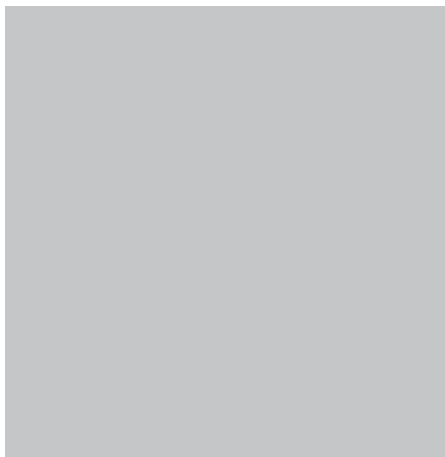
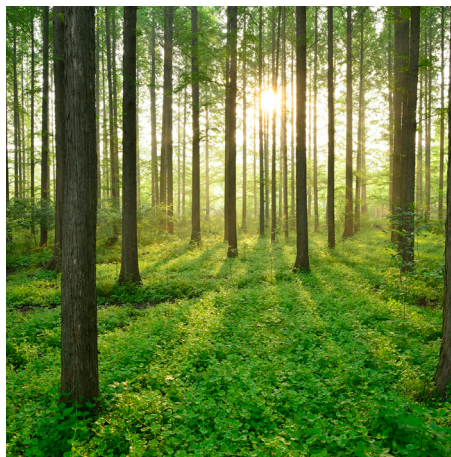


METODER FÖR ATT REDUCERA CEMENTÅTGÅNG VID DAMMBYGGNAD

RAPPORT 2025:1143



Metoder för att reducera cementåtgång vid dammbyggnad

MANOUCHEHR HASSANZADEH, KARIN APPELQUIST, BIRGIT FREDRICH

ISBN 978-91-89918-50-4 | © Energiforsk december 2025

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Att minska cementåtgången vid dammbyggnation kräver ett samspel mellan flera strategiska åtgärder. Genom att använda resurseffektiva konstruktioner, välja rätt betong för rätt plats och tillämpa klimatförbättrad betong kan både miljöpåverkan och materialförbrukning reduceras. Internationella metoder visar att en uppdelning av konstruktionen i olika delar med varierande krav på betongens egenskaper – särskilt i de yttre skikten – kan bidra till en mer hållbar och optimerad byggprocess. Ett sådant synsätt öppnar för att kravställningen anpassas efter exponeringsklass och geometri, snarare än att hela konstruktionen behandlas som en enhet med likartade krav.

I projektet "Metoder för att reducera cementåtgång vid dammbyggnad" har byggnationen undersökts utifrån dammkonstruktionens olika delar, med målet att åstadkomma en resurseffektiv konstruktion. Genom att tillämpa en differentierad kravställning kan både tekniska och miljömässiga mål uppnås utan att kompromissa med kvalitet eller säkerhet. Projektet har utförts av Karin Appelquist, tillsammans med Birgit Friedrich och Manouchehr Hassanzadeh, på Sweco.

Projektet har finansierats av Energiforsk genom FoU-programmet Betongtekniskt program vattenkraft, etapp 2022-2024. Programmets intressenter är Fortum Sverige, Holmen Energi, Jämtkraft, Karlstads Energi, Skellefteå Kraft, Statkraft Sverige, Sydkraft/Uniper, Tekniska Verken, Umeå Energi samt Vattenfall Vattenkraft. Projektets referensgrupp har utgjorts av representanter från programmets styrgrupp: Per Fektenberg och Thomas Mikaelsson, samt teknisk expert Martin Rosenqvist.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

För att minska cementåtgången vid dammbyggnad avsevärt krävs en kombination av åtgärder, såsom resurseffektivare konstruktioner, rätt betong på rätt plats och användningen av klimatförbättrad betong. I denna rapport presenteras även förslag på metoder liknande äldre konstruktioners uppbyggnad och metoder som idag används internationellt där en konstruktion delas in i olika delar / skikt med högre krav på betongens yttre delar.

Rapporten presenterar metoder som kan användas för att optimera dammkonstruktioner ur ett hållbarhetsperspektiv om ett mindre konservativt betraktelsesätt används än det som dagens regelverk utgör. Rapporten avser inte att göra avkall på kvalitet eller att de krav som krävs ska uppfyllas där de behövs. Detta innebär att kraven kan komma att skärpas i vissa dammdelar och att kravställningen för olika dammdelar tar hänsyn till bedömd exponeringsklass för respektive dammdel och dess geometri, men att kraven också sänks där dagens krav inte är nödvändiga. Krävs betong med likartade egenskaper (t.ex. kvalitet, täthet, frostbeständighet, nötningsmotstånd, armering) i hela konstruktionen så kan dock optimering utifrån exponeringsklass och geometri uteslutas.

Bedömningen är att en dammkonstruktion inte bör behandlas som en enhet, där samtliga krav ska uppfyllas i hela dammkonstruktionen, utan förslaget är att man istället utgår från kravställning för olika dammdelar där dess detaljer och specifika krav omhändertas. Principen bygger på en metod som benämns stenfylld betong (eng. Rock-Filled Concrete, RFC) vilket innebär att betongens yttre del ska uppfylla höga krav gällande bl.a. frostbeständighet, täthet och nötningsmotstånd, men att inre delar kan utgöras av betong med exempelvis lägre hållfasthet och lägre vct-ekvivalent.

