, betong, betongkonstruktioner, betongprovning, provning av hårdnad betong, "maintenance and repair of concrete structures", sprutbetong, metalliska material samt katodiskt skydd av stål i betong. Dessa finns omnämnda i löptexten och är redovisade som referenser.

Sverige medverkar i den Europeiska standardiseringskommittén (CEN European Committee for Standardization) och arbetar sedan 2002 med standarder för bevarande av kulturarv (CEN/TC 346) [2]. Syftet är att hjälpa professionella aktörer att säkerställa kvalitet i förvaltning och vård av olika kulturarv. De europeiska standarderna översätts och inarbetas successivt i svensk standard (SS) genom Svenska institutet för standarder (SIS) och blir då också styrande för hur arbeten med kulturarv ska utföras. Idag finns standarder som berör terminologi, metoder för testning och analys, karakterisering av material och nedbrytningsprocesser, metoder för tillståndsanalys och genomförande av restaurering och underhåll. Flera av dessa standarder berör direkt myndigheter, förvaltare, rådgivare och utförare som arbetar med kulturhistoriska byggnader och konstruktioner i betong. Nedan presenteras kortfattat ett urval relevanta standarder, men tyvärr är det endast ett fåtal standarder som har översatts till svenska.

2. Svenska institutet för standarder (SIS) hemsida. <https://www.sis.se/standarder/kpenstandard/forkopta-standarder/kulturarv/> Hämtad: 2022-07-13.

(SS-EN 16096:2012)

Tillståndsbedömning av fast kulturarv

Standarden ger riktlinjer för hur en tillståndsbedömning av fast kulturarv ska utformas. Fast kulturarv fokuserar på byggnader och anläggningar av olika slag och ställs i motsats till flyttbart kulturarv. Syftet med en tillståndsbedömning är att bedöma tillståndet på ett objekt och värdera risker och prioritering innan en åtgärd vidtas. Standarden är relevant inom byggnadsvården för handläggare, byggnadsantikvarier, konservatorer, arkitekter, ingenjörer och entreprenörer.

En viktig aspekt är att de olika momenten i en tillståndsbedömning struktureras och dokumenteras separat. Standarden föreslår exempelvis en arbetsgång där information från tidigare åtgärder samlas in och läggs till grund för tillståndsbedömningen på plats. Varje byggnadselement beskrivs separat innan orsaken till eventuella skador analyseras, för att slutligen kunna värdera tillståndet. Härfter värderas också risken som föreligger, prioriteringsordningen och slutligen rekommendation på insats.

(SS-EN 15898:2019)

Generella termer och definitioner

Här listas och definieras generella termer inom kulturarvsområdet på engelska, spanska och franska. Dessa generella termer utgör begrepp som återkommer i flera olika standarder och som också knyter an till internationella överenskommelser på området.

SS-EN 16853:2017

Kulturvårdsprocess - beslut, planering och implementering

Standarden förklarar tillvägagångssättet för beslut, planering och implementering av vården av det fysiska kulturarvet. Den kan användas vid offentlig och privat upphandling eller för upprättande av rutiner.

Beslut om bevarandeåtgärder förväntas tas på ett ansvarsfullt sätt och målen ska var möjliga att följa upp. I standarden slås det fast att när god kulturvård uppnås, planeras och utförs i en kulturvårdsprocess är det inte enbart viktigt för specialister som konservatorer och antikvarier utan även för övriga involverade yrkesgrupper och inte minst för byggherren och förvaltaren.

SS-EN 17429:2020

Upphandling av varor, tjänster och entreprenader inom kulturvård

Dokumentet ger en översikt över principer, processer och god praxis för upphandling av varor, tjänster och entreprenader för kulturvård. Upphandlingen kan omfatta alla typer av kulturvårdsåtgärder. Standarden är avsedd att läsas tillsammans med relevanta upphandlingsbestämmelser, och är specifikt för bevarande av kulturarv.

(SS-EN 16572:2015)

Ordlista för tekniska termer avseende putsbruk på murverk på byggnader och byggnadsverk med kulturvärden

Den här standarden kan vara relevant även för byggnader och konstruktioner i betong. Standarden är på engelska, men begreppen är översatta även till franska, tyska, nederländska, italienska, grekiska, svenska och spanska.

Här definieras betydelsen av bruk, bindemedel och ballast, men också skillnader mellan olika slags kalk (kritkalk, dolomitisk kalk, hydraulisk kalk, hydratkalk) och olika slags cement (naturlig cement, portlandcement och romacement). Tekniska distinktioner görs mellan fet kalk ($\text{CaO} + \text{MgO}$ 95%) och mager kalk (85% $\text{CaO} + \text{MgO}$ 95%), och tolkningar av hantverksrelaterade aktiva verb som "att sätta sig" eller "släckning".

(SS-EN 16455:2014)

Bestämning av lösliga salter i natursten och liknande material som används i det byggda kulturarvet

Standarden behandlar metoder för att analysera lösliga salter. Ett förfarande beskrivs för att extrahera lösliga salter som finns i porösa oorganiska material för att fastställa innehållet av lösliga salter. Standarden finns år 2022 enbart på engelska.

(SS-EN 17114)

Ytskydd för porösa oorganiska material

Betong klassificeras här som ett poröst oorganiskt material tillsammans med bland andra sten, tegel, mur- och putsbruk. Det förekommer olika produkter och sätt att behandla porösa oorganiska material för att göra dem vattenavvisande. Syftet är främst att förhindra att fukt tränger in i materialet som kan ge upphov till olika skador. I fråga om kulturhistoriska byggnader och konstruktioner i betong är det viktigt att ytskyddets kemiska och fysikaliska egenskaper är redovisade så att rätt produkt kan väljas utifrån objektets förutsättningar. Den här standarden vänder sig främst till tillverkare, importörer och återförsäljare.



Figur 6.1. Havrekvarnen på Kvarnholmen i Nacka är byggnadsminne enligt kulturmiljölöslag (KML) 1988:950. För att kunna bevara



byggnadsminnet togs ett kontroversiellt beslut. Först revs huvuddelen av havrekvarnens



betongkonstruktion för att därefter rekonstrueras. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2017-2021.

EN KONTROVERSIELL REKONSTRUKTION

Kvarnholmen i Nacka utanför Stockholm har sedan 1890-talet varit ett centrum för livsmedelsproduktion. På 1920-talet köper Kooperativa förbundet kvarnen och började att etablera en modernistisk bruksmiljö med livsmedelindustri och bostäder. År 1928 kompletterades anläggningen med en havrekvarn av betong som uppfördes efter ritningar av arkitekt Artur von Schmalensee. Kvarnen användes till 1977 då tillverkningen av havregryn på platsen avvecklades.

I början av 2000-talet antogs ett nytt planprogram för området med en vision att Kvarnholmen åter skulle bli en levande stadsdel. I samband med det väcktes fråga om att byggnadsminnesförklara bland annat havrekvarnen. År 2016 beslutade Länsstyrelsen i Stockholm att byggnadsminnesförklara havrekvarnen, kontorsbyggnaden, disponentvillan samt några radhus och smalhus.

Havrekvarnens betongkonstruktion var i mycket dåligt skick så att en restaurering med bibehållna värden bedömdes som utesluten. Vatten hade trängt in i byggnaden, betongen var frostsadad, armeringen korroderad och bärigheten på balkar samt bjälklag kraftigt reducerad i de övre våningsplanen. Dessutom var armeringen så ytligt liggande med nästan obefintligt täcksjikt att man inte kunde brandklassa konstruktionerna utan omfattande ingrepp. Man valde därför att i ett kontroversiellt projekt riva stora delar av den

ursprungliga stommen för att på samma plats uppföra en ny platsgjuten betongbyggnad med återskapad exteriör och interiör. Den nya byggnaden är ingen kopia utan en så trogen tolkning av originalet som möjligt, eftersom vissa mått i ytterväggarna är ändrade på grund av ökad isolering.

Från ett betongperspektiv är åtgärderna oåterkalleliga eftersom all originalmaterial har avlägsnats bortsett från det platsgjutna trapphusets betongstomme och silornas sockelvåning, som sparats i original. Vidare är den nya stommen uppförd med självkompakterande betong och modern armering. Med andra ord är det enbart den yttre formen, de invändiga synliga platsgjutna bärande pelarna, balkarna och bjälklagen samt de återskapade formbrädsavtrycken som återskapats. Ett på många sätt oerhört kraftigt ingrepp i ett byggnadsminne. Grundfrågan ställs därmed på sin spets: hur ska vi hantera ett material som inte längre tillverkas (cement och armering från 1920-talet), är i så dåligt skick att det förstör sig själv (ingen hållfasthet kvar) och dessutom är omöjligt att använda i en byggnad som ska nyttjas för en verksamhet utan till exempel fungerande brandskydd. Detta är väsentliga och helt avgörande frågor som måste diskuteras och hanteras vid bevarandet av konstruktioner uppförda med industriellt framställda material, vilka inte är tänkta att kunna underhållas på ett traditionellt sätt.



TILLSTÅNDSBEDÖMNING OCH SKADEMEKANISMER

Urs Müller och Elisabeth Helsing

De flesta byggnader är inte tänkta att existera för evigt. Idag byggs bostadshus, kontorsbyggnader och kommersiella fastigheter med en planerad livslängd på minst femtio år. Det är den tidsperiod som byggnaden med upprätthållen säkerhet och normalt underhåll ska kunna användas. För infrastrukturåläggningar och större installationer som till exempel för energiproduktion är den avsedda livslängden vanligtvis mellan 70 och 150 år.

Ett byggnadsverks tillstånd har stor betydelse för dess livslängd. *Tillståndsbedömningar* görs därför för att bestämma ett byggnadsverks kvarvarande livslängd. I analogi med medicinska termer kan tillståndsbedömningen beskrivas som en kombinerad anamnes och diagnos. Anamnesen fokuserar på att erhålla information om byggnadsverkets historia och besvarar frågor som varför och hur det har byggts, och hur det har använts. Diagnosen omfattar analys av skicket och möjliga strukturella eller materialrelaterade svagheter eller skador.

Vid tillståndsbedömning används ofta en omfattande uppsättning metoder för att identifiera det aktuella skicket och möjliga skador [1]. Frågorna som måste besvaras styr valet av metoder. Ibland räcker det att genomföra en bedömning av materialens skick, egenskaper och kvalitet, men oftast måste bedömningen omfatta både materialens och strukturens tillstånd. Det kräver vanligtvis bedömning på olika nivåer, från undersökning av byggnadsverket till materialnivån i makro- eller mikroskala, se figur 7.2.

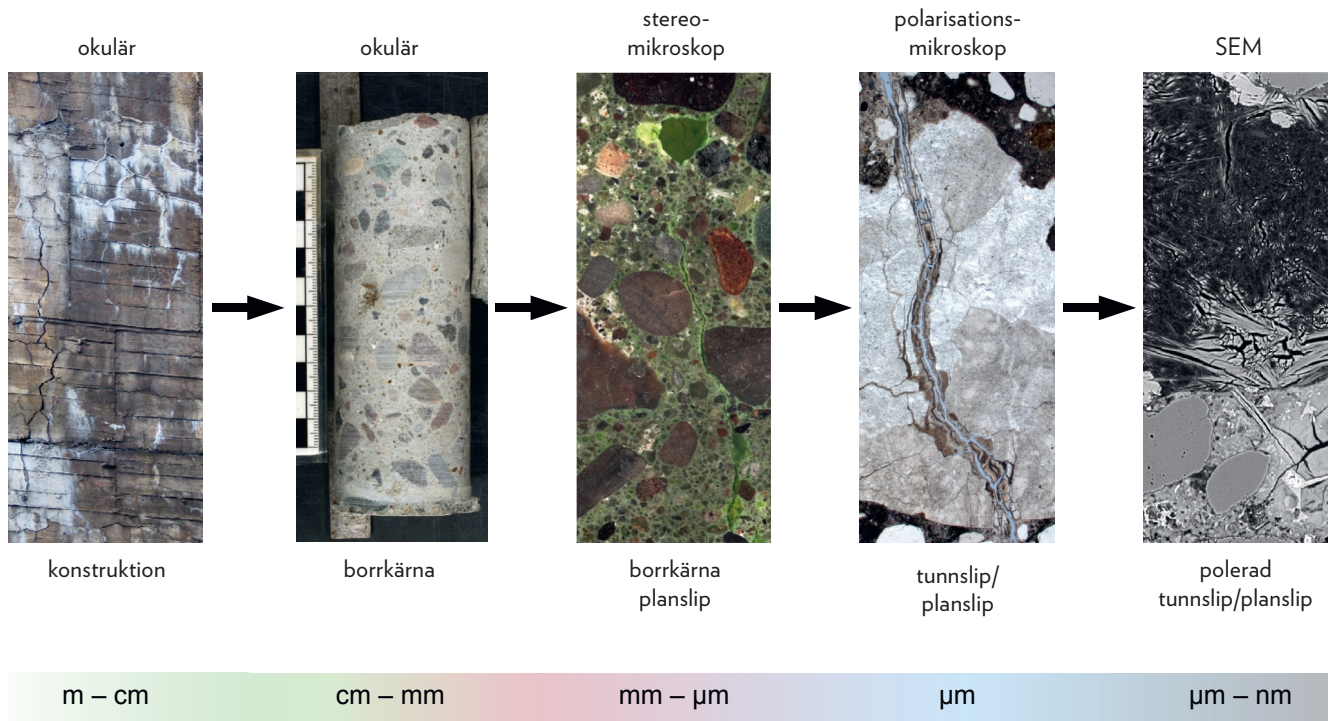
Vid tillståndsbedömning av historiska byggnadsverk används samma metoder som för moderna byggnader, med den skillnaden att kulturhistoriska värden måste vägas in. Det innebär ett mindre ensidigt fokus på funktionella aspekter. I detta sammanhang krävs nära samarbete mellan olika yrkesgrupper som ingenjörer, arkitekter och antikvarier.



Figur 7.1. Betongkyrkan Sankt Antonius av Padua i Pifa, Polen. Kyrkan uppfördes 1928-1930 och är ett tidigt exempel på betongmodernism. Foto: Urs Müller.

BORRPROV

För att kunna undersöka betongens hållfasthet behöver man ta ut borrkärnor som kan testas i ett laboratorium. Proven lämnar stora hål som behöver lagas efteråt, en inte helt enkel uppgift eftersom både kulör och textur ska matchas mot originalytor. Bilden visar en borrning i en betongbro från 1910-talet. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2014.



Figur 7.2. När en skadeanalys görs undersöks objektet på olika avstånd, allt från att bara titta med blotta ögat till SEM (Svepelektronmikroskop). Illustration och fotografier: Urs Müller.

BEDÖMNINGSSTRATEGIER

När en strategi för bedömning av en befintlig konstruktion ska göras är det viktigt att vara klar över syftet med bedömningen. Syftet kan exempelvis vara att:

- bedöma en observerad skada och vad som eventuellt krävs för att konstruktionens funktionalitet ska bibehållas eller återställas
- göra en bedömning av en konstruktions tillstånd och funktionalitet vid oförändrad användning
- bedöma om en konstruktion klarar att användas på ett annat sätt

Det första steget i samtliga fall är en tillståndskontroll av den befintliga konstruktionen.

TILLSTÅNDSBEDÖMNING

I Svensk Betongföreningens skrift *ASR i svensk betong – vägledning för nya och befintliga konstruktioner* [2] ges en utförlig beskrivning av hur en tillståndskontroll/-bedömning med avseende på skador orsakade av alkali-silikareaktioner (ASR) bör gå till.

Huvudsyftet med kontrollen är att klarlägga byggnadens kondition, eventuella skador samt att förstå omfattning, orsak och den konstruktiva

BEGREPP

I texten används begreppen tillståndsbedömning och tillståndskontroll synonymt.

konsekvensen av skadorna. Tillståndsbedömningen ska ge underlag för att vidta åtgärder som reparation eller förstärkning. Den ska inte föras längre än att ett beslut om framtida agerande kan fattas utifrån en tillräcklig förståelse för nedbrytningen och dess påverkan på funktionen.

Tillståndsbedömningen kan normalt delas upp i två nivåer:

1. Preliminär, inledande tillståndsbedömning
2. Detaljerad tillståndsbedömning.

Den preliminära tillståndsbedömningen är i huvudsak kvalitativ och resultatet avgör om en detaljerad undersökning är nödvändig. Den preliminära undersökningen kan i vissa fall kompletteras med enkla analyser.

En tillståndsbedömning bör belysa följande aspekter:

- typ av skador
- trolig skadeorsak
- skadans placering på konstruktionen
- skadans omfattning
- skadans effekt på konstruktionen
- bedömning av framtida nedbrytning
- bedömning av den framtida nedbrytningens påverkan på konstruktionen

Tillståndsbedömningens omfattning bestäms av frågeställningarna – när de har besvarats är kontrollen slutförd. Exakt omfattning av den preliminära och den detaljerade tillståndsbedömningen måste avgöras från fall till fall. För att inte överarbeta bör även den detaljerade tillståndsbedömningen genomföras stegvis. Huvudregeln är att kontrollen ska genomföras progressivt och avslutas när tillräcklig information finns för att fatta ett välgrundat beslut om vad som krävs för att konstruktionen ska fortleva med given funktion.

Frågan om tillståndsbedömningens omfattning kan vara svår att avgöra. En bedömning av exempelvis framtida nedbrytning och dess påverkan på framtida funktion kan bli otillräcklig om tillståndsbedömningen avslutas i ett för tidigt skede.

Nedan ges ett exempel på vilka arbetsmoment som brukar ingå i en tillståndsbedömning, och i vilken ordning [2]:

1. Inledande platsbesök

Ett inledande platsbesök genomförs av en sakkunnig som identifierar skador och deras omfattning samt möjliga skadeorsaker. Vid renodlad skadeutredning har platsbesöket oftast initierats utifrån anmärkningar vid rutininspektioner eller observation av synliga skador.

2. Skrivbordstudie

Ritningar och handlingar studeras men också källor som ger information om byggnadens tillkomst, förändringar, användning och kulturhistoriska värde.

FÖR BEDÖMNING

Inför tillståndsbedömningen utreds:

- skador
- skadeorsak
- placering
- omfattning
- effekt på konstruktionen
- framtida nedbrytning
- framtida påverkan på konstruktionen

Det kan vara fråga om beräkningar, allehanda bevarade dokument som ger en första information om hur strukturen byggdes, dess strukturella koncept, användning och den miljöpåverkan som byggnaden utsatts för. I de flesta fall behöver detta kompletteras med information från fastighetsägare, arkitekter, antikvarier och andra som vet något om byggnadens tillkomst eller förändringar över tid. Skrivbordsstudien bör resultera i en förståelse för konstruktionens funktion, problembild, ett besiktningssprogram och ett provtagningsprogram.

3. Preliminär tillståndsbedömning

En preliminär tillståndskontroll omfattar vanligtvis en okulär undersökning, enklare fältmätningar såsom sprickkartering samt viss provtagning och inledande laboratorieanalyser. Analyser från ett laboratorium kan till exempel vara hållfasthetsbestämning som främst görs för att verifiera antaganden om skademekanismer och omfattningen av skadorna. I den preliminära tillståndskontrollen ingår även en bedömning av skadornas inverkan på konstruktionens bärförmåga.

4. Detaljerad tillståndsbedömning

Här genomförs fördjupad provtagning och laboratorieanalyser samt en kvantitativ beräkning av inverkan på bärförmågan. Fasen innebär fördjupad förståelse för konstruktionen, eventuell framtida skadeutveckling samt en förfinad bedömning av skadeomfattningen.

5. Åtgärd

Om tillräcklig information finns tas ett åtgärdsförslag fram, annars fördjupas undersökningen ytterligare enligt särskilda frågeställningar, se nedan.

SÄRSKILDA FRÅGESTÄLLNINGAR

Utifrån de observerade skadorna kan det finnas särskilda frågeställningar som måste beaktas. Exempel på kompletterade frågeställningar är:

- Finns det risk att skadan påverkar konstruktionens bärförmåga?
- Påverkar skadan konstruktionens funktion vad det gäller krav på luftkvalitet, inneklimate, ljudisolering, brandskydd, energiåtgång eller tillgänglighet?
- Påverkar skadan byggnadens funktionalitet i övrigt? Utgör den exempelvis ett hinder för att använda byggnaden eller byggnadsdelen för avsedd funktion?
- Är skadan enbart estetisk?
- Om det finns risk att bärförmågan påverkas:
 - Är skadan av sådan art eller omfattning att den måste åtgärdas omgående för att undvika risk för kollaps?
 - Kan konstruktionen förstärkas temporärt?

UNDERSÖKNINGSMETODER

Det finns i dagsläget många metoder för att undersöka en betongkonstruktions uppbyggnad och tillstånd. En allmän tillståndsbedömning börjar vanligtvis med att samla information om en byggnad och sedan förstå dess strukturella koncept samt undersöka synliga skador. Resultaten blir utgångspunkt för att välja metod för en mer ingående undersökning.

VAL AV UNDERSÖKNINGSMETOD

Vilka undersökningsmetoder som ska väljas beror bland annat på vilka faktorer som bedömts vara viktiga för konstruktionens skick och funktionsduglighet. Det kan till exempel vara:

- armeringens mängd, typ och tillstånd; känslig koppling mellan olika horisontella och vertikala byggnadsdelar
- risk för att det har uppstått nedbrytning av betong som inte är synlig men som kan påverka det lastbärande tvärsnittet av en konstruktionsdel
- sprickbildning och sprickbredder

DETALJINFORMATION

Baserat på vilka faktorer som bedömts vara viktiga för konstruktionens skick och funktionsduglighet ska man bestämma vilken detaljinformation om hela konstruktionen eller enskilda delar som är nödvändiga att inhämta. Det kan gälla utformning eller material och kan vara fråga om:

- betongens tryckhållfasthet, i vissa fall även draghållfasthet och elasticitetsmodul
- betongens täckskikt
- skicket hos stålarmingen
- skador och risker som kan ge upphov till korrosion av armering. Identifiering av eventuella skador och risker:
 - betongens karbonatiseringsdjup
 - inträngningsdjup för klorider hos konstruktioner utsatta för avsiningsalter eller havsvatten
- sprickbildning, krosskador eller förskjutningar vilka troligtvis är belastningsskador [4]
- identifiering av andra skador i form av sprickbildning, avflagnig, ”pop-outs” med mera som inte direkt orsakas av belastningsrelaterade processer och klarläggande av orsak till dessa.
Det kan vara [4]:
 - frostangrepp
 - sulfatangrepp
 - skadlig alkalisilikareaktion (ASR)
 - angrepp av mjukt vatten
 - surt angrepp
- fuktillståndet i konstruktionen

Metoderna för att bedöma tillståndet hos en betongkonstruktion kan vara destruktiva eller icke-destruktiva. Destruktiva metoder kräver vanligtvis att provkroppar tas ut från en konstruktion och analyseras [5, 6]. Ickedestruktiva metoder tillämpar fysiska eller elektrokemiska principer för att få information om armering och betong, utan att man behöver ta ut provkroppar ur konstruktionen [7].

Vanligtvis används en kombination av destruktiva och icke-destruktiva metoder för att klargöra tillståndet hos en konstruktion. Valet av metoder beror på vilka frågor som ska lösas men kan också variera beroende på tillgången till specifika metoder. Risk för förstörande av estetiska eller historiska värden måste också beaktas. De metoder som beskrivs i det följande är de vanligast förekommande men utgör bara ett urval av möjliga metoder.

UTTAGNING AV PROV FRÅN EN BETONGKONSTRUKTION

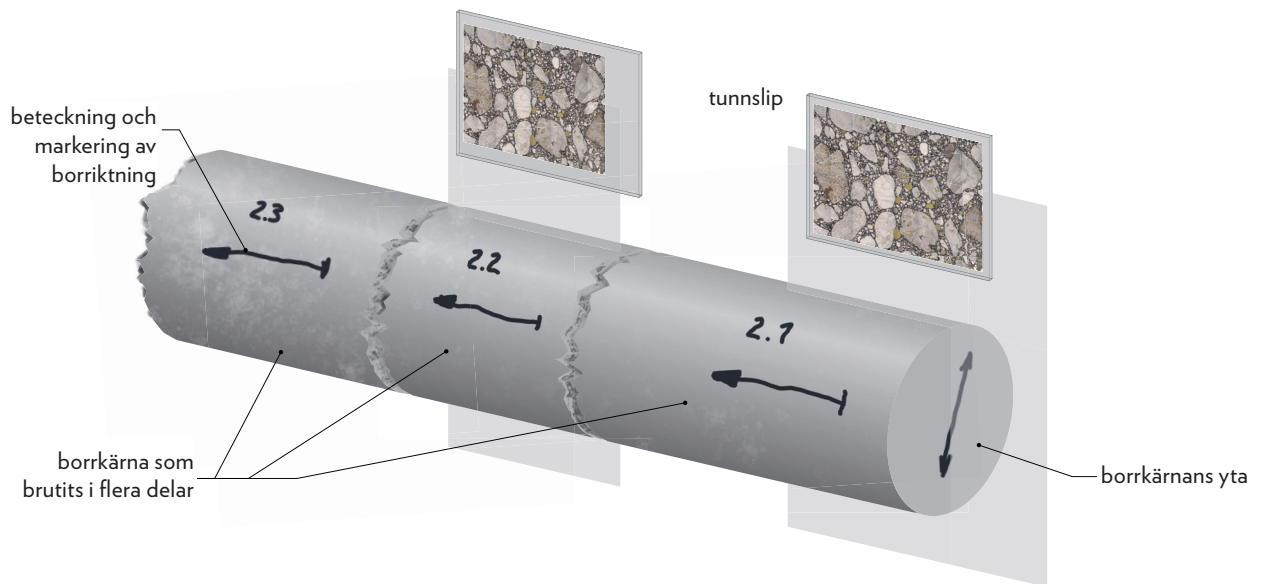
Prover från betongkonstruktioner tas vanligtvis i form av borrhärlor. Typiska borrhärlor har en diameter på mellan 70 och 150 mm. Hur stor diameter som krävs är beroende av ballastens kornstorlek och vanligast är en diameter på 100 mm. Historiska betong kan ibland ha ballaststorlekar på mer än 32 mm och då krävs en kärndiameter på minst 150 mm för att man ska få representativa resultat vid mekaniska provningar. Uttag och mekanisk provning av provkroppar ur en befintlig konstruktion beskrivs i standarden SS-En 12504-1 [8].

En fördel med borrhärlor är att de kan ge en profil av konstruktionen från dess yta till de inre delarna, ibland genom hela konstruktionen. Borrhärlor ska märkas korrekt och det är viktigt att markera borrhärlningen, se figur 7.3. Långa borrhärlor bryts eller kapas ibland i flera delar. Då är det viktigt att märka varje enskild del med ett delnummer: till exempel 2.1, 2.2, 2.3, så att ursprungsläget i konstruktionen tydligt framgår som i figur 7.3.

För mekaniska provningar bör minst tre prover tas från ett begränsat område. De borrhärlor som ska utsättas för tryck- och spräckhållfasthetsprovning bör vara fria från armering och ska helst tas från den inre delen av betongen för att undvika störningar från eventuella ytskador.

För att prova karbonatiseringsdjup krävs en borrhärla som innehåller den ursprungliga ytan och har en längd på minst 50 till 80 mm. Borrhärlan måste delas i två halvdelar, men får inte skäras eller sågas. Uppdelningen bör göras med en hydraulisk press eller en mekanisk splittrare.

För att göra en skadebedömning med mikroskopi sågas en borrhärla med den ursprungliga provytan i två delar med ett vattenkyllt diamantblad. Därefter impregneras snittytan med ett fluorescerande epoxiharts under vakuum och slipas sedan till en plan yta, figur 7.3. Dessutom kan ett så kallat



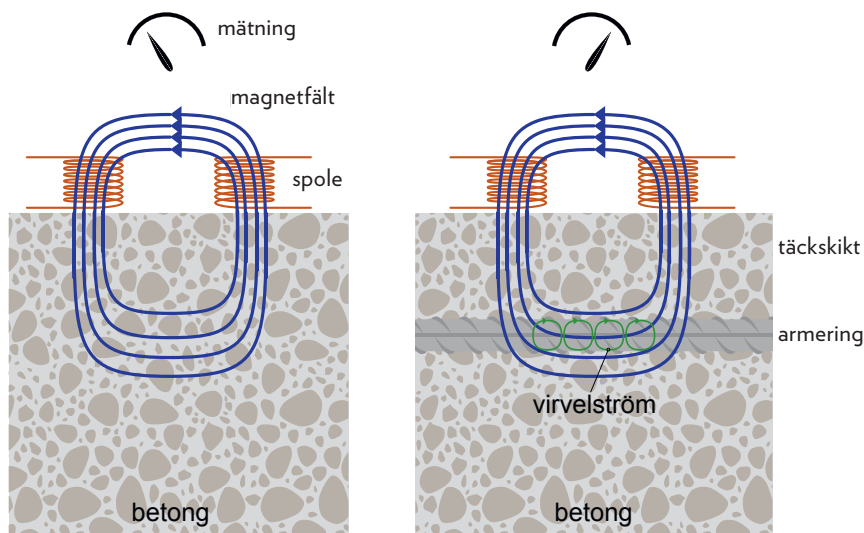
tunnslip beredas. Tunnslip är prover som slipas till en tjocklek av 30 µm, vilket gör att betongprovet blir genomskinligt. Tunnslip analyseras av ett polariserande mikroskop för ytterligare skadebedömning.

En bra och grundlig dokumentation av hela provtagnings- och provberedningsprocessen är av största vikt för att undvika hopblandning av prover och förlust av information. Detta är särskilt viktigt när provtagning, provberedning och analys görs av olika företag/laboratorier. De som utför analyser och provning av provkroppar och tolkar resultaten bör ha fullständig information om varifrån proverna kommer, hur de togs ut och hur de framställdes.

Figur 7.3. Märkning av en borrhärna som har delats i tre olika delar, 2.1, 2.2 och 2.3. Tunnslip-provet tas från borrhärnans snittyta efter att det sågats i två halvor. Källa: U. Müller (2021), illustrationen är modifierad.

