ILL: Bjørnar Hamstad

SPENNARMERING

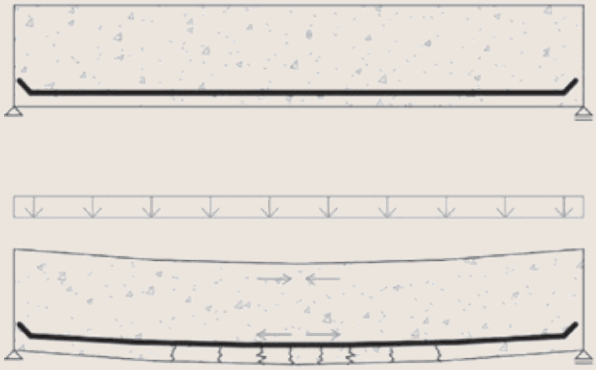
i plasstøpte flatdekker

Tekst: Bjørnar Hamstad og Terje Kanstad

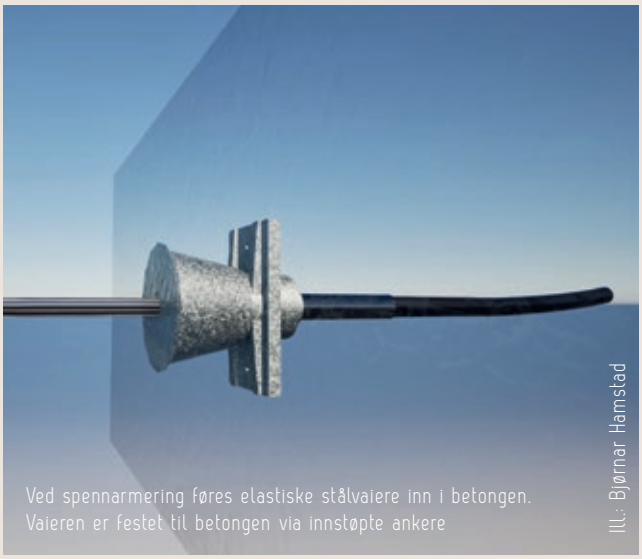
I forrige artikkel belyste hvordan flatdekker i plasstøpt betong representerer en rasjonell og effektiv løsning i moderne byggkonstruksjon.
Denne artikkelen tar for seg hvordan spennarmering ytterligere kan forbedre egenskapene til slike dekker – både strukturelt og økonomisk. Spesielt ser vi nærmere på hvordan spennarmeringens virkemåte og geometri, kombinert med plasstøpt utførelse, åpner for betydelige ytelsesforbedringer.

Bjørnar Hamstad
Sivilingeniør konstruksjon MRI. Seksjonsleder konstruksjon Multiconsult Trondheim.
Bjørnar Hamstad arbeider i tidligfase og utvikling av prosjekter samt detalprosjekterer stål, tegl, tre og betong. Innen betong med effektive løsninger med fiber og med etter-oppsenning. Hamstad er hobbyarkitekt og elsker å bygge, gjenbruke og designe.

Terje Kanstad
Professor NTNU ved institutt for konstruksjons-teknikk. Kjent for engasjement, faglig dyktighet og bred kompetanse innen konstruksjonsteknikk. Spesialisering innen spennarmering og fiber-armerte konstruksjoner. Kanstad har bidratt til utvikling på sitt felt gjennom FoU, undervisning og veiledning. Med god balanse mellom teoretisk innsikt og praktisk erfaring, har han også vært en viktig mentor for utallige studenter.



Slakkarmert fritt opplagt bjelke (prinsippskisse. B. Hamstad)



Ved spennarmering føres elastiske stålvaiere inn i betongen. Vaieren er festet til betongen via innstøpte ankere