Nyckelord

Betong, Bindemedel, Damm, Klimatförbättrad, Rock Filled Concrete (RFC), Roller Compacted Concrete (RCC), Sparsten, Stenfylld betong, Tillsatsmaterial, Vattenkraft, Vältbetong, Återbruk.

Summary

To significantly reduce cement consumption in dam construction, a combination of measures is required, such as resource-efficient designs, using appropriate concrete in the right locations, and the use of climate-improved concrete. The report also presents proposals for methods similar to the construction of older structures and techniques currently used internationally where a structure is divided into different parts/layers with higher requirements for the outer parts of the concrete.

The report presents methods that can be used to optimize dam structures from a sustainability perspective if a less conservative approach is taken than that of current regulations. The report does not intend to compromise on quality or the requirements that need to be met where they are necessary. This means that the requirements may be stricter in certain parts of the dam and that the requirements for other parts of the dam are lowered where today's requirements are not necessary. Different dam parts may thus be assessed with regards to its assessed exposure resistance class. If concrete with similar properties (e.g. consistency, water tightness, frost resistance, wear resistance, need for reinforcement) is required throughout the whole structure, then optimization based on exposure class and geometry can, however, be excluded.

It is thus suggested that a dam structure should not be treated as one unit, where all requirements need to be met throughout the entire structure. Instead, the proposal is to apply specific requirements on different parts of the dam based on the addressed exposure resistance class and the dam geometry. The proposed method is based on Rock filled concrete dams, which in principle means outer or upstream parts of the concrete meeting high requirements regarding e.g. frost resistance, density, and wear resistance, but that inner parts can consist of concrete with lower strength and w/c equivalent.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Projektets syfte och rapportindelning	8
1.2	Metodik	9
1.2.1	Litteraturstudie	9
1.2.2	Workshop	9
1.3	Avgränsningar/Förtydliganden	9
2	Termer och definitioner	10
3	Bakgrund och syfte	15
3.1	Historiskt dammbyggande	16
3.2	Dagens dammbyggande	16
3.3	Framtidens dammbyggande	17
4	Besparing av cement genom betongproportionering	18
4.1	Allmänt	18
4.2	Cementhalt i betong	18
4.3	Inverkan av ballastens maximala stenstorlek	22
4.4	Inverkan av betongens hållfasthetsklass	24
4.5	Ersätta del av portlandcementet med mineraliska tillsatsmaterial	25
4.5.1	Kiselrik flygaska	26
4.5.2	Granulerad masugnsslagg	27
4.5.3	Silikastoft	28
4.5.4	Naturliga puzzolaner	28
4.5.5	Aktiverade naturliga puzzolaner	29
5	Kravställning kopplat till konstruktions-förutsättningar och dess inverkan på cementförbrukning	31
5.1	Kravställning – Allmänt	31
5.2	Exponeringsklasser	32
5.2.1	Karbonatiseringsinitierad korrosion	33
5.2.2	Frost	34
5.3	Omgivningskategori	36
5.4	Cement	37
5.5	Ballast	38
5.6	Tillsatsmaterial	39
5.7	Hållfasthetsklass/Bärförmåga betong	40
5.8	vct	40
6	Alternativa bygg- / utförandemetoder	44
6.1	Sparsten, injekteringsbetong och stenfylld betong	44
6.1.1	Sparsten	44
6.1.2	Injekteringsbetong	46
6.1.3	Stenfylld betong (Rock-filled concrete, RFC)	47

6.2	Vältbetong i dammar (Roller compacted Concrete, RCC)	48
6.3	Återbruk (rivningsmassor och bergschaktmassor)	49
7	Betongkonstruktioner som består av olika delar med olika betonegenskaper	50
7.1	Bakgrund	50
7.2	Inverkan av exponeringsmiljö på vattenkraftens konstruktioner	53
7.3	Grova betongkonstruktioner i vattenkraftsmiljö	57
7.4	Fukt- och temperaturvariationer i grova betongkonstruktioner	59
	7.4.1 Allmänt	59
	7.4.2 Variationen av utomhusluftens temperatur och relativa fuktighet över året	60
	7.4.3 Grova konstruktioners fukt- och temperatur-profil	62
7.5	Yttre del uppfyller krav för exponeringsmiljö	74
	7.5.1 Allmänt	74
	7.5.2 Vertikal konstruktion	75
	7.5.3 Horisontell konstruktion	77
	7.5.4 De yttre delarnas tjocklek och egenskaper	79
7.6	Inre konstruktionsdelar med mildare krav på beständighet	80
7.7	Bärförmåga hos en konstruktion som består av delar med olika materialegenskaper	80
7.8	Utförandet av konstruktioner som består av flera delar	81
7.9	Kravställning olika dammdelar	82
8	Slutsatser	86
9	Referenslista	87

1 Inledning

Att minska mängden cement i vattenkraftkonstruktioner, såsom betongdammar, kan ur ett konservativt perspektiv ses som en utmanande uppgift. Höga krav ställs på betongen, som utsätts för ensidigt vattentryck, både gällande dess stabilitet och hållfasthet, men även på arbetbarhet, vattentäthet och beständighet. Det är av största vikt att avkall inte görs på krav gällande exempelvis vattentäthet och (frost-)beständighet och att dammsäkerhetsperspektivet fortsatt är i fokus.

