

Herde**teknologi**



Betong

er et materiale der styrke og ikke minst bestandighet bygges opp over tid.

Forholdene de første døgnene etter utstøping betyr spesielt mye for hvilke langtidsegenskaper betongen får.

Dagens byggepraksis med store krav til hurtig fremdrift har ofte gått på bekostning av etterbehandlingen av betongen. Når sement blandes med vann vil det etter kort tid igangsettes en reaksjon som er ledsaget av varmeutvikling. Denne kalles herdevarme. Under kontrollerte forhold vil denne selvoppvarmingen kunne utnyttes på en positiv måte som for eksempel ved vinterstøping. På den andre siden kan herdevarmen også føre til problemer. Dette gjelder for eksempel i massive konstruksjoner, hvor den utviklede varmen ikke kan ledes bort på en kontrollert måte. Dette kan føre til temperaturforskjeller av en slik størrelse at betongen sprekker opp. Et lignende forhold inntreffer ved for hurtig fjerning av isolasjonen / forskalingen ved intens varmeharding ved vinterstøp.

Tradisjonelt har betong vært sett på som et meget bestandig og nærmest vedlikeholdsfritt materiale. I de senere årene har vi dessverre også i Norge fått skader på betong. Mange av dem skyldes at man ikke har tatt vare på betongens iboende egenskaper ved utstøping og herding. Ofte kunne disse skadene vært unngått eller kraftig redusert med enkle og billige tiltak.

Ved bruk av dagens materialkunnskap kan man på en enkel måte sikre den nødvendige fremdrift samtidig som betongens iboende egenskaper ivaretas. En felles betegnelse for dette er herdeteknologi.

I denne brosjyren beskrives de enkelte parameterne som påvirker betongens herding og de styringsverktøy som finnes for materialvalg, isolering og beskyttelse av de ulike konstruksjoner under ulike værforhold.

Norcem FoU



Herdeteknologi

Et viktig verktøy ved vinterstøping og støping av massive konstruksjoner

En viktig forutsetning for en rasjonell byggeprosess er at den kan pågå nesten uansett værforhold

I lange perioder av året vil temperaturen i store deler av landet være lavere enn +5°C. Med et slikt klima er det nødvendig at man behersker betongarbeider ved så vel flere minusgrader som ved snø og isforhold. På den annen side vil bygging av massive konstruksjoner føre til kostbare løsninger for å hindre for høye temperaturer og temperaturgradienter. Herdeteknologi er en systematisering av planlegging, betongproduksjon, støping og etterbehandling bygd på den viten bransjen har gjort bruk av i mange år, særlig innenfor vinterstøping. Herdeteknologien omfatter mange felter:

Ut fra betongens sammensetting kan vi forutsi hvilke egenskaper betongen har med hensyn til størkning, fasthets- og varmeutvikling og hvordan disse egenskapene avhenger av temperaturen. Vi tar hensyn til betingelsene på byggeplassen som konstruksjonstype, dimensjoner, forskalingstype, lufttemperatur og vindforhold. Opplysningene blir satt sammen i et dataprogram som kan hjelpe oss til å besvare en rekke spørsmål:

- Når skal forskalingen rives?
- Hva må evt gjøres for å kunne rive etter fremdriftsplanen?
- Bør vi bruke en annen sementtype?
- Hvordan benytte tilsetningsstoffer ?
- Bør vi bruke mer sement?
- Bør betongtemperaturen være høyere?
- Bør vi bruke en annen type forskaling?
- Er det fare for at betongen fryser?
- Bør betongen til dekkes?
- Hvor lenge bør den i så fall være tildekket?
- Vil det ved formriving være fare for opprissing?

Eksempler på praktisk bruk av herdeteknologi er gitt seinere i brosjyren.



Betongens iboende egenskaper materialsammensetning

Forutsatt at betongen støpes ut og komprimeres på en god måte, vil betongens styrke, tetthet og bestandighet i hovedsak styres av sementlimet. Hvilke potensielle egenskaper som limet har, er igjen bestemt av bindemidlet (sementtype, pozzolaner), bindemiddelmengde og masseforhold (vann/ bindemiddel).

Bindemidlet

Sementer, enten de er rene portlandsementer eller modifiserte sementer, kan være vesentlig forskjellige med hensyn til avbindingshastighet, varme og fasthetsutvikling. Det er sannsynlig at denne forskjellen i bindemiddelegenskaper vil øke.

Bruk av andre sementtyper enn portlandsement (CEM I) eller en kombinasjon av sement og pozzolane bindemidler direkte i betongen er etter hvert blitt vanlig. I Norge er det særlig silikastøv som blir brukt på den sistnevnte måten. Siden bindemidlene har forskjellige iboende egenskaper, er det viktig å ha standardiserte metoder for å fastlegge dem.

Fasthetsegenskapene til sement blir bestemt gjennom standardisert prøving. Det finnes også en standardisert prøvemethode for å bestemme sementens hydrasjonsvarme. Denne blir lite brukt fordi man heller måler temperaturutviklingen direkte i den aktuelle betongen. Figur 1 viser at fasthetsnivået særlig i tidlig alder er vesentlig forskjellige for de ulike sementene. Dette vil naturligvis ha stor betydning med hensyn til opplegg for formriving, glatting av dekker med mer.

Fasthetstilveksten vil også være ulik avhengig av sementtype. Dersom vi erstatter Norcems Standardsement FA med Industrisement, øker tidligfastheten i vesentlig grad. Anleggssement FA har noe lavere tidligfasthet enn Standardsement FA. Vi legger også merke til at fasthetstilveksten for alle sementtypene er stor de første dagene etter utstøpingen. For å oppnå god sluttfasthet og tetthet, er det viktig at herdebetingelsene er gode (god fukttilgang, moderat temperatur).

Ved å øke eller minske sementinnholdet i betongen, vil man til en viss grad kunne kompensere for eventuelle ulikheter i sementenes varme- og fasthetsegenskaper. Det advares imidlertid mot dette i tilfeller hvor den nødvendige justering fører til for lave eller for høye sementmengder i betongen.

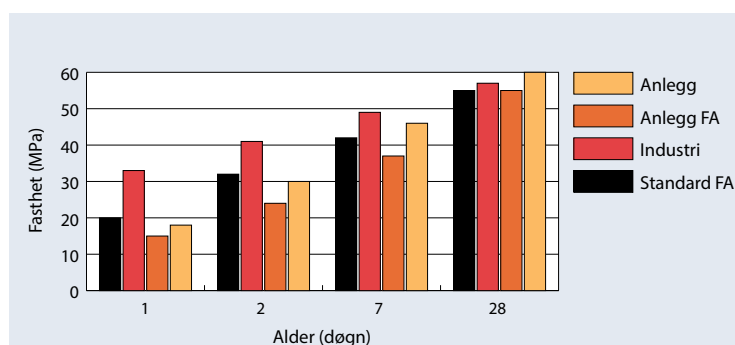


Fig 1. Fasthetsutvikling for Norcems sementer (standard mørtelprøving, NS-EN 196 med m=0,50).

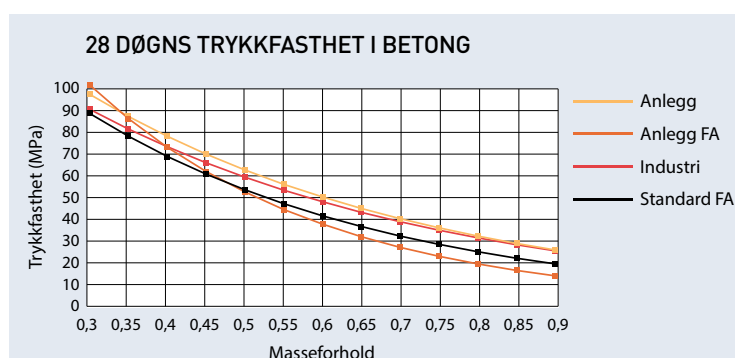


Fig 2. Fasthetsnivået er bestemt av masseforholdet.