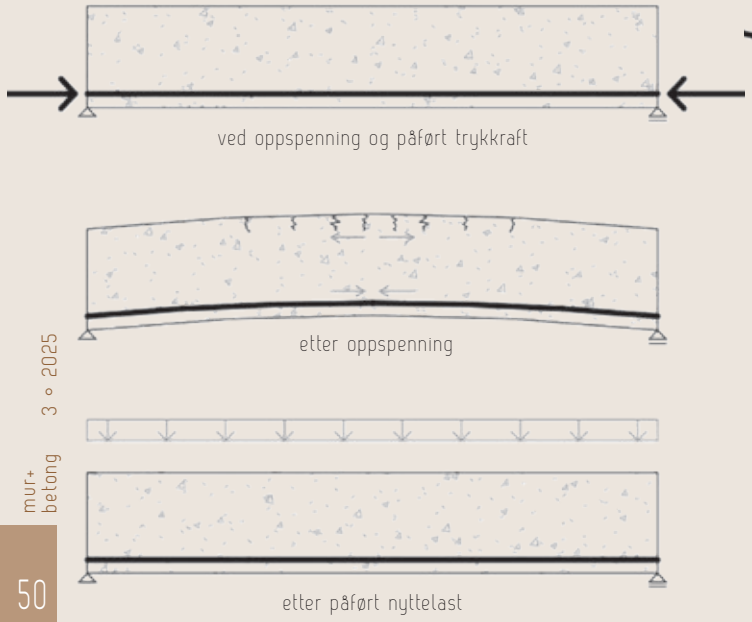
ILL.: Bjørnar Hamstad

Spennarmeringens virkemåte og løftekrefter i betongen

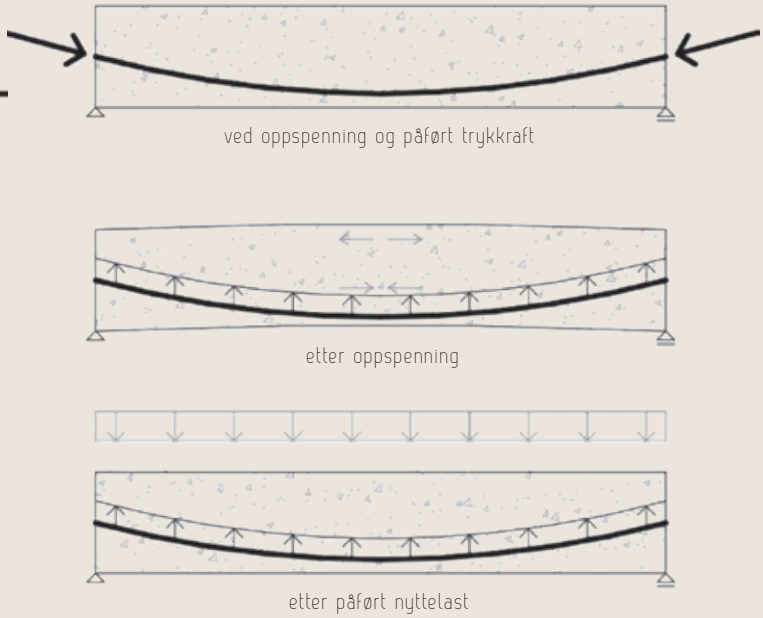
Spennarmering benytter seg av etter- eller forspente kabler av høyfast stål som legges i en rettform eller parabolsk bane i tverrsnittet av dekket. Kabelgeometrien er ikke tilfeldig, den er utformet slik at spennkraften i kabelen genererer interne vertikale løftekrefter i betongen som motvirker de ytre lastene. Den buede kabelen trykker betongen sammen langs hele dekkets lengde, og skaper en gunstig trykktilstand i områder som ellers ville vært utsatt for strekk.

Betongens egenskaper er slik at dimensjonerende trykkapasitet for en konstruksjonsbetong B30 er 17 MPa mens strekkapasiteten er i overkant av 2 MPa. Derfor må det innføres armering i strekksoner. Slakkarmert betong er avhengig av en liten nedbøyning i dekket eller bjelken slik at innstøpt strekkarmering blir mobilisert. Dette fører til mikroriss i betongen før slakkarmeringens kammer tar over oppståtte strekkspenninger og bærer kraften som strekk i armeringen. Dette endrer stivheten til det sammensatte materialet betong, siden det er risset.

Ved spennarmering føres elastiske stålvaiere inn i betongen. Vaieren er festes til betongen via innstøpte ankere. Ved uinjiserte systemer, vanlig for byggeprosjekter, ligger vaieren i en plasthylse som er fylt med fett. Plasthylsen støpes inn i betongen. Etter at betongen har nådd tilstrekkelig kapasitet i herdeforløpet kan vaierne strammes opp. Dette gjøres med hydrauliske jekker som utnytter vaierens elastisitet og trekker vaieren mens betongen brukes som mothold. Tiltrekningskraften og lengden for oppspenningen bestemmes ut fra materialegenskapene, arealet av vaier samt lengden av kabelen. Typisk spennes en vaier opp med en kraft på 220 kN, ca. 22 tonn. Etter oppspenning låses vaieren til ankeret via en kilelås, og kraften overføres fra jekk til det innstøpte ankeret. Via ankerets innstøpte overflate overføres kraften videre som en trykkraft inn i betongen.