Samtidigt lever vi i en värld där klimatförändringarna ständigt gör sig påminda. EU enades under våren 2021 om att EU:s nettoutsläpp av växthusgaser till 2030 ska minska med 55 procent jämfört med 1990. För att nå detta mål har bl.a. Betongbranschen upprättat en färdplan för klimatneutral konkurrenskraft med målet att erbjuda klimatneutral betong till marknaden 2030, samt en långsiktig målsättning att all betong ska vara klimatneutral 2045. Konkreta åtgärder i vattenkraftprojekt är bl.a. genom minskade utsläpp från transporter, betong, armering och masshantering – åtgärder som måste göras med hänsyn till anläggningens placering och specifika förutsättningar och som inte kan leda till klimatneutralitet förrän bl.a. all betong är klimatneutral. Minskade utsläpp från betong görs idag bl.a. genom punkt 1-5 i Energiforsks förfrågningsunderlag:

1. Ersätta del av portlandcementet med mineraliska tillsatsmaterial.
2. Reducera cementförbrukningen genom optimerade betongrecept (minskad säkerhetsmarginal med avseende på hållfasthet).
3. Reducera cementförbrukningen med ballast med större stenmax.
4. Använda sparsten för att reducera betong- och cementåtgången.
5. Föreskriva olika betongkvaliteter i olika konstruktionsdelar med utgångspunkt i bedömd exponeringsmiljö.

Dessa åtgärder leder till en minskad cementförbrukning, men även andra metoder krävs för att kraftindustrin ytterligare ska kunna minska utsläppen från nybyggnationer.

1.1 PROJEKTETS SYFTE OCH RAPPORTINDELNING

Syftet med rubricerat projekt är att kartlägga lämpliga metoder för att reducera cementförbrukningen inom vattenkraftprojekt, åtgärder som i sin tur minskar klimatpåverkan (koldioxidutsläpp och förbrukning av ändliga resurser) och som samtidigt kan anses både tekniskt och ekonomiskt försvarbara ur ett projekteringsperspektiv.

Rapporten beskriver metoder som används idag och som har använts historiskt inom svensk vattenkraft, såväl som internationellt använda metoder och kombinationer av metoder som kan tillämpas i grövre konstruktioner.

Utvärderingen av metoder har främst gjorts utifrån förutsättningen att dagens svenska krav och rekommendationer kan upprätthållas, men förslag ges även på vissa rationaliseringar som kan tillämpas om man gör mindre avsteg från dagens standarder.

Rapporten har utifrån dessa förutsättningar delats in i följande avsnitt:

Avsnitt 3 beskriver kort bakgrunden till projektet, gör en nulägsanalys avseende klimatförbättrande åtgärder för betong, och beskriver kortfattat hur dammbyggnad förändrats genom historien.

Avsnitt 4 beskriver kända metoder för att reducera cementåtgång i betongkonstruktioner genom betongproportionering, med visst fokus på betongdammar.

Avsnitt 5 beskriver kravställning av betongdammar, kopplat till konstruktionsförutsättningar och diskuterar kring hur cementförbrukningen kan minskas utan att kringgå krav i dagens standarder.

Avsnitt 6 beskriver olika utförandemetoder för att reducera cementåtgång i betongdammar.

I Avsnitt 7 förs ett resonemang kring konstruktionsförutsättningar, hur en grov konstruktion påverkas av sin yttre miljö, dess nedbrytnings-mekanismer och val av exponeringsklasser, betongens fuktillstånd när den utsätts för ensidigt vattentryck och hur hållfasthetsklass, luftinnehåll påverkar dess beständighet. Författarna ger även rekommendationer hur en betongdamm kan delas in i olika delar baserat på dess exponeringsmiljö; och hur cementmängden kan reduceras genom att dessa dammdelar krävs utifrån den avsedda exponeringsmiljön.

Avsnitt 8 sammanfattar de slutsatser som författarna dragit av projektet.

1.2 METODIK

1.2.1 Litteraturstudie

Relevant litteratur för projektet har genomlysts, med fokus på regelverk och utförandebeskrivningar (facklitteratur).

1.2.2 Workshop

En workshop hölls under hösten 2024, med inbjudna deltagare från konsultbolag, dammägare, betongleverantörer och entreprenörer.

Vid workshopen presenterades de viktigaste slutsatserna från litteraturstudien; samt att frågeställningar rörande byggbarhet och alternativa byggmetoder diskuterades. Slutsatser från denna presenteras i avsnitt 7.

1.3 AVGRÄNSNINGAR/FÖRTYDLIGANDEN

I denna rapport behandlas framförallt metoder för reduktion av cement- (och betong-) förbrukning. Det ligger utanför projektets omfattning att inkludera metoder för att reducera användning av armeringsjärn, varför minimiarmering ej heller avhandlas i rapporten.