KONSTRUKTIONSDELAR – GEOMETRISKA PARAMETRAR OCH ARMERING

Stålarmeringen i betong är en viktig del av konstruktionen, men står också för ett stort antal skador i betongbyggnader [10]. En stor del av bedömningen utgörs vanligtvis av att beskriva skicket hos armeringen och skicket på den betong som täcker den. Täcksikt skyddar armeringen från miljön och från skadliga ämnen. Om den täckande betongen är förstörd, på grund av sprickbildning eller förlust av material, kan konstruktionsdelen inte längre fungera som en monolit med bärande funktion. I sådana fall måste tillståndsbedömningen kvantifiera hur mycket av det ursprungliga tvärsnittet på en betongdel som finns kvar.



Figur 7.4. Till vänster visas två principskisser av en täcksiktmätare som använder sig av elektromagnetisk pulsinduktion. Illustration: Urs Müller.

Fotografiet till höger visar en täcksiktmätare under användning. Foto: Urs Müller.

Täckskiktmätare

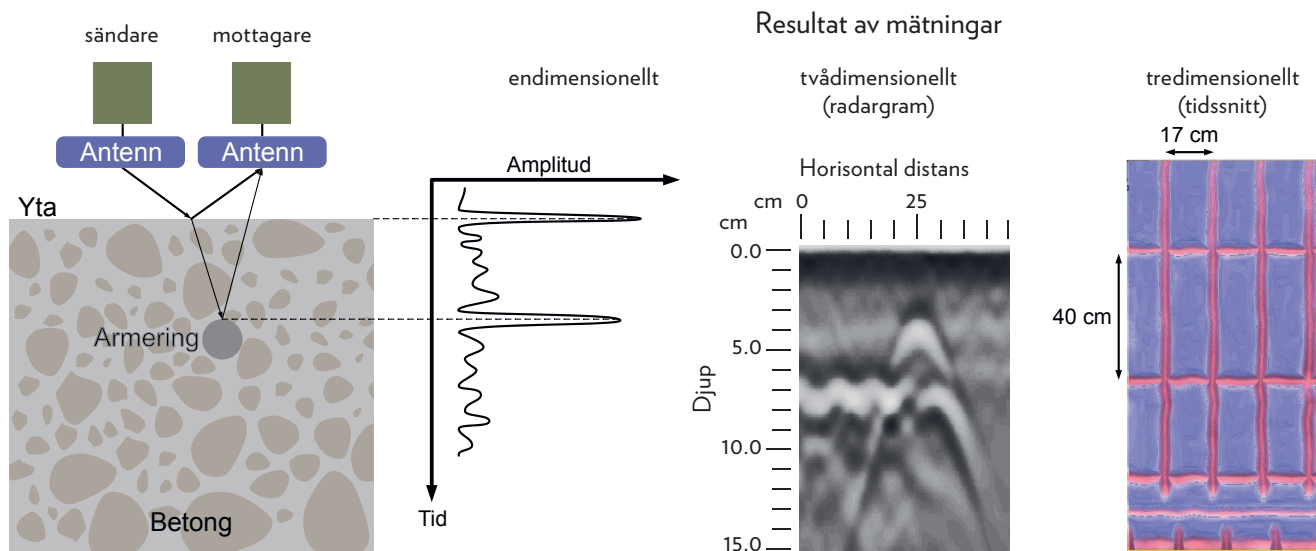
Tjockleken på det skyddande täcksiktet kan bestämmas ickedestruktivt med en täcksiktmätare [11]. Det är en elektromagnetisk metod som exakt kan bestämma djupet till en armeringsstång i betong och därmed ange täcksiktets tjocklek. Mätningen baseras bland annat på pulsinduktionsmetoden, där spolar i instrumentet periodiskt laddas av elektriska pulser, vilket genererar magnetfält, se figur 7.4. Magnetfälten interagerar med stålarmeringen och inducerar virvelströmmar på dess yta, vilket skapar ett magnetfält i motsatt riktning. Förändringar i magnetfältet detekteras av instrumentet och används för att beräkna armeringsjärnets djup och/eller diameter [12].

Den elektromagnetiska pulsindikationsmetoden fungerar bra under olika fukt- och miljösituationer och påverkas inte av betongsammansättningen. Men om andra metallföremål finns nära mätplatsen kommer resultaten inte att vara korrekta.

Det finns flera olika varianter av täcksiktmätare. Många mäter antingen armeringens täcksikt eller dess diameter, men den ena av dessa två faktorer måste vara känd för att kunna mäta den andra. Det finns också instrument som noggrant kan bestämma täcksiktets tjocklek och ge en uppskattning av armeringsdiametern. Armering på större djup kan dock inte lokaliseras exakt [12].

Georadar

Georadar (GPR) är en icke-destruktiv metod som har använts under de senaste 20 åren för bedömning av konstruktioner, med ökande användning under senare tid [11]. I betongkonstruktioner är metoden användbar för detektion av armering, inbäddade rör eller kraftledningar och för att upptäcka större

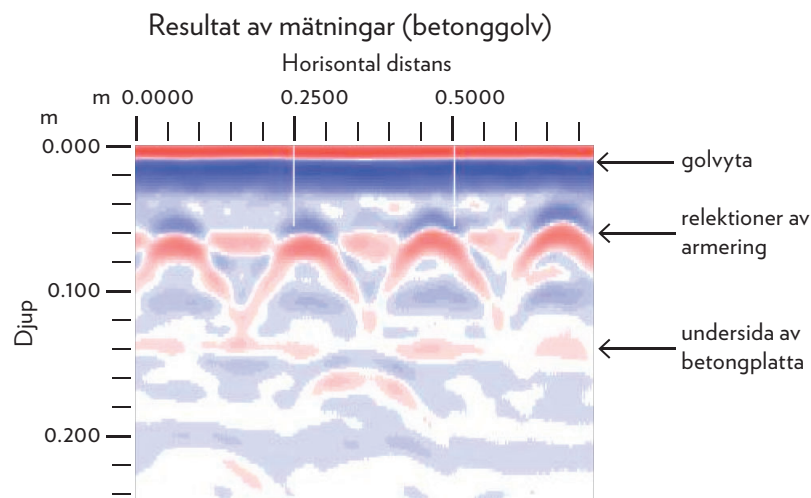
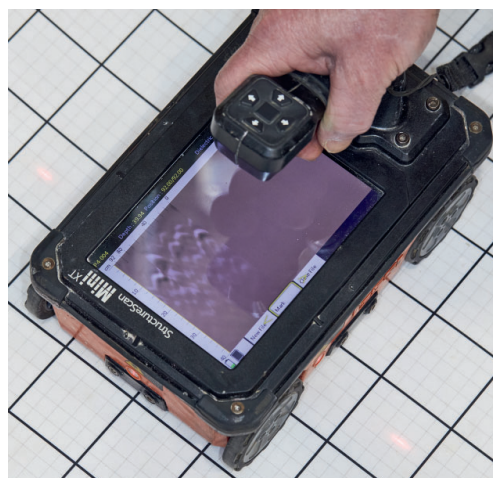


oegentligheter som större håligheter. GPR-metoderna bygger på avgivande av elektromagnetiska signaler, radiovågor, som delvis reflekteras på grund av skillnader i dielektrisk konstant (elektrisk permeabilitet) och ledningsegenskaper mellan olika medier, till exempel mellan stål–betong och betong–luft [13].

Signalerna avges i form av pulser och tas emot som funktion av tiden, genom svept frekvensmodulering eller genom stegvis frekvensmodulering av kontinuerliga vågor, se figur 7.5. Frekvensområdet hos de reflekterade signalerna tas sedan emot av antenner. Moderna GPR-instrument kan ha mer än en antenn. Radarsignalens upplösning i sidoriktningen och penetrationsdjupet beror på frekvensen: ju högre frekvens, desto högre upplösning och ju

Figur 7.5. Principskiss för georadar och exempel på olika typer av mätresultat från mätaren. Tvådimensionella diagram är vanligast men moderna instrument kan också beräkna tredimensionella resultat eller visa armeringen på ett visst djup i betongen. Illustration: Urs Müller.

Figur 7.6. Fotot till vänster visar ett kompakt georadarinstrument vid användning. Resultatet av mätningen kan se ut som i radargrammet för ett betonggolv med armering (till höger). Foto: Urs Müller, illustration: Paul Poppa.



MÄTMETODER

Täckskiktetsmätare kan mäta armeringens diameter samt djupet till armeringen och kan därmed ange täckskiktets tjocklek.

Georadar kan upptäcka armering, inbäddade rör, kraftledningar eller större oegentligheter som stora håligheter.

Halvcellspotentialmetoden visualiserar var det finns högre eller lägre risk för armeringskorrosion.

Resistivitetsmätning mäter också risken för armeringskorrosion.

lägre frekvens, desto högre penetrationsdjup. Den rumsliga upplösningen, till exempel med en 2,7 GHz-antenn är cirka 10 mm, se figur 7.6. Högre frekvenser ger högre upplösning men lägre penetrationsdjup.

För betong har antenner med frekvenser i GHz-området utvecklats, till exempel 1 till 4 GHz, vilket ger ett penetrationsdjup på 200 till 600 mm. För geotekniska och geologiska tillämpningar används antenner i MHz-serien för att få penetrationsdjup mellan 10 och flera hundra meter [14].

Medan täckskiktetsmätare ger direkta mätresultat så fås resultat från GPR-metoden i form av radargram som måste tolkas och det krävs en viss erfarenhet för att kunna tolka dem korrekt. De inspelade originalsignalerna måste också bearbetas, vilket genomförs av programvaran till GPR. Vissa produkter på marknaden erbjuder programvara, där föremål i betongen kan representeras som en 3D-bild. Detta görs med hjälp av en specifik beräkningsprocedur som kallas "inversion" [13].

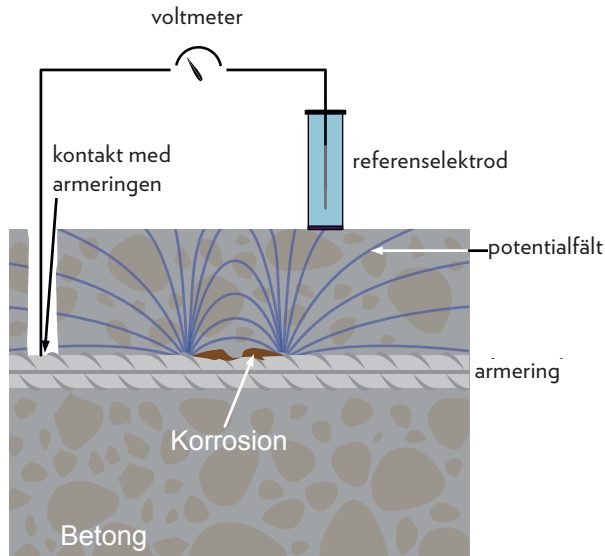
Begränsningarna i GPR-metoden påverkar dess användbarhet och noggrannhet i resultaten. Om kontrasten i materialegenskaperna är otillräcklig kommer gränsen mellan dessa material inte att upptäckas. Fukt kan dämpa signalerna och sänka penetrationsdjupet [15]. Elektriskt ledande material i större mängder kan leda till herrelösa strömmar och minska radiosignalens penetrationsdjup [13]. För att framgångsrikt kunna tolka GPR-resultat är ytterligare information, från till exempel borrhärlor och/eller ritningar, av värde.

Halvcellspotential

Täckskiktetsmätare kan mäta betongens täcksikt och lokalisera det första armeringslagen. GPR kan detektera armering, rör, kraftledningar och större ojämnheter och deras geometri i betongen ner till djupare djup. Halvcellspotentialmetoden kan ge en indikation om risken för armeringskorrosion [16]. Halvcellspotentialmetoden har använts i många år, främst för att fastställa risken för korrosion av armering baserat på armeringens elektriska potential mot en referenselektrod. Instrumentet består i huvudsak av en mycket känslig voltmeter med hög inre resistivitet och en referenselektrod, Cu/CuSO₄ (kopparsulfat) eller Ag/AgCl (silver), med en känd elektrisk potential som representerar en halvcell. Den andra halvcellen utgörs av armeringsstålet, som ansluts direkt till voltmeteren. Det elektriska fältet mellan de två halvcellerna påverkas av olika faktorer, som fukthalt, betongens joninnehåll men också om armeringen är korroderad eller inte, se figur 7.7.

Med instrumentet mäts skillnaden i potential mellan referenselektroden och armeringsstålet i millivolt. Mätningen ger inte strikt absoluta resultat; utan varje betong kommer att ge olika skillnader i potential. Figur 7.8 ger en indikation på resultatens betydelse och korrosionsrisken i betong [16].

För bestämningen av skillnader i elektrisk potential ansluts instrumentet till armeringen och till en referenselektrod. Referenselektroden flyttas sedan



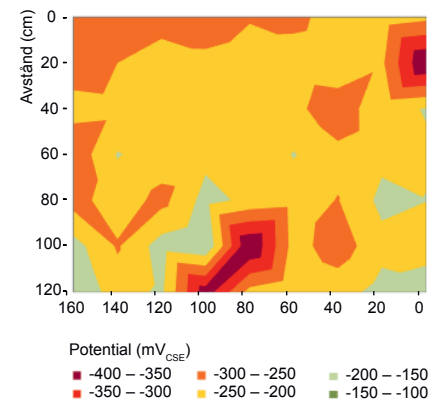
Figur 7.7. Till vänster en principskiss för halvcellpotentialmetoden. Till höger en en elektrod i verkligheten. Illustration och foto: Urs Müller.

över betongytan i ett mätmönster som bestämts i förväg. Metoden gör det möjligt att kartlägga hela områden och visualisera var det finns högre eller lägre risk för armeringskorrosion. Vilka potentialvärden som motsvarar ökad risk för korrosion framgår av både Elsener et al (2003) [16] och den amerikanska standarden ASTM C876-15, se figur 7.9. En kartläggning med halvcellspontential underlättar beslut om var prover ska tas för att till exempel analysera kloridinträngning eller karbonatiseringsdjup, se figur 7.8.

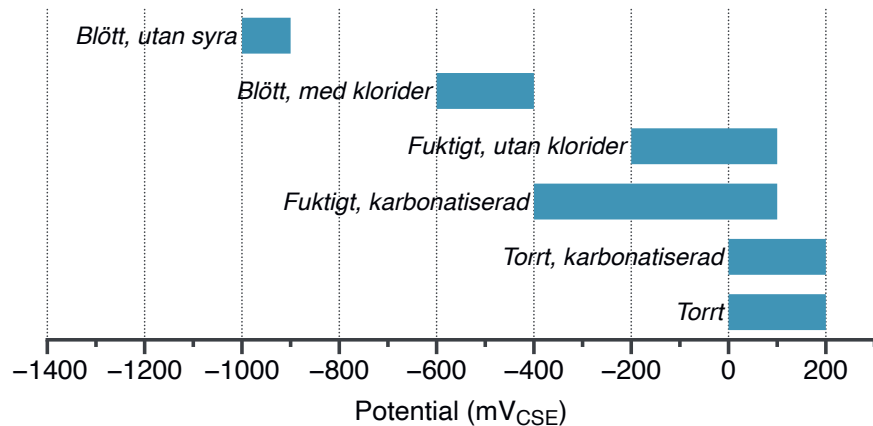
Betongresistivitet

En annan icke-destruktiv metod för att mäta korrosionsrisk är resistivitmätningar av den armerade betongen. Med resistivitet menas betongens motstånd mot att leda ström. Dessa mätningar görs med en Wennersond. Sonden har fyra elektroder, där en ström påförs på yttre elektroderna och

Figur 7.8. Kartering av halvcellspontential på ett golv i ett parkeringshus. Den vänstra bilden visar mätningsområdet och bilden till höger karteringsresultatet. Potentialer som är lägre än $250 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ indikerar en större risk för armeringskorrosion (CSE = kopparsulfatelektrod). Mätningarna genomfördes under våren när golvet var torrt. Foto och illustration: Urs Müller.



Figur 7.9. Potentialvärde för olika betongtillstånd.
Källa: B. Elsener et al. (2003).



skillnaden i potential mäts i de inre elektroderna. Från den påförda strömmen och skillnaden i potential kan betongens resistivitet bestämmas [17].

Betongens elektriska resistivitet påverkas främst av fukthalten och jonsammansställningen hos betongens porlösning. En hög fukthalt och hög kloridhalt ger låg resistivitet och vice versa. Resistiviteten kommer dock inte att ge någon direkt information om det finns pågående korrosion i armeringsstålet eller inte, men kan indikera att det föreligger förhöjd korrosionsrisk. Metoden bör dock kompletteras med andra metoder, som halvcellspotential eller direkt analys av kloridprofilen i betongen [17].

ARMERINGS-KORROSION

Karbonatisering och **kloridinträngning** är de processer som har störst betydelse för nedbrytning av rostskyddet och korrosion av armeringen.

Andra icke-destruktiva metoder

Andra metoder som är baserade på ultraljud eller termografi har begränsad användning för utredningar. En översikt av sådana metoder finns i en rapport från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) [11].

MÄTA RISKEN FÖR KORROSION

Karbonatiseringsdjupet

visualiseras genom att en indikatorvätska ändrar färg på den delen av betongen som inte karbonatiserat.

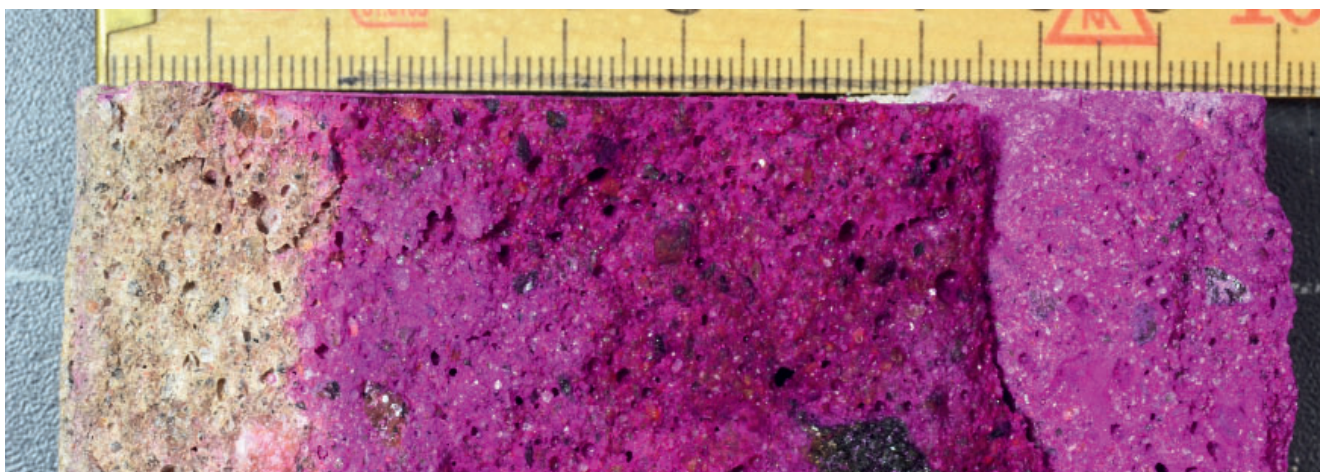
Kloridinträngning kan mätas med flera kemiska metoder för mätning av kloridnehåll. Metoderna utgår från prover med torkat betongpulver löst i utspädd salpetersyra.

Karbonatiseringsdjup

Stålarmeringen är korrosionsbenägen under normala atmosfäriska förhållanden, men betongen som armeringen är inbäddad i skyddar mot korrosion. Processer som bryter ner detta skydd måste övervakas. De två processer som har störst betydelse för nedbrytningen av skyddet och förorsakar att armeringen korroderar är **karbonatisering** och **kloridinträngning**.

När betong karbonatiserar på grund av koldioxid i omgivningen minskar dess pH-värde under 9, vilket förstör betongens skyddande effekt på armeringen. Det är därför viktigt att bestämma betongens karbonatiseringsdjup. Att bestämma karbonatiseringsdjupet är enkelt. Det som behövs är en minst 80 mm lång betongborrkärna med en diameter på 70 till 100 mm som delas så att färsk betongytta uppstår och en indikatorvätska som ändrar färg vid ett pH-värde på cirka 9, se figur 7.10.

Traditionellt har en lösning med 1 % fenolftaleinlösning i 70 % alkohol



använts som indikatorvätska. Det ger en färgförändring från färglös till magenta vid ett pH-värde som är lägre än 9. Då fenolftalein misstänks vara cancerogen använder man idag i stället en thymolftaleinlösning, som skiftar färg vid ett pH-värde på 9,6. Undantagsvis kan sågade betongytor användas, vilket dock ger otydligare färgskillnader. Hela proceduren beskrivs i SS 137242 *Betongprovning – Hårdnad betong – Karbonatiseringsdjup*. [18].

Figur 7.10. Betongborkärna med fenolftalein som indikatorvätska. Det som är färglöst är karbonatiserat. Av arbetsmiljöskäl används numera thymolftaleinlösningar istället för fenolftalein. Foto: Urs Müller.

Kloridinträngning och kloridprofiler

Kloridjoner förstör det passiva skiktet på stålarmeringen och kan orsaka korrosion. I Sverige är klorider vanligtvis förknippade med antingen avinsningssalter eller havsvatten. I de flesta fall sker inträngning av klorider i betongen genom diffusion eller kapillär uppsugning när betongen är permanent eller periodiskt i kontakt med en vätska som innehåller klorider [19]. Klorider kan också förekomma i aerosolform i luften i närhet av havsvatten och belägga betongytan varifrån de transporteras in i betongen med kapillärkrafter.

Prover för att bestämma kloridprofiler kan tas på flera sätt. Den enklaste metoden är att använda en hammarborr med en diameter på borkronan på minst 20 mm, med vilken man borrar torrt i olika djup (exempelvis i steg om 10 mm) ner till ett visst djup under armeringen, till exempel > 60 mm. Borrpulvret samlas in, antingen manuellt eller med en vakuumsug, se figur 7.11.

En annan metod för att bestämma kloridprofiler är att borra ut en kärna med en diameter på 70 till 100 mm och svarva pulver från olika djup från borkärnans yta. Detta kan göras i steg på ner till 1–2 mm om så behövs, och ner till önskat djup i betongkärnan. För svarvningen krävs antingen en stationär borr eller en svarv. Svarvningen görs med ett diamanttäckt verktyg utan vatten. Borkärnan bör därför vara torr. Pulvret samlas in manuellt eller via en vakuumsug.

Därefter bestäms vanligtvis det totala kloridinnehållet i pulvret. Klorid är en jon som finns upplöst i betongens porvatten. Vissa av cementets hydratfa-



Figur 7.11. Bormaskin med vakuumsug och en 20 mm specialborkrona. Foto: Urs Müller.

TITRERING

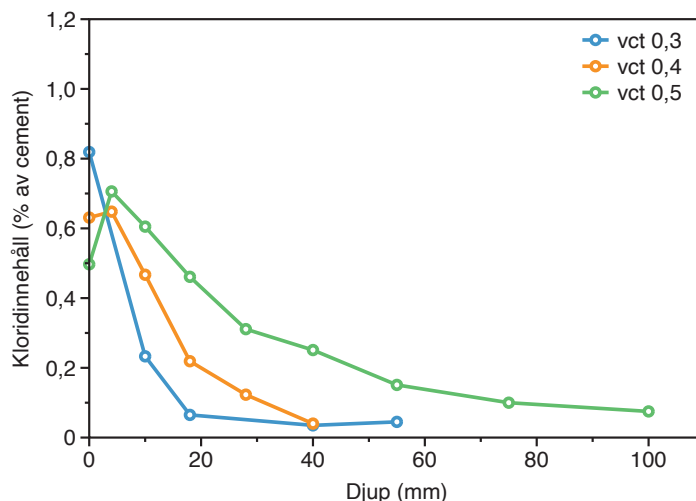
Titration är en analysmetod där koncentrationen hos en lösning avgörs genom att låta den reagera med en lösning av känd koncentration.

ser kan dock binda en del av de upplösta kloriderna permanent i bindemedlet. Vid bestämning av total kloridhalt får man ingen uppfattning av om kloriderna är bundna eller lösta. Kloridanalysen kan utföras med många metoder. Alla dessa metoder använder ugnstorkat betongpulver (vid 105 °C, partikelstorlek < 125 µm) som löses upp i utspädd salpetersyra.

SS EN 14629:2007 *Betongkonstruktioner - Provning av produkter och system för skydd och reparation - Bestämning av kloridhalt i hårdnad betong* ger två alternativa metoder, en baserad på fällning av kloridjoner med silvernitrattill silverklorid och sedan titrering av överskottet av silvernitrattill ammoniumtiocyanidlösning (*Volhardts metod*). Titreringens slut indikeras av en indikator. I detta fall används förbrukningen av ammoniumtiocyanidlösningen för beräkning av kloridkoncentrationen i provlösningen för att beräkna betongens totala kloridhalt. Den andra metoden är genom potentiometrisk titrering där provlösningen titreras med silvernitrattill lösningens potential mäts med en jonselektiv elektrod. Om all klorid i lösningen fälls ut av silvernitrattill, visar lösningens potential en betydande ändring. Det indikerar att titreringen ska avslutas. Mängden silvernitrattill används sedan för att beräkna kloridkoncentrationen i lösningen och beräkna den totala kloridhalten i betongen. Metoden AASHTO – T 260 analyserar syralöslig, total kloridhalt genom potentiometrisk titrering, se figur 7.12. Ett annat förfarande är att bestämma vattenlöslig kloridhalt genom atomabsorptionsmätning.

Det finns naturligtvis andra metoder för att analysera klorider i lösningar, som jonkromatografi eller snabba kloridtester, de senare är dock mindre exakta. Alla kloridhaltsresultat anges dock på betongvikten, medan kristisk kloridhalt (tröskelvärdet) anges vanligtvis i förhållande till cementhalten. Det är därför nödvändigt att känna till betongens cementinnehåll eller åtminstone kunna gissa den.

Figur 7.12. Exempel på kloridprofiler i betong med tre olika vct (vatten-cementtal) som är utsatta för en miljö med avisningssalter i 20. Betongproverna togs ut genom svarvning. Observera att prover med högre vct har en djupare kloridinträngning. Källa: Urs Müller.



MEKANISKA PARAMETRAR HOS MATERIALEN

Hållfasthetsegenskaper är viktiga för att utvärdera konstruktionens eller konstruktionsdelarnas beteende vid olika belastningsförhållanden. Detta är särskilt viktigt när lasterna på grund av renoveringar ökar eller man avser att ändra användningen av en byggnad eller ett utrymme. Den viktigaste mekaniska egenskapen hos betong är dess tryckhållfasthet. Ibland är även betongens draghållfasthet nödvändig för utvärderingen. Den bestäms ofta som spräckhållfasthet. I gamla konstruktioner kan det vara nödvändigt att bestämma armeringsstålets draghållfasthet för att kunna beräkna bärförmågan hos kvarvarande balkar.

Bestämning av tryckhållfasthet

Den tryckhållfasthet som bestäms anger hur stor tryckbelastning en betong kan ta per ytenhet innan den krossas, alltså en brott-hållfasthet. Tryckhållfastheten uttrycks numera i N/mm^2 (Newton per kvadratmillimeter) eller i MPa (megapascal). Tidigare angavs den i kP/cm^2 (kilopond per kvadratcentimeter). 1 kP/cm^2 är ungefär $0,098 \text{ MPa}$.

Det finns en standard för bedömning av tryckhållfasthet i färdiga betongkonstruktioner, SS-EN 13791 [20]. Den omfattar hållfasthet bestämd med olika metoder, en direkt metod (tryckning av utborrade provkroppar) och tre indirekta (med studshammare, genom att bestämma utdragskraft eller ultraljudshastighet) och genom att använda kombinationer av dessa. Studshammare är en icke-destruktiv metod och mätning av ultraljudshastighet kan vara det, medan de övriga är mer eller mindre destruktiva. Här fokuseras på de två förstnämnda, provning av utborrade provkroppar och studshammare, som är de som vanligtvis används i Sverige. SS-EN 13791 behandlar val av antal och lämpligt läge för provkroppar/provningsställena, kalibrering av de indirekta metoderna och utvärdering av provningsresultat. Antalet provkroppar/provningsställena beror på betongens förväntade enhetlighet. För äldre konstruktioner där man använt icke-vibrerad betong eller jordfuktig betong, kan spridningen i betongkvalitet i konstruktionen vara stor, vilket kräver fler provkroppar/provställena.

Den metod som ger den mest trovärdiga tryckhållfastheten är att ta ut prover ur en konstruktion genom att borra ut betongcylindrar och prova dem i en tryckprovningssmaskin. Enligt SS-EN 13791 är detta referensmetoden. Hur de enskilda provkropparna ska tas ut och provas beskrivs i SS-EN 12504-1 [8]. Kärnor som borrats ut ur en konstruktion (stålarmring bör undvikas) måste justeras så att tryckytorna blir helt parallella. Val av längd på borrkärnorna anpassas till geometrin hos de referensprovkroppar som resultatet jämförs med. Om resultaten ska jämföras med kubhållfasthet måste kärnorna justeras så att längden blir lika med diametern, och om man ska jämföra med cylinderhållfasthet ska längden vara lika med dubbla diametern. Provningsen kan genomföras både på våta (48 timmar i vatten innan provningen) och torra

DRAG & SPRÄCK

Vid mätning av hållfastheten i befintlig betong är ofta spräckhållfasthet synonymt med draghållfasthet.

TRYCKHÅLLFASTHET

Tryckhållfasthet mäts vanligen på utborrade provkroppar som provtrycks eller med en studs-hammare.



Figur 7.13A-B. Till vänster en universalprovningmaskin under en tryckhållfasthetsprovning. Belastningen ökas succesivt tills provkroppen går sönder. Till höger en studshammare som mäter betongens hållfasthet. Foto: Urs Müller.

provkroppar, men de jämförs då med olika värden eftersom provkroppens fuktillstånd påverkar uppmätt hållfasthet. De tryckprovningmaskiner som används är hydrauliska tryck- eller universalprovningmaskiner, som har en belastningskapacitet som väl överstiger den högsta brottlasten hos provkropparna, se figur 7.13A. En betongprovkropp placeras på en nedre tryckplatta och en övre tryckplatta läggs an mot provkroppens ovansida. Belastningen ökas med en jämn hastighet tills provkroppen går till brott. Själva tryckprovningen specificeras i SS-EN 12390-3 [21].