Sementmengde/masseforhold - v/c-tall (m)

For normale betongsammensetninger og vanlige norske tilslagsmaterialer, vil betongens sluttfasthet være bestemt av masseforholdet. Sementmengden i betongen bestemmes dermed av vannbehovet ved en gitt konsistens, og nødvendig masseforhold ut fra kravet til fasthet eller bestandighet.

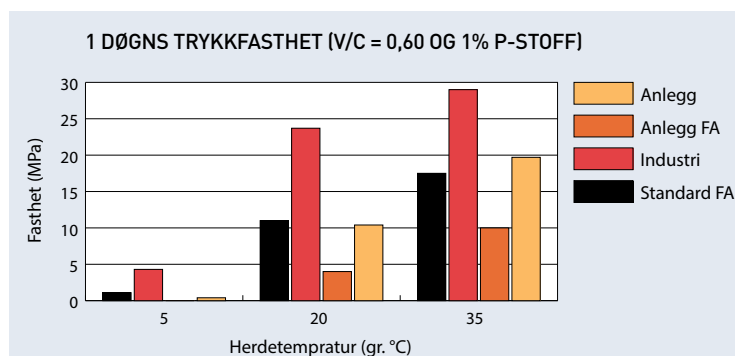


Fig 3. Fasthetsutvikling i tidlig alder er sterkt temperaturavhengig.

Det er i Norge i dag vanlig å benytte vannreducerende tilsetningsstoffer. Anvendelsen av disse har to hovedmål, nemlig å forbedre støpeligheten og å redusere sementforbruket gjennom et redusert vannbehov.

Vinterstid bør man være forsiktig med å redusere sementmengden for mye. Man bør derimot benytte sementens varmeutvikling til å opprettholde en høyere temperatur i betongen over et lengre tidsrom. Man vil da oppnå en akselerering av betongens fasthetsutvikling. Vinterstid vil man derfor ofte være tjent med en økt sementmengde i slankere konstruksjoner.

Innvirkning av silika

Silika er et industrielt fremstilt pozzolan som reagerer med sementens hydratasjonsprodukter. Silikaens pozzolanreaksjon fører til samme type bindestoffer som de sement/vann reaksjonen gir. På denne måten bidrar silika til økning i betongens fasthet og tetthet. Det kan være flere grunner til å bruke silika i betong. Tilsetning av silika vil medføre endrede egenskaper med hensyn til støpelighet, etterbehandlingsbehov, bestandighetsegenskaper og fasthet. Ofte benyttes silika nettopp for å bedre spesielle egenskaper som f eks støpelighet og bestandighet.

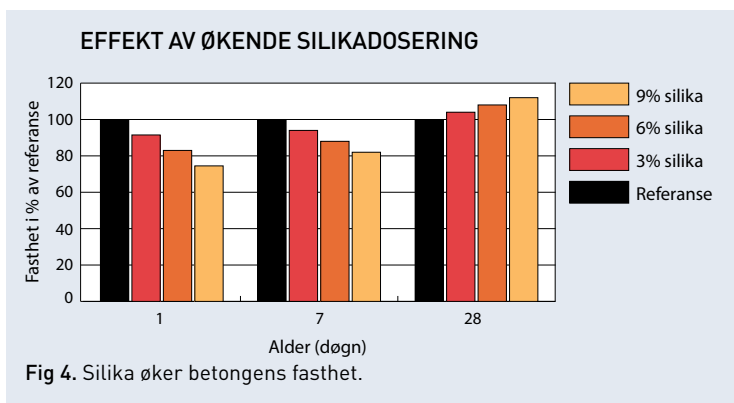


Fig 4. Silika øker betongens fasthet.

Det er viktig å være klar over at silikaens pozzolanreaksjon er mer temperaturømfintlig enn sementens reaksjon med vann. Ved lave temperaturer vil således pozzolanreaksjonen forsinkes. Vinterstid bør man særlig for lave betongkvalitetes være meget forsiktig med å benytte silika for å redusere betongens sementinnhold.

Tilsetningsstoffer

Det finnes i dag en rekke tilsetningsstoffer til betong. I dag produseres nær 100% av all betong med en eller annen form for tilsetningsstoff. De mest vanlige stoffene er de vannreducerende, omtalt tidligere. Den billigste formen for vannreducerende tilsetningsstoffer er lignosulfatene (P-stoffer). Disse har den bieffekten at de ved høye doseringer virker sterkt retarderende på betongens styrkning, varme- og fasthetsutvikling

i tidlig alder. Den retarderende effekten øker med økende dosering. Vannreducerende stoffer av typen superplastiserende (SP-stoffer) var tidligere basert på polymerer av melaminharts og naftalin. De nyere tredje generasjons superplastiserende tilsetningsstoffene (modifiserte polykarboksylater) vil ha vesentlig mindre retarderende effekt. De vil derfor kunne benyttes i doseringsmengder slik at den vannreducerende effekten kan økes.

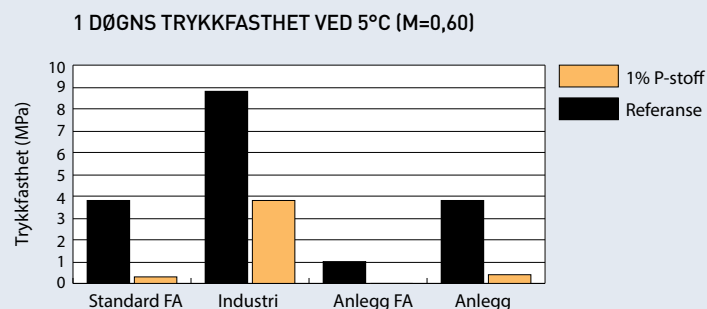


Fig 5. Plastiserende tilsetningsstoffer (P-stoffer) virker ofte retarderende, særlig ved lave temperaturer.

SP-stoffene er vesentlig dyrere enn P-stoffene. Derfor benyttes det av og til kombinasjoner av P- og SP-stoffer når høy grad av vannreduksjon ønskes uten at dette skal medføre uakseptabel retardasjon.

Felles for de plastiserende stoffene (P-stoffene) er at den retarderende effekten øker kraftig når betongtemperaturen blir lav. Vinterstid bør man derfor være meget forsiktig ved bruk av høye doseringer lignosulfatbaserte tilsetningsstoffer. For spesielle støpeoppgaver kan det være aktuelt å benytte akselererende tilsetningsstoffer. Av disse finnes to typer: Størkningsakselererende og herdningsakselererende.

- **Størkningsakselerator** benyttes i nær all sprøytebetong for å begrense prelltap / nedfall og sikre rask fasthetsoppbygging. De senere år er størkningsakseleratorer tatt i bruk i betydelig omfang også i støpebetong (f eks i golvbetong, for å oppnå raskere glatting).

- **Herdningsakselerator** virker ikke særlig inn på betongens størkningsegenskaper, men setter fart i fasthets- og varmeutviklingen. Det kreves ofte forholdsvis høye betongtemperaturer for å oppnå maksimal effekt av herdningsakseleratorene. Kombinasjonen herdningsakselerator og varm betong vil derfor være effektiv ved spesielle støpingsoppgaver vinterstid. De fleste herdningsakseleratorer var tidligere basert på klorider. Dagens herdningsakseleratorer godkjent for bruk til armert betong inneholder imidlertid ikke klorider. Herdningsakselerator er lite brukt. Kloridholdige produkter tillates kun benyttet i uarmert betongmasse f eks til pussmørtel.