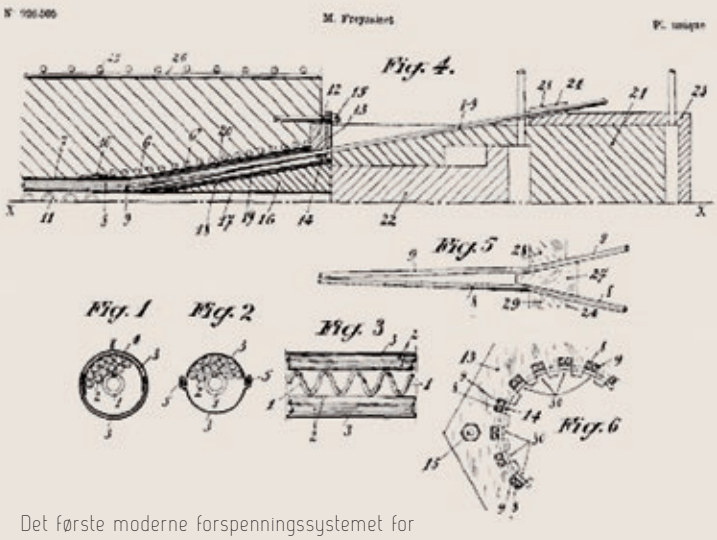


Spennarmert fritt opplagt bjelke, i tre steg (prinsippskisse. B. Hamstad)



Spennarmering i parabelbue, i tre steg (prinsippskisse. B. Hamstad)

Videre optimalisering er å legge spennkabelen med varierende høyde i tverrsnittet. I tillegg til å få innført trykk i betongen, oppstår interne løftekrefter i dekket, og løftkraften kan plasseres der lastene virker ut ifra kabelens plassering i tverrsnittet. I en flerfelts dekkestripe vil man legge parabelbuen lik momentdiagrammet fra egenvekt og ytre last, slik at løftekraften motvirker ytre last. Kabelen føres i underkant ute på felt og legges i overkant over støtte/søylepunkter. Resultatet er at den plasstøpte betongen, som har lav strekkfasthet, avlastes effektivt, og de interne kreftene bidrar til å 'bære' lasten sammen med armeringen. Dette gir et strukturelt samvirke som øker dekkets bæreevne, gir betongen større stivhet og reduserer behovet for tradisjonell armering.



Det første moderne forspenningssystemet for forankring ble designet av Eugène Freyssinet (1879–1962)

Fordeler med spennarmering i plasstøpte dekker

Ved å integrere spennarmering i plasstøpte flatdekker kan man realisere flere tekniske og økonomiske fordeler:

- Økt betongstivhet og redusert deformasjon
  Den innførte spennkraften gjør at konstruksjonen får høyere initialstivhet, noe som reduserer nedbøyning både i bygge- og bruksfasen. Dette er særlig gunstig for dekker med lange spennvidder. Idealisert kan man si at betongen har tilnærmet tre ganger så stor stivhet urisset som risset. Dette kan utnyttes til slankere dekker eller større spennvidder.
- Redusert rissdannelse og bedre bestandighet
  Spennkraften holder betongen i trykk og bidrar til å redusere eller forhindre riss under normal belastning. Dette gir ikke bare et estetisk forbedret resultat, men øker også konstruksjonens bestandighet over tid, særlig viktig i miljøeksponerte konstruksjoner. Riktig dimensjonert kan betongen gjøres helt vanntett.
- Forbedrede betongegenskaper
  Når betongen holdes i trykktilstand, forbedres flere av dens materialegenskaper, som for eksempel skjærkapasitet og bøyekapasitet. Dette gjør at konstruksjonen bedre kan utnytte materialets potensiale.
- Redusert materialbruk og slankere konstruksjon
  Den økte ytelsen gjør det mulig å redusere tverrsnittet på dekket, noe som gir lavere betongvolum, mindre armeringsbehov og reduserte egenlaster. Dette vil i neste omgang føre til mindre globale laster og lavere materialforbruk i fundamenter. Redusert materialbruk gir økonomiske og miljømessige gevinster, og åpner for slankere dekker, som igjen gir større frihet i arkitektonisk utforming og muliggjør lavere etasjehøyde.
- Optimalisering for moderne byggeri
  Spennarmerte plasstøpte dekker egner seg særlig godt i bygg med store åpne arealer, som kontorbygg, parkeringshus og kjøpesentre, steder hvor kombinasjonen av lange spenn og lav konstruksjonshøyde er etterspurt. Vi ser også betydelig effekt i leilighetsbyggeri.

Spennarmeringens historie – Eugène Freyssinet og gjennombruddet

Spennarmering som konstruksjonsprinsipp har sine røtter tidlig på 1900-tallet. Det var den franske ingeniøren Eugène Freyssinet (1879–1962) som regnes som opphavsmannen til teknologien slik vi kjenner den i dag. Han forstod at betongens begrensede strekkfasthet kunne kompenseres ved å tilføre den en permanent trykkspenning, slik at konstruksjonen i større grad holdes i trykk også under ytre belastning.