Bedömning av tryckhållfasthet med studshammare är en icke-destruktiv teknik [22]. En studshammare är en handhållen anordning där en fjäderdriven massa träffar betongens yta och rekylen ger ett värde för betongens hållfasthet se figur 7.13B. Metoden är relativ och kalibreras mot direkt provning av hållfasthet genom tryckning [22]. Den används främst för att utvärdera homogeniteten hos betongen i en konstruktionsdel eller en byggnad. Mätning med studshammaren på många ställen i en konstruktion ger en uppfattning om fördelningen av olika betongkvaliteter. Det ger också bara hållfastheten i betongens ytskikt, inte i det inre av konstruktionen, vilket kan vara missvisande om ytan är skadad. Resultaten har oftast stor spridning och man kan ifrågasätta om de är representativa för huvuddelen av betongen i en konstruktionsdel.

Provning av utdragskraft beskrivs i SS-EN 12504-3 [23] och bestämning av ultraljudshastighet i SS-EN 12504-4 [24].

Spräck- och draghållfasthet

Spräckhållfastheten är inte ett direkt mått på en betongs draghållfasthet men den kan korreleras till draghållfastheten [25]. Hos betongcylindrar är spräckhållfastheten cirka 0,9 gånger draghållfastheten. Provning av spräckhållfasthet utförs enligt SS-EN 12390-6 [26] på borrkärnor från en konstruktion och samma typ av maskin som används för provning av tryckhållfasthet används. Den cylindriska borrkärnan placeras med sin längd parallellt med maskinens tryckplattor och kraften anbringas längs en smal linje utefter längden. Belastningen ökas tills borrkärnan spräcks, och spräckhållfastheten beräknas sedan enligt en formel i standarden. I allmänhet är både spräckhållfasthet och draghållfasthet mycket lägre än betongens tryckhållfasthet.

Elasticitetsmodul

I vissa fall, när en strukturanalys ska genomföras med *finit elementanalys*, behöver man betongens elastiska egenskaper. De viktigaste parametrarna är då *elasticitetsmodul* och *Poisons tal*. Även om betong är ett mycket sprött material visar det en viss elasticitet, som mäts i form av elasticitets- eller E-modul. Det görs på borrkärnecylindrar (liknande tryckhållfasthetsprovning) enligt SS-EN 12390-13 [27]. I detta fall mäts inte bara betongprovernas brottlast utan även deras deformation under belastningscykler inom det belastningsområde där de har ett elastiskt beteende.

Mekaniska egenskaper hos armeringen

Stålarmeringen i historiska betongkonstruktioner kan vara av olika typ. Det förekommer kamstål, vridna stänger, profilerade eller släta armeringsstänger, plattstål eller stålnät. De egenskaper som är viktigast är vidhäftningen mellan armeringen och betongen betongen och stålets draghållfasthet. Provning av draghållfastheten kan utföras på armeringsstänger från konstruktionen och provas i en hydraulisk dragprovningssmaskin. Armeringsstången kläms fast i provningssmaskinen och dras sedan tills den går av. Provningen utförs enligt SS EN ISO 6892-1 *Metalliska material - Dragprovning*. Armeringens vidhäftning i en betongkonstruktion är mer komplicerad att mäta och detta görs vanligtvis bara för klagörande av specifika frågor.

PARAMETRAR HOS BETONGENS INRE STRUKTUR

Många skador i betong visar sig genom sprickbildning, avflagning eller delaminering. Orsakerna till skadorna kan vara mekanisk påverkan samt kemiska eller fysiska angrepp. Det går inte alltid att avgöra vad som är orsaken genom yttre observationer i makroskala. För att fastställa vilka skademekanismer som det är fråga om används ofta en kombination av mikroskopiska och mikroanalytiska metoder.

NUMERISK BERÄKNING

Finite elementmetoden löser partiella differentialekvationer och integralekvationer numeriskt med hjälp av datorer.

MATERIAL-KONSTANTER

E-modul är en konstant som karakteriserar styvheten hos ett elastiskt material. För betong 20-50 gigapascal.

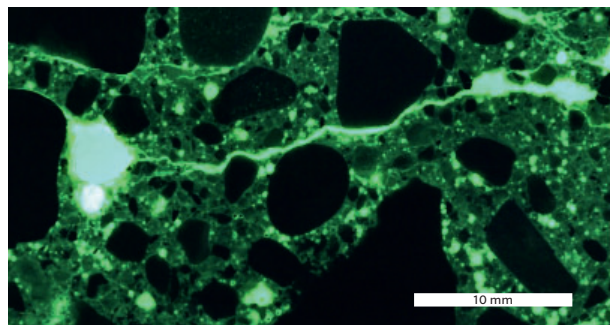
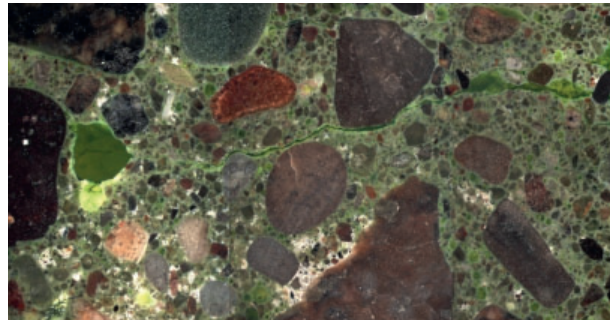
Poisons tal (tvärkontraktions-talet) är ett mått på deformationen i den vinkelräta riktningen gentemot den specifika belastningsriktningen. För betong är den 0,1-0,2.

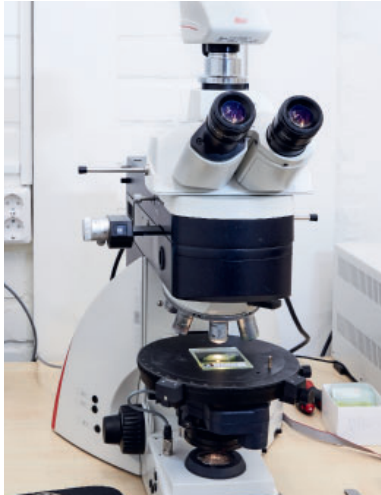
Mikroskopi

Mikroskopi är ett bra sätt att studera inre skador på betong, från en ganska låg upplösning till en mycket hög upplösning, beroende på vilken typ av mikroskop som används [5]. För en mikroskopisk analys är borrkärneprover optimala. Genom att såga dem i två halvkärnor får man en provprofil som i figur 7.3. En av de halva kärnorna kan impregneras med fluorescerande epoxiharts och slipas. På detta sätt blir även små sprickor synliga i UV-ljus. Genom slipningen blir dessutom ytan slät och komponenter som inte kan ses i ett spräckt prov blir synliga. Impregnerade och slipade prover kan studeras i *stereomikroskop*, se figur 7.14. Ett stereomikroskop har två separata ljusvägar, ett för varje öga, vilket gör det möjligt att observera provet med förstöringsgrad på vanligtvis 5x till 100x.

För en mer detaljerad observation rekommenderas användning av ett *polarisationsmikroskop*, se figur 7.15. I ett polarisationsmikroskop används tunnslip som prover. Tunnslip är speciella prover med en tjocklek av 30 µm och som är genomskinliga (figur 7.3 och 7.15). I ett polarisationsmikroskop interagerar betongens genomskinliga komponenter med det polariserade ljuset och kan urskiljas om storleken inte är för liten (> 10 µm). Dessutom kan betongens struktur karakteriseras och sprickor kan identifieras. I sprickorna kan produkter av kemiska reaktioner som leder till skador ha ansamlats. De flesta polarisationsmikroskop har också en UV-lampa, där tunnslip kan studeras under UV-ljus om hartset innehöll ett fluorescerande ämne. I UV-ljus blir sprickor, luftporer, kaviteter och andra defekter väl synliga.

Figur 7.14. Ett stereomikroskop med belysning (vänster). Bilder av sprucken betong är fotograferad genom ett stereomikroskop under infallande ljus respektive UV-ljus. Under UV-ljus framgår sprickvidden och sprickutbredningen i starkt ljusgrön kulör. Foto: Urs Müller.





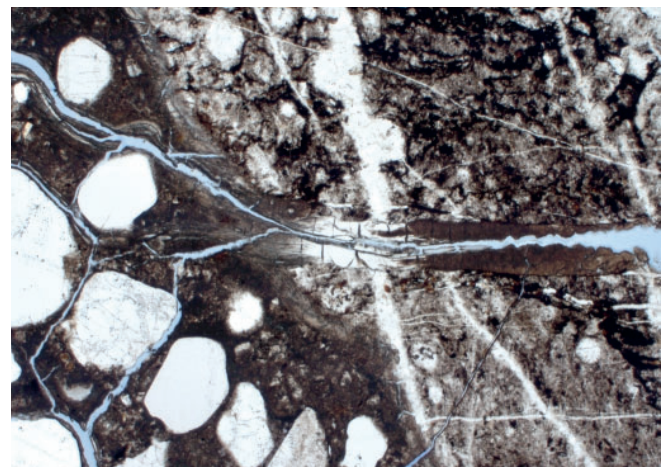
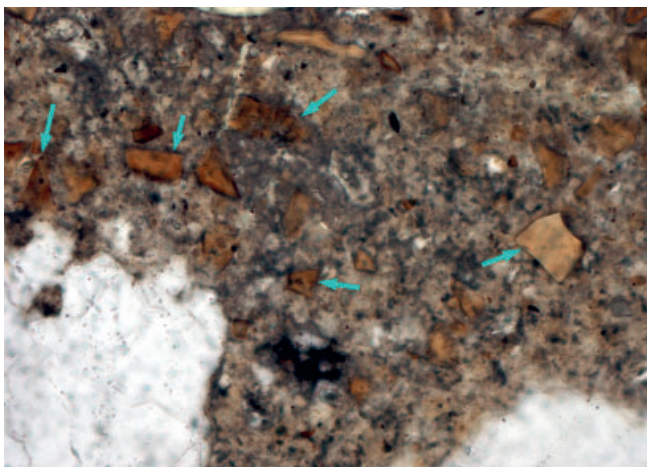
Betongens vattencementtal (*vct*) kan uppskattas enligt en metod som beskrivs i NT BUILD 361 [28], där fluorescensen hos provet jämförs med fluorescensen hos referensprover med kända *vct*. Med lämpliga referensprover kan *vct* uppskattas med en noggrannhet av $\pm 0,05$.

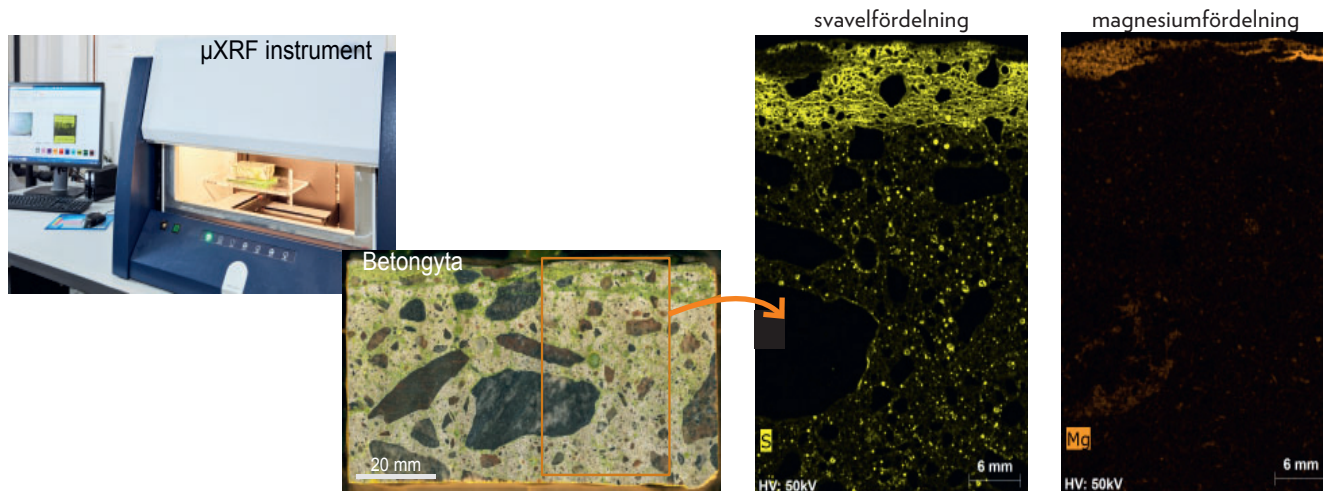
Tunnslipsmikroskopi kräver dock kunskap om de optiska egenskaperna hos mineraler och andra ämnen. Det kan endast utföras av kvalificerad personal med adekvat utbildning i materialvetenskap eller geologi. Preparering av tunnslip är komplicerat och görs bara i speciella laboratorier. Metoden är dock en av de bästa för att karakterisera betongens sammansättning och kartlägga inre skador i betong, se figur 7.16.

Figur 7.15. Ett polarisationsmikroskop ger mycket detaljerade observationer. På den högra bilden visas ett tunnslip som studeras i polarisationsmikroskop. Foto: Urs Müller.

Figur 7.16. Betong från en 70 år gammal bro med slaggcement (till vänster). Några slaggpartiklar är markerade med pilar.

I bilden till höger visas betong skadad av ASR. I kontaktytan mellan bindemedlet och ballasten har en expandande reaktionsprodukt i form av ett gel bildats. Båda bilderna har tagits med ett polarisationsmikroskop under planpolariserat ljus. Foto: Urs Müller.





Figur 7.17. Resultat från μ XRF-analyser av en betong som varit utsatt för havsmiljö. Bilderna till vänster visar ett μ XRF-instrument och ett tvärsnitt av de första 50 mm av en delad betongborrkärna. De två bilderna till höger visar inträngningen av svavel respektive magnesium i form av elementfördelningskartor. Foto: Urs Müller.

Mikroanalytiska metoder

För en kemisk mikroanalys används svepelektronmikroskop (SEM). SEM använder inte synligt ljus för visualiseringen utan en elektronstråle, som skannar över ett prov. Proverna utgörs av brutna ytor eller polerade tvärsnitt. Eftersom de flesta SEM har en ganska liten provkammare kan provet inte vara för stort, vanligtvis högst några centimeter. I SEM ser man mikrostrukturen, men apparaten kan också utföra kemisk analys med mycket hög upplösning ($< 1 \mu\text{m}$). Detta gör att man lättare kan identifiera enskilda produkter från skadliga reaktioner.

Under senare år har användningen av mikroröntgenfluorescensspektrometrar (μ XRF) blivit alltmer vanligt vid undersökning av oorganiska material [29]. Metoden kan med ganska hög rumslig upplösning (10 till 100 μm) utföra en kemisk analys på olika oorganiska material, inklusive betong, se figur 7.17. Skillnaden mot SEM är att analysen kan utföras på större prover, på ytor upp till 150 x 200 mm, alltså i princip på hela borrhärnhälvor. På detta sätt går det ganska snabbt och enkelt att ta fram kemiska profiler på hela borrhärnhärnor. Metoden fungerar kvalitativt och semi-kvantitativt.

SKADOR PÅ BETONGKONSTRUKTIONER

Skador på betongkonstruktioner kan endera relateras till för hög belastning i förhållande till betongdelarnas prestanda eller till undermåligt material. De flesta betongkonstruktioner har dimensionerats för laster som konstruktionen förväntades bli utsatt för under sin livslängd. Laster som orsakar skador kan endera uppkomma på grund av en allvarlig händelse som till exempel jordbävning, brand och explosion, eller på grund av att belastningen ökats utöver det som den dimensionerats för utan adekvat förstärkning. En tredje orsak

till konstruktionsskador kan vara undermålig dimensionering eller dåligt utförande.

Materialrelaterade skador i betongkonstruktioner beror ofta på förändringar som har en negativ inverkan på bärförmågan eller beständigheten. Materialsador kan medföra konstruktionsskador när nedbrytning av betongen leder till att betongens egenskaper försämras i förhållande till hur konstruktionen ursprungligen dimensionerades.

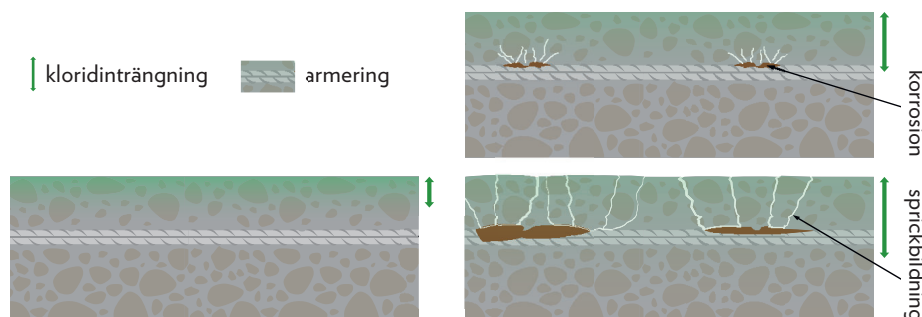
De flesta materialrelaterade betongskadorna i historiska betongkonstruktioner beror på korrosion av armering [30]. I många fall är betongtäcks-skiktet över armeringen för litet eller betongkvaliteten för dålig, vilket lett till omfattande karbonatisering eller kloridinträngning. I synnerhet uppvisar byggnader från första fjärdedelen av 1900-talet stor variation i betongkvalitet, även inom samma byggnad. Det beror på att betong då var ett relativt nytt material och det saknades erfarenhet av relationen mellan betongegenskaper och beständighet över tid.

Alla andra skadeprocesser, utöver armeringskorrosion, är mer ovanliga och oftast relaterade till specifika exponeringsscenarioer. Det kan till exempel vara skador orsakade av frysning–upptining, sulfatangrepp, surt angrepp, angrepp av mjukt vatten eller kemin hos vissa materialkomponenter exempelvis alkalisilikaangrepp. Skador på betongkonstruktioner orsakas dock ofta av en kombination av en eller flera processer, inte bara av en enda skademekanism.

SKADOR ORSAKADE AV ARMERINGSKORROSION (KARBONATISERING OCH KLORIDINTRÄNGNING)

När armeringen i en betongkonstruktion korroderar har korrosionsprodukterna en större volym än det stål de ersätter. Detta inducerar en spänning på den omgivande betongen, som reagerar med att spricka om så mycket reaktionsprodukter bildas att draghållfastheten i betongen överskrids. Processen illustreras i figur 7.18, där passiveringen av stålet förstörts av klorider och tillgängligt syre (visas inte i figuren).

Kloridinitierad korrosion påträffas ofta i konstruktioner utsatta för havsvatten eller avsningsalter, till exempel konstruktioner nära saltade



VANLIGA SKADOR

På betong är följande typer av skador vanliga:

- armeringskorrosion
- ytkorrosion
- expanderande angrepp
- urlakning
- sprickbildning orsakad av temperatur- eller fuktgradienter
- olyckslast
- överbelastning
- estetiska skador
- förlust av sammanhållning hos bindemedlet
- brandskador

Figur 7.18. Princip för sprickbildning och avskalning på grund av kloridinitierad armeringskorrosion. Illustration: Urs Müller.



Figur 7.19 A-D. Två exempel på klorid-initierad korrosion av armering. Övre raden: En betongpir i italienska Vada med starkt korroderad armering. Foto: Katarina Malaga.

Nedre raden: En betongbalkbro med omfattande armeringskorrosion på undersidan som delvis orsakats av klorider. Betongbalkbron är från 1909 och är en av Sveriges äldsta bevarade. Bron finns i Axmar, Gävle kommun. Foto: Sven Olof Ahlberg.

vägar. I Sverige är det vanligt att vägar saltas vintertid. I synnerhet ackumulerar tunnlar och vägbroar avsningsalter. På broar uppträder skador ofta på undersidan eftersom regnvatten för med sig salterna från vägbanan till de lägre belägna brodelarna, se figur 7.19. Byggnader intill vägar kan uppvisa kloridinitierad korrosion i de lägre belägna delarna där passerande bilar orsakat uppskvättning av snömodd som innehåller salt.

Figur 7.20 visar ett typiskt exempel på armeringskorrosion orsakad av karbonatisering och sprickbildning i en betongpelare. Betongpelaren är en del av en bärande ramkonstruktion som består av betongbjälklag och pelare mellan dem. Väggarna består av tegelmurverk. Sprickorna är orsakade av korrosionsprodukter och följer de vertikala stålstängerna i hörnen av pelaren, och de brunaktiga missfärgningarna kommer från horisontella byglar.

Armeringskorrosion åtföljs ofta av missfärgning i form av rostfläckar.



Fläckar kommer från överskott på tvåvärt järn som kan lösas upp i porvattnet och transporteras till betongytan, där det oxiderar till trevärt järn och faller ut som järnhydroxid som i exemplen i figur 7.20 och 7.21. Även om fläckarna bara påverkar det estetiska intrycket, ger det indikation om pågående armeringskorrosion, i synnerhet om de dyker upp med ett regelbundet avstånd.

Armeringskorrosion kan leda till allvarliga konsekvenser för den lastbärande förmågan hos betongkonstruktioner, till exempel när det lastbärande betongtvärsnittets area minskar på grund av den typ av uppsprickning som visas i figur 7.20. De spruckna delarna av ett pelartvårsnitt kan inte bära någon last, och den lastbärande arean reduceras till den ospruckna inre delen av tvärsnittet. Exemplet i figur 7.22 kan innebära allvarliga säkerhetsrisker om avflagnade delar av betongtäcksnittet faller från hög höjd och träffar förbipasserande.

Figur 7.20. Öppen byggnadskonstruktion i Olympiabyn i Berlin från 1936. Ett exempel på armeringskorrosion orsakad av karbonatisering i en ram-bjälklagskonstruktion. Foto: Urs Müller.

Figur 7.21. Bruna missfärgningar på en betongyta som indikera armeringskorrosion. Det regelbundna avståndet och de parallella stråken avslöjar att det är armeringskorrosion. Foto: Dimitrios Boubitsas.





Figur 7.22. Korrosion på ett förtillverkat väggelement i ett flervåningshus tillhörande BRF Tantolunden, Stockholm. Foto: Sven Olof Ahlberg.

FROST

Skador orsakade av frostangrepp innebär en avsevärd risk för betongens beständighet [31]. Byggnadsverk vid vägar är oftast värst drabbade, eftersom frysning/upptining i närvaro av salt ger mer skador än frysning/upptining i rent vatten. Men även frysning i rent vatten kan orsaka skador, i synnerhet om betongen inte har ett bra luftporsystem. I modern betong utsatt för frost tillsätts normalt luftporbildare som ger en lufthalt på mellan 4 och 6 % eller så provas dess frostbeständighet. Betong utsatt för frysning/upptining i närvaro av salt ska alltid frostprovas, även om de har förhöjd lufthalt. Betong från tiden före andra världskriget innehåller inte förhöjd lufthalt och frostprovades inte heller rutinmässigt.

Skador orsakade av frost visar sig som ett mönster parallellt med betongytan i form av avflagning av ytskiktet eller sprickbildning under ytlagret ner till ett djup på 20 till 40 mm (inre frostsador). Båda typerna av skador kan visa sig samtidigt och kan minska den lastbärande delen av betongkonstruktionen avsevärt.

Figur 7.23 visar ett gjutet betongkors med skador orsakade av armeringskorrosion såväl som skador på grund av frostangrepp i form av avflagning. Detta exempel illustrerar även det faktum att frostsador ibland kombineras med sprickbildning som härrör från någon annan skademekanism, som armeringskorrosion eller alkalisilikareaktioner (ASR). Inre frostsador i form av sprickbildning parallellt med ytan som i figur 7.24 är inte alltid synliga om avflagning inte inträffat. Sprickorna går vanligtvis genom cementpastan och, för det mesta, runt ballastkornen. Inre frostsador kan emellertid reducera motståndskraften hos täcksiktet och öka kloridinträngning och karbonatisering [19, 31].



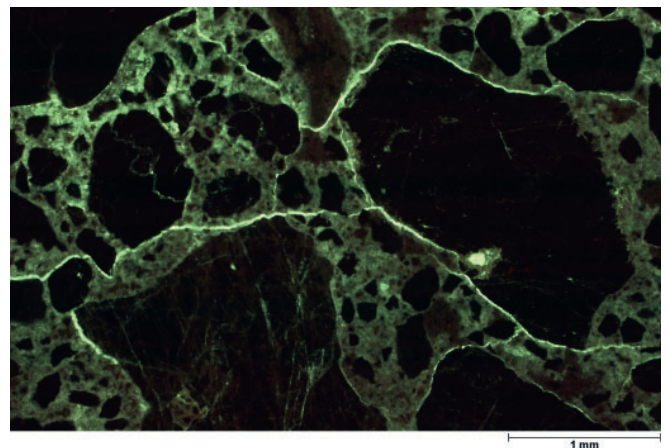
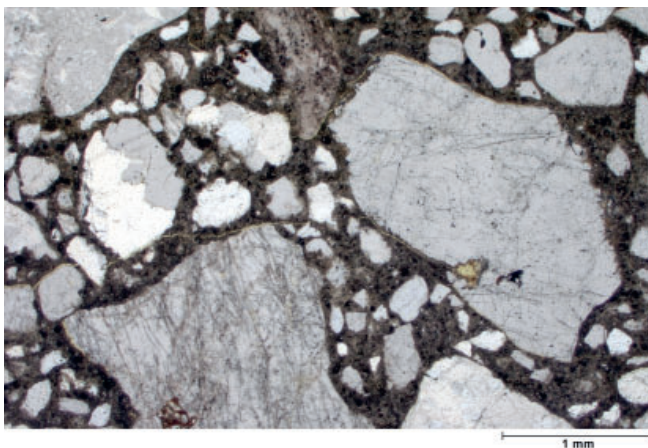
Figur 7.23. Domkyrkan i Luleå. Korset uppvisar frostsador i form av avflagnings. Foto: Sven Olof Ahlberg. 2021.

ASR – ALKALISILIKAREAKTIONER

Alkalisilikareaktioner (ASR) är inte en vanlig skademekanism i Sverige, men kan orsaka betydande kostnader för ägare av byggnadsverk för att förhindra skador eller reparera dem. ASR är en reaktion mellan cementpastan och vissa ballasttyper som är känsliga för alkaliska lösningar. ASR-skador uppstår i våta miljöer. Som beskrivits i kapitlet *Betong är en blandning* finns det tre avgörande faktorer för att ASR ska initieras; en reaktiv ballast, en hög alkalinitet, i form av natrium och kaliumjoner i cementpastan och en fuktig omgivning [2].

ASR är en expansiv reaktion som orsakar en omfattande sprickbildning. Om ASR uppstår på grund av att alkaliniteten är för hög i betongbindemedlet kommer sprickorna att sträcka sig genom hela betongdelen. Om alkalierna

Figur 7.24. Inre frostsador i form av sprickor parallella med ytan. Observera att sprickutbredningen sker i cementpastan. Till vänster visas en bild från ett tunnslip tagit med ett polarisationsmikroskop under planpolariserat ljus. Den högra bilden är samma prov fotograferat med UV-ljus. Foto: Urs Müller.



ASR

Reaktion mellan cementpastan och vissa ballasttyper känsliga för alkaliska lösningar.

Figur 7.25. Den tyska ubåtsbunkern i Trondheim från andra världskriget uppvisar omfattande ASR-skador och ett typiskt kartliknade sprickmönster. De vita utfällningarna i den högra bilden är kalciumhydroxid som spolats ut från cementpastan. Foto: Urs Müller.

kommer från omgivningen, till exempel genom avsningsalter eller havsvatten, sker angreppet från ytan och sprider sig mot de inre delarna av betongen. Sprickbildningen orsakas av de svällande reaktionsprodukterna från ASR, som har konsistensen av en expanderad gel när den är våt och en spröd glasliknade struktur när den är helt torr. Många uppfuktning-uttorkningscykler orsakar omväxlande svällning och krympning som ger en betydande spänning i betongen. Omfattande ASR-skador på tjockare betongkonstruktioner ger ett kartliknade sprickmönster, där sprickorna är slumpmässigt fördelade över betongytan och ofta formar polygoner, se figur 7.25.

Sprickbildning orsakad av ASR är dock inte alltid oregelbunden. Betongkonstruktionsdelens geometri påverkar ofta sprickmönstret. En slank konstruktionsdel kan ha långsgående sprickor orsakade av ASR. Figur 7.26





visar ett exempel från en vägbro i Trondheim i Norge, med ASR i bropelarna [32, 33]. Sprickorna visar sig i både ett kartlikande mönster och som sprickor som följer pelarnas längsgående axel. Ibland kan sprickbildningen till synes verka oskyldig, med enbart få sprickor på ytan men med omfattande parallella sprickor i det inre av betongen, se figur 7.27.

Det som är typiskt för ASR är att sprickor också påverkar ballastkornen. Sprickorna i betongen går ofta genom större ballastkorn, eftersom sprickbildningen startar i ballasten eller i gränsskiktet mellan ballast och cementpasta, se figur 7.28 och 7.29. I allvarliga fall kan omfattande sprickbildning på grund av ASR i betydande grad påverka funktionalitet och livslängd negativt. ASR är vanligtvis en långsam process och det kan ta år eller årtionden innan

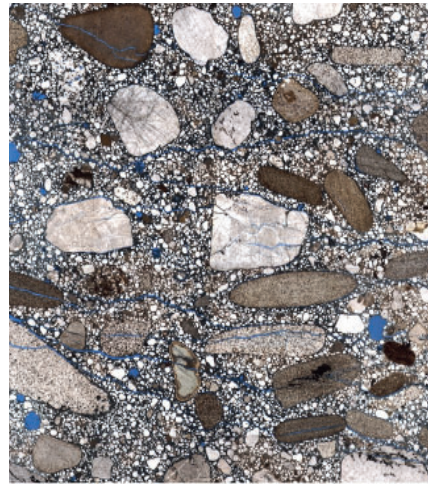
Figur 7.26. Elgeseter bro i Trondheim med ASR-skador [33]. Sprickorna i pelarna är ofta parallella med pelarnas längdriktning. Foto: Urs Müller.