Hvordan styres betongens herdeforløp?

Hastigheten av herdeprosessen er i stor grad bestemt av betongtemperaturen. Økes betongtemperaturen, forløper prosessen hurtigere og omvendt: Senkes den, forløper prosessen langsommere.

Reaksjonshastigheten

Ved 35°C skjer herdingen dobbelt så fort som ved 20°C. Ved 10°C er hastigheten det halve av hastigheten ved 20°C. Dette betyr at det tar dobbelt så lang tid før en betong har oppnådd en spesifisert rivingsfasthet dersom herdetemperaturen har vært 10°C i stedet for 20°C. I figur 6 er vist hastighetsfunksjonen ved ulike aktuelle temperaturer. Reaksjonshastigheten $H(T)$ ved 20°C i betongen er 1,0.

Under betongens herding utvikles varme

Temperaturen i en betong som herder uten varmetap til omgivelsene vil øke. Denne egen-oppvarmingen kan føre til en temperaturøkning på inntil 60°C utover utstøpingstemperaturen i en normal betongblanding. Betongens egentlige temperaturforløp vil bestemmes av balansen mellom varmeutviklingen i betongen og varmetapet til omgivelsene.

I meget grove konstruksjonsdeler eller i konstruksjoner som er godt isolert, vil temperaturen bli høy siden det er vanskelig å avgi herdevarme til omgivelsene. I tynnveggede, uisolerte konstruksjoner er forholdet det motsatte. Herdevarmen fjernes på en enkel måte, og

temperaturstigningen blir liten. Et meget viktig element i styringen av betongens herdeforløp vil derfor være å kontrollere betongens herdevarme. Hvor stor andel av herdevarmen ønsker man å ta vare på i form av temperaturstigning i betongen og hvor stor andel som skal ledes bort til omgivelsene. I praksis finnes det mange muligheter for å styre denne balansen.

Vanntapet må forhindres

For ubeskyttede betongoverflater vil det foregå en fordamping av vann fra betongen til luften omkring. Fordampingshastigheten avhenger av betongtemperaturen, lufttemperaturen, luftfuktigheten, vindforholdene og hvordan betongkonstruksjonen er utformet. Forutsetningen for at herdingen skal bli god, er at vi forhindrer vanntap fra betongoverflaten.

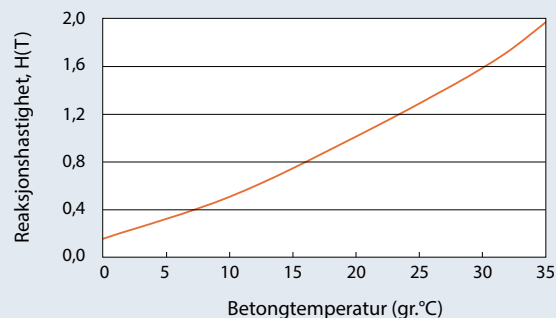


Fig 6. Relativ reaksjonshastighet $H(T)$ ved ulike betongtemperaturer



Varmetap fra konstruksjonen

Betongens iboende egenskaper bestemmer sammen med utstøpingstemperaturen hvilken varme- og fasthetsutvikling som kan oppnås i en gitt konstruksjon. Forholdene på byggeplass avgjør i hvilken grad man tar vare på betongens iboende egenskaper ved å skjermes denne mot uteklimaet.

Der hvor det finnes temperaturforskjeller i et system, vil det alltid foregå en transport av varme fra områder med høy temp til områder med lav temp. Denne varmetransporten skjer gjennom tre ulike transportmekanismer:

- Varmeledning
- Konveksjon
- Stråling

Varmeledning

Varmeledningsmotstanden er en konstant størrelse for en gitt konstruksjon. Denne størrelsen er avhengig av hvilke materialer konstruksjonen er satt sammen av og tykkelsen på de enkelte materiallagene.

Varmeledningsmotstanden $m = d/k$
 $d =$ lagtykkelsen
 $k =$ varmeledningsevnen for materialet

Varmeledningstallet er en materialstørrelse som i stor grad avhenger av materialets porøsitet og fuktinnhold. I tabell 1 er gitt en del materialers varmeledningsevne. Av tabellen leser vi at varmeledningen gjennom en ståplate er over 1000 ganger større enn varmeledningen gjennom en like tykk plate av et vanlig isolasjonsmateriale. I mange tilfelle vil en konstruksjon være satt sammen av flere materialer i lag utenpå hverandre. For en slik konstruksjon er den totale varmeledningsmotstanden satt sammen av motstanden for de enkelte lag. I tabell 2 er gitt varmeledningsmotstanden for en del vanlige forskalingsmaterialer. Tabellen viser at en stålforskaling gir meget lav motstand mot varmetap, mens 15 mm finér har ganske god motstand mot varmeledning. Ståll dekket med etafoam vil også gi bra motstand.

Konveksjon

Varmetapet på grunn av konveksjon oppstår ved at den varme luften inntil forskalingsens utside transporteres bort og erstattes med kaldere luft. Denne lufta blir så varmet opp av forskalingsen før

den bli erstattet med ny kald luft. Varmetapet pga konveksjon er således i stor grad avhengig av hvor raskt luften inntil forskalingsen byttes ut. Dette er i stor grad avhengig av de lokale vindforholdene. Størrelsen på den konvektive varmestrømmen :

- øker med stigende temp-differanse mellom materialets overflatetemp og lufttemp
- øker med økende overflateareal og
- avtar med økende motstand mot konveksjon.

Varmekonveksjonsmotstanden (m_k) avhenger av hvor raskt varmeovergangen kan skje i selve overflateskiktet.

$$m_k = \frac{1}{a_k}$$

hvor konvektivt varmeovergangstall a_k ($\text{kJ/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$).

Stål	209,0
Fersk betong	8,4
Herdet betong	5,9
Lettbetong	2,9
Treverk (fuktig)	0,67
Vanlige isolasjonsmaterialer	0,15

Tabell 1: Materialenes varmeledningsevne k_1 ($\text{kJ/mh}^\circ\text{C}$).

Stålforskaling:	0,00005
Finér 15 mm:	0,022
Finér 22 mm:	0,033
Etafoam 10 mm:	0,067
Vintermatte 50 mm:	0,330
Stål + etafoam 10 mm:	0,067
Finér 15 mm + skumplast 10 mm:	0,089

Tabell 2: Varmeledningsmotstand m_1 ($\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C/kJ}$).

Det konvektive varmeovergangstallet a_k avhenger av hvilke medium overgangen skjer mellom. For eksempel er overgangstallet mellom et fast stoff og luft vesentlig lavere enn tilsvarende overgangstall fra fast stoff til vann. I tillegg er overgangstallet vesentlig influert av hvor raskt luften eller vannet skiftes ut ved overflaten. I tabell 3 er gjengitt konveksjonsmotstand for en del praktiske eksempler:

Faststoff til luft - Vindhastighet	
0 m/sek :	$m_k = 0,050$
2 m/sek :	$m_k = 0,021$
5 m/sek :	$m_k = 0,011$
10 m/sek :	$m_k = 0,006$
20 m/sek :	$m_k = 0,0004$
Faststoff til vann - Stille vann:	
$m_k =$	0,0005
Faststoff til vann - Strømmende vann:	
$m_k =$	0,00005

Tabell 3: Varmekonveksjonsmotstand m_k ($m^2h^\circ C/kJ$)

Tabellen viser at vindhastigheten har meget stor innflytelse på størrelsen på den konvektive overgangsmotstanden. Dette er noe alle som har gått på ski i fjellet har erfart.