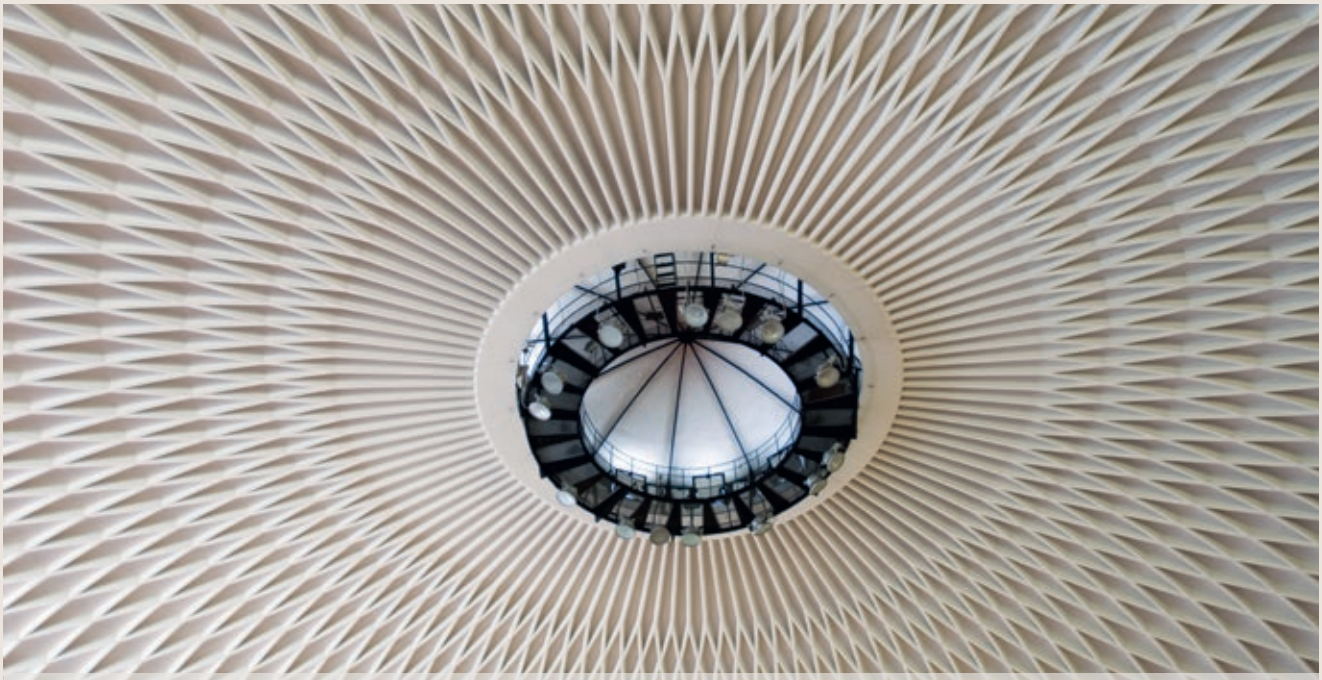
Freyssinet begynte sine eksperimenter allerede på 1910-tallet, og i 1928 tok han patent på metoden med bruk av høyfast spennstål og etterspenning. Dette gjorde det mulig å innføre betydelig forspenning i betongen uten at spenningen forsvant over tid som følge av kryp og svinn, et gjennombrudd som tidligere forsøk ikke hadde oppnådd.

Senere grunnla han Société Freyssinet, som utviklet spesialutstyr for spennarmering og bidro til å industrialisere og standardisere metoden. I tiårene etter andre verdenskrig spredte teknologien seg raskt til store deler av verden, og spennarmering ble en sentral løsning i brobygging, industribygg og høyhus.

Freyssinets arbeid la grunnlaget for moderne spennbetong, og hans innsats blir i dag betraktet som et av de viktigste teknologiske fremskrittene i betongens utvikling.

Arkitektene og ingeniørene som forsto potensialet i spennarmering

Selv om spennarmering i betong først og fremst ble utviklet som en konstruktiv metode, tok flere arkitekter raskt teknologien i bruk som et redskap for å forme nye og grensesprengende rom. Med større spennvidder, færre søyler og tynnere dekker åpnet spennarmering for arkitektonisk frihet, og da særlig i offentlige bygg, infrastruktur og monumental arkitektur.



Palazzetto dello Sport i Roma ble tegnet av Pier Luigi Nervi og bygget til OL i 1960. Foto: Grant Smith-VIEW/Alamy

PIER LUIGI NERVI 1891–1979 (Italia)

Nervi var både ingeniør og arkitekt, og en tidlig mester i å kombinere tekniske og estetiske kvaliteter.

I haller og idrettsanlegg som Palazzetto dello Sport i Roma (1957), brukte han prefabrikkerte elementer og tynne betongskall for å skape lette, bærekraftige konstruksjoner med stor visuell effekt. Nå er ikke betongkuppelen spennarmert siden designet sikrer trykk i betongen, men for å oppnå denne konstruksjonen måtte det designes en spennarmert ringbjelke for å ta imot kreftene og for å redusere deformasjoner i takkonstruksjonen.