Figur 7.27. Exempel på ett betongprov från en sluss. Sprickmönstret visar många sprickor som är parallella med ytan. Foto: Urs Müller.

betongyta

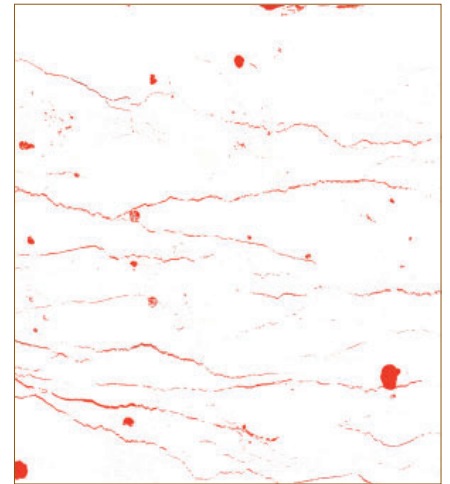


borrhärna

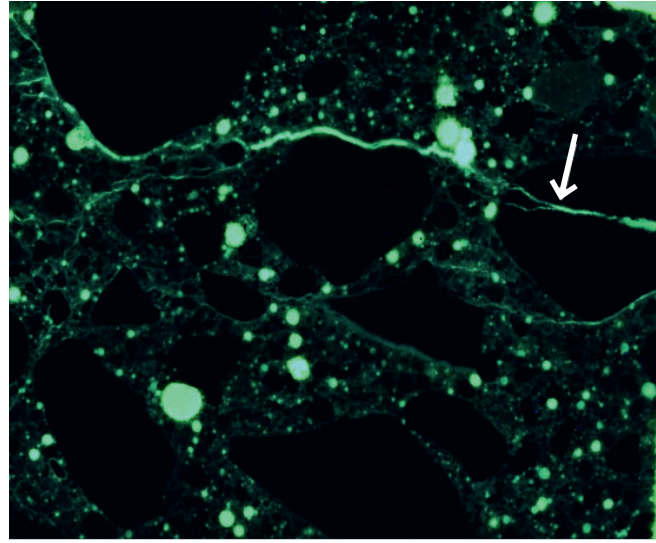
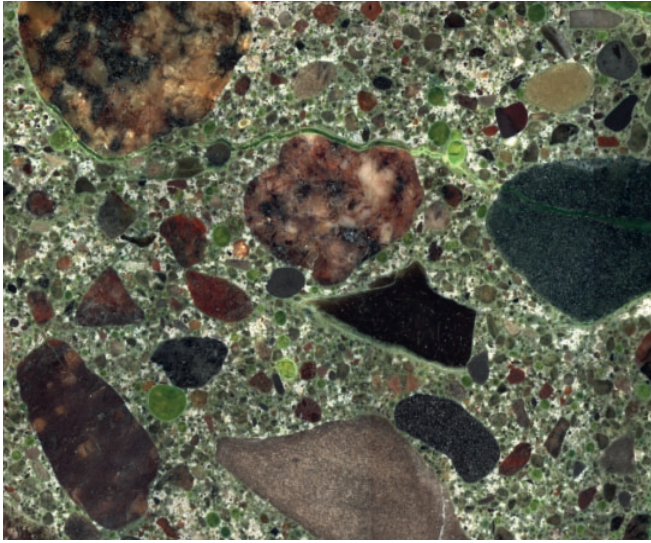


10 mm

tunnslipsbild

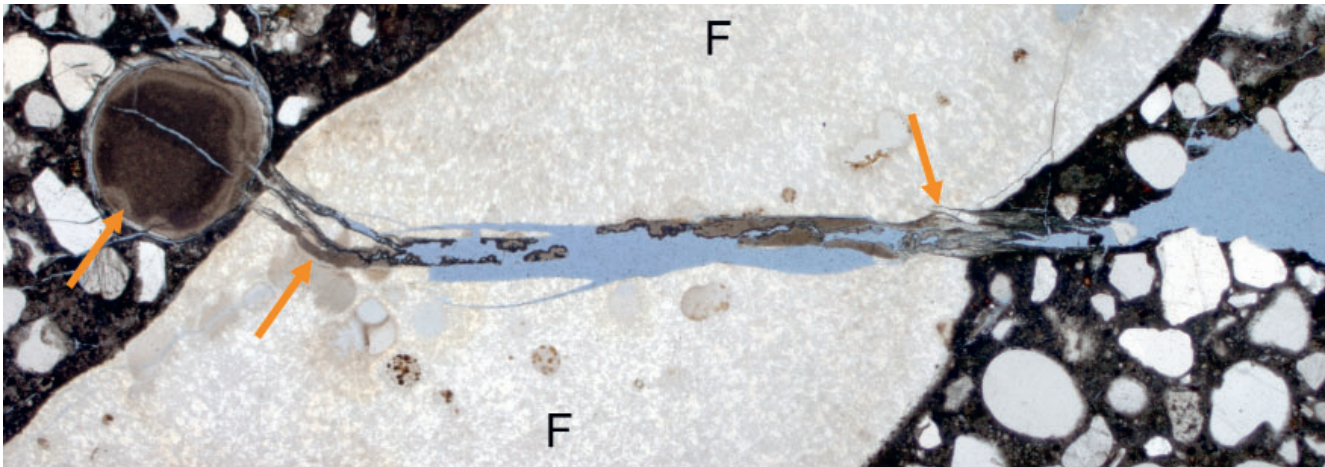


sprickmönster



Figur 7.28. Vänstra bilden visar ett betongprov skadat av ASR (alkalisilikareaktioner). Högra bilden visar samma betongprov under UV-ljus. I den bilden syns en spricka som går genom ett ballastkorn

(vid pilen) och vidare in i cementpastan. Båda bilderna är tagna genom ett stereomikroskop. Foto: Urs Müller.

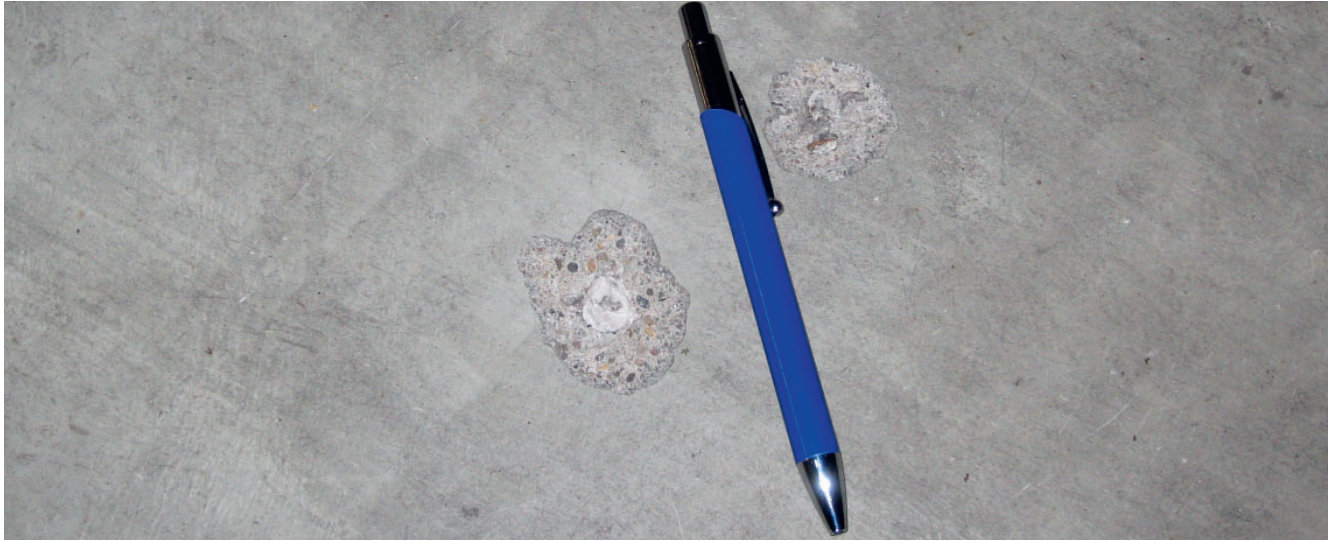


Figur 7.29. Ett flintakorn (F) med en spricka orsakad av ASR. Lägg märke till ASR-reaktionsprodukter vid korngränser och i en luftpor

till vänster i bilden (orange pilar). Bild av ett tunnslip taget med ett polarisationsmikroskop under planpolariserat ljus. Foto: Urs Müller.

den är fullt utvecklad om ballasten i betongen är långsamreaktiv. Snabbreaktiv ballast kan orsaka ASR-skador inom mellan tre och sju år.

ASR kan också visa sig som "pop-outs", ofta i områden med extern alkaliinträngning, till exempel i parkeringsbjälklag, där fordon dragit in snömodd som innehåller avisningssalter som smälter på garagebjälklagets betongyta. "Pop-outs" orsakas av enstaka ASR-känsliga korn med rund form nära betongytan, se figur 7.30.

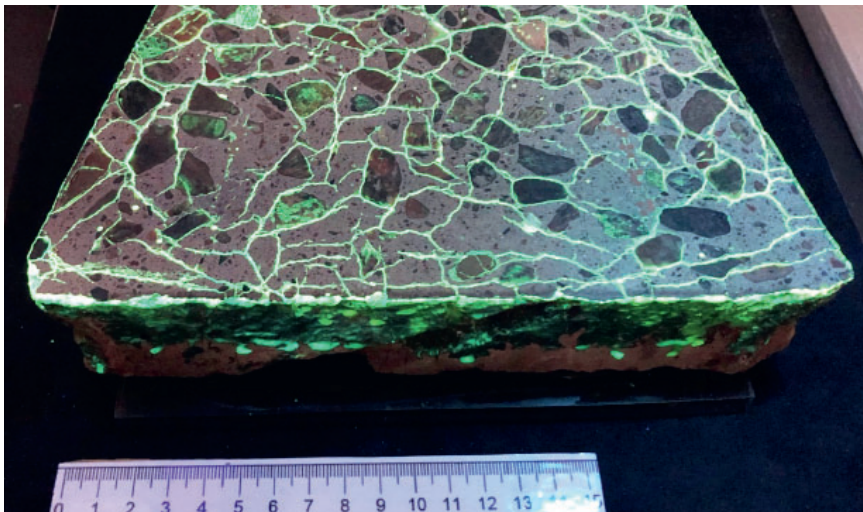


Figur 7.30. Två pop-outs orsakade av ASR (alkalisilikareaktioner) i betongbjälklaget i ett parkeringsgarage. Foto: Urs Müller.

SULFATANGREPP

Sulfatangrepp på betong uppträder i en miljö där det finns sulfatjoner. Det kan vara i sulfatrik jord, i industriella miljöer där sulfider eller sulfater används och där betong utsätts för grundvatten som innehåller sulfater [34]. Sulfatattack är en expansiv reaktion i cementpastan och leder företrädesvis till sprickbildning i cementpastan, se figur 7.31.

Skademönstret kan likna det som uppstår vid ASR med en kartliknade sprickbildning, men på samma sätt som för ASR påverkas sprickmönstret av betongdelarnas form. I värsta fall kan cementbindemedlet förstöras helt och



Figur 7.31. En betongdel skadad av sulfatangrepp. Bild tagen under UV-ljus. Foto: Magnus Döse.

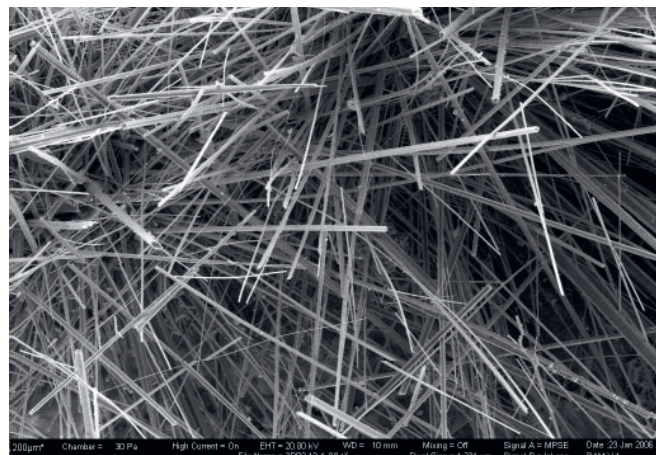
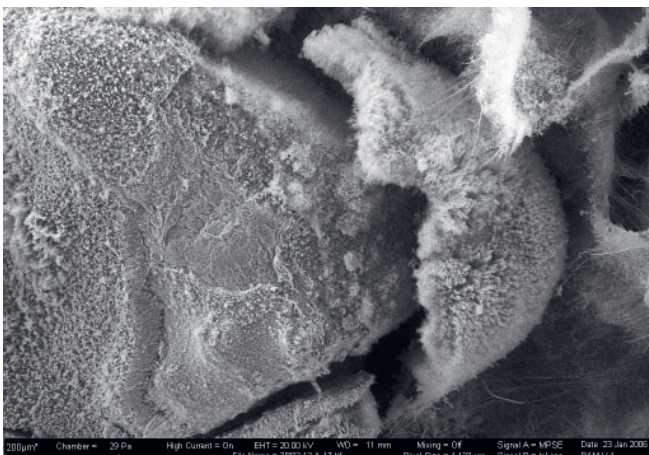


Figur 7.32. En betongdel som är allvarligt skadad av sulfatangrepp (till vänster). Det finns frilagda ballastkorn på grund av kombinerat sulfat- och syraangrepp (till höger). Båda bilderna kommer från en industrianläggning som upparbetar malm i form av metallsulfider. Foto: Urs Müller.

Figur 7.33. Betong skadad av sulfatangrepp. Ett ballastkorn är helt täckt av ettringit (till vänster). Ettringiten visas i högre upplösning (till höger). Båda bilderna är tagna med svepelektromikroskop (SEM). Foto: Urs Müller.

betongytan börjar falla sönder som i exemplet med Luleå domkyrka, figur 7.23. Om sulfatangreppet kombineras med angrepp av syror löses bindemedlet i ytan ut och lämnar utstående ballastkorn, se figur 7.32.

Reaktionsprodukten vid sulfatangrepp är mineralet **ettringit** som ger en expansion av cementpastan som leder till sprickbildning, se figur 7.33. En annan typ av sulfatangrepp ger mineralet **thaumasit** som är expansivt och kan orsaka total nedbrytning av cementpastan om det bildas i större mängder. För att thaumasit ska bildas krävs dock karbonater och en omgivningstemperatur under 10 °C [35]. Skador från thaumasitbildning har därför oftast påträffats i



tunnlar eller i grundläggningar där betongen innehållit kalkstensballast eller kalkstensfiller [36, 37], men är inte speciellt vanliga i Sverige. En annan typ av sulfatangrepp är försenad ettringitbildning [38] som inte beskrivs i detalj i detta sammanhang. Denna mekanism kan orsaka allvarliga skador på värmebehandlade förtillverkade betongelement, vanligtvis järnvägssliprar. Denna skademekanism är begränsad till förtillverkade betongelement som har värmebehandlats för att påskynda härdningsprocessen med temperaturer över 65 °C.

NEDBRYTNING AV ALUMINATCEMENT

Aluminatcement användes före andra världskriget i lastbärande betongdelar. Även om det var dyrare än portlandcement användes det ibland för att skynda på härdningsprocessen och snabbare uppnå hållfasthet. I vissa fall blandades aluminatcement och portlandcement för att få en önskad hållfasthetsutveckling.

Skadebilden med aluminatcement är inte sprickbildning utan hållfasthetsförlust hos bindemedlet. De hydratiseringsprodukter som bildas initialt med aluminatcement kan ändra sin densitet med tiden och förlora sin hållfasthet. Det kan leda till nedbrytning av betongen. Nedbrytningen kan förvärras om andra mekanismer, som till exempel frostangrepp, också förekommer, se figur 7.34. Aluminatcement används inte längre i lastbärande konstruktioner, men det finns fortfarande kvar byggnader från 1920- till 1940-talet som byggts med aluminatcement.

ALUMINATCEMENT

Kan i Sverige finnas i lastbärande konstruktioner från 1920-40-talen.

Figur 7.34. En gjuten balkongplatta där betong med aluminatcement använts (till vänster). Nedbrytning av bindemedlet på grund av omvandling av hydratfasen (till höger). Foto: Anders Thorsén.



ANDRA SKADEMEKANISMER

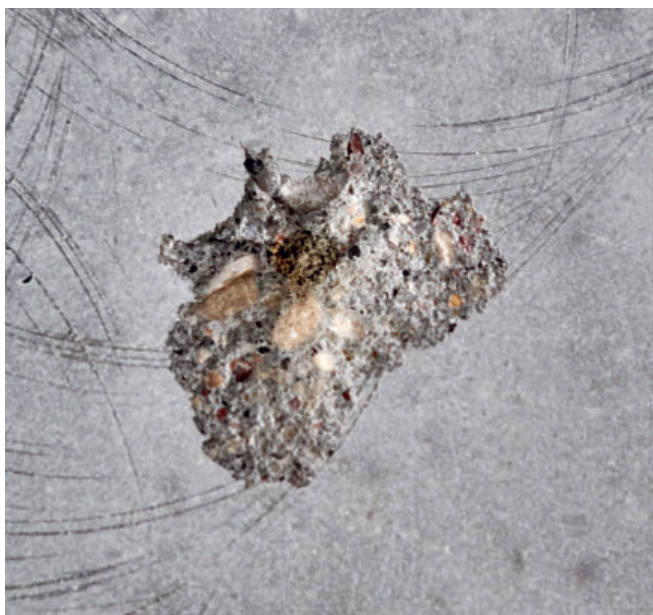
Pop-outs

Så kallade pop-outs kan ofta förekomma i betongkonstruktioner men medför oftast inte allvarliga risker för konstruktionen. Om det är fråga om ASR, som beskrivits tidigare, kan de emellertid indikera att allvarligare skademekanismer är för handen. Det kan finnas många orsaker till pop-outs men de sammankopplas vanligtvis med olika typer av mineralkorn strax under betongytan som expanderar med tiden. De expansiva kornen kan ha olika storlek men det är den slutliga volymexpansionen som avgör om det kommer att bildas pop-outs och med vilken storlek, se figur 7.35. Pop-outs kan ha följande orsaker:

- ballastkorn som är känsligt för ASR
- kalciumoxidkorn som hydratiserar till kalciumhydroxid och karbonatiserar till kalciumkarbonat
- korn av magnesiumoxid som hydratiserar till magnesiumhydroxid
- alltför stort korn av cementklinker
- korn av anhydrit (CaSO_4), bildar gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- poröst vattenmättat ballastkorn som fryser under vintern

Det finns andra korn som kan orsaka pop-outs på grund av expansion och det är därför viktigt att undersöka vad som är orsaken till expansionen. Pop-out uppträder vanligtvis inom de första månaderna eller åren av en byggnads livslängd.

Figur 7.35. Två exempel på pop-outs i betongväggar. Foto: Urs Müller.



Missfärgningar

När betongytan är missfärgad är det i första hand en estetisk skada som kan uppstå över tid. Det kan finnas många orsaker till missfärgningar såsom:

- beståndsdelar i betong som kan orsaka missfärgning
- biologisk påväxt
- fläckar från klottersanering
- utlakning av kalciumhydroxid

Betongen kan innehålla ballastkorn som avger tvåvärt järn i någon form. Det tvåvärda järnet kan transporteras till ytan och oxidera till trevärt järn som bildar järnhydroxid som fläckar ytan, se figur 7.36. Korroderad armering kan fläcka ytan på samma sätt. En annan typ av missfärgning kan uppkomma när slaggcement används. Betong med slaggcement är vanligtvis ljusgrå men ibland kan en blåliknade färg visa sig, se figur 7.37. Andra vanliga missfärgningar är fläckar från avlägsnande av klottor, där skuggor av klottret finns kvar eller klottret inte tagits bort ordentligt, se figur 7.38. Utlakning av kalciumhydroxid är en vanlig missfärgning. Kalciumhydroxid är en cementhydratiseringsprodukt, och när betong spricker kan det tränga ut till ytan vid regn. På ytan karbonatiserar det snabbt och bildar en tålig skorpa, figur 7.39.

Betong är ett poröst material och dess utseende varierar med tiden. Damm-partiklar och sot ackumuleras på ytan. Alger och lavar växer på ytan när den har karbonatiserat, men under de första månaderna är pH på en betongyta alltför hög för biologisk påväxt. Man bör därför ha en viss tolerans för hur en äldre betongyta ser ut och att dess ålder är en del av det visuella intrycket.



Figur 7.36. En brun järnhydroxid fläck på en betongyta som är orsakad av järnhaltiga ballastkorn. Foto: Katarina Malaga.



Figur 7.37. Blåaktiga områden på en annars ljusgrå yta är exempel på missfärgning. Foto: Urs Müller.

Figur 7.38 Missfärgning orsakad av dålig klottersanering. Foto: Katarina Malaga.



Figur 7.39. Järnvägsbron över Piteälven vid Sikfors. Bron är statligt byggnadsminne. Betongytan har fått en vit skorpa som huvudsakligen är karbonatiserad kalciumhydroxid som utlakats från betongen men även salter har påträffats. Foto: Sven Olof Ahlberg.



REFERENSER

- [1] ISO 16311-2 (2014). *Maintenance and repair of concrete structures - Part 2: Assessment of existing concrete structures*.
- [2] Trägårdh J, Nordström E, Appelquist K, Hassanzadeh M, Helsing E, Kalinowki M, Al-Ayish N, Janz M. (2019). *ASR i svensk betong - vägledning för nya och befintliga konstruktioner*, Stockholm, Svenska Betongföreningen. doi:10.13140/RG.2.2.33525.29926.
- [3] Reichert D, Boström M. (2017). *Betongkonstruktioner i vattenverk: Vägledning vid projektering* TT - Concrete structures in waterworks (eng), urn:nbn:se:uu:diva-325044
- [4] Andreasson P, Esping B, Johansson L. (1999). *Skador i virkestorkar av betong: [byggnader och utrustning, råd vid reparation och nybyggnad]*. Stockholm: Träteck. <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1079811/FULLTEXT01.pdf>.
- [5] St. John D.A, Poole A.W, Sims I. (1998). *Concrete petrography: a handbook of investigative techniques*. London: Arnold.
- [6] Müller U, Meng B, Rübner K. (2010). The analysis of solid components and their ratios, in: C. Maierhofer, H.W. Reinhardt, G. Dobmann (Eds.), *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*. Woodhead Publishing. pp. 180–197.
- [7] Maierhofer C. (red.), Reinhardt H.W, Dobmann G. (2010). *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures – Non-destructive testing methods* (Volume 2), Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- [8] SS-EN 12504-1 (2019). *Provning av betong i färdiga konstruktioner – Del 1: Borrkärnor – Uttag, undersökning och tryckprovning*.
- [9] Müller U. (2021). *Mineralische Baustoffe – Untersuchen, Bewerten und Konservieren*. Fraunhofer IRB Verlag.
- [10] Cabrera J.G. (1996). Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion, *Cement and Concrete Composites, Volume 18, Issue 1*, pp. 47-59. doi:10.1016/0958-9465(95)00043-7.
- [11] Blanksvärd T, Hedlund H, Popescu C. (2017). *Icke-förstörande provning i samband med tillståndsbedömning*. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF).
- [12] Rathod H, Debeck S, Gupta R, Chow B. (2019). Applicability of GPR and a rebar detector to obtain rebar information of existing concrete structures, *Case Studies in Construction Materials, II*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00240>.
- [13] Hugenschmidt J. (2010). Ground penetrating radar for the evaluation of reinforced concrete structures, in: *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*, Woodhead Publishing, pp.317-333. doi:<https://doi.org/10.1533/9781845699604.2.317>.
- [14] Annan A.P. (2003). *Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications*, Sensors & Software Incorporated.

- [15] Popa P. (2014). *Evaluation of ground penetrating radar as a non-destructive investigation method in concrete elements*, Chalmers University of Technology. <https://hdl.handle.net/20.500.12380/194107>.
- [16] Elsener B, Andrade C, Gulikers J, Polder R, Raupach M. (2003). Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures, *Materials and Structures*, vol. 36, pp. 461-471. doi:10.1007/BF02481526.
- [17] Polder R.B. (2001). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*, vol. 15, pp. 125-131. doi:[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1).
- [18] SS 137242 (1988). *Betongprovning – Hårdnad betong – Karbonatiseringsdjup*.
- [19] Tang L, Boubitsas D, Utgenannt P, Abbas Z. (2018). *Chloride Ingress and Reinforcement Corrosion - After 20 years' field exposure in a highway environment*, CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Built Environment, RISE - Research Institutes of Sweden, 2018. <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1282287/FULLTEXT01.pdf>.
- [20] SS-EN 13791 (2019). *Bedömning av tryckhållfasthet i färdiga betongkonstruktioner och förtillverkade betongelement*.
- [21] SS-EN 12390-3 (2019). *Provning av hårdnad betong – Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar*.
- [22] Brencich A, Cassini G, Pera D, Riotta G. (2013). Calibration and Reliability of the Rebound (Schmidt) Hammer Test. *Civil Engineering and Architecture* 1(3), pp. 66-78. doi:10.13189/cea.2013.010303.
- [23] SS-EN 12504-3 (2005). *Provning av betong i färdig konstruktion - Del 3: Bestämning av utdragskraft*.
- [24] SS-EN 12504-4 (2021). *Provning av betong i färdig konstruktion - Del 4: Bestämning av ultraljudbastighet*.
- [25] *Betonghandbok. Material - Del I, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong* (2017) Tredje, reviderade utgåvan Solna: Svensk byggtjänst.
- [26] SS-EN 12390-6 (2009). *Provning av hårdnad betong - Del 6: Spräckhållfasthet hos provkroppar*.
- [27] SS-EN 12390-13 (2021). *Provning av hårdnad betong – Del 13: Bestämning av elasticitetsmodulens sekantvärde vid tryck*.
- [28] NT BUILD 361 (1999). *Concrete, hardened: Water-cement ratio*. Nordtest.
- [29] Haschke M. (2014). *Laboratory Micro-X-Ray Fluorescence Spectroscopy*, Springer Series in Surface Sciences. doi:10.1007/978-3-319-04864-2.
- [30] Visser J.H.M, Van Zon Q.F. (2012). Performance and service life of repairs of concrete structures in *The Netherlands. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*, Taylor & Francis Group, Cape Town, pp. 876-881.
- [31] Boubitsas D, Tang L, Fridh K, Müller U, Utgenannt P. (2018).

- Frost Resistance of Concrete – Experience from Long-Term Field Exposure*, CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Built Environment, RISE - Research Institutes of Sweden. <http://ri.diva-portal.org/smash/get/diva2:1282289/FULLTEXT01.pdf>.
- [32] Jensen V. (2003). Elgeseter bridge in Trondheim damaged by alkali silica reaction: Microscopy, expansion and relative humidity measurements, treatment with monosilanes and repair, in: *9th Euroseminar. Microscopy Applied to Building Materials*, Trondheim.
- [33] Rodum E, Pedersen B.M, Holen Relling R. (2016). Field and laboratory examinations of an ASR-affected bridge – variation in crack extent and water content, in: *15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Sao Paulo, Brazil.
- [34] Mehta P.K. (1983). Mechanism of sulfate attack on portland cement concrete – Another look, *Cement and Concrete Research*, volume 13, Issue 3, pp. 401–406. doi:10.1016/0008-8846(83)90040-6.
- [35] Hooton R.D, Thomas M.D.A. (2002). The use of limestone in Portland cements: Effect on thaumasite form of sulfate attack. *Cement and Concrete Composites* 24(3), pp. 351-359. Skokie, USA.
- [36] Crammond N, The thaumasite form of sulfate attack in the UK, *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, issue 8, pp. 809–818. doi:10.1016/S0958-9465(03)00106-9.
- [37] Romer M, Holzer L, Pfiffner M. (2003). Swiss tunnel structures: Concrete damage by formation of thaumasite. *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, issue 8, pp. 1111–1117. doi:10.1016/S0958-9465(03)00141-0.
- [38] Taylor H.F, Famy C, Scrivener K. (2001). Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, issue 5, pp. 683–693. doi:10.1016/S0008-8846(01)00466-5.



ÅTGÄRDA BETONG

Elisabeth Helsing och Urs Müller

Reparation av betongkonstruktioner är ur teknisk synvinkel en åtgärd för att underhålla deras form och funktion. Angreppssättet är pragmatiskt. Skadat material tas bort och ersätts med reparationsmaterial och sprickor injekteras. Om det är nödvändigt för att upprätthålla bärförmågan, installeras stålförankringar eller annat förstärkningsmaterial så att konstruktionen förblir säker. Ytor kan täckas eller impregneras med moderna skyddssystem. Alla dessa åtgärder vidtas för att bibehålla de huvudsakliga funktioner som byggnaden dimensionerats och utformats för eller för att anpassa den till en önskad ny användning.

STÄLLNINGSTAGANDEN INFÖR ÅTGÄRDER

Betong är ett vanligt konstruktionsmaterial eftersom det varit lättillgängligt i stor mängd och är förhållandevis billigt. I kombination med armeringsstål har materialet utmärkta tekniska egenskaper och kan utformas på många olika sätt, se figur 8.1. När kulturhistoriskt värdefulla byggnadskonstruktioner ska repareras är det viktigt att ställa sig frågan hur det ska genomföras så att de kulturhistoriska värdena bevaras. Ska ansträngningarna fokusera på funktionen eller på byggnadens karaktär och historia? I de exempel som visas i figur 8.1 och 8.2 är avgörandet ganska enkelt eftersom de två byggnaderna i den tidigare tyska flygprovvningsanstalten som tagits ur bruk. Men hur ska man göra när det gäller byggnader, broar och andra konstruktioner som fortfarande används?

Att bevara betongkonstruktioner kommer alltid att innebära en kompromiss mellan **kulturhistoriska värden**, **säkerhet** och **konstruktionens funktionalitet**. Principer som stämmer överens med *Venedigfördraget* eller *Burrafördraget* [1, 2] kommer inte att vara tillräckliga när det gäller bevarande av betongkonstruktioner. Krav på konstruktionens säkerhet blir ofta viktigare än fördragens principer för bevarande. Det är också nödvändigt att beakta betongens egenskaper. Om det uppstått en skada är det inte alltid tillräckligt att bara göra lagningar om det finns behov av att avlägsna större delar av betongens yta och den underliggande armeringen.



Figur 8.1. En vertikal vindtunnel som använts för att undersöka flygplan. Betongkonstruktionen är från 1930-talet och ingår i den tyska tidigare flygprovvningsanstalten i Berlin Adersdorf. Byggnaden har restaurerats och åtnjuter idag skydd som kulturminne. Foto: Urs Müller.

BALLASTPROBLEMET

All reparation av betongytor med frilagd ballast ställer stora krav på att man hittar ersättningsmaterial med exakt samma kulör och textur som originalet. Detta kan vara ett mödosamt arbete och ofta tvingas man nöja sig med ballast som "nästan" stämmer med utgångsläget. Foto: Sven Olof Ahlberg, 2018.