Stråling

Varmestråling er en form for energioverføring fra et varmt legeme gjennom f eks luft til et kaldere legeme. Strålingsenergien som treffer en flate vil kunne reflekteres, absorberes eller slippes gjennom (transmitteres). Et høyt absorpsjonstall betyr at et materiale har stor evne til å oppta varme fra stråling. Det betyr også at materialet har stor evne til å avgj varme i form av stråling. I tabell 4 er gjengitt verdier for absorpsjonstallet for en del vanlige materialer.

Materiale	
Betong	$a = 0,93$
Vann	$a = 0,92$
Treverk	$a = 0,85$
Kobber, blankt	$a = 0,04$
Kobber, oksydert	$a = 0,73$

Tabell 4: Absorpsjonstall ved stråling

Beregningsmessig er det meget vanskelig å ta hensyn til størrelsen på varmetapet / varmetilførsel på grunn av naturlig stråling, da dette i stor grad er avhengig av sol- og værforhold. For vertikale flater kan man i stor utstrekning se bort fra strålingen. For utlekkede horisontale flater, kan derimot strålingen ha stor betydning. Denne medfører blant

annet at man ved dekke støp vinterstid kan oppleve at overflateskiktet har frosset i løpet av natten selv om det ikke har vært kuldegrader. Dette unngås ved å dekke til med plastfolie før man går hjem om kvelden. Ofte vil det da dannes rim på undersiden av plasten uten at det oppstår skade på selve betongen.

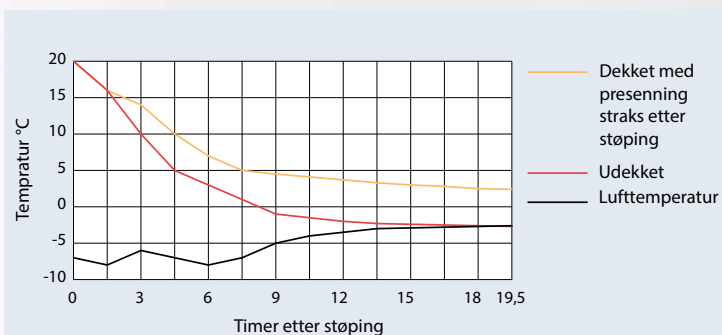


Fig 7. Eksempel på temperaturfall i en 100 mm plate, udekket og dekket umiddelbart etter støping

Varmetap ved fordamping

Ved støping av dekker hvor det ikke benyttes noen form for tildekking, vil uttørkingen fra overflaten gi vesentlige bidrag til varmetapet. Dette varmetapet skjer ved at vannet i overflaten fordampes og derved avgis fordampingsvarmen fra betongen til luften over overflaten. Jo mer vann som fordampes, jo mer varme forsvinner fra betongen. Den mengde vann som forsvinner avhenger av temp og fuktforhold i lufta, vindhastigheten og betonges overflate-temperatur. Denne effekten av uttørking kan drastisk reduseres ved å benytte en membranherdner.

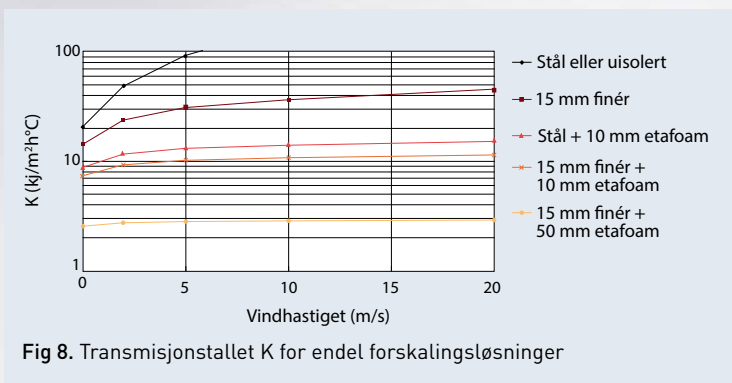


Fig 8. Transmisjonstallet K for endel forskalingsløsninger

Effekt av konstruksjonsforhold

Det totale varmetapet fra en konstruksjonsdel er avhengig av konstruksjonens dimensjon og geometri. Det er forholdet mellom varmekapasiteten til konstruksjonens volum og varmeavgivelsen fra konstruksjonens totale overflate som bestemmer konstruksjonens avkjølingsforhold. En bjelke vil ha større forholdsmessig overflate enn en vegg og dermed større avkjøling. Effekten av tykkelsen på avkjølingsforholdene er større jo dårligere isoleringen i overflaten er. Dette betyr at tykkelsen av konstruksjonen har større betydning for dekker, særlig når man ikke benytter noen form for tildekking. For to vegger med samme forskalings-system, men med forskjellig tykkelse, vil således den tynneste veggen ha større forholdsmessig overflate og dermed større avkjøling. Matematisk kan dette beskrives ved hjelp av avkjølingstallet:

$$a = \frac{\sum (k \cdot A)}{V \cdot R \cdot c} \quad (h^{-1})$$

a = avkjølingstall
 K = transmisjonstall i overflaten
 A = overflateareal V = volum
 R = romvekt c = varmekapasitet

Et høyt avkjølingstall vil gi stort varmetap til omgivelsene. Transmisjonstallet K for en valgt forskalingsløsning er satt sammen av følgende:

$$K = \frac{1}{m} = \frac{1}{m_f + m_i + m_k}$$

m_f = motstandstall for forskaling
 m_i = motstandstall for isolasjon
 m_k = konvektivt motstandstall

når man ikke tar hensyn til varmetapet fra stråling og fordamping.

Størrelsen på transmisjonstallet K for en del vanlige forskalingsløsninger er gjengitt i figur 8. Figuren viser at for et uisolert dekke og for stålforskaling, har vindhastigheten meget stor betydning for avkjølingen. Når vindhastigheten øker fra 2 m/sek til 5 m/sek øker transmisjonstallet for uisolert / stålforskaling fra ca 50 kJ/m²h°C til ca 90 kJ/m²h°C, dvs at avkjølingen øker til det nesten dobbelte. Når forskalingen i utgangspunktet har bedre isolerende evne, vil effekten av vind bli betraktelig redusert. For en 15 mm finérplate vil transmisjonstallet øke fra 23 kJ/m²h°C til 30 kJ/m²h°C når vindhastigheten øker fra 2 m/sek til 5 m/sek. Dette tilsvarer en økning på ca 25%.



Problemstillinger

Dagens krav til effektiv drift krever rasjonell bruk av forskalingen og at de ulike driftsoperasjonene kan følge etter hverandre så raskt som mulig. En forutsetning for en vellykket arbeidsprosess er at vi vet hvordan temp- og fasthetsutviklingen i betongen er. Fasthetsutviklingen er avgjørende blant annet for å avgjøre når betongen er frostsikker ved støping om vinteren.

NS-EN 13670:2009+NA:2010 stiller krav om at betong ikke skal fryse før den har oppnådd en fasthet på 5 MPa. Vi må også kjenne til fasthetsutviklingen for å avgjøre om vi kan foreta oppspenning av spennarmerte konstruksjoner. Høy herdetemp gir en mer porøs betong, noe som igjen fører til at betongen blir mindre bestandig og at den får lavere sluttfasthet. NS-EN 13670:2009+NA:2010 krever at temperaturen ikke skal overstige 70°C. Dette kravet er begrunnet i at det ved høyere herdetemperaturer kan være fare for "forsinket ettringitdannelse". Det bør kontrolleres at det ikke oppstår for store temperaturforskjeller mellom betongens indre og betongens overflate, eller mellom overflaten og lufta når forskalingen rives. I begge tilfeller kan det oppstå sprekker i betongen.