EERO SAARINEN 1910–1961 (Finland/USA)

Kjent for sine ikoniske flyplassterminaler – som TWA-terminalen i New York og Dulles Airport (1962), samarbeidet Saarinen med ingeniører for å bruke etteroppspent betong i svevende takkonstruksjoner. Dette muliggjorde store, søylefrie haller som redefinerte funksjonalitet og form innen transportarkitektur. Han samarbeidet mye med vår norske ingeniør Fred Severud som er konstruktøren bak blant annet Madison Square Garden, for øvrig utdannet ved NTH.

TWA Terminal 5, JFK airport, New York ble tegnet av Eero Saarinen og sto ferdig i 1962. Foto: Orjan Ellingvag/Alamy

Sydney Opera House ble tegnet av Jørn Utzon og fullført av et australsk arkitektteam ledet av Peter Hall, 1973. Foto: Bernard Spragg. NZ/wikimedia

JØRN UTZON 1918–2008 (Danmark)
I samarbeid med ingeniør Ove Arup ble etteroppspenning benyttet i de komplekse skallelementene som utgjør Sydney Opera House (1959–1973). Her sikret spennkraften både stivhet og kontrollert geometri i det banebrytende konstruktive uttrykket.

SANTIAGO CALATRAVA f. 1951 (Spania/Sveits)
Arkitekten og konstruktøren Calatrava har videreutviklet den arkitektoniske bruken av spennbetong. Hans broer og bygg, som Milwaukee Art Museum (2001) og Auditorio de Tenerife (2003), kombinerer etteroppspenning med avansert formgivning, der konstruksjon og arkitektur smelter sammen.

Adán Martín – Auditorio de Tenerife i Santa Cruz er tegnet av Santiago Calatrava og sto ferdig i 2003. Foto: ©Thomas Wolf, www.foto-tw.de/wikimedia

The Quadracci Pavilion, Milwaukee Art Museum ble tegnet av Santiago Calatrava og åpnet i 2001. Foto: Rodney Nelson/Alamy

Rolex Learning Center i Lausanne ble tegnet av Sanaa og sto ferdig i 2010 (mur+betong 1-2010). Foto: Prisma by Dukas Presseagentur GmbH/Alamy

Arkitektonisk frihet gjennom spennkraft

Gjennom det 20. og 21. århundre har noen av verdens mest visjonære arkitekter sett verdien av etteroppspent betong som et redskap for både form og funksjon. Etteroppspenning har gjort det mulig å skape store, søylefrie rom, svevende dekker og dristige overheng som ville vært umulig eller ekstremt materialkrevende med tradisjonell slakkarmering alene.

Pionerer som Eero Saarinen, Pier Luigi Nervi og Felix Candela viste tidlig hvordan spennbetong kunne løfte konstruksjon fra ren teknikk til poetisk arkitektur. Senere har arkitekter som Zaha Hadid videreført arven med organiske, sømløse strukturer som kombinerer teknologi og skulptur.

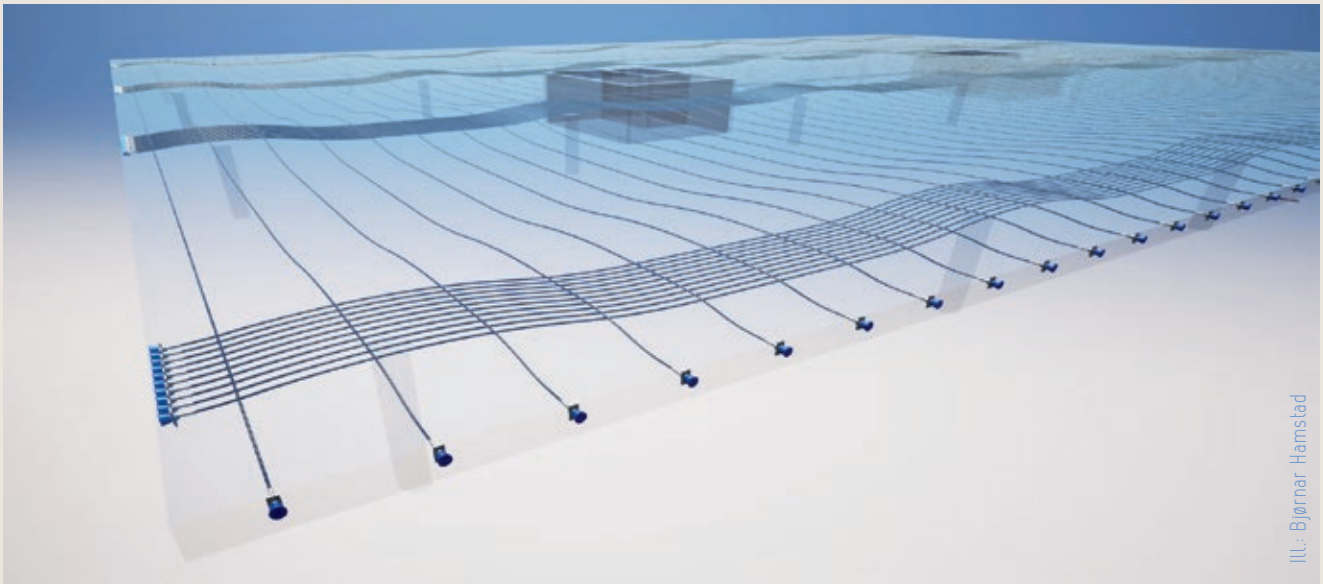
SANAA (Japan)
har også forstått dette potensialet fullt ut. SANAA er kjent for radikalt lette, nesten svevende bygninger med store, åpne plan og minimale detaljer. I Rolex Learning Center i Lausanne (2010) utnyttes etteroppspent betong til å skape ultratynne dekker, lange spenn og flytende romløsninger.
Ved å bruke etterspenning kan søyleantallet reduseres til et minimum og gir bygningene en åpenhet og flyt som speiler kontorets designfilosofi. Selvfølgelig muliggjort av dyktige ingeniører som kan å utnytte materialegenskapene til fulle.