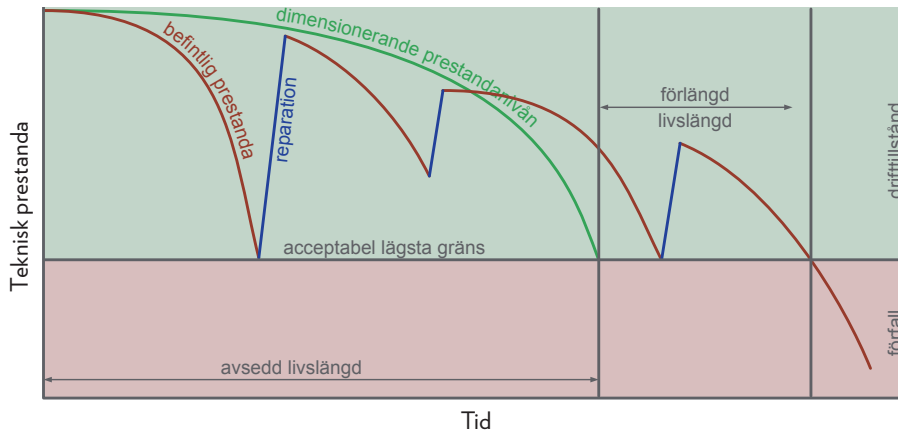


Figur 8.2. Även denna vindtunnel är en del av den tyska flygprovninganstalten i Berlin-Adersdorf. I tunneln testades flygplans aerodynamiska egenskaper. Foto. Urs Müller.

KONSTRUKTIONENS LIVSLÄNGD

Betongkonstruktioner har dimensionerats för att fungera tillfredsställande under en viss tidsperiod. För att vara mer precis förväntas konstruktionen uppnå en viss avsedd livslängd, en så kallad dimensionerande livslängd [3]. Livslängden definieras som en antagen tidsperiod under vilken en konstruktion eller en del av den ska användas. Under denna tidsperiod förutsätts förväntat underhåll genomföras, med utan att konstruktionen ska riskera att vara en säkerhetsrisk för människor [3]. En byggnads eller konstruktions tillstånd bör vanligtvis övervakas och inspekteras regelbundet för att kunna utföra kontinuerligt underhåll. När det gäller trafik- och energianläggningar är det olika statliga myndigheter som ansvarar för underhållet. För bostadsbebyggelse samt offentliga, kommersiella eller industriella byggnader är det fastighetsägaren som har ansvar för att aktivt underhålla byggnaden.

I ett idealfall bör en byggnad först underhållas kontinuerligt och när den nått sin avsedda livslängd bör byggnaden nedmonteras eller så bör livslängden förlängas, men så är dock sällan fallet i verkligheten, se figur 8.3. I många fall behöver konstruktionen repareras innan den avsedda livslängden uppnåtts vilket innebär att byggnaden i stort sätt återförs till den dimensionerande prestandanivån [4]. Genom kombinerade reparations- och underhållsåtgärder



Figur 8.3. Prestanda- och livslängdsförhållanden för en konstruktion med respektive utan åtgärder. Illustration: Urs Müller.

kan en konstruktions livslängd förlängas utöver den avsedda livslängden. Om inga underhåll- eller reparationsåtgärder genomförs kommer tillståndet till slut att vara oreparabelt och konstruktionen kan betraktas som en ruin.

Många av de parametrar som påverkar livslängden hos en konstruktion är relaterade till skador som beror på dess exponering för omgivningen, men det finns även andra orsaker. När det gäller betong är följande skademekanismer vanligast [5]:

- Armeringskorrosion
- Ytkorrosion
- Expanderande angrepp
- Urlakning
- Sprickbildning orsakad av temperatur- eller fuktgradienter
- Olyckslast
- Överbelastning
- Estetiska skador
- Förlust av sammanhållning hos bindemedlet
- Brandskador

Av alla dessa skademekanismer är armeringskorrosion den vanligast förekommande [6] Som beskrivits i kapitlet *Betong är en blandning* initieras korrosion av endera karbonatisering eller kloridinträngning. Karbonatiseringen sänker betongens pH, och såväl kloridjoner som ett lågt pH, förstör det passiverande ytlaget på stålarmering vilket leder till korrosion.

Skademekanismerna påverkar beständigheten hos betongmaterialet. Termen *beständighet* används främst för material och *livslängd* för konstruktioner. Eurokoderna [3] använder dock termen "beständiga bärverk" där bärverk står för lastbärande konstruktioner, men kopplar ihop det med nedbrytning av material. Beständighet och livslängd är visserligen relaterade till varandra men relationen är komplex eftersom det finns många beständighetsrelaterade



Figur 8.4. Två exempel på betongytor. Till vänster avtryck av träform inklusive spikhuvuden. Till höger en fasad med frilagd grov ballast. Foto: Urs Müller.

TERMODYNAMIK

Läran om värme och dess omvandling till andra energiformer.

parametrar. Dessutom använder forskningen accelererade laboriemetoder för att mäta beständighet med belastningar som är betydligt mer krävande än den påverkan som den verkliga miljön har på konstruktionen. Termodynamiska och numeriska modeller som förutspår skador tar vanligtvis bara med ett begränsat antal miljöparametrar och representerar därför inte helt verkliga förhållanden. Prediktiva modeller kan därför bara ge en indikation om materials tillstånd efter att det har varit exponerat en viss tidsperiod för en specifik miljö.

UNDERHÅLL OCH REPARATION

Förbättring av en konstruktions tillstånd sker genom underhåll och reparationer. Underhållsåtgärder kan till exempel vara målning, dränering eller omläggning av läckande tak. Reparationer av betongkonstruktioner minskar vanligtvis inverkan av en eller flera av skademekanismerna som listats ovan och höjer prestandanivån till i närheten av den ursprungliga, se figur 8.3. I många fall är det möjligt att förlänga livslängden avsevärt genom välplanerat underhåll och reparation. Ofta är det inte bara önskvärt att förlänga livslängden hos historiska betongkonstruktioner av historiska skäl. Det kan även finnas ekonomiska grunder eftersom det ofta kostar mindre att underhålla och reparera en befintlig konstruktion än att uppföra en ny.

För reparation av befintliga betongkonstruktioner används speciella material och metoder. Ofta tillförs ett nytt skydd av ytan i form av beläggning eller impregnering. Åtgärderna inriktas vanligtvis på att återupprätta den funktionella prestandan och garantera en säker användning av konstruktionen. Trots det bör kulturmiljövårdens principer beaktas som att respektera konstruktionens historia och karaktär. Detta gäller i synnerhet för

arkitektoniska ytor som till exempel formavtryck och ytor med frilagd ballast, se figur 8.4. I allmänhet bör man reflektera över hur materialet betong ska värderas. Är det viktigt att originalmaterialet bevaras som historiskt dokument som så ofta görs i kulturhistoriska konstruktioner av sten, trä, murverk eller jord? Eller ska det ses som utbytbart som vid en vanlig betongreparation? Det finns inte ett allmängiltigt och entydigt svar på dessa frågor, utan de behöver besvaras individuellt för varje projekt [7] För betongkonstruktioner bör dock följande allmänna princip för kulturhistoriskt värdefulla byggnader tillämpas: Gör så mycket som krävs men så lite som möjligt!

Standarden SS-EN 1504-9, bilaga A.6.2 [8] anger principer och metoder för skydd och reparation. Dessa principer återspeglar en verktygslåda med metoder för reparation och förstärkning ur vilken man kan välja fritt för att uppnå bästa tekniska resultat. Det krävs emellertid försiktighet för att inte äventyra kulturmiljövårdens principer genom att blint använda metoder som fungerar bra tekniskt sett. För varje objekt bör en plan för varsam hantering och varsamma åtgärder utarbetas och implementeras. Den bör användas för att besluta om vilka åtgärder som är nödvändiga, hur de påverkar byggnadens karaktär och vilka andra alternativ som är möjliga. Principerna i SS-EN 1504-9 är:

- Princip 1: Skydd mot inträngning
- Princip 2: Fuktkontroll
- Princip 3: Restaurering av betong
- Princip 4: Konstruktiv förstärkning
- Princip 5: Öka den fysiska motståndskraften
- Princip 6: Öka motståndskraften mot kemiskt angrepp
- Princip 7: Upprätthålla eller återupprätta passivitet
- Princip 8: Öka resistiviteten
- Princip 9: Katodisk övervakning
- Princip 10: Katodiskt skydd
- Princip 11: Kontroll av anodiska områden

BETONGREPARATIONER OCH REPARATIONSMATERIAL

Betongreparationer är sedan många år en etablerad vetenskapsgren som vuxit i betydelse då många betongbyggnader har en ålder väl över 50 år. Innan betongskador repareras krävs att en noggrann tillståndsbedömning, vilket beskrivs i kapitlet *Tillståndsbedömning och skademekanismer*. Tillståndsbedömningen ska ta fram information om konstruktionen, dess ursprungsfunktion och konstruktiva utformning, typ av betong som använts (hållfasthet, *vct*, sammansättning på bindemedel och ballast) samt typ och omfattning av

HISTORISKT DOKUMENT

Betongmaterialet i sig kan ha ett kulturhistoriskt värde. Gör så mycket som krävs men så lite som möjligt.

skador. För att planera åtgärder bör all information bedömas i ljuset av byggnadens kulturhistoriska värde och dess nuvarande och framtida användning. För att genomföra detta behöver experter på olika områden engageras: kulturvårdsexperter, konstruktörer, materialexperter samt företag med erfarenhet av varsam reparation av betongkonstruktioner.

Vanligtvis omfattar betongreparationer dels ersättning av skadat material, dels skyddande åtgärder. Det kan också innefatta injektering av sprickor och förstärkning av bärande delar. Vilken reparationsmetod som används styrs ofta av typen av skada. Om betongytan är skadad av armeringskorrosion, frostsador och sulfatangrepp byts det skadade materialet ut mot reparationsmaterial. Vid skador som också påverkar djupare delar av betongen, till exempel sprickbildning på grund av ASR (alkalisilikareaktion) eller överbelastning, kan injektering av sprickor bidra till att den ursprungliga funktionen återställs.

I Sverige sammanfattas reparationsprinciperna i den IT-baserade handboken *Betongreparationer* som givits ut av Rebet (Nätverket för betongreparationer) [9]. Kontroll av reparationer och reparationsmaterial ges i standarden SS-EN 1504 *Betongkonstruktioner - Produkter och system för skydd och reparation* och dess tio delar. SS-EN 1504-9 beskriver allmänna principer för användning av reparationsprodukter och reparationssystem [8].

Reparationsåtgärder startar med preparering av betongunderlaget [9, 10]. Detta är nödvändigt för att reparationsmaterial och -system ska fungera tillsammans med den befintliga betongen, samt att de är beständiga och funktionella. Det förutsätter främst att vidhäftningen mellan underlaget (betong eller armeringsstål) och reparationsmaterialet är så bra som möjligt. Preparering av underlaget kan omfatta [10]:

- Avlägsnande av beläggningar och filmer, till exempel färg och smuts
- Avlägsnande av ytskikt med svag vidhäftning
- Avlägsnande av täckande betongskikt eller bruksskikt
- Rengöring av korroderad armering
- Rengöring från damm och smuts

ERSÄTTNING AV BETONG

Det är nödvändigt att avlägsna betong när det täckande betongskiktet har karbonatiserat eller är besmittat med klorider. I dessa fall måste betongen avlägsnas ner till opåverkad betong, som inte innehåller klorider eller är karbonatiserad. Information om karbonatiseringsdjup och inträngningsdjup för klorider erhålls från tillståndsbedömningen. En översikt av olika borttagningsmetoder ges i tabell 8.1 [9].

Betongborttagningsmetoder ska inte leda till skador på armeringen. Spännarmering är särskilt känslig för skador och mekaniska och termiska borttagningsmetoder bör användas med stor försiktighet för att undvika skador på sådan armering [9].

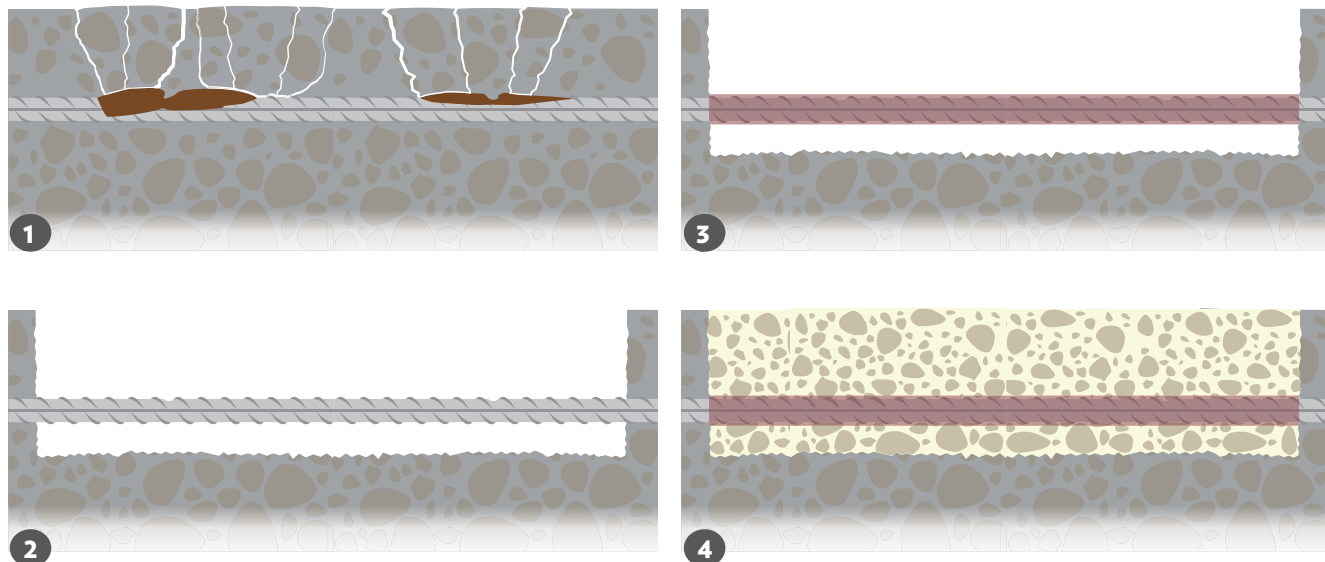
Metod	Djupverkan	Verkningsätt	Miljöeffekter
Blästring	0–10 mm	Sand, stålkulor eller vatten	Dammbildning, hög bullernivå
Slagborrning	Allt mellan små och stora hål	Borr eller krona av hårdmetall	Dammbildning, hög bullernivå, vibrationer
Flamrensning	0–6 mm	3100 °C varm låga skalar eller bränner bort betongyttskiktet	Hetutveckling, hög bullernivå, eventuella giftiga rökgaser
Vattenbilning	Obegränsad	Vatten med högt tryck spräcker materialet	Hög bullernivå, behov av stora mängder av vatten
Fräsning	6–100 mm	Mekanisk metod; fräshuvud tar bort ytskiktet	Hög bullernivå, dammbildning, vibrationer
Mekanisk bilning	Obegränsad	Bilningsverktyg krossar betongen	Hög bullernivå, dammbildning, vibrationer
Slipning	0–10 mm	Roterande skiva av hårt material slipar bort ytskiktet	Dammbildning, hög bullernivå
Spräckning	0–500 mm	I borrhål placeras utrustning som expanderar och spräcker betongen	Hög bullernivå, tungt arbete
Sågning	Obegränsad	Med sågblad, vajer skär eller kedja	Hög bullernivå

Tabell 8.1. Sammanställning över borttagningsmetoder. Källa: Rebets IT-baserade handbok *Betongreparation*.

Figur 8.5. Exempel på olika betongreparationsåtgärder:

1. Skadat tillstånd
2. Borttagning av betong och rengöring av korroderad armering
3. Skyddande beläggning på armeringen
4. Ifyllning med reparationsmaterial

Illustration: Urs Müller.





Figur 8.6. Olika steg vid betongreparation:
Borttagning av betong med hötrycksvätt.



Borttagen betong med rengjord armering.
Lägg märke till den nästan vertikala kanten.



Skyddande beläggning på armeringen.



En profil påförs för hand och formas efter befintlig betong.



Ett exempel på en betongreparation där avtrycket av formen återskapas i det färskta reparationsmaterialet för att ge ytan ...



... samma utseende som hos den ursprungliga betongen.
Samtliga fotografier: Sven Olof Ahlberg.

Om det täckande betongskiktet avlägsnas för att komma åt korroderad armering måste man ofta ta bort ett par centimeter under armeringen. När problemet är korrosion kan armeringsstången rengöras helt och där efter beläggas med ett skydd eller tas bort och ersättas med ny armering, se figur 8.5.

När betong tas bort ska det utföras med skarpa kanter och så nära vinkelrätt mot betongytan som möjligt, se figur 8.5 och 8.6. Plana avsmalnande borttagningar, som tunnas ut mot kanterna, måste under alla omständigheter undvikas. För att undvika framtida korrosion appliceras ofta en polymerbaserad skyddande beläggning på den rengjorda armeringsstångens yta. Innan appliceringen måste armeringsstången vara fullständigt torr och ren. Skyddande beläggningar baseras ofta på epoxihartser eftersom dessa ger en god vidhäftning mot cementbaserade reparationsmaterial. Skyddande beläggningar kan emellertid ibland ge motsatt effekt, om inte beläggningen omger armeringsstålet fullständigt eller om den blir skadad. Om så är fallet, fungerar områden med oförstörd beläggning och med skadad beläggning som en elektrokemisk cell som kan initiera korrosion [9]. Om armeringen inte är belagd kommer reparationsbruket att skydda stålet genom sin höga alkalinitet, men då krävs att täcksiktet är tillräckligt. Därför används ofta skyddsbeläggning om täcksiktet efter reparation understiger 10 mm [10].

Om armeringen ska ersättas bör samma diameter och stålqualität användas. Är det täckande betongskiktet mycket tunt kan användning av armering baserad på förstärkt polymerfiber (FRP) övervägas. Räfflade, sandpapprade eller gängförsedda FRP-stänger finns tillgängliga för att öka vidhäftningen mot reparationsmaterial. Stänger av rostfritt stål kan också användas för att ersätta vanlig stålarmering och rostfritt stål har uppvisat bra egenskaper för reparationsändamål [11].

Efter rengöring och eventuell beläggning kan reparationsmaterialet appliceras. Innan appliceringen måste allt damm och all smuts avlägsnas och betongunderlaget måste fuktas tillräckligt för att ge en god vidhäftning mellan underlaget och reparationsmaterialet. För det mesta används följande material [10].

- Betong enligt SS 137003
- Våt- eller torrsprutad sprutbetong enligt SS-EN 14487
- Cementbruk
- Polymermodifierat cementbruk eller betong (PCC = polymer modified cement concrete or mortar)
- Polymermodifierat cementbruk eller betong, applicerat med sprutning (SPCC = sprayed polymer modified cement concrete or mortar)
- Betong eller bruk med polymerharts som bindemedel (PC-polymer betong)

Produkter för icke-konstruktiv eller konstruktiv reparation av betong ska vara CE-märkta och måste uppfylla kraven i SS-EN 1504-3 [12], om de inte är



Figur 8.7. Reparerade sprickor i fasad-element på ett bostadshus i Tokyo. Orsaken till sprickorna är okänd. Foto: Urs Müller.

nämnda ovan. Kraven i denna standard säkerställer en minsta kompatibilitet och arbetbarhet för de olika produkterna.

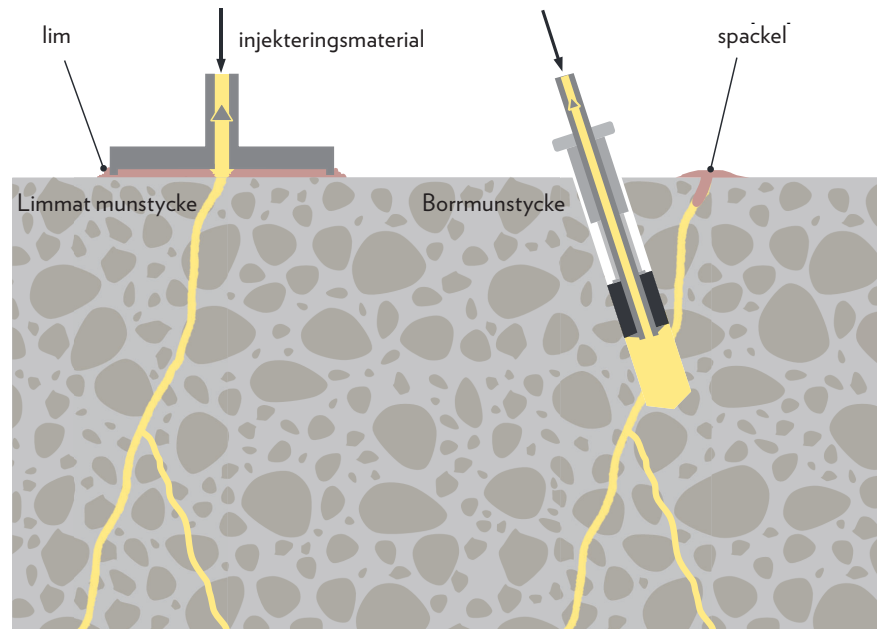
Småreparationer appliceras för hand och ytan av reparationsmaterialet profileras med en murslev eller andra verktyg. För detta används ofta PCC eftersom det har god vidhäftning mot underlaget och uppvisar en viss tolerans gentemot fukt- och temperaturrörelser i den ursprungliga betongen. Detta är ofta fördelaktigt för reparationsområden där hög fuktighet och temperaturvariationer förekommer.

Reparationer av större områden följer samma principer. Reparationsmaterialet kan appliceras dels genom igjutning, vid till exempel horisontella områden eller mot form, dels genom sprutning, vid vertikala eller överhängande ytor.

REPARATION AV SPRICKOR

Om det finns sprickor i betongen kan det vara nödvändigt att försluta dem med injektering. Sprickor medger inträngning av fukt och luft, det vill säga koldioxid. Fukten kan dessutom föra med sig skadliga joner, som klorider och sulfat. Att försluta sprickor med injektering innebär att fylla dem helt med injekteringsmaterial, som kan fylla sprickor ner till en bredd på 0,05 till 0,1 mm [9].

Som injekteringsmaterial används cementpasta eller polymerhartser som epoxiharts, polyuretan eller akrylat [9]. Injekteringsprodukter ska uppfylla kraven i standarden SS-EN 1504-5 *Betongkonstruktioner - Produkter och system*



Figur 8.8. Princip för sprickreparation i betong med två typer av munstycken. Dels ett munstycke som är limmat på ytan, dels ett som är instuckat i ett borrhål. Illustration: Urs Müller.

för skydd och reparation - Del 4: Produkter för vidbäftning mot betong [13]. Innan injekteringen kan påbörjas måste betongens yta rengöras. Därefter ska alla synliga spricköppningar på betongens yta förslutas med ett snabbhärdande material, som till exempel cement eller polymerspäckel. Detta görs för att undvika blödning av injekteringsmaterial genom icke förslutna sprickor. Injekteringsmunstyckena kan antingen klistras mot ytan eller kilas fast i ett hål, se figur 8.8. Munstycken för borrhål har en gummipackning som kan skruvas åt så att borrhålet helt förseglas. Munstyckena har vanligtvis en envägsventil eller en stoppventil. Ventilens funktion är dels att möjliggöra att ett tryck kan byggas upp, dels för att undvika läckage av bruk från injekteringspunkten. Antalet munstycken anpassas till sprickfrekvensen. Om det finns många sprickor måste flera munstycken installeras, eftersom man inte kan förvänta sig att alla sprickor är förbundna med varandra. En slang förbinder munstyckena med injekteringspumpen. Pumpen injekterar lagningsbruket i sprickorna med ett tryck på upp till 3 bar (0,3 MPa) [9]. Det finns handdrivna pumpar för mindre arbeten och motoriserade pumpar för mer omfattande injektering. Pumptrycket måste anpassas till användningsområdet. Ett alltför högt tryck under injekteringen kan orsaka skada på bärande konstruktionsdelar. Om ett cementbaserat injekteringsbruk används, kan det vara nödvändigt att fukta sprickorna genom att injektera vatten i spricksystemet. Under hela injekteringen måste processen övervakas för att undvika oavsiktligt läckage av injekteringsmaterial på oväntade platser.

De metoder som används för sprickinjektering är också lämpliga för att fylla kaviteter eller andra större hålrum som till exempel ballastansamlingar. Det som är viktigt är att det finns en hydraulisk förbindelse mellan injekteringsstället och det tomma utrymmet. På samma sätt som för sprickor måste processen övervakas noggrant för att undvika oavsiktligt läckage av större volymer injekteringsmaterial.

SKYDD AV YTAN

Ytskydd vid betongreparationer anbringas främst för att undvika inträngning av vätskor, gaser eller joner. Vätskorna kan vara vatten men även syror eller oljor som fotogen eller råolja. En annan orsak till att använda ytskydd kan vara för att förstärka betongytan. Ytskyddssystem är enligt SS-EN 1504-2 [14] uppdelade på två huvudkategorier:

- Impregneringar
- Beläggningar

Impregneringar kan ha hydrofoba det vill säga vattenavvisande, förstärkande eller förseglade egenskaper, se figur 8.9 och 8.10. Beläggningar kan bilda tunna filmer (<1 mm) eller tjocka flerlayersystem (>1 mm). Impregneringar är kemiska medel som till viss del tränger in i betongens porsystem. Inträngnings-



Figur 8.9a & b. På Holocaust Memorial i Berlin har betongytorna behandlats med en hydrofobisk impregnering för att göra ytan vattenavvisande. Foto: Urs Müller.

genom att dela på en syremolekyl [17, 18]. Eftersom betong har ganska små kapillärporer används sällan siloxaner, då de har större molekylstorlek.

Direkt efter appliceringen av impregneringen börjar silanerna hydrolysera, vilket innebär att de avger alkohol och tar upp vatten. Efter en stund börjar de kondensera, en process som formar ett silikonhartsnätverk på porernas yta. Silikonhartsnätverket har kedjor av avstötande kemiska föreningar som till exempel oktylgrupper fästa till sig, se figur 8.11. Hela processen tar vanligtvis 15 till 20 dagar under normala omgivningsförhållanden, det vill säga inte för kallt eller varmt, inte för torrt eller fuktigt.

Silan- eller siloxanbaserade medel är vanligtvis tillgängliga i flytande form eller som gel [18]. Flytande medel är dispergerade i vatten och måste appliceras genom sprutning eller som flödande täckning [20]. Eftersom flytande medel bara tränger in tillräckligt djupt i mycket porös betong (högt *vct*) utvecklade man geler. Geler innehåller det vattenavvisande medlet i form av en pasta som kan borstas eller rollas på ytan. Fördelen med gelapplicering är att kontakttiden mellan medlet och underlaget är mycket längre, vilket ger en djupare inträngning av silanmolekylerna i betongen. Beroende på *vct* kan en gel tränga in mellan 2 och 20 mm i betongen [18].

Innan impregneringsmedlet eller beläggningsmedlet appliceras måste betongytan vara tillräckligt ren. I synnerhet kräver impregnering en yta där por-systemet i betongen inte är blockerat av smuts eller damm. För hydrofoberande impregnering är det också viktigt att betongytan inte är våt utan torr. Under kondensationsprocessen hos silaner avges vatten. Om betongytan är våt blockeras kondensationen och hindrar skapandet av ett effektivt silikonhartsnätverk. Betongen kan fortfarande ha vattenavvisande egenskaper, men inte fullt ut.

Andra impregneringar används som förstärkare. Vissa produkter baseras på alkalisilikater (vattenglas). Alkalisilikater är starkt alkaliska och löses upp i vatten. För betong används vanligtvis blandningar av kalium/natrium och litiumsilikat. Alkalisilikat kondenserar till en amorft silikat i en ände, vilken kan fungera som en tillkommande bindning i en betong som förlorat en del av sin sammanhållning. Reaktionen hos alkalisilikat kan beskrivas som:



Metoden används för att realkalisera betong, men eftersom inträngningsdjupet hos medlet bara är 5–20 mm är effekten begränsad.

Impregneringar som förseglar ytan består till största delen av polymerer som polyuretan eller epoxiharts. Vissa produkter kan också innehålla funktionella silangrupper för att bli vattenavvisande. Eftersom båda produkterna har stora molekyler begränsas inträngningsdjupet till den första millimetern (utom för betong med mycket högt *vct*) och produkterna kan mer betraktas som tunna beläggningar.

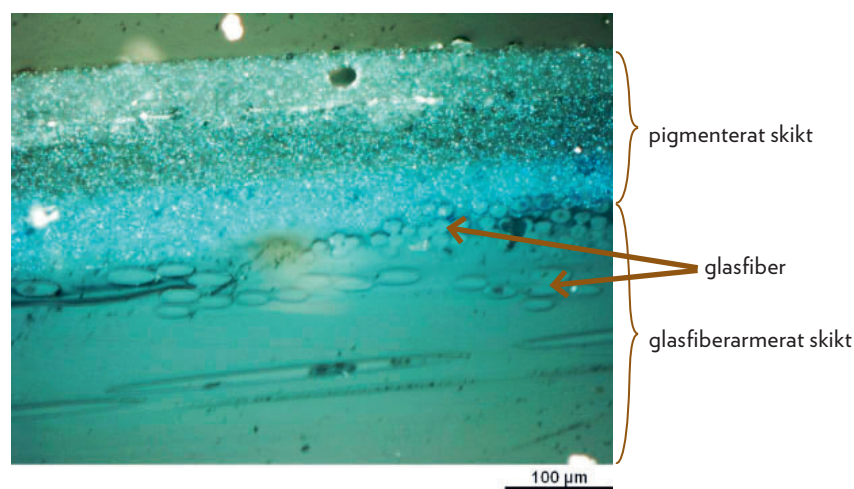
Impregneringsprodukter som används för reparation av betong ska vara

certifierade och uppfylla kraven i SS-EN 1504-2 [14]. Om det huvudsakliga syftet med impregneringen är att förhindra kloridinträngning kan *Nordtest-metoden* (NT Build 515) [21] användas för att välja den mest lämpliga produkten [16]. Nordtestmetoden är även en bra metod för att utvärdera allmän prestanda hos vattenavvisande impregneringar.