Krav til utførelse

Det stilles en rekke krav til utførelse av betongarbeider:

- En del av disse kravene er nedfelt i NS-EN 13670:2009+NA:2010
- En del krav kan være særlige byggherre krav (Vegdirektoratets prosesskode)
- Krav til utførelse kommer også inn som entreprenørkrav for å sikre fremdrift og minimalisere kostnader

Vinterstøping

Betongstøping under frost og vinterforhold må bare utføres når alle hjelpemidler som er nødvendige for å sikre betongen en tilfredsstillende temp under blanding, støping og herding finnes på byggeplassen og er klare til bruk før støpingen begynner.

NS-EN 13670:2009+NA:2010 stiller følgende krav til vinterstøping av betong:

- Grunn, forskaling eller konstruksjonsdeler som er i kontakt med fersk betong, skal ikke ha en temperatur som fører til at betongen fryser før den har en tilstrekkelig fasthet til å motstå skade
- Hvis omgivelsestemperaturen forventes å være under 0°C på støpetidspunktet eller i

herdeperioden, skal det tas forholdsregler for å beskytte betongen mot skade som følge av frysing

- Det skal treffes tiltak som sikrer at betongens temperatur ikke på noe sted skal synke under 0°C før betongen har oppnådd fasthet på minst 5 MPa
- I henhold til NS-EN 206 skal temperaturen i den ferske betongen ikke være lavere enn 5°C ved levering på byggeplass

Når betongen plasseres i formen, skal grunnen, forskaling og armering i praksis være fri for snø og is. Utgangspunktet for dette er at snø og is vil smelte og øke vanninnholdet lokalt i betongen. Dette vil kunne medføre vesentlige svekkelser av den herdnende betongen. Særlig kan nedsatt heft til armeringen resultere i alvorlige skader. Fjerning av snø og is kan gjøres på flere måter. Når det er snakk om store flater med mye snø og is, er ofte steaming den beste metoden. Varmluft i kombinasjon med tildekking kan ofte være et alternativ; særlig ved støping på grunn der oppvarming av underlaget vil være helt nødvendig.

Tining av mindre konsentrerte snø- og ismengder, f.eks. på utstikkende skjøtejern gjøres ofte lettest ved å benytte gassflamme. Fjerning av snø og is fra forskaling og armering kan være både tidkrevende og vanskelig, derfor er det ofte hensiktsmessig å unngå mest mulig av dette arbeidet ved tildekking etter hvert som forskalings- og armeringsarbeid skrider frem.

De tilfeller der det er mest vesentlig å tine opp underlaget er ved støping på grunn som kan være telefarlig. Utilstrekkelig oppvarming av telefarlig underlag kan medføre både hulrom og uholdbare setninger når underlaget en gang tiner opp.

Erfaringsmessig vil en herdet betong få varige skader dersom den fryser før den har oppnådd en viss modenhet. Vann som fryser til is utvider seg ca 9%. Dersom vannet i en fersk betong fryser, vil betongen utvide seg ca 2%. Når den ferske betongen fryser, omdannes vannet til is, og vannet reagerer da ikke med sementkornene. Hydratiseringen kommer ikke i gang før betongen tines. En slik betong blir porøs og av dårlig kvalitet med betydelig nedsatt fasthet og bestandighet. Ved støping av dekker kan tidlig frysing føre til oppsmuldring av overflaten og medføre behov for ekstrabehandling før påstøp (utmeisling etc).

Dersom en har grunn til å tro at en betong har frosset i tidlig alder, må forskalingen ikke rives før aktuell fasthet er kontrollert ved prøving.

Om betong som er delvis herdet utsettes for en frostpåkjenning, vil det frie vannet i porene gå over til is. Volumutvidelsen ved isdannelsen fører til spenning i betongmassen. Har betongen ikke oppnådd høy nok fasthet, vil denne spenningen føre til rissdannelser. Langvarig frostpåkjenning gir større skader enn kortvarig, og gjentatte fryse- og tinepåkjenninger øker skadene. Man sier at betongen er frostsikker når den har fått en så høy fasthet at den kan tåle en frysing uten å ta varig skade. Et vesentlig punkt for å sikre betongens kvalitet er derfor å påse at betongen ikke fryser før den kan tåle dette. I henhold til NS-EN 13670:2009+NA:2010 gjøres dette ved å sikre at betongens temp ikke på noe sted faller under 0°C før betongen har nådd en fasthet av 5 MPa. Dersom betongen ikke har oppnådd 5 MPa før første frysing, vil den få varig skade i form av fasthetstap og nedsatt holdbarhet (figur 9).

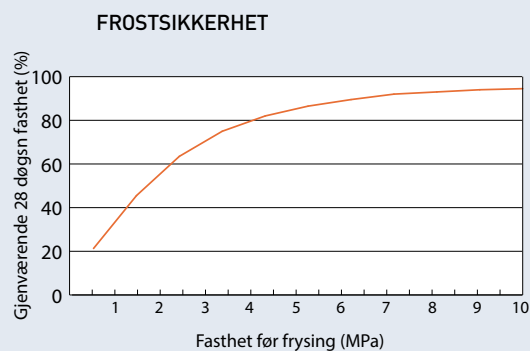


Fig 9. De tildels store fasthetstap som oppstår når betongen fryser før den har bundet av (dvs fasthet mindre enn 1-2 MPa) skyldes dannelse av islinser eller isnåler i betongen. Når disse tiner, dannes et hulrom mellom tilslag og bindemiddel.

Betongen skal i minst mulig grad utsettes for kraftig uttørking, for overoppheting eller for karbon-dioksydrike gasser i løpet av det første døgnet. I det tidsrommet skal man være varsom med bruk av bensin- eller dieseldrevne varmluftsaggregater til oppvarming av betong med fri overflate.

Temperatur /-forskjeller

Ved all form for betongstøping vil det oppstå temperaturforskjeller internt i konstruksjonen. Dette kan enten være forskjeller over tverrsnittet innen støpeavsnitt, eller forskjeller mellom ny og gammel betong. Når betongoverflaten avkjøles raskere enn betongkjernene, vil det oppstå strekkspenninger i overflaten. Dersom temperaturkontraksjonen kun holdes tilbake i kjernen i betongtverrsnittet, vil overflaten risse opp dersom differansen mellom max temp og randtemp overstiger en viss grense. Ved rask avkjøling (f.eks. ved riving av forskaling) vil denne grensen ofte bli satt til 20°C. Ved tynne veggkonstruksjoner er det teknisk mulig å oppfylle

dette kravet, men ved grove konstruksjoner som er utsatt for kraftig avkjøling i overflaten, f eks ved undervannsstøp, er dette nærmest umulig å oppfylle.

Bildet blir mer komplisert når tempkontraksjonen i tillegg holdes tilbake av andre konstruksjonsdeler (vegg støpt mot stivt fundament, fundament mot kaldt, fortannet fjell eller dekke støpt mot stiv vegg).

En vil få et tillegg i strekkspenningene, avhengig av innspenningsgraden og hvor fort avkjølingen skjer. Dersom en har full innspenning og avkjølingen skjer fort (ingen spenningsavlastning pga kryp i betongen), kan riss oppstå allerede dersom differansen mellom den nystøpte konstruksjonsdelens middeltemp og underlagets temp overstiger 13°C. Om vinteren er det vanligvis umulig å overholde et slikt krav. Selv et krav på 30–40°C vil være vanskelig å oppfylle. Ved støping av grove konstruksjoner om sommeren, hvor max temp i betongen kan nå 60–65°C, kan det også være vanskelig å oppfylle dette.