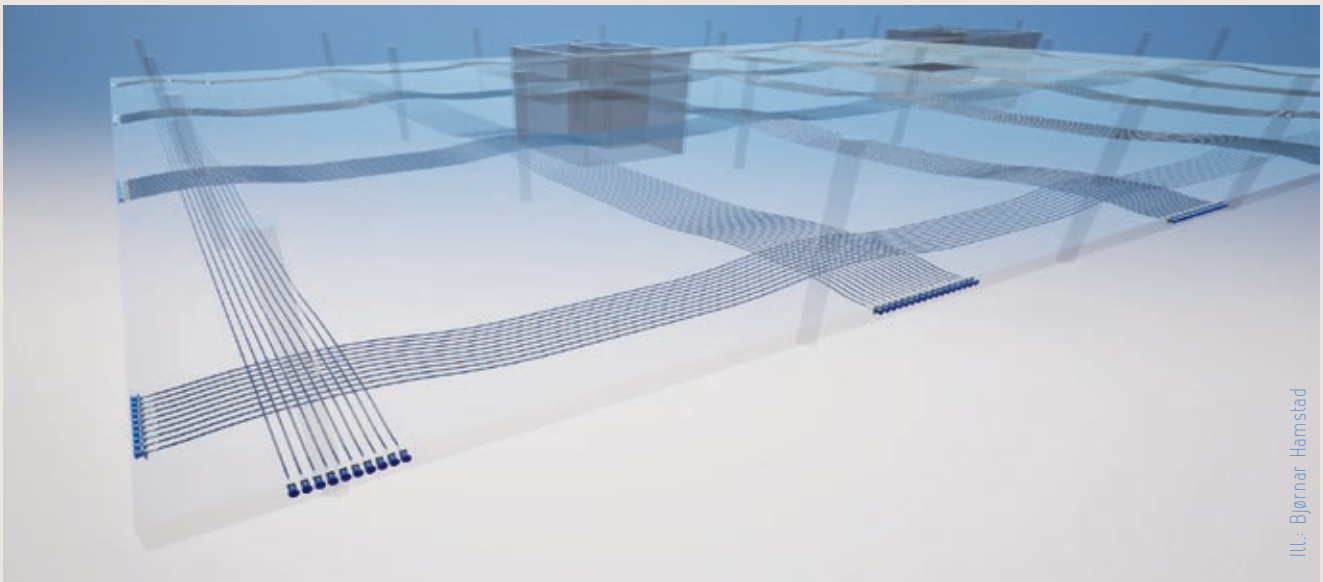
MAKI AND ASSOCIATES (Japan)
Et prosjekt i vår samtidsarkitektur som illustrerer mange av fordelene med spennarmerte flatdekker er Novartis' forskningssenter i New Jersey, tegnet av Maki and Associates, prosjektert av Leslie E. Robertson Associates og CCL, ferdigstilt 2013. 'Building 345' har et avansert samspill mellom arkitektur og konstruksjonsteknikk, med to-veis etteroppspente betongdekker som muliggjør store, svevende utkragninger på 10 meter i to retninger. Flatdekkekonstruksjonene har varierende dekketykkelse: 500 mm ved søyle slanket ned til 200 mm i dekkekant. Dekkene er spennarmert i begge spennretninger for å overføre både moment- og skjærkrefter effektivt til kjernen og de inntrukne søylene.