2 Termer och definitioner

Alternativt bindemedel	Alternativa bindemedel används som ett samlingsbegrepp för andra "bindemedel" i betong än portlandcement. De kan reagera hydrauliskt, latent hydrauliskt eller puzzolant och bildar föreningar som är snarlika dem som bildas när portlandcement reagerar. I betongstandarden kallas de <i>tillsatsmaterial typ II</i> , vilket står för reaktiva tillsatsmaterial som tillsätts när betong blandas, och när de ingår i fabriksstillverkade cement benämns de <i>andra huvudbeståndsdelar än portlandcementklinker</i> . En annan vanlig benämning är endast <i>tillsatsmaterial</i> .
Ballast	Naturligt, konstgjort eller återvunnet granulärt mineraliskt material, lämpligt för användning i betong.
Beståndsdelar i cement	Samtliga material som ingår i en cementsammansättning.
Betong	Material bildat genom blandning av cement, grov och fin ballast och vatten samt eventuella tillsatsmedel, tillsatsmaterial eller fibrer, vilket utvecklar sina egenskaper genom hydrataion.
Bindemedel	Bindemedel är det ämne som ingår i en produkt för att foga eller binda samman fasta beståndsdelar i partikelform. För betong är det vanligaste bindemedlet portlandcement.
Bindemedelskombination	En kombination av minst två bindemedel, där portlandcement ingår och som har funktionen att hydrauliskt binda samman betongen. Portlandcement fungerar också som aktivator för icke hydrauliska bindemedel såsom flygaska, slagg och silikastoft.
Blandcement	Begreppet "blandcement" används bl.a. i RIDAS (2022) och avser accepterade cement (bindemedelskombinationer) som inte är rena portlandcement.
Cement	Ett hydrauliskt bindemedel i pulverform, dvs. ett finmalet oorganiskt material som blandat med vatten bildar en pasta som binder och hårdnar genom hydrataion och som efter hårdnandet behåller sin hållfasthet och stabilitet även under vatten. Se även <i>Ordinära cement</i>
Exponeringsklass	Exponeringsklass beskriver hur betongen påverkas av dess omkringliggande miljö. Klassindelning görs utifrån risk för karbonatisering (XC), korrosion (XS och XD), frysning (XF) och kemiska angrepp (XA). Se Tabell 7 – 10 i SS 137003 (2024) för gränsvärden för betongens sammansättning och andra krav för respektive exponeringsklass.

Alternativt bindemedel	Alternativa bindemedel används som ett samlingsbegrepp för andra "bindemedel" i betong än portlandcement. De kan reagera hydrauliskt, latent hydrauliskt eller puzzolant och bildar föreningar som är snarlika dem som bildas när portlandcement reagerar. I betongstandarden kallas de <i>tillsatsmaterial typ II</i> , vilket står för reaktiva tillsatsmaterial som tillsätts när betong blandas, och när de ingår i fabriktillverkade cement benämns de <i>andra huvudbeståndsdelar än portlandcementklinker</i> . En annan vanlig benämning är endast <i>tillsatsmaterial</i> .
Flygaska	Flygaska är ett fint pulver som erhålls genom elektrostatisch eller mekanisk avskiljning av dammliknande partiklar ur gasflödet från kolpulvereldade förbränningsugnar. Flygaska kan vara kiselrik (V) eller kalkrik (W) till sin natur. Den förstnämnda har puzzolana egenskaper , den senare kan dessutom ha hydrauliska egenskaper. Aktiveras av frigid calciumhydroxid (Ca(OH)_2) från cement.
Färsk betong	Betong som är väl blandad och fortfarande är i sådant tillstånd att den kan kompakteras.
Granulerad masugnsslagg	Granulerad masugnsslagg framställs genom snabb kylning av en lämpligt sammansatt smält slaggsälta, som erhålls vid smältning av järnmalm i en masugn. Minst två tredjedelar av vikten ska utgöras av glasig slagg. Granulerad masugnsslagg är latent hydrauliskt , vilket innebär att slagg har förmågan att reagera med vatten och bilda en cementliknande produkt, men denna reaktion sker mycket långsamt om den inte aktiveras. För att påskynda den hydrauliska reaktionen blandas slagg ofta med aktivatorer som portlandcement eller kalk.
Huvudbeståndsdel	Speciellt utvalt oorganiskt material i en mängd överstigande 5 % av summan av alla huvudbeståndsdelar och mindre beståndsdelar i ett cement.
Hydratation	En kemisk process där ett ämne reagerar med vatten. När cement blandas med vatten startar flera kemiska reaktioner, vilket leder till att cementet binder och hårdnar.
Hårdnad betong	Betong i fast tillstånd som har utvecklat en viss hållfasthet.
Inert	Innebär att ett ämne inte reagerar kemiskt med andra ämnen under normala förhållanden. Inerta material är stabila och resistent mot kemiska förändringar.
Inblandad luft	Mikroskopiska luftblåsor med typisk diameter mellan 10 µm och 300 µm och med sfärisk eller nära sfärisk form avsiktligt skapade i eller tillförda till betongen under blandningen, vanligen genom användning av ytaktiva ämnen.