Eksempel: Entreprenørkrav til fremdrift

For å oppnå en god produksjon, kan entreprenøren stille følgende krav til fremdrift (riving):

Vegg/søylar: Dagen etter utstøping (16 timer)

Dekker: Helst dagen etter utstøping, men kan tillate 2–3 døgn.

For at forskaling kan rives til de ønskede tidene, må betongen har oppnådd følgende egenskaper:

Vegg	MPa
Riping	2-3
Sig	3-5
Uttrekk	3-5
Frost	5
Dekker	Nebøying / Opprissing
Spennvidde	4 m : 15 MPa
Spennvidde	2 m : 8 MPa
Frost	5 MPa

Etterbehandling

God etterbehandling betyr at betongens herdebetingelser er slik at de sikrer dens iboende egenskaper. Etterbehandlingen skal:

- Sikre at sementen får tilstrekkelig fuktighet til å hydratisere
- Sikre at betongoverflaten ikke svekkes eller sprekker opp på grunn av tidlig uttørking (plastiske svinriss)
- Sikre at betongen oppnår en gunstig fasthetsutvikling både med hensyn til fremdrift / avforming og langtidsfasthet / bestandighet
- Sikre at betongen ikke blir utsatt for frysing før den har fått tilstrekkelig styrke
- Sikre at betongen ikke får skader på grunn av temperaturspenninger

Etterbehandlingen må sikre at betongen har rikelig med fuktighet under herdingen. Fuktigheten i betongen forsvinner dels ved selvuttørking når vann bindes kjemisk til sement og dels ved uttørking. De første døgn etter utstøping vil være de mest kritiske med hensyn til behovet for fuktighet. Effekten av manglende fuktlagring de første døgn etter utstøping avhenger blant annet av sementtype, sementmengde, v/c-tall, utstøpingstemperatur, konstruksjonstype og dimensjon.

Standarden setter krav til herdetiltak som skal sikre lav fordamping fra betongoverflaten. Varigheten av herdetiltakene skal være tilpasset utviklingen av betongens egenskaper iht NS-EN 13670:2009+NA:2010. Kap 8.5 angir beskyttelses- og herdingstiltak og definerer 4 herdeklasser. I tillegg F i NS-EN 13670 er gått minste periode med herdetiltak for de ulike herdeklassene. For herdeklasse 2 er minste periode for herdetiltak gjengitt i tabell 5 under.

Permeabiliteten er en parameter hos betong der effekten av manglende fuktherding trolig er større enn for trykkfasthet. Siden permeabiliteten er den betongparameteren som er av størst betydning for betongens bestandighet vil betong utsatt for manglende fuktherding ha betydelig svekket bestandighet. Dersom man ikke straks etter avforming påser at betongen får tilstrekkelig fuktherding vil fasthets- og tetthetsutviklingen nærmest kunne stoppe helt opp.

Dette vil kunne påføre betongen skader allerede i byggefasen som kan redusere konstruksjonens levetid betraktelig. Trenden innenfor dagens betongbygging er at man ønsker stadig tidligere formriving. Selv vinterstid med lave utetemperaturer avformes betongen ofte allerede 16-20 timer etter utstøping. For å oppnå dette benyttes ofte varmbetong eller sterke varmekilder for å akselerere betongens herding. Dette gjør at man avformer betong med meget høye temperaturer. Dersom man da ikke etterbehandler betongen skikkelig vil man kunne svekke konstruksjonens bestandighet i vesentlig grad. Overflateskittet tjener som overdekning for armeringen. En uttørking i meget tidlig alder vil føre til en åpnere porestruktur som igjen vil medvirke til at væsker og gasser lettere kan trenge inn i betongen. Karbonatiseringen av betongoverdekningen går dermed raskere og betongens alkaliske beskyttelse av armeringen fjernes raskere.

Sammen med økt vannsugingsevne og økt oksygen-diffusjon fører dette til at betongens levetid med hensyn til armeringskorrosjon vil kunne reduseres betraktelig.

Ved at porestrukturen blir mer åpen og vannsugingsevnen øker, vil betongoverflatens frostbestandighet kunne svekkes i betraktelig grad.

Betongoverflatetemperatur (t) °C	Minste periode med herdetiltak i døgn ^{a)}		
	Utvikling av betongfasthet ^{c) d)} $(f_{cm2} / f_{cm28}) = r$		
	Rask $r \geq 0,50$	Middels rask $0,50 > r \geq 0,30$	Langsom $0,30 > r \geq 0,15$
$t \geq 25$	1,0	1,5	2,5
$25 > t \geq 15$	1,0	2,5	5,0
$15 > t \geq 10$	1,5	4,0	8,0
$10 > t \geq 5$ ^{b)}	2,0	5,0	11

^{a)} Pluss avbindingsperioder som overskrider fem timer
^{b)} Har betongtemperaturen vært lavere enn 5°C i deler av perioden, bør varigheten av herdetiltakene utvides tilsvarende
^{c)} Utviklingen av betongfastheten er forholdet mellom midlere trykkfasthet etter to døgn og midlere trykkfasthet etter 28 døgn, bestemt fra initiell prøving eller basert på deklarasjon fra betongprodusenten (se NS-EN 206-1)
^{d)} For betong med meget langsom fasthetsutvikling bør det angis spesielle krav i produksjonsunderlaget.

Tabell 5. Minste periode for herdetiltak i døgn for herdeklasse 2. (Tillegg F, NS-EN 13670:2009+NA2010)

En betongoverflate som har vært utsatt for uttørking momentant etter utstøping, vil være vesentlig mindre bestandig overfor fryse/tine-påkjenninger enn en beskyttet betongoverflate.

Det er flere måter å forhindre at betongen tørker ut. I tidligere tider var vanning av overflaten standard prosedyre. I dag dekker vi ofte med plastfolie eller påfører membraner.

Kravene til herdetiltak avhenger også av brukskravene. For konstruksjoner der vi stiller spesielle krav til tetthet, f.eks. vannbeholdere, kan kreves en mer omfattende fuktherding. Under herdingen bør vi passe på at det ikke oppstår store temperaturforskjeller mellom betongoverflaten og det indre av betongen. Det kan føre til oppsprekking, med særlig negativ effekt for bestandigheten. Tidlig riving av en isolert form i kjølig vær eller vanning av en varm overflate kan gi slike sprekke-dannelser og må derfor frarådes. Dersom temperaturforskjellen mellom lufta og betong-overflaten overstiger ca 40°C når støpeformen rives, kan betongen sprekke opp.

Vegger og søyler

Forskalingen er ofte tilstrekkelig til å holde på fuktigheten i vegger og søyler. Derfor behøver vi som regel ikke å vanne så lenge forskalingen står. Men hvis veggene er utsatt for sterk varme, sol og vind, vil en treforskaling tørke og trekke fuktighet ut av betongoverflaten. I tørt og varmt vær bør vi derfor vanne slike forskalinger den første uken etter støpingen.