Novartis' forskningssenter i New Jersey
ble tegnet av Maki and Associates og sto ferdig i 2013.
Building 345 har store, svevende utkragninger på 10 meter i to retninger

Løsningen gir maksimal planfrihet og store, åpne arealer med høy fleksibilitet. Etteroppspenningen tillater også en vesentlig reduksjon i betongvolum og total dekketykkelse, noe som gir lavere materialforbruk og CO_2-avtrykk sammenlignet med tradisjonelle løsninger. Samtidig gir det høy stivhet og kontrollert nedbøyning. Prosjektet er et godt eksempel på hvordan etteroppspenning kan brukes strategisk for å realisere arkitektoniske intensjoner uten å kompromisse på funksjon, samt muliggjøre store åpne fasader fra gulv til tak uten hindringer.

Disse arkitektene og ingeniørene beviser at etteroppspenning ikke bare er et ingeniørgrep, men et arkitektonisk verktøy som gir formfrihet, materialreduksjon og varig bærekraft, egenskaper som er mer aktuelle enn noensinne i en tid hvor ressursbruk og klimabelastning må reduseres drastisk.





Klimagassutslipp per kilo – spennvaier vs. resirkulert armeringsstål

Miljødeklarasjoner (EPD-er) gir oss typiske verdier for slakkarmering på 0,33 kg CO_2equ/kg og tilsv. 0,51 kg CO_2equ/kg for den spennarmeringen som er markedsledende, basert på utslipp. (GreenStrand – Hjulsbro Steel).

Ved første øyekast virker spennstål mindre miljøvennlig per kilo. Men: Spennarmering har mye høyere karakteristisk flytestyrke (ofte >1670 MPa) sammenlignet med slakkarmering (500 MPa). Dermed trenger man betydelig mindre mengde spennvaier for å oppnå samme kapasitet. Selvfølgelig tilkommer noe ekstra fra materialet i ankre, plasthylser og fett, men ved store kabellengder utgjør dette lite i forhold til materialforbruket og kapasiteten til spenntauet.

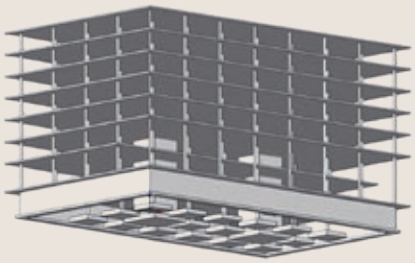
Basert på kapasitet per utslippsenhet for komplett spennsystem er faktisk spenntau ca. 60% mer effektive. I tillegg til å ha høyere flytegrense, gir spenntauet løftekrefter og gjør derved betongen mer bestandig.

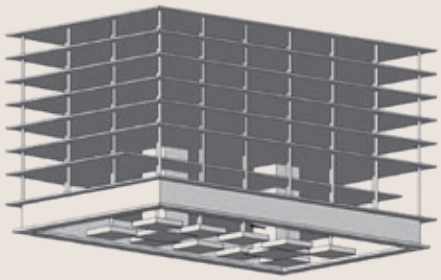
Typisk kabelføring for etterspent dekke

Parabelbuer er helt klart det mest effektive for bæreevnen.

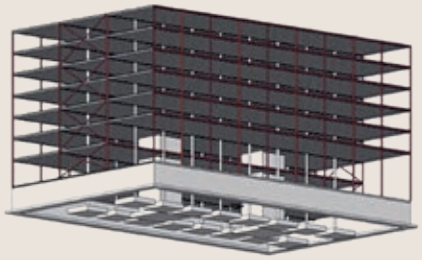
For å forenkle leggingen av kabler gjøres ofte en annen tilnærming, ved at kablene legges flatt ut på felt og heller får større løftekrefter ved søylesonene. Dette gjør det enklere å installere. Videre armeres ofte flatdekker slik at man har konsentrerte bjelkestriper internt i dekket den ene veien og legger fordelte kabler i motsatt retning. Dette forenkler også installasjonen.

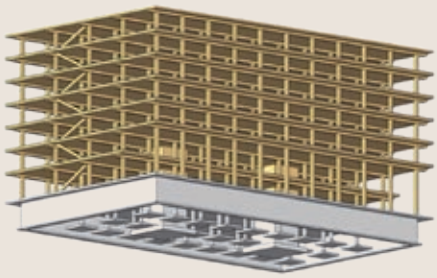
Et annet alternativ som gjerne ønskes i kontorbygg er å legge konsentrerte kabelgrupper i begge retningen og heller slakkarmere det siste dekkefeltet. Dette gir større fleksibilitet med tanke på fremtidige utsparinger til for eksempel nye tekniske sjakter eller ny interntrapp.