Alternativt bindemedel	Alternativa bindemedel används som ett samlingsbegrepp för andra "bindemedel" i betong än portlandcement. De kan reagera hydrauliskt, latent hydrauliskt eller puzzolant och bildar föreningar som är snarlika dem som bildas när portlandcement reagerar. I betongstandarden kallas de <i>tillsatsmaterial typ II</i>, vilket står för reaktiva tillsatsmaterial som tillsätts när betong blandas, och när de ingår i fabriktillverkade cement benämns de <i>andra huvudbeståndsdelar än portlandcementklinker</i>. En annan vanlig benämning är endast <i>tillsatsmaterial</i>.
Kompositcement	CEM V- och CEM VI-produkter. CEM V innehåller 20–64 % PC-klinker, 18–49 % slagg och 18–49 % puzzolan eller flygaska. Antalet huvudbeståndsdelar är ej begränsat. CEM VI innehåller 35–49 % PC-klinker och 31–59 % slagg. Antalet huvudbeståndsdelar utöver portlandcementklinker är begränsat till två.
Mindre beståndsdel	Mindre beståndsdelar är speciellt utvalda, oorganiska material i en mängd som inte överstiger 5% av summan av alla huvudbeståndsdelar och mindre beståndsdelar i ett cement. Räknas endast som mindre beståndsdel om de inte är medräknade som huvudbeståndsdelar i cementet.
Naturliga puzzolaner	Naturliga puzzolaner (P) är vanligen material av vulkaniskt ursprung eller sedimentära bergarter med lämpliga kemiska och mineralogiska sammansättningar med puzzolana egenskaper.
Ordinära cement	Cementtyp som överensstämmer med EN 197-1, för vilka lämplighet för användning i en övervägd exponeringsklass fastställts i de bestämmelser som gäller på platsen för betongens användning. Idag (2025/02) finns sex accepterade cementhuvudtyper (CEM I – CEM VI) och 27 godkända cementprodukter/-typer. CEM I benämns portlandcement och innehåller 95–100 % portlandcementklinker samt 0–5 % mindre beståndsdelar. CEM II-CEM VI innehåller utöver portlandcementklinker tillsatsmaterial / övriga huvudbeståndsdelar, vilka kan utgöras av masugnsslagg (S), silikastoft (D), naturliga eller naturliga kalcinerade puzzolaner (P/Q), kiselrik eller kalkrik flygaska (V/W), bränd skiffer (T) eller kalksten (L/LL) samt 0–5 % mindre beståndsdelar.
Portlandcement	CEM I-produkter. Innehåller 95–100 % portlandklinker.
Portlandkompositcement	CEM II-produkter bestående av minst två huvudbeståndsdelar utöver portlandcementklinker.

Alternativt bindemedel	Alternativa bindemedel används som ett samlingsbegrepp för andra "bindemedel" i betong än portlandcement. De kan reagera hydrauliskt, latent hydrauliskt eller puzzolant och bildar föreningar som är snarlika dem som bildas när portlandcement reagerar. I betongstandarden kallas de <i>tillsatsmaterial typ II</i> , vilket står för reaktiva tillsatsmaterial som tillsätts när betong blandas, och när de ingår i fabrikstillverkade cement benämns de <i>andra huvudbeståndsdelar än portlandcementklinker</i> . En annan vanlig benämning är endast <i>tillsatsmaterial</i> .
Portlandcementklinker	Portlandcementklinker tillverkas genom sintring av en noggrant sammansatt blandning av råmaterial (råmjöl, pasta eller slam) som innehåller ämnen, vanligtvis uttryckta som oxider, CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ och små mängder av andra material. Råmjölet, pastan eller slammet ska vara finfördelat, väl blandat och sålunda homogent. Portlandcementklinker är ett hydrauliskt material som till minst två tredjedelar av sin vikt ska bestå av kalcium-silikater (3CaO, SiO ₂ och 2CaO, SiO ₂) medan återstoden består av aluminium- och järnhaltiga klinkerfaser och andra föreningar.
Puzzolana material	Puzzolana material är naturliga ämnen med kisel- eller kiselaluminiumhaltig sammansättning eller en kombination av dessa. Puzzolana material hårdnar inte själva vid blandning med vatten, men finmalda och vid närvaro av vatten reagerar de vid normal omgivningstemperatur med löst kalciumhydroxid (Ca(OH) ₂) och bildar hållfasthetsutvecklande föreningar av kalciumsilikater och kalciumaluminater. Dessa föreningar liknar de som bildas vid hårdnande av hydrauliska material.
Puzzolancement	CEM IV-produkter innehållande 45-89 % portlandcementklinker. Antalet huvudbeståndsdelar utöver portlandcementklinker är ej begränsat.
Sammansatta portlandcement	CEM II-produkter. För huvuddelen av sammansatta cement är antalet huvudbeståndsdelar utöver portlandcementklinker begränsat till en. Anläggningscement FA (CEM II/A-V) är ett exempel på ett sammansatt portlandcement. Se även <i>portlandkompositcement</i> .
Silikastoft	Silikastoft (även känt som mikrosilika eller silikadamm) bildas som biprodukt vid produktion av kisel- och järnkisel-legeringar. Silikastoft utgörs av mycket fina partiklar av amorf kiseldioxid och har puzzolana egenskaper .
Självkompakterande betong	Betong som enbart med hjälp av gravitationskraften/sin egen tyngd förmår flyta ut och fylla en form samt med god vidhäftning och bibehållen homogenitet omsluta all armering och ingjutningsgods.
Slaggcement	CEM III-produkter innehållande 5-64 % portlandcementklinker och 36-95 % slagg.