Jämfört med stenytor är applicering av hydrofoberande produkter på betongytor vanligtvis mindre problematiskt. Effekter som beskrivs av U. Muller, F. Weise, S. Grell (2006) [22] är mindre troliga, eftersom permeabiliteten för vattenånga normalt är mindre än hos porös sten. Om däremot den behandlade ytan har ett *vct* högre än 0,80 och är utsatt för extrema fuktillstånd bör alternativa åtgärder övervägas.

BELÄGGNINGAR

Skyddande beläggningar baseras för det mesta på filmbildande organiska polymerer. De polymerer som används är bland annat polyuretan, epoxiharter, omättad polyester eller akrylat. För speciella ändamål kan alkalisilikater, det vill säga vattenglas, som blandats med filler användas. Vissa filler kan vara



Figur 8.12. Del av ett skyddande beläggningssystem med pigmenterade skikt och glasfiberförstärkta skikt. Beläggningens totala tjocklek är 3,5 mm (mikrograffoto av ett polerat tvärsnitt). Foto: Urs Müller.

reaktiva, exempelvis flygaska, som tillsammans med alkalisilikatet skapar beständiga alkalisilikathydrat.

Beläggningarnas huvudsakliga funktion är att hindra vätskor, gaser (O_2 och CO_2) eller joner från att tränga in i betongen [9]. De har vanligtvis en mycket låg permeabilitet för vattenånga eller andra gaser och är uppbyggda av olika lager. Man bör därför hellre prata om beläggningssystem. Vissa beläggningar kan vara elastiska och kan överbrygga sprickor med en viss bredd. På grund av polymerens elasticitet kan beläggningen i viss mån röra sig till exempel under dagliga temperaturcykler. Beläggningar som är mer än 2 mm tjocka kan



förstärkas med glasfibrer och appliceras i flera lager, se figur 8.12. Beläggningssystem kan pigmenteras för att inte enbart fungera som beläggning utan också för att förändra betongytans utseende. Skyddande beläggningssystem kan dessutom ha ett översta lager som är vatten och/eller oljeavstötande för att förstärka det övergripande skyddet och göra det lättare att rengöra ytan.

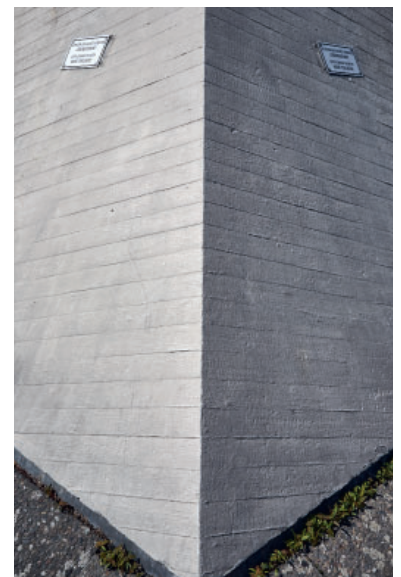
Beläggningssystem används som en åtgärd för att förhindra armeringskorrosion hos kritiska bärande delar. Genom att minska eller även helt förhindra inträngning av syre, koldioxid och kloridjoner kan initieringen av korrosion av armeringsstål fördröjas betydligt. Detta är särskilt viktigt för förspända betongelement eftersom brott på grund av korrosion kan leda till plötslig kollaps av bärverket. Ett exempel på en sådan kollaps är kongresshallen i Berlin, numera "Haus der Kulturen", som ritades av den amerikanska arkitekten Hugh Stubbins och var färdig 1957, se figur 8.13 och 8.14. Takkonstruktionen var särskilt innovativ. Den bestod av biaxiala böjda element med kantbalkar av förspänd lättbetong runt omkretsen. År 1980 kollapsade plötsligt taket delvis och begravnade en person. Orsaken till kollapsen identifierades senare som brott i spännarmeringen i ändbalkarna orsakad av korrosion [23]. Efter återuppbyggnad, och för att undvika fortsatt korrosion behandlades bärverksdelarna i betong (ändbalkar, pelare mm) med ett skyddande beläggningssystem.

På samma sätt som för impregnering ska skyddande beläggningssystem uppfylla kraven i SS-EN 1504-2.

KLOTTERSKYDDSSYSTEM (AGS)

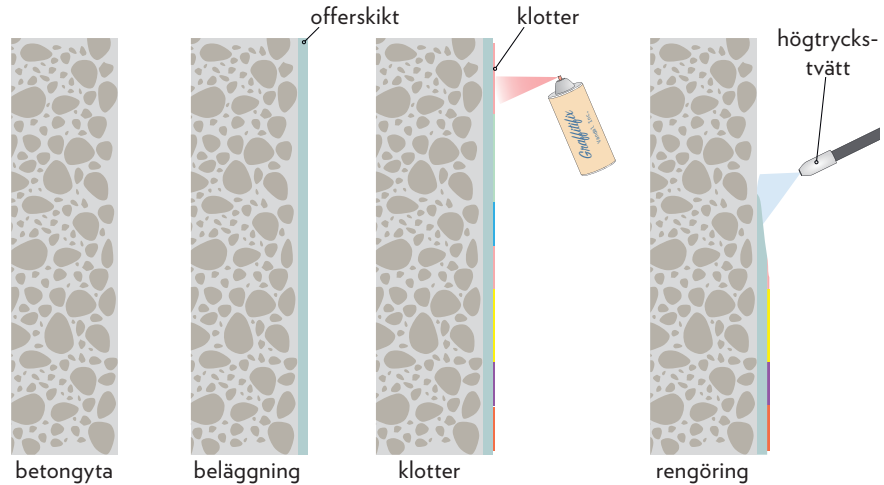
Klotterskydd är i allmänhet kemiska ämnen i form av impregneringar eller beläggningar som appliceras på ett underlag för att förenkla borttagande av klotter. Om det klottras på en behandlad yta kan den tvätts bort med

Figur 8.13. Kongresshallen Haus der Kulturen i Berlin har en stomme av förspänd armering som kollapsade 1980. För att fördröja korrosion av armeringen målades betongen med ett beläggningssystem som ska minska inträngning av syre, koldioxid och kloridjoner. Foto: Urs Müller.



Figur 8.14. Detaljbild av Haus der Kulturen efter åtgärder. För att undvika fortsatt korrosion behandlades bärande betongdelar som ändbalkar och pelare med ett skyddande beläggningssystem. Foto: Urs Müller.

Figur 8.15. Princip för ett offersystem för klotterskydd. Illustration: Urs Müller.



Figur 8.16. Klotterskyddssystem på betongpelare i centrala Berlin. Skyddet som applicerats från marknivå upp till tre meters höjd gör betongytan mörkare och glansigare. Foto: Urs Müller.

vattensprutning eller med ett speciellt rengöringsmedel som är anpassat för det använda klotterskyddet. Två huvudsakliga system kan särskiljas:

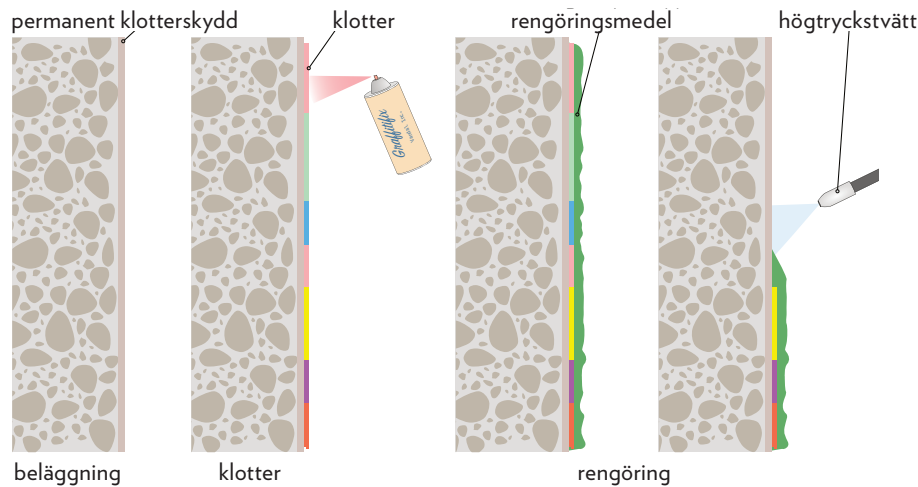
- Offersystem
- Permanenta system

Offersystem för betong består företrädesvis av vaxbaserade system vilka appliceras som beläggningar. Principen är att applicera beläggningen innan betongytan utsätts för klotter. När det har klottrats kan beläggningen lätt avlägsnas genom sprutning med het vattenånga, se figur 8.15.

Vaxbaserade klotterskydd ger ett synligt intryck som beror på skillnad i glans mellan behandlad och obehandlad yta. Klotterskydd appliceras normalt inte på alla betongytor utan bara på vertikala delar som kan nås från marknivån och upp till 3–3,5 meters höjd, se figur 8.16. Efter borttagning måste ett offersystem för klotterskydd påföras igen.

Permanent klotterskydd är antingen impregneringar baserade på fluorerade silaner eller baserade på filmbildande organiska polymerer som fluorerad polyuretan. Den sistnämnda ger täta beläggningar och kan utgöra en del av ett skyddande beläggningssystem som beskrivit i tidigare avsnitt [24]. Båda appliceras genom sprutning (impregnering) eller med roller (beläggning) i flera skikt. Om det har klottrats på en behandlad yta används ett rengöringsmedel, vanligtvis i gelform, för att avlägsna klotret. Efter uppblötning avlägsnas klotret och rengöringsmedlet genom högtryckstvätt med hett vatten, se figur 8.17. Permanenta system tål mer än tio tvättar innan nytt klotterskydd måste appliceras.

Impregnerande klotterskydd är vanligtvis baserade på silaner. Silanerna kan ges ytterligare funktioner eftersom kolvätekedjan i silanmolekylen gör den vattenavvisande. Om en del av kolatomerna i kedjan byts ut mot fluoratomer blir silanen både vattenavvisande och oljeavvisande [25]. Oljeavvisande



Figur 8.17. Princip för permanent offersystem för klotterskydd. Illustration: Urs Müller.

beläggningar används på pekskärmar. Den oljeavvisande förmågan kan också utsträckas till att gälla andra kolväten till exempel till polymeriska bindemedel i färger. Fluorerade silaner används därför som klotterskydd på betong, naturliga stenar och gips [25]. Den positiva effekten av impregnerade klotterskydd beror på underlagets porositet. Om vct är för högt ($>0,7$) kan det hända att den rengörande effekten inte blir tillräcklig och det kvarstår skuggor på ytan.

ARMERINGSSKYDD

Om armeringen i betong förlorar sitt passiverande skikt på grund av karbonatisering eller kloridinträngning börjar stålet korrodera. Av de skademekanismer som kan leda till brist på bärförmåga hos en betongkonstruktion är korrosionsskador på armeringen en av de vanligaste. Därför har ett antal metoder för att skydda armeringsstål mot korrosion utvecklats. De metoder som beskrivs här ingår som reparationsprinciperna som listas i SS-EN 1504-9 [8].

REALKALISERING AV BETONG

Det passiva skiktet på stålets yta skapas av den alkaliska omgivningen i betongen. Det passiva skiktet kan förstöras endera genom karbonatisering eller genom kloridinträngning. För båda processerna krävs att det finns tillräckligt med syre i gränsskiktet mellan stål och betong. För att få tillbaka det passiva skiktet på stålets yta bör de kemiska förhållandena i betongen återställas. Då förhindras återigen armeringskorrosionen eller stoppas om den är pågående.

De kemiska förhållandena kan återställas med olika metoder. Den enklaste

är att gjuta ytterligare ett betonglager på en befintlig karbonatiserad betongyta om det passiverande skiktet fortfarande är intakt. Detta är emellertid bara möjligt i mycket få fall. Om korrosionen redan har startat kan ersättning av betong utföras med rengöring av armeringsstålet och igjutning med reparationsbruk eller -betong, se avsnittet *Ersättning av betong*.

En annan metod är elektrokemisk realkalisering [9, 10]. Då används en tillfällig anod i form av ett metallnät som är i elektrolytisk kontakt med en natriumkarbonatmättad cellulosapasta på betongens yta. Mellan anoden (metallnätet) och katoden (armeringsstålet) anbringas en likström. Vid katoden (armeringsstålet) reduceras vatten och syre till OH⁻-joner (hydroxyljoner) som höjer alkaliteten i betongen. Andra joner som kloridjoner (Cl⁻) eller sulfatjoner (SO₄²⁻) transporteras till anoden. Katjoner som natrium och kalcium rör sig i riktning mot katoden. Vid anoden oxiderar hydroxyljoner till vatten och syre.

Den elektrokemiska processen får arbeta i en till två veckor. Eftersom migration av natrium och hydroxyljoner (OH⁻) ökar alkalihalten och pH i betongen finns det en ökad risk för att det kan triggas igång en alkaliskisreaktion i betongen. Innan denna metod används måste man därför säkerställa att betongen inte innehåller alkalireaktiv ballast [9]. Metoden kan också användas för att dra ut klorider och sulfater.

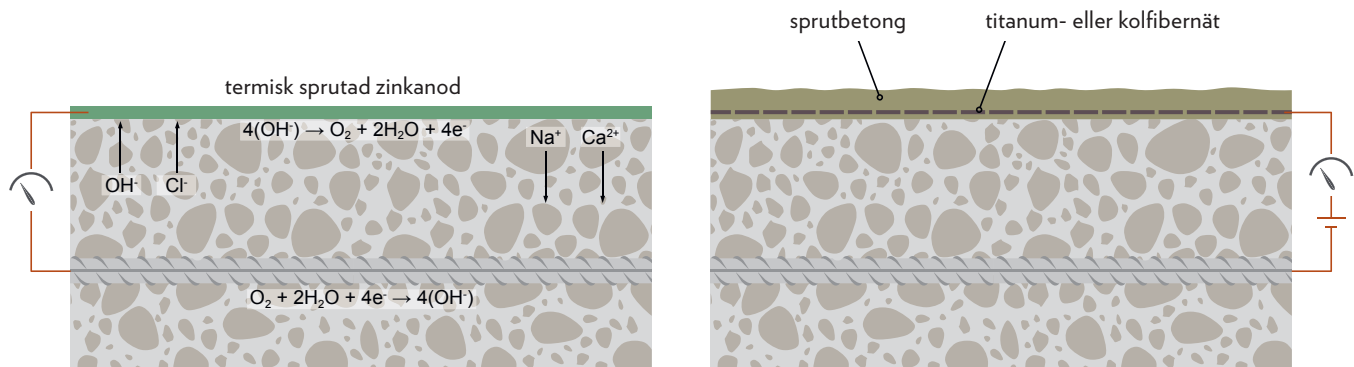
KATODISKT SKYDD

Katodiskt skydd av armeringsstål i betong har använts under lång tid. Principen är att använda armeringsstålet som en katod, där syre och vatten reduceras till OH⁻-joner (hydroxyljoner), som håller det passiverande skiktet på stålet intakt. Anoden finns vanligtvis nära eller på betongytan. Två typer av anoder används [9]:

- en passiv offeranod som vanligtvis består av zink, magnesium eller aluminium som kopplas ihop med katoden (armeringsstålet).
- en aktiv anod som består av ett titannät eller kolfibergaller, som är sammankopplade med katoden och till vilken en konstant likström lagts på. Denna typ av skydd kallas också ett elektrolytiskt skydd med påtryckt ström.

Metoderna fungerar om betongen inte är helt torr och dess elektriska resistivitet inte är för hög. Metoden används främst för konstruktioner som är utsatta för kloridsalter, i synnerhet infrastruktur anläggningar som broar i havsvatten eller vägbroar utsatta för avisningssalter.

Den passiva anoden med högre negativ potential bildar, tillsammans med armeringen som katod med en lägre negativ potential, en elektrisk cell där anoden löses upp med tiden, därför kallad offeranod. Denna typ av katodiskt skydd kallas också galvaniskt skydd. Offeranoder kan placeras nära eller på betongytan men det måste finnas kontakt mellan den och armeringen. En



Figur 8.18. Principen för katodiskt skydd. Ett passivt offeranodsystem (vänster) och ett aktivt system som kräver konstant likström (höger). De kemiska reaktionerna och jonmigrationen är lika i båda systemen. Illustration: Urs Müller.

annan metod är att spruta på zink som anod på betongytan, så kallad termiskt sprutad zink, se figur 8.18 [9].

Det vanligaste sättet att använda sig av elektrolytisk katodiskt skydd är att montera titan- eller kolfibernet på betongytan [9]. För att erhålla god kontakt med betongunderlaget sprutas vanligtvis ett lager sprutbetong eller bruk över nätet. Sedan måste nätet kopplas ihop med armeringen varpå en likström läggs på, se figur 8.18 [9]. Elektrolytiskt katodiskt skydd kan innebära problem för förspänd betong. Under ogynnsamma förhållanden kan väte bildas vid katoden genom nedbrytning av vatten. Väte kan leda till väteförspändning av spännstål vilket kan leda till brott i spännarmeringen. För att undvika vätebildning kan man installera ytterligare en elektrod (referenselektrod), vilken mäter potentialskillnaden mellan elektroden och katoden (armeringen). Enligt standarden SS-EN ISO 12696 [26] bör den externa kraftkällan styras så att potentialskillnaden är under -900 mV mätt mot referenselektroden (Ag/AgCl/0,5 M KCl).

Båda typerna av anoder resulterar i samma reaktioner som vid elektrisk realkalisering. En fördel med katodiskt skydd är att klorid- och sulfatjoner förflyttar sig från armeringen mot anoden, vilket förebygger kloridinitierad korrosion, se figur 8.18.

Det finns flera tillgängliga system som används i praktiken. Standarden SS-EN ISO 12696 [26] ger en översikt över systemen, typ av anoder och hur de ska installeras, hanteras och underhållas. Trots användbarheten kräver katodiska skyddssystem underhåll och kontroll med definierade tidsintervall. För galvaniska system är effektiviteten sämre under atmosfäriska förhållanden och bättre under vattenyta eller i tidvattenzoner [27]. Elektrolytiska system kräver en egen yttre kraftkälla och är mer utmanande när det gäller handhavande och underhåll beroende på var de används. Solpaneler används ibland som yttre kraftkälla vilket definitivt kräver regelbunden tillsyn.

Båda typerna av katodiskt skydd har sina för- och nackdelar. System med pålagd ström är mer effektiva i olika exponeringsmiljöer än passiva system men måste användas med försiktighet i förspända betongkonstruktioner [28].

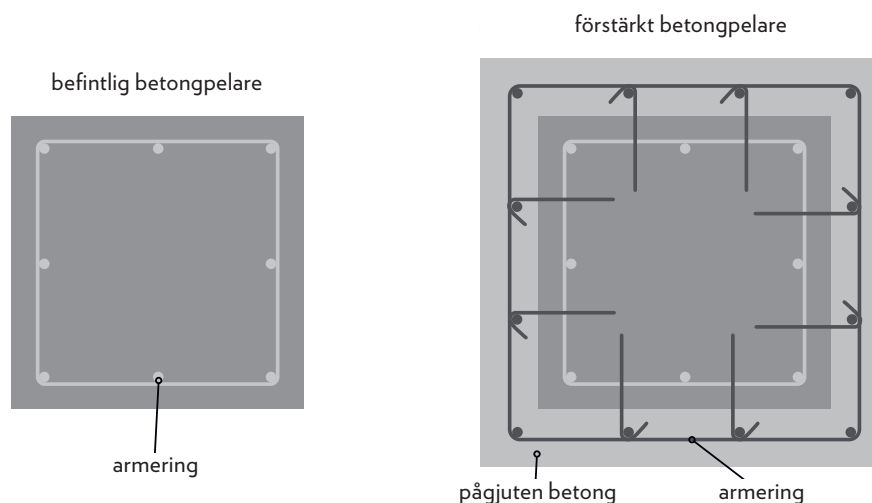
Elektrolytiska system med pålagd ström via nät ändrar ytans utseende då de behöver bäddas in i bruk som sprutas på den ursprungliga betongytan. Det är inte den bästa lösningen om det är betongytan som är synlig och ska bevaras. Om däremot betongytan ändå måste ersättas över stora områden på grund av omfattande skador, kan ett nät bäddas in i reparationsmaterialet för att förhindra fortgående korrosion av armeringen.

FÖRSTÄRKNING

Förstärkning används främst i bärande konstruktionsdelar. Förstärkning kan göras för två olika ändamål, dels för att återställa den ursprungliga bärförmågan hos en konstruktionsdel som försvagats genom skador, dels för att öka den ursprungliga dimensionerande bärförmågan om belastningen redan ökats eller planeras att öka.

Det finns åtskilliga förstärkningsmetoder för betongkonstruktioner. Vilken metod som är lämplig metod måste avgöras med beaktande av vilken typ av konstruktion det är fråga om och varför den ska förstärkas. Metoderna varierar beroende på om det är fråga om statiska eller dynamiska laster, till exempel jordbävning. Olika metoder kan också kombineras om så krävs.

En enkel metod men som innebär ett djupt ingrepp är armerad betonginklädnad. Metoden kan användas på armerade betongdelar som balkar och pelare. Metoden innebär i huvudsak att ett nytt lager armerad betong läggs utanpå en befintlig konstruktionsdel med längsgående armering och tvärgående byglar. Lagret förankras i den befintliga konstruktionsdelen [29], se figur 8.19. Det nya lagret gjuts på plats i en form som monterats på den befintliga konstruktionsdelen. Innan betonginklädnaden genomförs måste den befintliga konstruktionsdelen rengöras eller uppruggas så att man får



Figur 8.19. Armerad betonginklädnad för en betongpelare (tvärsnitt).
Illustration: Urs Müller.

vidhäftning mellan ny och gammal betong. Ett alternativ är att inte använda form utan spruta på ny sprutbetong. Detta kräver dock att den nya betongytan ges rätt ytstruktur.

En i dagsläget mycket vanlig teknik för förstärkning är att använda fiberarmerade polymerkompositer (FRP). Fördelen med FRP är att det ger en god draghållfasthet och har låg densitet i jämförelse med stål och betong. Fibertypen varierar och kan vara glasfiber, kolfiber, basaltfiber eller aramidfiber. Kolfibrer har blivit mest vanligt tack vare högre draghållfasthet jämfört med glasfibrer [30]. Som polymerbindemedel används främst epoxiharts men även termiskt hårdnande hartser som vinylester eller polyester.

Det finns olika sätt att använda FRP för förstärkning av armerade betongkonstruktioner. Vanliga sätt är som FRP-inklädnader eller FRP-laminat. Men det förekommer även FRP-armering som monteras nära ytan, FRP-kablar eller sprutad FRP. FRP-inklädnad används ofta på stolpar eller pelare som i figur 8.20, medan laminat används för balkar och lådbalkar. Sprutad FRP används vanligen för att höja tvärkraftskapaciteten hos betongdelar och kan bidra till att höja jordbävningssäkerheten [31]

Betongytan måste vara torr innan FRP kan appliceras. De hartser som används är ganska dyra och appliceringen kan innebära hälsorisker om inte tillräckliga försiktighetsåtgärder vidtagits. FRP-förstärkning kan inte tas bort eftersom materialet limmas direkt på betongytan. En annan nackdel är bristen på temperaturstabilitet vid brand. FRP-förstärkning är inte lämpligt för betongytor med formavtryck, frilagd ballast eller andra ytbehandlinger. Påverkan på det visuella intrycket är påtaglig (figur 8.20), i synnerhet när kolfibrer används och om förstärkningen inte målas över.

Ett liknande koncept för att använda FRP för förstärkning är vävarmerat cementbruk, *textile reinforced cement mortars (TRC)*. Metoden använder kolfiberväv som bäddas in i höghållfast cementbruk [32]. Brukslagret kan göras mycket tunnare än med en armerad betonginklädnad men den blir tjockare än med FRP-inklädnad. Typiska tjocklekar på TRC-lager är 20–40 mm och de innehåller två skikt med kolfiberväv. Bruket kan läggas på för hand på små områden eller genom sprutning på större områden [33]. Det befintliga betongunderlagets yta måste vara rent men får vara vått då TRC läggs på. TRC-förstärkning är ganska brandbeständig, inte speciellt dyr och inte förenad med allvarliga hälsorisker som polymeriska hartser är. Kolfiberväven i TRC är vanligtvis täckt med epoxiharts eller styrenbutadiengummi (SBR) som polymer [34]. Polymeren höjer i hög grad vidhäftningshållfastheten mellan väv och cementmatrisen. Återigen är metoderna kanske inte lämpliga för betongytor som behöver vara synliga eftersom ett brukslager måste anbringas på betongunderlaget. De kan emellertid användas för att förstärka små skalkonstruktioner av betong eftersom tjockleken är relativt liten.

En annan förstärkningsmetod är att använda stålstöd. Stålstöd är yttre ramar som är sammankopplade med den befintliga betongkonstruktionen

FRP

FRP står för fiberarmerade polymerkompositer. Förstärkning med FRP är inte en reversibel åtgärd.

TRC

TRC står för textile reinforced cement mortars. Det är inte heller helt reversibel då förstärkningen måste slipas bort.



Figur 8.20. Pelare under Elgeseter bro i Trondheim i Norge. Glasfiberarmerad polymerinklädnad runt en bropelare. Pelarna var påverkade av ASR och förstärkningen utfördes med GFRP-inklädnad. Foto: Urs Müller.

[34]. De förbättrar styvhet, hållfasthet och segheten hos en betongbyggnad. Stålstöd är gynnsamma vid sidorörelser som till exempel vid jordbävning. Stöden kan kombineras med dämpningsanordningar som fördelar den dynamiska rörelseenergin. Påverkan på det visuella intrycket är stor då dessa monteras exteriört. Men stålstöd kan vara lämpligt i en byggnad där påverkan på det visuella intrycket är mer begränsat.

REFERENSER

- [1] ICOMOS (1964). *The Venice Charter. International charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites*. IInd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Venice, 1964. Tillgänglig på: <https://www.icomos.org/en/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/157-the-venice-charter>.
- [2] ICOMOS Australia (2013). *The Burra Charter – The Australia ICOMOS charter for places of cultural significance*, <http://australia.icomos.org/wp-content/uploads/The-Burra-Charter-2013-Adopted-31.10.2013.pdf>.
- [3] SS-EN 1990 (2010). *Eurocode – Basis of structural design*.
- [4] Czarnecki L, Geryło R, Kuczyński K. (2020). Concrete Repair Durability, *Materials* 13(20). doi:10.3390/ma13204535.
- [5] Hassanzadeh M. (red.) (2014). *Reparation av betongkonstruktioner: Skador och reparationsmetoder från 1970-talet och framåt: reparationsbehov, forskningsbehov, effektivitet: bidrag till projekt Bygginnovationen*. Lund: Lunds tekniska.
- [6] Visser J.H.M, Van Zon Q.F. (2012). Performance and service life of repairs of concrete structures in The Netherlands. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*. Cape Town, pp. 876–881. <https://doi.org/10.1201/b12750>
- [7] Tang, G (2008). The Rise and Fall of The Thin Concrete Shell, *International Conference on Flexible Formwork*, Bath. pp. 334–344.
- [8] SS-EN 1504-9 (2008). *Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 9: Allmänna principer för val av produkter och system*.
- [9] Hassanzadeh M, Janz M, Vinka T.-G, Persson M, Rosenqvist M, Oxfall M, Holmgren J, Nordström E, Silfwerbrand J. (2022). *IT-baserad handbok: Betongreparation*. Rebet. <https://www.betongreparation.se/om-betonghandboken>.
- [10] Raupach M, Orłowski J. (2008). Schutz und Instandsetzung von Betontragwerken. *VBT Verlag Bau+Technik*, Düsseldorf.

- [11] Markeset G, Rostam S, Klinghoffer O. (2006). *Guide for the use of stainless steel reinforcement in concrete structures*, Byggeforsk, Norwegian Building Research Institute, Project report 405 Oslo. <https://www.sintef.no/globalassets/upload/byggeforsk/publikasjoner/prrapp-405.pdf/>.
- [12] SS-EN 1504-3 (2005). *Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 3: Reparation*.
- [13] SS-EN 1504-5 (2013). *Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 5: Injektering av betong*.
- [14] SS-EN 1504-2 (2004). *Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 2: Ytskyddsprodukter för betong*.
- [15] Kargol M.A, Müller U, Gardei A. (2013). Properties and performance of silane: blended cement systems, *Materials and Structures* 46. pp. 1429–1439. doi:10.1617/s11527-012-9984-1.
- [16] Helsing E, Malaga K, Silva N, Eva R, Torkkeli M, Hejll A. (2017). *A Nordic method for testing hydrophobic impregnations with regard to prevention of chloride ingress*, CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Built Environment, RISE - Research Institutes of Sweden (2017-2019). urn:nbn:se:ri:diva-33619.
- [17] Wheeler G. (2005). Alkoxysilanes and the consolidation of stone. *Research in conservation*, The Getty Conversation Institute, Los Angeles.
- [18] Roos M, König F, Stadtmüller S. and Weyershausen B. (2008). Evolution of silicone based water repellents for modern building protection. *Hydrophobe V 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials*, pp. 3–16.
- [19] Müller U. (2021). *Mineralische Baustoffe – Untersuchen, Bewerten und Konservieren*. Fraunhofer IRB Verlag.
- [20] Johansson A, Nyman B, Silfwerbrand J. (2008). Decreasing Humidity in Concrete acades after Water Repellent Treatment. *Hydrophobe V*, pp. 379–386. http://www.hydrophobe.org/pdf/bruxelles/V_33.pdf.
- [21] NT BUILD 515 (2016). *Hydrophobic impregnations for concrete – Prevention of chloride ingress – Filter effect*. Nordtest.
- [22] Müller U, Weise F, Grell S. (2006). The long term effects of a water repellent treatment on a volcanic tuff. *Heritage, Weathering and Conservation*. Madrid, pp. 777–784.
- [23] Hornig U, Rudolph M. (2016). Zustandsuntersuchung und Instandsetzung am Hauptdach des Hauses der Kulturen der Welt in Berlin. *Beton- und Stahlbetonbau*, vol 111, issue 10. pp. 611–621. doi:10.1002/best.201600035.