Dekker

Dekker og andre åpne flater er særlig utsatt for uttørking. Det er ikke bare temperaturen, men også vinden som bidrar til det. Dagens praksis ved støping av dekker medfører ofte at betongoverflaten



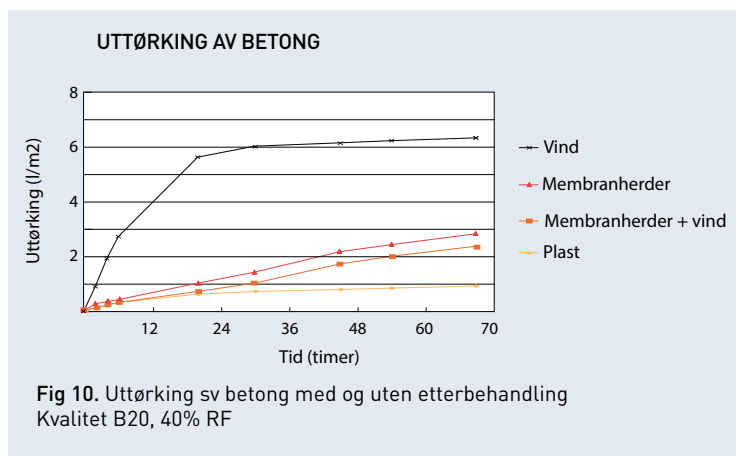
tørker ut rett etter utstøpingen. Denne tidlige uttørkingen fører til at den ferske massen trekker seg sammen. Dersom sammentrekningen er større enn evnen i massen til å motstå tøyningene, oppstår det riss. Rissene kalles plastiske svinnriss fordi de oppstår mens betongen ennå er plastisk, altså før størkningen er avsluttet.

Disse rissene har et karakteristisk utseende. De er ca. 50-100 mm lange og 1-3 mm brede. De går ofte tvers gjennom dekketøpen og reduserer tettheten og bestandigheten i betongen. Betong som har et høyt fillerinnhold, særlig i kombinasjon med silikastøv, er mest utsatt for denne typen riss. I den første tiden etter at det ble vanlig å bruke silikastøv oppsto en rekke slike skader under støping av dekker. Å dekke til med plast eller påføre en membran etter utstøping, har vist seg å være meget effektivt for å hindre at slike riss oppstår. Etter avsluttet størkning øker fastheten raskt. I de første dagene vil betongen være følsom for uttørkingssvinn. Som diskutert tidligere, angir NS-EN 13670:2009+NA:2010 varigheten av herdetiltakene. Egnede herdetiltak kan være vanning eller bruk av fordampingshindrende midler. Av praktiske årsaker bruker vi ofte en membranherder. Den påføres umiddelbart etter avretting. De fleste membranherdere er effektive i ca ett døgn, deretter må vi dekke til med plastfolie eller vanne. Se fig 10.

Noen typer membranherdere gir en hinne som forsvinner etter hvert, og som ikke skaper problemer for senere overflatebehandling, f.eks. maling eller påstøp. Er du usikker på hvordan produktet virker, må produsenten kontaktes.

Å vanne for tidlig er like galt som å vanne for lite. Vanningen skal ikke begynne før betongen er ferdig med å størkne, vanligvis 8-10 timer etter utstøping, avhengig av sementtype og temperatur.

Bruk av betong med silikainnblanding stiller større krav til fuktig herding den første tiden. Hvis slik betong tørker ut for tidlig, er faren for svinnriss stor.



Modellering av temperatur- og fasthetsutvikling

Tid og temperatur er to av de viktigste faktorene som påvirker betongens fasthetsutvikling. Den kombinerte effekten av tid og temperaturhistoriens virkning på fastheten er kalt modenhet.

Modenhetskonseptet kan beskrives slik:

En betong vil ved samme modenhet ha oppnådd samme fasthet uavhengig av hvilken tid/ temperaturhistorie som resulterer i modenhetsverdien. For et aktuelt støpearbeid kan man naturligvis følge prosessen ved å måle temperaturutviklingen og fasthetsutviklingen i selve konstruksjonen ved de ønskede tidspunkt. Dette er ofte vanskelig og kostnads-krevende. I stedet for dette brukes mer og mer en matematisk modellering. For å kunne beregne herdeforløpet i en betongkonstruksjon trengs:

- Betongens fasthetsutvikling ved konstant temperatur, dvs. betongens isoterme fasthetsutvikling.
- Betongens varmeutvikling som følge av sementens reaksjon med vann, dvs. betongens adiabatisk varmeutvikling.
- Innvirkningen temperaturen har på henholdsvis varme- og fasthetsutvikling må beskrives med en reaksjonshastighets- eller modenhetsfunksjon.
- Varmebalansen internt i konstruksjonen og eksternt mot omgivelsene.
- En matematisk sammenkobling av elementene over til et samlet beregningsverktøy: EDB-programmet. det finnes forskjellige slike simuleringprogrammer i dag. Norcem tilbyr programmet HETT.

Modenhetsmodell

Modenhetsmodellen gjør det mulig å sammenligne herdeprosessen som foregår under forskjellige tid-/ temperaturhistorier og sammenligne denne med ekvivalent herdetid ved 20°C.

For å oppnå dette må man kjenne sementens reaksjonshastighet med vann ved forskjellige temperaturer. Denne uttrykkes ved en Arrenius-funksjon:

$$H(T) = \exp \left[E(T) \frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right] \frac{1}{R}$$

$E(T)$ = Empirisk aktiveringsenergi

R = Gasskonst. 8,314 J/mol C

$E(T)$ = A+B (20-T)

B = 0 for $T > 20^\circ\text{C}$

A og B er empiriske konstanter bestemt ved kurvetilpasning av fasthetsutviklingen ved 20°C opp til ca. 50 % av 28 døgns fasthet. Hastighetsfunksjonen $H(T)$ er vist i et tidligere avsnitt, fig. 6.

En betong som har herdet ved temperaturen T_1 i en tid Δt_1 har da modenhet

$$M_1 = H(T_1) \cdot \Delta t_1$$

Ved å dele herdeforløpet inn i intervaller ved konstant temperatur blir da den totale modenhet

$$M = \sum H(T_i) \cdot \Delta t_i$$



Egenskapsmodeller

Både den isoterme fasthetsutviklingen og den adiabatisk varmeutviklingen beskrives ved hjelp av en generell egenskapsutviklingsfunksjon

$$y = y_u \cdot \exp \left[\left(\frac{t}{M} \right)^a \right]$$

hvor

y = egenskapsverdi,

y_u = sluttverdi (asymptoteverdi) for egenskapen,

t_e = en konstant med dimensjon timer, karakteristisk for betongen,

a = Krumningsparameter, en konstant karakteristisk for betongen.

I et logaritmelineært diagram vil egenskapsutviklingen avbildes som en S-kurve. Parametersettet vil avhenge av betongens delmaterialsammensetning. Det må derfor bestemmes et sett for hver betongresept. For fasthet bestemmes parameterne når en kjenner fasthetsutviklingen ved normert herding (vannlagret ved 20°C).

Varmeutviklingen for den aktuelle betongen bestemmes ved måling av temperaturutviklingen for en betongprøve utstøpt i en godt isolert kasse, korrigert for det reelle varmetapet fra kassa i måleperioden (adiabatisk temperaturforløp).

Med kjennskap til betongreseptens adiabatisk varmeutvikling, den aktuelle konstruksjonens varmetapsegenskaper (se tidligere avsnitt) og antatt kjennskap til lufttemperatur og vindforhold i herdeperioden kan temperaturutviklingen i konstruksjonsdelen simuleres.