Tabellen nedenfor viser en sammenligning mellom CO_2-utslippene til fire ulike dekketyper: Plasstøpt, spennarmert, hulldekke/stål og massivtre – der alle nødvendige materialer er medtatt for å oppfylle tekniske krav til bæreevne, brann og lyd for et kontordekke
Ill.: Bjørnar Hamstad





Eksempel: Sammenligning av ulike konstruksjonssystemer

For å sammenligne ulike konstruksjonssystemer mht. effektivitet, materialbruk og utslipp, er det designet fire forskjellige konstruksjonssystemer for et typisk kontorbygg, størrelse 33,6 x 51,6 m, i hhv. plasstøpt betong, prefabrikkerte betongelementer og som limtre- og massivtredekker. Materialene har ulike statiske egenskaper og må kombineres for å finne dekketykkelser, spennvidder og riktige materialmengder for videre å kunne sammenlignes. Ytterligere optimalisering av byggets ytre form ville kunne optimalisert materialbruken i samtlige eksempler.

Eksempelet er konstruert med optimaliseringer for det valgte ytre format, det er sett på bransjereferanse-utslipp for betong og sammenlignet med tilgjengelige lavkarbonbetongresepter.

Det plasstøpte alternativet er et rent flatdekke med slakkarmering. Dekketykkelse 270 mm armert med 120 kg/m^3. Plasstøptdekket er ytterligere optimalisert med spennarmering. Dette kan utnyttes til større dekkespenn og færre søyler eller til å redusere dekketykkelsen. Med flatdekkespenn på 10x8,7 m er dekketykkelsen 270 mm og ved 7,5x7,5 m er dekketykkelsen redusert til 220 mm, noe som er muliggjort av spennarmeringen. Spennarmeringen kombineres med slakkarmering for å oppfylle standardens krav. I dette dekket er det totalt 5200 m spennkabel mens slakkarmeringen er redusert til 80 kg/m^3.

Prefab-eksempelet er gjort med hulldekker 320 mm, 11,2 m spenn, opplagt på hatteprofiler i stål. Dette gjør konstruksjonen nærmest uten hindringer under dekket, kun nedre flens stikker nedenfor betonghimlingen. Fugestøp og tynnavretting er medtatt.

Trekonstruksjonen har underliggende limtrebjelker lagt i doble bjelkepar for å redusere krymppotensialet i treets tverretning, globalt for konstruksjonen, og for å redusere høyden på bjelkene. Dekkekonstruksjonen er krysslimte massivtreplater som legges i flerspenn og med dekkespenn på 7,5 m. For å ivareta tekniske egenskaper er det valgt å legge en påstøp på 8 cm over tredekket slik at trekonstruksjonen oppfyller krav til vibrasjoner, luftlyd og trinnlyd gjennom dekkekonstruksjonen.

Sammenligning av de fire konstruksjonene, der alle nødvendige materialer er medtatt for å nå tekniske krav til bæreevne, brann og lyd for et kontordekke, ses i tabellen.

Dekketype	Format (m)	Utslipp (Co_2equ/m^2) med vanlig betong	Utslipp (Co_2equ/m^2) med lavkarbon betong
Plasstøpt	7,5 x 7,5	80,0	38,2
Spennarmert (etterspent)	10 x 8,7	86,7	40,9
Spennarmert (etterspent)	7,5 x 7,5	–	31,4
Hulldekke og stål	11,2 x 6,25	89,5	58,9
Massivtre (CLT)	7,5 x 5,25	44,3	32,3

Sammenligningen er utført ved å benytte EPDer for kategoriene A1-A3. Det betyr at klimagassutslipp fra utvinning og produksjon inngår, og at transport fra fabrikk til byggeplass kommer i tillegg. Videre er kun dekkets materialer sammenlignet – søyler, ekstra avstivende elementer og fundamenter er ikke medtatt. Brukbarhet og byggehøyde er heller ikke vektet mot hverandre. Hos trevirket, limtre og CLT er det benyttet GWP-IOBC, som oppgir klimapåvirkningen basert på øyeblikkelig oksidasjon.

KONKLUSJON:
Eksempelet viser at spennarmerte flatdekkekonstruksjoner kan være den mest materialeffektive konstruksjonen – i tillegg til å komme godt ut miljømessig ved bruk av de riktige produktene. Her er spennarmeringen benyttet til å øke betongens stivhet og dermed kunne redusere dekketykkelsen.
Den spennarmerte konstruksjonen gir

- mindre byggehøyde
- mindre areal som opptas av konstruksjonselementer
- færre materialer – og materialer som alene oppfyller alle tekniske krav mht. brann, lyd, vibrasjon og statisk kapasitet
- stor fleksibilitet for fremtidige omgjøringer og endrede bruksmåter – uten inngrep i konstruksjonen
- lang levetid: Innendørs og tørt står betongkonstruksjoner nesten uendelig, siden kjente nedbrytningsmekanismer for betong ikke oppstår i slike miljøer.

Konstruksjoner med stor fleksibilitet, lavt materialbruk og 'evig' levetid, det er bærekraft!