- [24] Meng B, Müller U, Garcia O, Malaga K. (2014). Performance of a New Anti-Graffiti Agent Used for Immovable Cultural Heritage Objects, *International Journal of Architectural Heritage*, vol 8 (6), pp. 820-834. doi:10.1080/15583058.2012.747116.
- [25] Malaga K, Müller U. (2013). Relevance of Hydrophobic and Oleophobic Properties of Antigrffiti Systems on Their Cleaning Efficiency on Concrete and Stone Surfaces. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 25, issue 6. pp. 755-762. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000557.
- [26] SS-EN ISO 12696 (2017). *Katodiskt skydd av stål i betong*. [27] O. Rincon, A. Sagues, A. Torres-Acosta, M. Martínez-Madrid (2018). Galvanic Anodes for Reinforced Concrete Structures: A Review. *Corrosion* 74 (6), pp. 715-723. doi:10.5006/2613.
- [28] van den Hondel A.J, Klamer E.L, Gulikers J, Polder R.B. (2016). Application of cathodic protection on 30 concrete bridges with pre-stressing steel: Remaining service life extended with more than 20 years, *International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*. Leipzig. pp. 651-656.
- [29] Inge W, Audrey, Nugroho S, Njo H. (2018). Strengthening method of concrete structure. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 126 (1) 12051. doi:10.1088/1755-1315/126/1/012051.
- [30] Täljsten B. (2018). FRP Strengthening of structures-bridging gaps in academic research and industry-25-years' experience creating innovation. *International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2018)*. MATEC Web of Conferences 199. doi:10.1051/mateconf/201819901003.
- [31] Furuta T, Kanakubo T, Nemoto T, Takahashi K, Fukuyama H. (2001). Sprayed up FRP strengthening for concrete structures. *International Conference on Composites in Infrastructure At: No.094*. pp. 1109-1116.
- [32] Lampros N, Koutas, Zoi Tetta, Dionysios A. Bournas, Thanasis C. Triantafillou (2019). Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, volume 23 issue 1. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882.
- [33] Orlowsky J, Raupach M, Westendarp A. (2011). Shotcrete Layers with Textile Reinforcement for Repair of Hydraulic Constructions. *Restoration of Buildings and Monuments*, volume 17, issue 3-4. doi:10.1515/rbm-2011-6452.

- {34} Müller U, Williams Portal N, Chozas V, Flansbjer M, Larazza I, da Silva N, Malaga K. (2016). Reactive powder concrete for facade elements – A sustainable approach. *Journal of Facade Design and Engineering* 4(1-2):1-14.
- {35} Massumi A, Tasnimi A.A. (2008). Strengthening of low ductile reinforced concrete frames using steel x-bracings with different details. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.



KONSERVERA BETONG

Stefan Holmgren

Vårt företag hade fått i uppdrag av en liten landsbygdsförsamling att åtgärda naturstenen i deras medeltida kyrka. Uppdraget hade föregåtts av en långdragen process och när arbetet äntligen var avslutat och det blev dags för besiktning samlades vi en stor skara människor på byggnadsställningen där jag berättade om de vidtagna åtgärderna.

Allt var frid och fröjd tills vi kom till tornluckorna och de inmurade kalkstensdekorationerna. Dessa var i original och det stod uttryckligen i handlingarna att de skulle konserveras. En av församlingsmedlemmarna harklade sig plötsligt och bad om ordet: ”Det ser ju fördjävligt ut. De ser ju ut precis som innan!”

Jag blev förstås överrumplad men samtidigt glad. Han hade inte bara gjort en mycket god iakttagelse och visat en sund reaktion, han hade dessutom gett oss konservatorer högsta betyg och skapat förutsättningar för en bra diskussion om vad konservatorsarbete innebär.

För konservatorer innebär konservering att man bevarar något *utan tillägg*. Ett omsorgsfullt konserverat föremål kan fortfarande vara slitet, avskavt och skevt. Den lilla bisatsen ”utan tillägg” är i själva verket grundprincipen för hela den moderna konservatorsprofessionen, även om de flesta konservatorer också arbetar med *restaurering*.

KONSERVERA ELLER RESTAURERA

Man brukar skilja mellan att konservera och att restaurera, även om det i båda fallen handlar om att bevara något för framtiden. För att illustrera skillnaden kan vi tänka oss en sprucken stensulptur. Om skulpturen restaureras finns en ambition att återställa den till ursprungligt skick, vilket innebär att nytt material och kanske nya metoder måste användas. När

URSPRUNGLIG KULÖR

Konservator Lisa Edgren målar lekskulpturen Ägget i Kungsparken, Göteborg. Färgen fyller två syften dels att återge skulpturen dess karakteristiska gula kulör, dels göra betongytan mera glatt till glädje för de barn som ska åka kana. Vid samma tillfälle blåstrades hela skulpturen ren med is och skador i betongen reparerades. Skulpturen är ett verk av Egon Möller-Nielsen från 1951. Foto: Stefan Holmgren, 2014.



Figur 9.1. År 2009 restaurerades den nygotiska kyrkan i Grebbestad från 1892. Här monteras nygjutna betongsegment som utgör en dekorativ fris på tornet. Foto. Stefan Holmgren.

skulpturen konserveras vidtas åtgärder som förhindrar eller fördröjer nedbrytning men skulpturen bevaras i sitt spruckna skick.

Konserverade antika skulpturer kan sakna många kroppsdelar utan att någon höjer på ögonbrynet. Det är så vi är vana att se dem. För en konservator handlar en huvudlös skulptur om ett medvetet val. Med ett nytt huvud skulle skulpturen förlora sin äkthet, sin *autenticitet*, och därmed en stor del av sitt kulturhistoriska värde.

Renodlad konservering förekommer främst innanför museernas väggar. I de flesta andra sammanhang är det mer gängse att skulpturer delvis konserveras, delvis restaureras. Som i fallet med den medeltida landsbygdskyrkan är det ofta i skarven mellan att konservera och att restaurera som många missförstånd uppstår. Är konservatorn otydlig med ordens betydelse finns alltid en risk att det slutliga resultatet inte uppfyller beställarens förväntningar.

VILKEN BETONG KONSERVERAS

Av bevarandeskäl borde alla föremål och byggnader av betong hanteras varsamt och bevaras när så är möjligt. Men det ska sägas direkt: Konservatorer anlitas sällan för att konservera betong. Det sker i stort sett bara när föremålet eller byggnaden har officiell status som *särskilt kulturhistoriskt värdefull*, är ett *byggnadsminne* eller är ett kyrkligt kulturminne. Materialet eller materialets behandling bedöms då vara av sådan betydelse att det kräver en konservators omsorger. Det händer också att konservatorer kallas in när ett värdefullt konstverk är infogat i en vittrande konstruktion som behöver hanteras varsamt för att konstverket ska räddas för framtiden.

Precis som med andra kulturhistoriska byggnader och föremål kan ett betongobjekt anses värdefullt av olika skäl. Det kan ha arkitektoniska och estetiska kvalitéer, eller påminna om ett viktigt skede eller en särskild person i historien. Ibland råder samhällelig konsensus, ibland är det bara en liten grupp som delar synen på objektets värde. Just föremål och byggnader av betong har av olika skäl haft opinionen mot sig, vilket inneburit att utsmyckade fasadelement från 1960-talet är mer sällsynta än massproducerad fasaddekor från 1800-talet.

Synen på att laga betong har förändrats till det bättre under 2000-talet. Tidigare ansågs armerad betong ha ett absolut bäst-före-datum och när det hade passerats fanns inga andra alternativ än att kassera och gjuta nytt. Idag är inställningen en annan. Byggnadsverk och föremål undersöks utifrån sina unika förutsättningar, färre objekt döms ut och fler betongobjekt underhålls och lagas.

Visserligen är betong*konservering* fortfarande i sin linda i Sverige och de flesta projekt handlar om *restaurering*, om än utförda med varsamma metoder. Det finns skäl att tro att intresset för historisk betong kommer att fortsätta öka för att i framtiden bli en materialkategori bland andra för konservatorn.

KONSERVATORNS UNDERSÖKNING OCH TILLSTÅNDSBEDÖMNING

En konservator tillfrågas således i första hand när det handlar om kulturhistoriskt värdefulla objekt. Ibland kan något oförutsett ha inträffat, en brand eller vattenskada, som kräver akuta insatser. Vanligast är dock att konservatorn kopplas in i projekteringsfasen för att göra en *undersökning* och en *tillståndsbedömning*. Dessa ställs samman i en *tillståndsrapport* som i sin tur är underlag för ett åtgärdsförslag, se även kapitlet *Tillståndsbedömning och skademekanismer*.

Konservatorns undersökning och tillståndsbedömning avviker inte väsentligen från konstruktörens eller arkitektens även om metoderna skiljer sig åt. Hela proceduren kan liknas vid läkarens anamnes och diagnos: Först samlas information från arkiv och det görs en övergripande okulär besiktning av objektet. Resultaten redovisas i en tillståndsrapport som ligger till grund för en bedömning av objektets aktuella tillstånd. Slutligen tar konservatorn fram ett åtgärdsförslag med rekommendationer på lämpliga metoder och material för att ta itu med skadorna.

Åtgärdsförslaget ingår i nästa skede som en del i förfrågningsunderlaget där beställaren beskriver vad som ska utföras. Förfrågningsunderlaget är utgångspunkt för utförandet, entreprenaden. Vilken påverkan konservatorns tekniska tillståndsbedömning har för projektet i sin helhet varierar. På ett startmöte brukar projektledare, antikvarie och konsulter träffas för att diskutera åtgärderna. Det är vid detta tillfälle som de olika utförarna, medräknat konservatorn, kan komma till tals och framföra sina synpunkter.

NÄR KONSERVERING INTE ÄR LÄMPLIGT

Principen att ”bevara utan tillägg” kan och bör sällan tillämpas till fullo. Det är skillnad på en huvudlös marmorskulptur i ett museum och en trasig betongskulptur på ett kyrktak. Gjuten betongdekor som pryder flerfamiljshus från sent 1800-tal kan orsaka stor skada om den vittrar och lossnar. En stor del av denna ornamentik är oarmerad men fastsatt i fasaden med förankringsjärn. Det finns också gott om exempel på fasadornament som innehåller armeringsjärn. Idag spricker de isär och bitar ramlar i backen. Värst utsatta är tredimensionella friskulpturer och kors som står på kyrktak och -torn, ofta 20-30 meter över mark. Här kan sprickor och skador få fatala konsekvenser. Att *konservera* betongen, i meningen bevara den i sitt nuvarande tillstånd, är då inte ett alternativ.

Risk för personskada väger tungt och innebär ofta att trasiga delar måste restaureras, alternativt ersätts med en nytillverkade kopior. Ibland används emellertid risken för skada på tredje man som argument för att slippa betala konserveringsinsatser och istället tas skulpturen bort eller byggnaden rivs. Det händer också att beställaren helt enkelt inte vet att materialet går att bevara.

AKTIV KONSERVERING

Innebär någon av momenten:

- rengöring
- reparation
- rekonstruktion

Som konservator kan det vara svårt att ta strid när en konstruktör påstår att det enda alternativet är att byta ut. Ingen vill ta ansvar för tekniskt tveksamma lösningar och människoliv får aldrig riskeras. Även om betongen kan förstärkas, *konsolideras*, upplever vi en till synes sönderfallande betongkonstruktion som farlig. Med utgångspunkt i en riskbedömning finns ändå alltid val att göra, till exempel kan original flyttas till museum och ersättas av kopia på ursprungsplatsen.

KONSERVATORNS ÅTGÄRDER, METODER OCH MATERIAL

Konserveringsåtgärder som utförs direkt på ett objekt i syfte att stoppa eller fördröja nedbrytning, eller begränsa skada kallas *aktiv konservering*. Aktiv konservering och restaurering av betong handlar uteslutande om att utföra ett eller flera av de tre momenten *rengöring*, *reparation*, *rekonstruktion* (nyttillverkning).

RENGÖRING

När konservatorn talar om *rengöring* handlar det om att avlägsna skadligt eller misspyrdande material, vanligtvis partiklar eller organisk påväxt, från objektets yta.

Gemensamt för de rengöringsmetoder som konservatorn använder på betong är att de hittills främst har tillämpats på natursten. Det är fortfarande ovanligt att konservatorer anlitas när betongobjekt behöver åtgärdas.

Det är inte bara metodvalet som avgör resultatet, hur och av vem rengöringen utförs är minst lika viktigt. Rätt utförd kan många rengöringsmetoder användas utan att skada materialet, och omvänt, fel utförd kan även den mildaste av metoder göra stor skada.

REPARATION

För betongreparationer handlar det om samma tillvägagångssätt som vid alla former av lagningar. Först ska skadorna undersökas och orsakerna fastställas. Därefter gäller att välja lämplig metod och ett ändamålsenligt material för att åtgärda skadorna. Det bör också tilläggas att en reparation alltid föregås av någon form av rengöring.

Metodvalet vid en reparation är ofta det lättaste att göra, medan materialval är mer komplicerat. Dels finns en mängd produkter att välja bland, dels krävs i regel konstnärliga och antikvariska hänsyn.

Lagningsbruk för betong innehåller alltid tillsatsmedel, till exempel för bättre vidhäftning, vilket ger reparationen god hållbarhet. Baksidan är att den nya betongen med tillsatsmedel åldras annorlunda än originalbetongen. En reparation som till en början knappt syns kan på sikt bli alltmer framträdande.

NYTILLVERKNING

Ibland krävs att en historisk betongkonstruktionen ersätts med ett nytt objekt. Skadebilden kan vara av sådant slag att objekten inte går att reparera, valet blir då att göra kopior. I SS-EN 15898:2019 *Bevarande av kulturarv*, används även termen *ersättningsobjekt*.

Vanligtvis tänker man sig en helt ny kopia, men gränsen mellan reparation och rekonstruktion är inte alltid glasklar. Som vi ska se nedan kan man nytillverka *en del* av ett objekt och fälla in den nya delen, rekonstruktionen, i originalobjektet – det vill säga reparera ett objekt med en rekonstruktion.

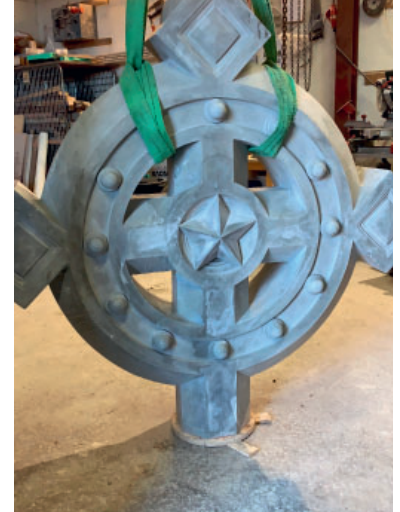
EXPONERAD BETONG

I skulpturer och byggnader där betongen är exponerad har materialet ofta en avgörande roll för gestaltningen. Den exponerade betongen är en marginell del av materialets användningsområde, men står för en stor del av den betong som konservatorn möter i sin praktik.

Det är stor skillnad mellan att arbeta med ett konstverk och en byggnad. Många konstverk av betong är unga och konserveringsinsatserna kan ske i samarbete med konstnären. I möjligaste mån används då bruk med samma ingredienser som det ursprungliga. I en byggnad är man som konservator mer låst. Byggnader lyder under byggbranschens reglementen, vilket innebär att det ofta redan i upphandlingsunderlaget finns angivet vilka produkter som ska användas.

Eftersom betongreovering är en stor industri pågår ständig produktutveckling. Alla stora producenter har egna system med specialtillverkade bruk för snart sagt alla former av skador. Man kan på goda grunder anta att produkterna generellt håller hög teknisk kvalitet, inte minst med tanke på garantierna som lämnas på materialet. Sådana garantier är vanligtvis knutna till villkor och ofta krävs att entreprenören har "certifierats" av producenten genom att till exempel gå en kurs och lära sig blanda och applicera produkterna.

Det finns stora fördelar för alla inblandade med ett sådant förfarande. Beställaren får garantier, entreprenören är återförsäkrad hos materialtillverkaren som i sin tur kan känna sig trygg i att arbetet utförs enligt dennes anvisningar. Men utifrån ett kulturvårdande synsätt kan det finnas betänkligheter. Även om reparationsbruk bygger på samma grundrecept, cement, ballast och vatten, innehåller de också tillsmedel som ska ge bruket önskade egenskaper. Ett exempel är plastfibrer som ska minska risken för sprickbildning och öka vidhäftningsförmågan. Tillsatsmedlen gör bruket lättbearbetat och förbättrar de tekniska egenskaperna, men de åtgärdade områdena får vanligtvis en annan kulör och yta. När det är fråga om exponerad obehandlad betong som ska konserveras eller restaureras blir ytan många gånger fläckig.



Figur 9.2. En rekonstruktion där ett nytt gjutet ansgarskors ska ersätta ett skadat på domkyrkan i Luleå. Skadorna på de ursprungliga korset framgår av figur 7.23. Foto. Stefan Holmgren.

En annan avgörande faktor vid restaurering av exponerad betong är ballastens sammansättning och struktur. Utseendemässigt är skillnaden stor på en betong med ljus sand som ballast och en betong där ballasten består av mörkt bergskross. Helt avgörande är det förstås om ballasten är frilagd.

FRILAGD BALLAST

Genom att frilägga ballasten får ytan ett utseende som påtagligt skiljer den från den rena betongytan. Metoden var populär på fasadelement på 1960- och 1970-talen, men har förkommit från och till både tidigare och senare, även utanför elementfabrikerna.

Det är inte ovanligt att konstnärer arbetar i betong och i många bostadsområden finns konstverk som på ett eller annat sätt knyter an till trakten. Ett sådant exempel är konstnären Bo Sällströms skulptur *Konfekten* från 1970 som står i Gårdsten strax nordost om Göteborg, se figur 9.3. Konfekten består av två separata skulpturer, där den ena blev påkörd av en svängande kran och skadades så svårt att den inte gick att reparera. Den skadade skulpturen ersattes därför med en nytillverkad kopia.

Skulpturen är uppbyggd av ett antal rätblock i betong som står staplade på varandra. Flertalet av blocken har en slät kulört yta, på de övriga är ballasten frilagd. Utmaningen var dels att få fram likadan ballast som på originalskulpturen både med avseende på kulör och fördelning, dels att hitta rätt teknik för att tvätta fram ballasten. Eftersom Bo Sällström inte längre fanns i livet och dokumentation från tillverkningsprocessen saknades, fick de skadade delarna fungera som förlagor för att få fram rätt ballast och betongblandning.

Att tillverka gjutformar föreföll enkelt med tanke på deras rätvinklighet, men svårigheten låg i att konstruera formarna så att de gick att ta isär och montera ihop *innan* betongen hade bränt. Ballasten skulle friläggas på fem av rätblockens sex sidor och eftersom friläggningen enbart skulle göras med vatten och pensel måste det utföras medan betongytan ännu var vattenlöslig. Ytterligare en faktor att ta hänsyn till var hur de färdiga rätblocken skulle monteras samman till en skulptur. Trots att gjutformen till modellen var enkel krävdes en noggrant tankearbete för att alla krav skulle uppfyllas.

Ett liknande arbete utfördes på den byggnad från 1964 som rymmer delar av Högskolan för konst och design, HDK, i Göteborg, se figur 9.5. De ljusa betongelement med frilagd ballast av marmor som täcker fasaderna har många likheter med skulpturen *Konfekten*, men skadebildningen var en helt annan. Här hade betongelementen sprängts inifrån när armeringsjärnen i betongen börjat rosta.

Processen med rostande armering beskrivs utförligt i kapitlet *Betong är en blandning*, men i enkla ordalag ökar järnets volym när det rostar. Eftersom processen är beroende av vatten krävs fuktvandring genom betongen, utifrån och in till armeringen. Vattnet är boven i dramat och den direkta orsaken till



Figur 9.3. Skulpturen Konfekten i Gårdsten där den ena delen skades så svårt av en svängande kran att den behövde bytas ut. Foto: Stefan Holmgren.



Figur 9.4. Den nytillverkade kopian med nygjutna block som liksom tidigare staplats på varandra. Tillvägagångsättet beskrivs i texten och bild 9.5-9.6. Foto: Stefan Holmgren.

att järnet rostar, men det finns andra kriterier som också behöver uppfyllas. Nygjuten betong har normalt hög *alkalinitet*, vilket gör att betongen bildar ett skyddande oxidskikt runt armeringen. Det fungerar som ett effektivt rostskydd, järnet befinner sig i en passiv miljö och börjar därför inte korrodera.

Efterhand sjunker betongens pH-värde, den börjar *karbonatisera*. Det är en naturlig process som uppstår när betong kommer i kontakt med koldioxid från luften. Processen startar på ytan och tränger sedan in i konstruktionen. För betongen är det positivt, den blir tätare och får ökad tryckhållfasthet. Men för armerad betong kan det bli förödande eftersom det skyddande oxidskiktet slutar fungera vid $\text{pH} \leq 9,5$. Om armeringsjärnen kommer i



Figur: 9.5. HDKs utbyggnad från 1964 med fasad av prefabricerade betongelement. Foto: Stefan Holmgren.



Figur 9.6. Formen till de mellanstora rätblocken fylld med betong inför en provgjutning. Formarna byggdes så att de gick att ta isär innan betongen hade bränt.

Betongblandningen tillverkades på plats med vit cement som binde-medel och krossad marmor som ballast.

I bakgrunden syns de gamla rätblocken. Foto: Stefan Holmgren.

kontakt med vatten börjar de rosta vilket gör att volymen ökar, vilket i sin tur medför ett inre tryck som på sikt spränger betongen. Armerad betong bär så att säga på sin egen undergång.

Det finns olika sätt att förhålla sig till hur skador i armerad betong ska åtgärdas. I sådana projekt där en konservator medverkar är det sällan den tekniskt mest långsiktiga lösningen som väljs. Skyddade byggnader och konstverk behandlas generellt med stor varsamhet och när det, som i exemplet HDK, kommer till fasader så väljs inte sällan återhållsamma metoder, det vill säga små ingrepp före mer omfattande åtgärder, se figur 9.9.

Betongelementen på HDK tillverkades och monterades 1964 och under dessa snart 60 år har betongen hunnit karbonatisera en bit in. På fasaderna finns också äldre lagningar *över* rostiga armeringsjärn vilket kan tyda på att armeringen redan från början legat alltför ytligt. Flertalet av äldre reparationer behövde tas bort och göras om.

Som konservator är första steget att välja metod. Här stod valet mellan att reparera med ett lagningsbruk på plats, eller att gjuta tunna plattor och fälla in dem i fasadelementet. Eftersom ballasten skulle friläggas föll valet på plattor. Momentet att tvätta fram ballasten är svårt att kontrollera på en



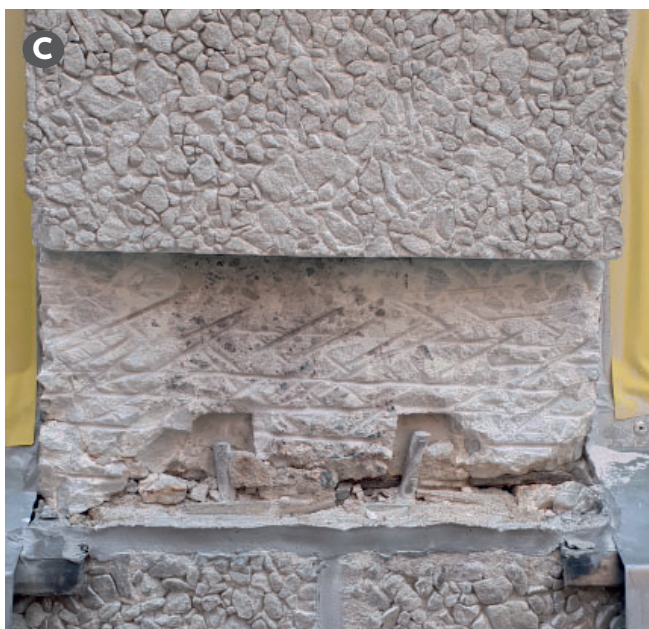
Figur 9.7. Medan betongen fortfarande var vattenlös tvättades ballasten fram med vattenspruta och pensel. Foto: Stefan Holmgren



Figur 9.8. Färdig provyta som den blev efter att ballastens synliga yta frilagts. Foto: Stefan Holmgren.

vertikal yta. Risken är stor att cementvatten rinner ner och missfärgar fasaden under lagningarna.

Dokumentation om den ursprungliga betongblandningen saknades. För att i möjligaste mån få fram samma fördelning på ballasten i den nya betongen som i de befintliga elementen mättes all synlig marmor på en kvadratmeterstor yta upp. Den framtagna ballastfördelning blev grunden i ett recept på en reparationsbetong. Övriga ingredienser var vit cement och vatten. Plattor göts och ytan tvättades fram med vatten och pensel, enligt samma metod som beskrevs tidigare. Plattorna fick bränna en månad innan montering och sattes fast med ett cementbaserat fästbruk, ett så kallat *fix*, på det befintliga elementet. Allt enligt bildserien på följande sida.



Figur 9.9. A-B. Detaljfotografier av betongelement på HDKs fasad i Göteborg. Bild A visar en äldre lagning som tjänat ut. Återkommande lagningar ger en hint om att armeringen från början placerades för nära ytan. Bild B togs när lagningen var avlägsnad medan bild C visar vad som blev kvar efter att all skadad betong tagits bort. Valet av åtgärd stod mellan att reparera med ett lagningsbruk eller att gjuta tunna plattor att fälla in. Även här blev

valet att gjuta plattor. Den nya betongen blandades av vit cement, vatten och ballast som bland annat innehåller marmor. För att få fram rätt mängd mättes all synlig marmor på en kvadratmeter stor yta. På samma sätt som för skulpturen Konfekten tvättades de nya plattorna med vatten och pensel. Bild D visar hur lagningen blev. Foto: Stefan Holmgren.

SVÅRA VAL VID REKONSTRUKTION

Östergötlands museum är en modernistisk gul tegelbyggnad som stod klar 1939. Längs fasaderna löper en slät ljus fris. Frisen är av betong med vit cement som bindemedel och tillverkad i tunna segment, cirka en meter långa. När man blickar upp på fasaden syns det inte att segmenten är fastgjutna på en kraftig stomme, också den i betong men med vanlig grå cement som bindemedel.

Metoden grundar sig sannolikt på de särskilda förhållanden som rådde under förkrigsåren. Cement var en bristvara som betingade ett mycket högt pris på marknaden. Tillverkningsprocessen bakom frisen dokumenterades, så även recepten, och den som vill fördjupa sig i ämnet kan kontakta museet.

Betongen blandades ”mossfuktig”, det vill säga betydligt torrare än vid gjutningar idag, och stampades i formen. Först lades ett tunt lager vit betong, cirka 15 mm, och efter en kort tid skyfflades den grå betongblandningen ner i formen tillsammans med armeringsjärn och stampades fast mot det vita lagret. Den totala tjockleken på varje frissegment är 15-20 cm och all armering finns i den bakomliggande grå betongen.



Figur 9.10. Längs delar av fasaden på Östergötlands museibygnad från 1939 löper en fris av betong. Foto: Stefan Holmgren.



Figur 9.11. Del av östra fasaden på Östergötlands museum med en fris av betong. Fristen består av cirka en meter långa segment med ett 15 mm tjockt yttre skikt av vit betong. Detta yttre dekorativa

skiktet är sammangjutet med en bakomliggande armerad betong. Notera att några segment i frisen saknades 2009 då bilden togs. De har lossnat och fallit ned. Foto Stefan Holmgren, 2009.

Frisens segment har alltså ett tunt synligt skal av vit betong som är samman-gjutet med en stomme av armerad grå betong, se figur 9.13. Det är också i skarven mellan den vita och grå betongen segmenten har sin svaga punkt. Exakt när det visade sig första gången är oklart men i slutet av 1900-talet hade flera skal släppt från stommen och ramlat i marken, lyckligtvis utan att någon kom till skada.

År 2009 var problemet med frisen känd sedan länge och ett antal försök att åtgärda den hade också gjorts. Bland annat hade man försökt gjuta nya skal genom att montera en form på plats. Inget av försöken föll väl ut, tvärtom orsakades nya skador på tegelfasaden. Enklast hade varit att slå på en puts, men förslaget fick inte gehör hos Länsstyrelsen eftersom putslagning innebar en *förvanskning* av ursprungsidén. Originalfrisen var gjuten och så skulle det förbli.

När vi konservatorer kopplades till projektet var vårt förslag att gjuta tunna skivor i vit betong och fästa dem i den bakomliggande stommen. Med tanke på segmentens tunna dimensioner armerades de med krenelerat galler. På gallret svetsades även fyra dubbar. De användes som infästning vid monteringen av segmenten och säkerställde att de inte lossnade.

Formar tillverkades och efter några provgjutningar var tanken att produktionen av nya segment skulle starta i större skala. Betongen blandades efter originalreceptet, men de nya segmenten kom ändå att skilja sig utseendemässigt från originalen. En avgörande anledning var att det är omöjligt att få fram sand (ballast) i exakt samma kulör. Dessutom hade väder och vind eroderat betongen i frisen, vilket i kombination med påväxt av alger och smuts innebar att såväl struktur som kulör förändrats med tiden. Skulle vi ändra receptet, patinera de nya skalens yta, rengöra originalfrisen – eller ingetdera?

Slutligen tillverkades segmenten enligt originalreceptet, och ytan ruggades på dessa samtidigt som originalfrisen rengjordes varsamt. Målet var att minska kontrasterna mellan det nya och den befintliga frisen. Trots åtgärderna rådde ingen tvekan om vilka segment som ersatts med nya. Ännu idag, mer än tio år senare, syns det tydligt, se foto 9.12.

Figur 9.12. Frisen konserverades 2010 och fotografiet av östra fasaden är från 2021. De segment som monterades 2010 har en ljusare ton än övriga.

Färgskiftningen beror på att frisen före 2010 års konservering var smutsig, eroderad och hade algpåväxt. Samtidigt tillverkades kopiorna utifrån originalreceptet. För att minska kontrasten ruggades ytan på de nytillverkade segmenten medan originalfrisen varsamt rengjordes. Men för den som tittar noga syns vad som är original och vad som är utbytt. Foto: Stefan Holmgren, 2021.





Figur 9.13. De segment som satt lösa demonterades. Några satt så löst att de kunde brytas loss medan andra sågades sönder. Därefter avlägsnades alternativt rostskyddsbehandlades all rostig armering

varpå betongytan jämnades av och de nya segmenten sattes i fästbruk. Fotografier: Stefan Holmgren.