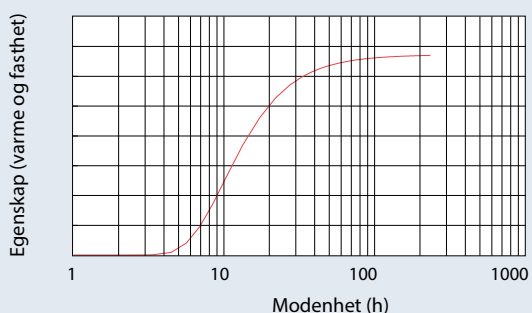


Fig 11. Sammenheng mellom egenskap og modenhet



Herdeteknologiprogrammet **HETT**

Norcem tilbyr sine kunder det brukervennlige herdeteknologiprogrammet HETT. Det er tilpasset norske forhold og betongrecepter med Norcems ulike sementer.

I de neste figurene er det vist eksempler på bruk av HETT.

I figur 12 og 13 er det vist temperatur og fasthetsutvikling i en betongplate hvor hovedforutsetningene er som følger.

Konstruksjon:	Betongplate 300mm
Kvalitet:	Statens vegvesen SV Standard
Sement:	Norcem Standard FA, 400kg
Forskaling:	18mm finer, isolert
Betong temperatur:	15 °C
Lufttemperatur:	-5 °C
Vind:	Lett bris (5m/s)
Tildekking:	Ingen

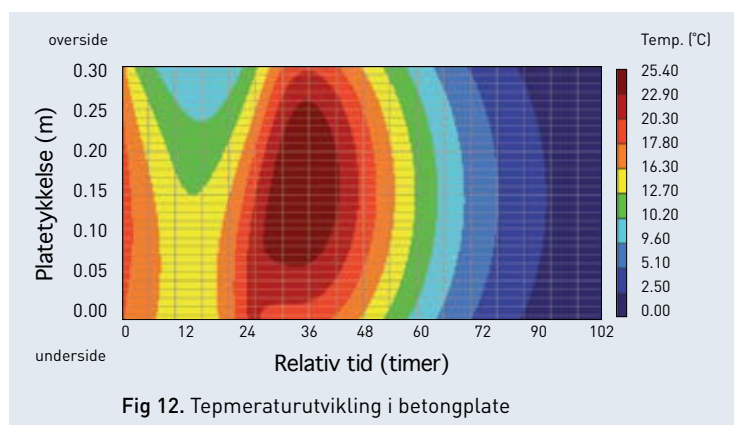


Fig 12. Tepmeraturutvikling i betongplate

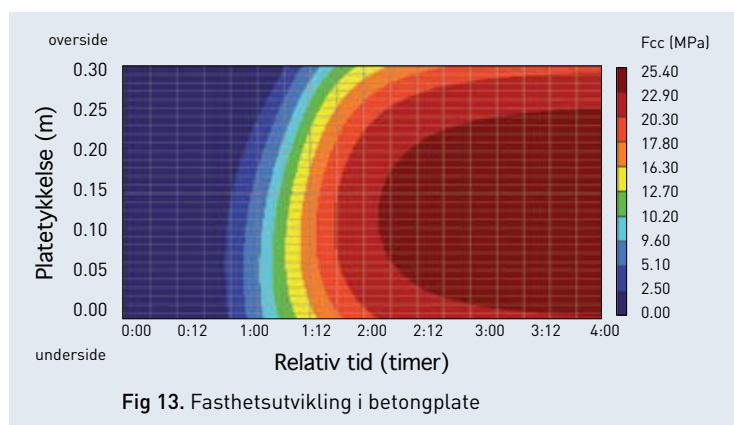


Fig 13. Fasthetsutvikling i betongplate



I eksemplene i figur 14, 15 og 16 er det sett på endringen i betongenes fasthetsutvikling under ulike forutsetninger som, varierende lufttemperatur, varierende vindforhold og varierende forskaling. Forutsetningene er som følger.

Konstruksjon: Betongvegg 20cm
 Kvalitet: B30 M60
 Sement: Norcem Standard FA
 Betong temperatur: 20 °C

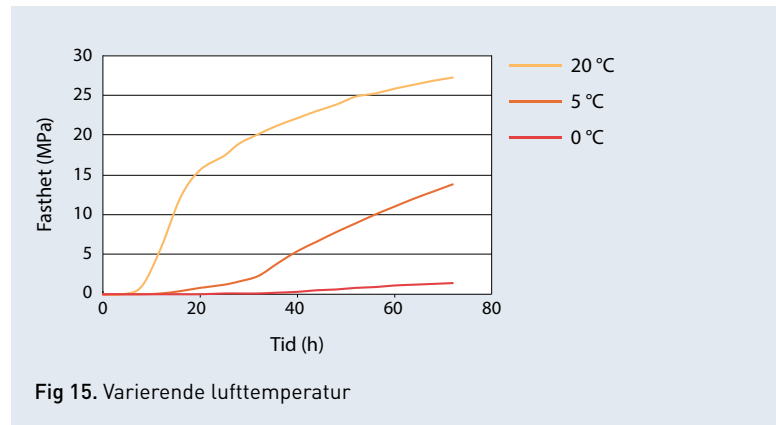


Fig 15. Varierende lufttemperatur

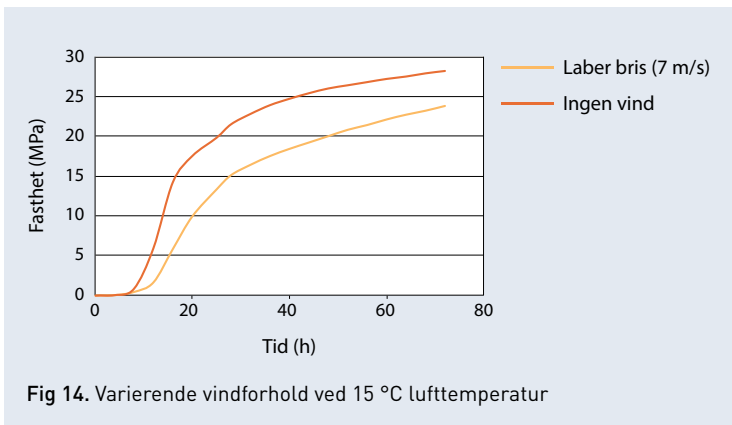


Fig 14. Varierende vindforhold ved 15 °C lufttemperatur

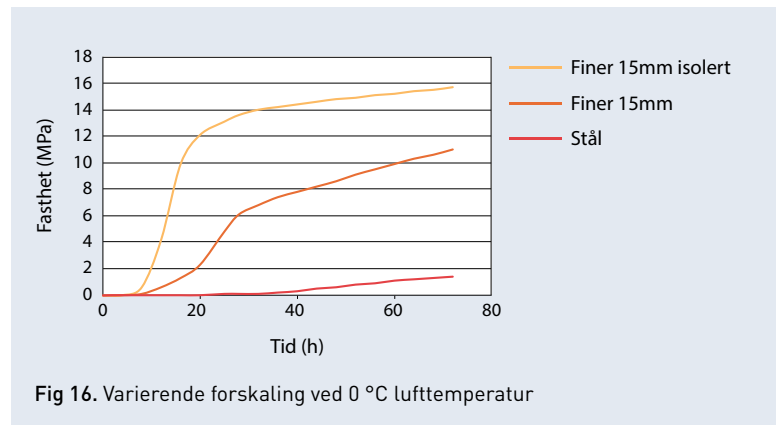


Fig 16. Varierende forskaling ved 0 °C lufttemperatur



NORCEM

HEIDELBERGCEMENT Group

Hovedkontor/Markedsavdelingen
Norcem A.S
Postboks 143 Lilleaker, 0216 Oslo
Telefon: 22 87 84 00
Telefax: 22 87 84 01

Forsknings- og Utviklingsavdeling - FoU
Norcem A.S
3950 Brevik
Telefon: 35 57 20 00
Telefax: 35 57 04 00

www.norcem.no