Alternativt bindemedel	Alternativa bindemedel används som ett samlingsbegrepp för andra "bindemedel" i betong än portlandcement. De kan reagera hydrauliskt, latent hydrauliskt eller puzzolant och bildar föreningar som är snarlika dem som bildas när portlandcement reagerar. I betongstandarden kallas de <i>tillsatsmaterial typ II</i>, vilket står för reaktiva tillsatsmaterial som tillsätts när betong blandas, och när de ingår i fabriktillverkade cement benämns de <i>andra huvudbeståndsdelar än portlandcementklinker</i>. En annan vanlig benämning är endast <i>tillsatsmaterial</i>.
Tillsatsmaterial	Finfördelat oorganiskt material använt i betong för att förbättra vissa egenskaper eller för att erhålla speciella egenskaper.
Tillsatsmaterial typ I	Nära inert tillsatsmaterial.
Tillsatsmaterial typ II	Puzzolant eller latent hydrauliskt tillsatsmaterial.
Tillsatsmedel	Material som tillsätts under den färska betongens blandning i små mängder i förhållande till cementmängden för att förändra den färska betongens eller den hårdnade betongens egenskap.
Vattencementtal, vct	Kvoten mellan effektiv vattenhalt och cementshalt i den färska betongen. $vct = \frac{\text{vattenhalt}}{\text{cementhalt}}$
Vattencementekvivalent, vct_{ekv}	Om tillsatsmaterial används i betongen, ersätts vct av vct_{ekv} enligt: $vct_{ekv} = \frac{\text{effektiv vattenhalt}}{(\text{cementhalt} + \sum (k_i \times \text{halten tillsatsmaterial } i))}$ Där k_i = effektivitetsfaktor för respektive tillsatsmaterial (i)
Vattenlinje	Området inom regleringsamplituden, mellan dämpningsgräns (DG) och sänkningsgräns (SG), samt en viss (objektspecifik) säkerhetsmarginal ovan/under detta område.
Värmeutveckling	Värmemängd som utvecklas vid hydrataion av cement under en given tidsperiod

3 Bakgrund och syfte

I dagens omvärld blir det allt viktigare att både reducera förbrukning av ändliga resurser och att reducera utsläpp av koldioxid (CO₂). Cementtillverkning står idag för ca 4 % av Sveriges utsläpp av växthusgaser (Cementbranschen, 2023) och i de flesta byggprojekt är det därför en självklarhet att försöka minska cementåtgången i betong.

I Svensk Betongs *Vägledning för klimatförbättrad betong* (2022) beskrivs tre strategier för att minska betongens klimatpåverkan:

1. Resurseffektiv konstruktion: innebär att man optimerar användningen av betongmaterial och minskar onödig mängd och spill. Genom smartare design och materialoptimering tas konstruktionslösningar fram som utnyttjar betongen effektivare och optimerar dess funktion. Dessa insatser kan minska klimatpåverkan från en konstruktion då en mindre mängd betong behöver tillverkas och transporteras.
2. Rätt betong på rätt plats: handlar om att använda den mest lämpliga betongtypen baserat på projektets krav och förutsättningar. Betongen uppfyller ställda krav på funktion och beständighet i aktuell konstruktion. Däremot används inte högre betongkvaliteter än konstruktionens olika delar kräver. Genom att välja rätt betong med rätt egenskaper kan man minska klimatpåverkan och samtidigt uppnå önskad hållbarhet och prestanda.
3. Klimatförbättrad betong: innebär att betongen, utifrån en specificerad exponerings- och hållfasthetsklass, optimeras för att reducera dess koldioxidutsläpp. I klimatförbättrad betong ersätts en del av cementklinkern med "alternativa bindemedel" med lägre klimatpåverkan. Dessa alternativa bindemedel kan däremot inte ersätta cementklinkern fullt ut eftersom de inte kan binda utan närvaro av andra bindemedel (PC-klinker), vilket innebär att kalkstensbaserad cement fortsatt kommer vara en viktig råvara för tillverkning av betong under överskådlig tid. Alternativa bindemedel kan ingå som delmaterial i ett cement eller tillsättas som tillsatsmaterial vid blandningen av betongen. Samma effekt gällande reducerade koldioxidutsläpp uppnås oavsett angreppssätt. Mängden alternativa bindemedel i betong styrs och begränsas av vår nationella betongstandard SS 137003.

Storleken på klimatförbättringen i ett byggprojekt kan graderas och man pratar idag om fyra nivåer (Svensk Betong, 2022): Nivå 1, 2, 3 och 4 som motsvarar 10, 20, 30 och 40 procent reduktion (eller mer) i förhållande till en referensbetong.

Genom att optimera betongrecept, sänka cementhalterna i betongen och genom att ersätta en del av cementet med alternativa bindemedel erbjuder idag vissa betongleverantörer en CO₂-ekv-reduktion på upp till 50%, dvs. klimatförbättrad betong på nivå 1, 2, 3 och 4. Dessa optimeringar är dock inte optimerade för vattenkraftkonstruktioner, och för att nå dit krävs vanligen mer specifika åtgärder och anpassningar.

Vattenkraftens betongkonstruktioner har vanligtvis grova dimensioner, jämfört med många andra infrastrukturkonstruktioner, något som innebär att det åtgår stora volymer betong – vilket dels är ett argument för att begränsa miljöbelastningen i så stor

utsträckning som möjligt, men även ger möjligheter som inte är tillämpbara vid exempelvis hus- eller brobyggnad.