Det finns anledning att både diskutera och ifrågasätta metoderna och resultatet av restaureringen av frisen på Östergötlands museum. Helhetsintrycket påverkas förvisso av segmentens varierande karaktär. Samtidigt var åtgärder helt nödvändiga. Som syns på bilden går gräsmattan ända in mot fasaden och det är inte ovanligt att barn springer omkring, medan vuxna sitter i gräset eller rentav lutar sig mot husväggen. Lösa segment är förenat med livsfara. Den risken är nu undanröjd, åtminstone vad gäller de nya segmenten.

BOMSKADOR PÅ HÖG HÖJD

Betongskulpturen "Gemenskap", ibland kallad *Invandrarmonumentet*, vid Linnéplatsen i Göteborg består av sju vertikala pelare i lika många kulörer. Pelarna reser sig ur marken för att flätas samman till en drakslinga knappt tio meter ovan mark, varpå de åter delar sig i något som kan uppfattas som en öppnande gest. Enligt konstnären Ralph Lundquist symboliserar skulpturen olika kulturers samspel och särart. Skulpturen stod klar 1995 och placeringen på gräsmattan vid parken Slottsskogens norra entré har gjort den till ett känt landmärke. Det organiska formspråket gör att många tror att den är av trä snarare än gjuten i armerad betong.

Figur 9.14. Skulpturen Gemenskap symboliserar enligt konstnären Ralph Lundquist olika kulturers samspel och särart. Den tio meter höga skulpturen från 1995 står på en gräsmatta vid en av Slottsskogens entréer. Det är en populär plats för picknick och lek. Foto: Stefan Holmgren.





Figur 9.15. De flesta skadorna på skulpturen gemenskap fanns på den gjutna fläta som håller ihop skulpturens ben. Skadorna var sannolikt orsakade av någon brist vid gjutningstillfället. Under

flätans yttre skal, med mycket bom, fanns ett mönster som tyder på att det lösa skalet var gjutet mot benen av redan hård betong. Fotografier: Stefan Holmgren.



Figur 9.16. Ytan på skulpturen var täckt av alger som tvättades bort med het vatten. Foto: Stefan Holmgren.



Figur 9.17. Betongytan hade även spruckit med många fina sprickor som injicerades med pigmenterat bruk. Foto: Stefan Holmgren.

År 2018 var skulpturen skadad och behövde åtgärdas. Skadebilden var ungefär vad som kan förväntas efter 25 år, men *bompartier* högt upp på skulpturen innebär att arbetet inte kunde skjutas på framtiden. Bom innebär att ytskiktet, ofta en puts, har förlorat vidhäftning och en luftficka bildats. Bompartier identifieras genom att man knackar på ytan. Ett dovt klanglöst ljud tyder på att det finns ett tomrum, en bom, vilket i sin tur innebär att ytskiktet lätt lossnar. Bomskador på armerad betong kan uppstå om ytskiktet spjälkar på grund av korrosion i armeringsjärnen, men de kan också bero på brister i gjutningen. Oavsett orsak innebär det här en allvarlig risk för att människor kan komma till skada.

Redan vid besiktningen plockades lösa delar bort. Skulpturens ben är tillverkade var för sig i relativt enkla former. En mer avancerad form krävdes för att gjuta flätan i vilken benen är fastsatta. Det var också på flätan som skadorna fanns och sannolikt är de orsakade av brister från gjutningen, en defekt. På bilderna i serien på föregående sida syns ett mönster under det

yttre skal som plockas bort. Det har gjutits senare mot en redan hård betong, därav den dåliga vidhäftningen.

När arbetet med att restaurera skulpturen påbörjades några månader efter besiktningen var stora, lösa bitar nedplockade. De sattes inte tillbaka. Förutom att rengöra hela skulpturen från alger och lavar med hetvatten avlägsnades även misspdydande kalkutfällningar mekaniskt. Större skador och materialbortfall lagades i samråd med konstnären och nytt material tillfördes. Genom konstnärens försorg fick vi tillgång till originalreceptet, alltså vilket pigment och vilken mängd pigment som tillsatts i den ursprungliga betongblandningen. Vi kunde därför direkt laga skadorna med ett bruk i samma kulör. Vanligt är annars att konservatorn gör en provserie med pigmenterat bruk för att hitta rätt kulör.

Alla sprickor fylldes med så kallat *injektionsbruk*, ett bruk framtaget för att kunna applicera med spruta och kanyl.

NÄR YTORNA ÄR STORA

Skador på hög höjd ställer stora krav på åtgärderna vad gäller den tekniska kvaliteten, i synnerhet när det handlar om publika miljöer. I fallet med Sankt Görans gymnasium på Kungsholmen i Stockholm var det inte bara skador på hög höjd som var en utmaning, här handlade det också om att hantera mycket stora ytor – en utmaning som konservatorer sällan ställs inför.

Till att börja med gjordes en skadekartering där tre typer av skador identifierades: strukturella, medelsvåra och estetiska. Till varje skadetypp kopplades sedan en åtgärd varpå åtgärden prissattes. Byggnadens storlek gjorde att bara skadekarteringen tog åtskilliga dagar i anspråk. Skadorna besiktigades okulärt, numrerades, märktes upp, fotograferades och uppgifterna fördes in i en liggare.

Totalt noterades omkring 400 skador som skulle åtgärdas. Även om ambitionsnivån var hög påverkade betraktelseavståndet noggrannheten i utförandet av varje enskild lagning. I det här projektet togs större hänsyn till helhetsintrycket på håll än till detaljerna.

Vad gäller metod föll valet på att *putsлага* istället för att gjuta nya delar och fälla in dessa i fasaden, Putslagning är en vanlig metod när det gäller att åtgärda ytliga skador och innebär i princip att det skadade området fylls med ny betong. För att uppnå ett gott slutresultat är det viktigt att all skadad betong rensas bort och att det sker till ett sådant djup att lagningen inte blir för tunn.

Fasaden på Sankt Görans gymnasium består till stor del av glaspardier som ramas in av betong. Traditionell bilning kunde inte användas eftersom vibrationerna skulle spräcka fönsterrutorna. Därför vattenbilades varje skada ner till frisk betong, innan den lagades med bruk.

En stor fördel med vattenbilning är att metoden är dammfri och förutom att området som bearbetas blir rengjort avlägsnas även ytrost från



Figur 9.18. S:t Görans gymnasium är ett tidstypiskt betongmonument från 1960. Den modernistiska arkitekten Léonie Geisendorf ritade byggnaden. I samband med en ombyggnad till studentlägenheter konserverades betongfasaden. Foto: Sven Olof Ahlberg.



Figur 9.19. Detaljbilder av en armerad fönsteromfattning med en av fasadens omkring fyrahundra skador. Skadorna kategoriserades som strukturella, medelsvåra eller estetiska. Den här skadan föll inom kategorin medelsvår. Betongen hade karbonatiserat runt den rostangripna armeringen. Först vattenbilades skadan till frisk betong, varpå den slammades och järnet rostskyddsbehandlades. Slutligen putslagades skadan med bruk/betong. Foto: Stefan Holmgren.



armeringsjärnen. I det här fallet vattenbilades skadorna till ett sådant djup att lagningsbruket kom att omringa ett armeringsjärn, vilket ger brukslagningen extra gott fäste. Lagningarna gjordes med ett egenkomponerat bruk vilket applicerades och bearbetades för hand. För att efterlikna den omgivande betongytans struktur tillsattes dansk sjösten i mindre mängd. I syfte att dels få bättre vidhäftning, dels rostskydda armeringsjärnet så påfördes först en slamma av ett polymerförstärkt bruk. Alla stora producenter har den här typen av produkter i sitt sortiment och de ingår som en del i deras respektive system för betongreparationer.

DOLD BETONG – BETONG SOM STOMME

Vanligare än exponerad betong är betong som utgör stomme och bär upp ett skal, exempelvis av natursten, se figur 9.20. Det är ofta i den formen konservatorn kommer i kontakt med betong, som den bärande konstruktionen bakom ett kulturhistoriskt värdefullt ytskikt.

På naturstensfasader från tidigt 1930-tal och några decennier framåt var det vanligt att tunna beklädnadsskivor i till exempel marmor (3-8 cm) fästes med bruk direkt på bakmuren, den armerad betongstommen. Idag har många av dessa fasader svåra skador. De syns på ytan där naturstenen spruckit, men

Figur 9.20. Heliga korsets kyrka i Kalmar är ett exempel på marmorbeklädnad på en stomme av betong. Kyrkan uppfördes efter ritningar av arkitekt Rudolf Holmgren och invigdes 1963. Foto: Stefan Holmgren.

orsakas av rostande armeringsjärn inne i betongstommen. Järnets expansion pressar sönder betongen, som trycker på naturstensskivan och spräcker den.

Skador av den här typen är enkla att identifiera men ofta mycket komplexa och kostsamma att åtgärda. Eftersom källan till skadorna finns inne i betongen är det sällan en långsiktig lösning att enbart reparera ytskiktet. Samtidigt, på grund av svårighetsgraden och den höga kostnaden för att åtgärda grundorsaken är det ändå vanligt att ytskiktet lagas. Estetiskt är det värdefullt och ibland kan alternativet att inte göra något alls kännas svårsmält. Som konservator är det emellertid viktigt att vara tydlig med vad en lagning av det slaget innebär.

DEKOR OCH KONST PÅ VITTRANDE STOMME

När den välbärgade grosshandlaren Arthur Seaton dog år 1912 lät hans son George beställa ett monument som än idag är Nordens största gravplats. Mausoleet ritades av arkitekten i ropet, IG Clason, och restes på Östra kyrkogården i Göteborg. Det fick formen av en villa eller suterränghus med stomme av armerad betong och de synliga fasaderna och taket kläddes och utsmyckades med granit. På insidan är golv, väggar och tak klädda med marmor, kalksten och förgylld mosaik i ett sällan skådat överdåd.

Betongstommen har sedan lång tid stora och svåråtgärdade skador. Tätskiktet har tjänat ut vilket medför fuktvandring genom betongen. Armeringsjärn rostar och spränger sönder betongen så att de invändiga ytskikten lossat eller skadats på annat sätt.

Skadebilden inne i mausoleet är därför både omfattande och komplicerad. Här finns en provkarta över alla upptänkliga skadetyper. Eftersom betongen ständigt är våt blir inomhusklimatet rått och luftfuktigheten mycket hög. I syfte att ventilerma mausoleet borrade man för ett tiotal år sedan vädringshål genom taket, men då åtminstone ett par av hålen borrades rakt genom takrännan har åtgärderna varit kontraproduktiva. Vid regn leds vatten i stora mängder in och skadebilden har snarare eskalerat än avstannat. Med tanke på att källan till skadorna finns i den bakomliggande betongstommen är det ogjort arbete att åtgärda ytskiktets mosaik, marmor- och kalkstensplattor. För att långsiktigt stoppa nedbrytningen krävs ett helhetsgrepp som inkluderar åtgärder av den armerade betongen. I dagsläget finns inga planer på att åtgärda Seatons gravmonument.

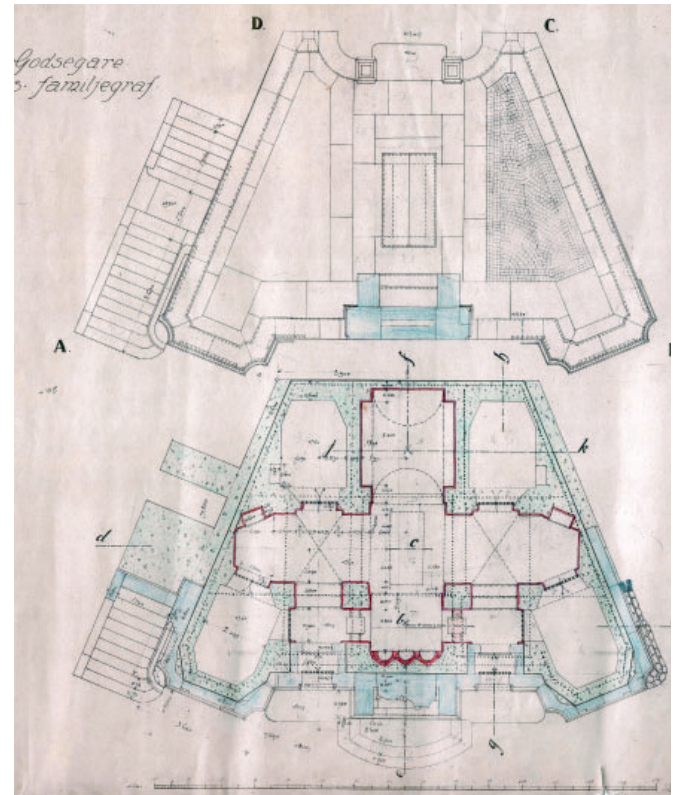
Ett annat exempel är skulpturen-fontänen *Scanisaurus* i centrala Bromölla, se figur 9.24. Skulpturen formgavs av konstnären Gunnar Nylund 1971 och består av fler än 3 000 keramiska plattor vilka har monterats på en stomme av armerad betong. Keramik är inte det ultimata materialvalet för en utomhusfontän i vårt klimat och många plattor har frusit sönder och bytts ut genom åren. Men nu efter mer än 50 år börjar även skador på betongstommen ge sig till känna. För att åtgärda den armerade betongen måste all keramik först demonteras, en tidskrävande, kostsam och riskfylld process. Den komplexa skadebilden är troligen en anledning till varför beställaren valde att skjuta på åtgärderna till framtiden.



Figur 9.21. Familjen Seatons gravmonument från 1912 på Östra kyrkogården i Göteborg. Foto: Stefan Holmgren.

Figur 9.22. När bilderna togs 2017 hade stora delar av interiören kvar sina ytskikt. Invändigt hade sjok av mosaik släppt och fallit ner på golvet. Iögonenfallande var också de vita utfällningarna. De har bildats av vatten som trängt genom stommen, löst kalk- och kloridjoner ur betongen och transporterat dem genom mosaikens och marmorns fogar till vägg- och takytan där de avsatt sig som kalkavlagringar. Partiellt är transporten av kalk i löst form så stor och regelbunden att det vuxit fram stalaktiter. Foto: Stefan Holmgren.

Figur 9.23. Gravmonumentet uppfördes efter ritningar av arkitekt IG Clason varav delar av planritningen visas nere till höger.





Figur 9.24. Scanisaurus från 1971 på torget i Bromölla. På håll ser allt bra ut men vid en närmare granskning träder en annan bild fram. Ett stort antal keramiska plattorna har spruckit och dessa yttre skador har sitt upphov i skador i den armerade betongstommen. Foto: Stefan Holmgren.

Figur 9.25. Det svartvita fotografiet visar väggreliefen Betong på Tunaskolan i Lund. Konstverket är skapat av Anders Österlin. Mosaiker av prefabricerade keramiska material har monterats på en obehandlad betongyta. Fotografiet är taget strax efter invigningen 1967. Foto: Håkan Alexandersson.

Ytterligare ett exempel på problematiken med dekor på en vittrande betongstomme är konstverket *Betong* på Tunaskolan i Lund, se figur 9.25. Konstverket skapades 1966 av Anders Österlin. Verket är en väggrelief i form av 160 inramade rektangulära fält i vilka mosaiker av prefabricerade keramiska material monterats på en obehandlad betongyta. Keramiken är tillverkad på Ifö-verken och avsedd för våtutrymmen. Också här fanns en varierad skadebild. Ytan på betongen hade vittrat, dels på grund av väder och vind, dels på grund av alltför ytligt lagd armering som hade rosttat. Armeringen hade även tryckt loss mycket av mosaiken/keramiken och medverkat till att keramiken spruckit. En del av sprickorna i keramiken hade sannolikt orsakats genom frostsprängning och mekanisk åverkan.

Det är sällan självklart vad som är den avgörande orsaken till en skada. Ibland kan upphovet vara inneboende svagheter i materialet, ibland har skadan uppstått genom yttre påverkan. I flera fall är det en kombination av yttre och inre orsaker. Just här kan vissa skador direkt kopplas till att den bakomliggande betongen sprängts sönder av rostiga armeringsjärn. Att skadebilden var större närmare marken kan kanske förklaras med skadegörelse i kombination med att fasaden normalt sett är mera fuktig nertill, speciellt med tanke på senare tids plantering och buskage.

I fallet med konstverket *Betong* var det inte aktuellt att plocka ner all





Figur 9.26. Väggregeliefens all synliga armering rostskyddsbehandlades innan skadorna i betongen reparerades. Foto: Stefan Holmgren.

keramik för att åtgärda betongväggen men efter avslutad förundersökning och tillståndsbedömning uttryckte beställaren ändå en vilja att gå vidare. Frågan var med vilka åtgärder?

Konstnären var inte längre i livet. Dödsboet, som hade ärvt upphovsrätten, ställde sig positiva till att konstverket uppmärksammas och åtgärdas men hade inga synpunkter på hur eller i vilken omfattning. Ifö-verken hade styckats upp i flera bolag och den här typen av keramik hade sedan länge gått ur produktion. Därför var det omöjligt att komplettera saknade och skadade delar i konstverket. Slutligen valde man att låta åtgärda skadorna på betongytan men samtidigt, så långt det var möjligt, bevara keramiken i sitt nuvarande tillstånd.

Löst sittande keramik plockades ner, rensades från gammalt bruk och sattes tillbaka med nytt bruk. Därefter rengjordes hela konstverket. Området med skadad betong knackades med mejsel och hammare och rensades till



fast underlag. All synlig armering rostskyddsbehandlades innan skadorna i betongen lagades.

Nästa steg var att gå över keramiken. Skadade delar togs isär, rengjordes och limmades samman. Där glasyren fallit av täcktes ytan med färg. Tunna sprickor fylldes med lim. Avslutningsvis målades områden där keramik fallit bort med färg i samma kulör, för att reliefen på avstånd skulle se ut som den ursprungligen gjorde.

Arbetet med väggreliefen på Tunaskolan i Lund visar ett möjligt tillvägagångssätt. Visserligen kvarstår grundproblematiken och på lite längre sikt kommer armeringen fortsätta skada betongen, men de lokala skadorna är åtgärdade och helhetsintrycket är välbehållet. Därmed har också upplevelsevärdet för betraktaren ökat avsevärt.

Figur 9.27. Områden där mosaik och keramik fallit bort målades för att delarna på avstånd ska uppfattas som hela. Foto: Stefan Holmgren.

KONSERVATORNS ROLL

I den operativa processen är det vanligt att konservatorn arbetar nära andra yrkesgrupper. När det gäller betong kan murare och skulptörer bidra med praktisk materialkunskap och formkänsla. Ofta behövs också yrkespersoner som har kunskap om konstruktion och arkitektur, såsom byggnadsingenjörer, arkitekter eller antikvarier. Det är vanligt att kompetenserna överlappar, men generellt kan sägas att konservatorn besitter en gedigen materialförståelse som grundar sig på kunskaper om historiska föremål och konstruktioner. Dessutom arbetar konservatorn bokstavligen nära objekten och går ofta baklänges i upphovspersonens fotspår på ett sätt som skiljer sig från övriga yrkesgrupper. Den historiska kunskapen, närheten till objektet och förmågan att förstå föremålets tillkomst är utmärkande för konservatorn.

Även om betongrestaurering sedan många år är en storindustri med ständig utveckling av nya produkter är konservering av betong en ytterst marginell företeelse. Som nämnts tidigare finns flera anledningar och en är betongens dåliga rykte. Själva ordet har en negativ klang som står i motsats till sådant som normalt uppfattas som kulturhistoriskt värdefullt. Materialets mindre goda anseende hänger sannolikt även samman med att skadebilden i armerade betongkonstruktioner ofta är mycket komplicerad och skadorna svåra att åtgärda på djupet. Utmaningen, inte bara för konservatorn, blir därför att beskriva de intressanta egenskaperna hos byggnader och föremål av betong, och att visa hur de går att bevara genom att applicera konservatorns varsamma metoder. För även om skadorna är svårartade går det ofta att välja andra lösningar än de som idag är gängse.

REFERENSER

Bouichou, Myriam och Elisabeth Marie-Victoire (2021/2009). *Cleaning Historic Concrete A Guide to Techniques and Decision-Making*. Getty Conservation Institute, Los Angeles

Macdonald, Susan och Ana Paula Arato Goncalves (2020), *Conservation Principles for Concrete of Cultural Significance*. Getty Conservation Institute, Los Angeles

Muñoz Viñas, Salvador (2015). *Contemporary theory of conservation*. Abdington: Routledge

RÅ BETONGYTA

En av Sveriges absolut mest konsekvent brutalistiska interiör finns i ljusgården i före detta Sankt Görans gymnasium i Stockholm. Den exponerade betongen fick en översyn i samband med ombyggnaden till studentlägenheter. Alla ytor rengjordes genom blästring med kolsyreis, mindre skavanker justerades och alla originalytor bevarades.
Foto: Sven Olof Ahlberg, 2017.



INDEX

A

A-cement 48, 66, 68, 69
Aktiv konservering 228
Alit 23, 73
Aluminatcement 48, 68, 72, 73, 76, 92, 191
Aluminiumoxid 63, 67, 70, 73
Antikvarisk förundersökning 12
Armerad 9, 59, 218, 232
 Armering 4, 42, 82, 137, 168
 Armeringsjärn 68, 244
 Armeringskorrosion 182, 183, 201
ASR (Alkalisilikareaktion) 91, 99, 138, 162, 165, 179,
 184-189, 192, 195, 197, 204, 219
Avflagnig 85, 86, 165, 177, 184, 185

B

Basalt 64
BBK (Boverkets handbok om betongkonstruktioner)
 93, 94
Belit 73
Beläggning 202, 205-207, 210, 213-215
Blandcement 93
Bomskador 238
Borrkärna 162, 166, 167, 187
Brotthållfasthet 175
Brottlast 177

C

Calciumsulfoaluminatcement 73
Cement
 Cementfabrik 48
 Cementgel 75
 Cementklinker 69, 192
 Cementpasta 60, 78, 91, 187, 208
 CE-märkning 68, 69
 CFRP (kolfiberförstärkt plast) 82, 83
C-S-H (Kalciumsilikathydrat) 72-74, 76-78, 86

D

Deformation 132, 135, 140, 147-151, 177
Destruktiv metod 168, 171, 175
Diffusion 173
Draghållfasthet, dragspänning 59, 82, 132, 136, 145,
 165, 175, 177, 219
 Dragspänning 59, 82, 132, 136, 145, 165, 175, 177, 219
Duktilitet 135

E

E-cement 48, 68, 69, 92, 96
Ekvivalent vattencementtal 65
Elasticitetsmodul (E-modul) 165, 177
Epoxiharts 83, 166, 178, 208, 211, 219
Ersättningscement 69, 92
Ettringit 74, 89, 90, 190
Eurokod 201, 156

F

Ferrit 76
Finit elementanalys 177
Flygaska 60, 65-67, 69-72, 75, 80, 88-89, 91-95, 98, 212
Formvibrering 47
Fosfatcement 73
Frekvensmodulering 169
Frilagd ballast 199, 203, 219, 230
Fritt upplagd balk 131, 145, 146
Frivibrering 47
Frostangrepp 84, 94, 165, 184, 191
FRP (Fiberarmerade polymerer) 17, 207, 219, 222
Fästbruk 233, 237
Förspänd armering, Se även spännarmering 38, 213
Förundersökning 12, 248
Förvanskning 153, 236

G

GFRP (Glasfiberförstärkt plast) 82, 83, 219
Gjuta
 Gjutform 29, 104, 124
Gnejs 64
GPR (Georadar) 168-170, 195
Granit 64, 244

H

Halvcellspotential 170
Hydratisering 60, 73, 76, 78-80, 84
Hydraulisk 209
Härda 64, 73, 85, 88
Härdning 31, 66, 77, 138, 142
Höghållfast 28, 37, 49, 64, 219

I

Icke-destruktiv metod 168, 171, 175, 176
ICOMOS 11, 19, 153, 155, 156, 220
Impregnering 17, 202, 209-211, 213, 214
Injektering 204, 208, 209

J

Järnportlandcement 67

K

Kalcium 69
 Kalciumaluminat 48, 62, 72, 74
 Kalciumhydroxid 61, 69, 73, 74, 76, 86, 186, 192, 193, 194
 Kalciumoxid 63, 67, 70, 73, 75, 76
Kamstål 33, 42, 177

Karbonatisering 77, 84, 86, 87, 94, 132, 136, 172, 181-184, 201, 215
 Karbonatiseringsdjup 165, 166, 171, 204
Katodiskt skydd 156, 216, 217
Kisel 63, 71, 73
 Kiseloxid 63, 67
Klinker 61, 63, 66, 67, 69-72
 Klinkersättningsmaterial 66
Klorid 172, 174, 181, 182, 217
 Kloridinträngning 87, 171, 172, 174, 181, 184, 201, 212, 215
 Kloridprofil 173
Kompositcement 70
Konststen 30, 31
Korrosion 87, 88, 138, 165, 170-173, 181, 182, 201, 207, 213, 215, 217, 218, 240
Kraftmönster 131
Krympning 61, 64, 79, 137-139, 143, 144, 186
 Krympreducerande 64
Krysshamrad 31
Kulturhistoriskt värde 15, 131
Kulturmiljölagen 154
k-värde 65, 66, 93, 94

L

Latent hydrauliskt 61, 75
Luftpor 60, 90, 137, 178, 184, 188
 Luftporbildare 64, 65, 68, 84-86, 184

M

Magnesiacement 73
Massivcement 68
Masugnsslagg 48, 66-71, 75, 88
Materialpunkt 133, 134, 135
Miljöbalken 154
Mjukt vatten 165, 181
Märgel 62

N

NAD (Nationellt anpassningsdokument) 93, 94

O

Opus caementicium 61

P

Pansarcement 67-69

Plan- och bygglagen 153, 154

Pop-outs 188, 192

Portlandcement 63, 68, 70, 73, 75, 89, 93

Puzzolan 22, 61, 62

Puzzolancement 70

R

Romancement 62, 63, 68, 158

Romersk betong 61

S

SBR (styren butadien-gummi) 83, 219

SEM (svepelektronmikroskop) 69, 162, 180, 190

Silikastoft 71, 76, 87, 89, 93, 94

Slagg 67, 86, 88, 91, 93, 94

Slaggcement 68, 70, 90

Specialcement 48, 66

Spräckhållfasthet 196

Sprödhet 135

Spännarmering 137

Efterspänd armering 83, 137

Förespänd armering 38, 83, 137, 213

Spänningstrajektorier 132, 133, 140-151

Stampbetong 4, 68, 77

Studshammare 175

Sulfatangrepp 89, 90, 138, 162, 181, 189-191, 204

Supersulfatcement 73

T

Textilarmering 83

Tillsats

Tillsatsmaterial 48, 59, 60, 65, 66, 71, 75, 92-94, 137

Tillsatsmedel 59, 60, 64, 65, 77, 78, 137, 228

Titring 174

TRC (Vävarmerat cementbruk) 219

Tryckhållfasthet, tryckspänning 64, 66, 80-82,
132ff, 165, 175, 218, 231

Tunnslip 66, 84, 162, 167, 178, 179, 185, 187, 188

Täckskiktmätare 168, 170

V

Varsamhet 12, 15

Vbt (Vattenbindemedelstal) 65, 66, 79-85, 87, 88, 93

Vct (Vattencementtal) 65, 66, 77, 80-82, 87, 93, 94, 174,
179, 203, 210-212, 215

Vulkancement 67, 68

Y

Ytskydd 158, 209

Sven Olof Ahlberg Kulturbyggnadsbyrån AB, bebyggelseantikvarie, fotograf och antikvarisk sakkunnig med mångårig erfarenhet av betong i historiska konstruktioner, undervisar regelbundet på flera svenska universitet, författare till *Bevara betongen* (2012).

Gunnar Almevik Institutionen för kulturvård, Göteborgs universitet; professor i kulturvård med inriktning hantverksvetenskap och en av grundarna till Hantverkslaboratoriet. Forskar och undervisar i byggnadshistoria med särskilt fokus på metodologiska frågor.

Lone-Pia Bach Kungl. Konsthögskolan och Bach arkitekter AB, professor i restaureringskonst och praktiserande arkitekt. Lång erfarenhet av restaurering och utveckling av komplexa kulturhistoriska miljöer även industrialismens och modernismens arkitektur, material och byggmetoder.

Elisabeth Helsing Research Institute of Sweden (RISE), seniorforskare, tekn. dr. inom byggnadsmaterial, expert på materialet betong och dess beständighet. Mångårig erfarenhet av forskning, standardisering och regelskrivande om cement och betong.

Stefan Holmgren AB Stenkonservering Väst. Konservator med inriktning på natursten och betong. Lång erfarenhet av restaurering och konservering av kulturhistoriska föremål och byggnader.

Sara Höglund bebyggelseantikvarie med lång erfarenhet av svensk kulturmiljövård, har medverkat till flera av Hantverkslaboratoriets publikationer, har haft en avgörande roll i det redaktionella arbetet med boken.

Eva Löfgren Institutionen för kulturvård, Göteborgs universitet; docent i kulturvård och bebyggelseantikvarie, intresserad av tvärvetenskapligt samarbete och möten mellan akademi och yrkesfält. Forskar om bebyggelsens användning och betydelser.

Urs Müller Schwenk Sverige AB, Luleå Tekniska Universitet, disputerad mineralog, teknisk chef, professor inom byggnadsmaterial, lång erfarenhet av arbete med cement och betong. Författare till *Mineralische Baustoffe – Untersuchen, Bewerten und Konservieren* (2021).

Karl-Gunnar Olsson Chalmers, professor i arkitektur och teknik, med särskilt intresse för strukturmekaniska verkningssätt och mönster i kulturhistoriskt värdefulla byggnader, författare till flera böcker inom strukturmekanik.

BETONG

Den här boken samlar några av Sveriges mest sakkunniga forskare och yrkesverksamma i ämnet betong. Boken förmedlar aktuell forskning och konkret handledning i frågor som rör historiska betongkonstruktioners vård och underhåll. I nio kapitel behandlas materialets sammansättning och bakgrund, dess arkitektoniska och konstruktiva egenskaper, de vanligaste undersökningsmetoderna och skadorna samt beprövade metoder för att renovera, restaurera och konservera.

Att betong är ett industriellt framställt, komposit material gör det särskilt svårt att underhålla och restaurera – det finns nästan lika många betongsammansättningar som det finns historiska byggnader. Idag befinner vi oss dessutom i en situation där många av efterkrigstidens betongkonstruktioner har nått gränsen för sin tekniska livslängd. Nu krävs samarbete och krafttag av hantverkare, antikvarier, arkitekter, ingenjörer och fastighetsägare.