3.1 HISTORISKT DAMMBYGGANDE

Historiskt har förbrukningen av cement reducerats på olika sätt och av olika skäl. Under tidigt 1900-tal var cement dyra. Cementfattig (mager) betong användes i inre delar av grova konstruktioner medan cementrik (fet) betong användes i yttre delar i kontakt med vatten. Den magra betongen skulle tillföra konstruktionen egentygnd medan den feta betongen skulle göra den vattentät. För att ytterligare reducera cementförbrukningen var det inte ovanligt att upp till 20 % sparsten (block) användes i grova och oarmerade delar av konstruktionen. Till följd av allvarliga beständighetsproblem i form av urlakning i tidiga vattenkraftsanläggningar skedde en övergång under sent 1920-tal till att gjuta hela konstruktionens volym med betong av hög kvalitet. Högre cementshalt ökade däremot risken för sprickbildning i konstruktionen till följd av betongens temperatur-stegring och avsvalling efter gjutning. För att reducera risken användes ballast med stort stenmax, $D_{\max} > 100$ mm. Under 1950-talet började mineraliska tillsatsmaterial att användas för att ytterligare reducera cementförbrukningen. Sedan 1970-talet har få större vattenkraftsanläggningar byggts, varför behovet av speciellt anpassad vattenbyggnadsbetong minskade.

3.2 DAGENS DAMMBYGGANDE

När hållbarhetsfrågan aktualiserades i början av 2000-talet, började nya cement- och betongsorter tas fram (och nya utvecklas fortfarande kontinuerligt) för att minska klimatpåverkan från våra byggprojekt. Bl.a. fasas det traditionella Anläggningscementet nu ut från marknaden och ersätts av Anläggningscement FA – ett anläggningscement där del av Portlandcementet ersätts med flygaska (i detta fall utgör flygaska en huvudbeståndsdel i ett ordinärt cement, CEM II/A-V, dvs. del av portlandcementklinkern ersätts vid tillverkningen av cementet). Anläggningscement FA togs fram med ambitionen att ha egenskaper liknande Anläggningscement, och användes först i klimätförbättrad betong för att nå Nivå 1 (även om dessa begrepp inte var införlivade vid denna tid), men har senare utvecklats och klinkerandelen sänkts till 80 % genom ersättning med flygaska och kalksten så Nivå 2 kan uppnås.

Även om behovet av vattenbyggnadsbetong minskat i jämförelse med under de stora vattenkraftutbyggnaderna, finns ett behov av betong med god beständighet och hög täthet, både för upprustning av befintliga dammar och för nybyggnation.

På senare tid har behovet av betong med lägre temperaturutveckling och lägre koldioxidutsläpp aktualiserats. En metod att åstadkomma detta med är genom att ersätta en del av cementet med flygaska vid betongens beredning (tillsatsmaterialet ingår ej som huvudbeståndsdel i ett ordinärt cement utan tillsätts vid betongtillverkningen). En annan metod är att använda ballast med större stenmax. Med dessa metoder kan cementmängden och värmeutvecklingen i betongen minskas. Dock är det svårt att nå över Nivå 2 och samtidigt uppfylla kraven i dagens standarder. Ytterligare metoder kan därför behöva utvecklas och anpassas efter moderna krav på vattenbyggnader för att i större utsträckning uppnå reduktion i cement- och betongförbrukningen vid större vattenbyggnadsprojekt. Exempel på metoder kan vara

användning av andra bindemedel, fortsatt optimering av betongrecept, användning av olika betongkvaliteter i olika delar av konstruktionerna eller att börja använda sparsten på nytt. Vid en omvärldsbevakning kan konstateras att sparsten går att jämföra med de stenfyllda betongdammar (eng. Rock-Filled Concrete, RFC) som byggs internationellt idag, men med den stora skillnaden att man i dessa använder både större block och större mängder stenblock och att den betong som används främst är självkompakterande betong.

Idag är produktionsteknik och arbetskraft kostnadsdrivande parametrar, i motsats till historiskt då material var dyrt och arbetskraft billigt. Produktionen styr kostnader ("tid är pengar"), vilket ofta leder till förenklade byggprocesser och användandet av samma betong i hela konstruktionen.

3.3 FRAMTIDENS DAMMBYGGANDE

Med aktualiseringen av hållbarhetsaspekter blir det allt viktigare att spara på mängden cement, genom t.ex. användning av alternativa bindemedel (Klimatförbättrad betong) och slimmade konstruktioner (Resurseffektiv konstruktion). Gällande dammar är det dock inte eftersträvanvärt med slimmade konstruktioner (bl.a. eftersom egentyngden är av mycket stor vikt för dammars glid- och stjälpstabilitet). Däremot avser denna rapport belysa möjligheterna att för yttre och inre konstruktionsdelar i grövre dammkonstruktioner kunna kravställa på olika sätt (Rätt betong på rätt plats).

Görs detta på rätt sätt kanske mängden material som sparas in kan motivera (både ekonomiskt och klimatmässigt) en mer komplex byggprocess.

4 Besparing av cement genom betongproportionering

4.1 ALLMÄNT

En betydande mängd cement kan sparas genom att inte välja onödigt hög betongkvalitet med avseende på hållfasthet och livslängd. Ökad betongkvalitet uppnås främst genom en sänkning av betongens vattencementtal (vct) och en ökning av andelen portlandcementklinker. I vissa fall, till exempel vid höga krav på vattentäthet, blir det nödvändigt att även öka andelen fin ballast i betongen, vilket i sin tur leder till en minskad finhetsmodul och ökad cementmängd vid oförändrad konsistens. I praktiken styrs betongens sammansättning av följande parametrar:

- Vattencementtal som styr betongens hållfasthet och beständighet.
- Ballastens maximala kornstorlek (d_{max}), stenmax, som styr bland annat ballastens finhetsmodul och betongens konsistens.
- Betongens konsistens som påverkas av mängden cementpasta och ballastgränsvärdet, d.v.s. proportionerna av cement och ballast i betongen.
- Betongens lufthalt som bl.a. styr betongens frostbeständighet. Ökad lufthalt leder till lösare konsistens (högre sättmått) och minskad hållfasthet vid konstant vct .

Nedan redogörs för inverkan av de ovannämnda parametrarna på betongens cementinnehåll. Syftet är att uppskatta den besparing av cementmängd som kan uppnås genom att välja rätt betongsammansättning för ändamålet och undvika onödigt hög betongkvalitet. Tillvägagångssättet är dock teoretiskt och baserat enbart på de formler och diagram som presenteras av Gram & Ericsson (2017).

4.2 CEMENTHALT I BETONG

Andelen cement i betong utan luftporbildande medel beräknas med nedanstående formel (Gram & Ericsson, 2017).

$$C = \frac{980 - 10 \cdot V_a}{\frac{\rho_w}{\rho_c} + vct} \quad (1)$$

$$V_a = V_{a,max} - \frac{2,92}{vct - vct_{min}} \quad (2)$$

$$V_{a,max} = 4,6 \cdot FM + 54,3 \quad (3)$$

- C = cementhalt utan tillsatsmedel (kg/m^3)
 V_a = volymandel ballast (%)
 $V_{a,max}$ = ballastgränsvärde (%)
 ρ_w = vattnets densitet (kg/m^3)
 ρ_c = cementets kompaktdensitet (kg/m^3), anges i Tabell 1
 vct = vattencementtal
 vct_{min} = cementpastagränsvärde, anges i Tabell 2.

FM = den sammansatta ballastens finhetsmodul. Finhetsmodulen är ytan över ballastens graderingskurva, definierad enligt den grå delen i Figur 1. Arealen bestäms genom att addera standardsiktarna.

Tabell 1. Cementets kompaktdensitet (kg/m^3), från Gram & Ericsson (2017).

Cementtyp	$\rho_c, \text{kg}/\text{m}^3$
Byggcement CEM II/A-LL 42,5 R	3080
Anläggningscement CEM I 42,5 N SR3 MH/LA	3200
SH-cement CEM I 52,5 R	3125
Bascement CEM II/A-V 52,5 N	3000

Tabell 2. Samband mellan cementpastagränsvärde och konsistens för betong med olika cement, från Gram & Ericsson (2017).

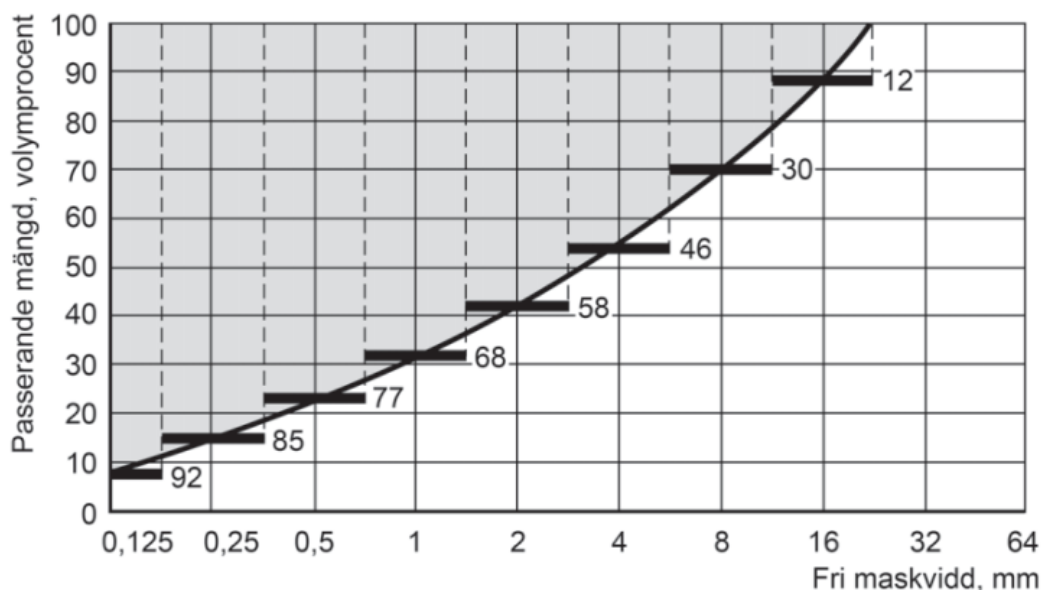
Konsistens	Cementpastagränsvärde, $v_{ct,min}$, för cementsort			
	CEM II/A-LL 42,5 R t.ex. Byggcement	CEM I 52,5 R t.ex. SH-cement	CEM I 42,5 N SR 3 MH/LA t.ex. Anläggnings- cement	CEM II/A-V 52,5 N t.ex. Bascement
S1	0,23	0,28	0,17	0,21
S2	0,25	0,30	0,19	0,23
S3	0,27	0,32	0,21	0,25
S4	0,29	0,34	0,23	0,27

Tabell 3. Korrigering av ballastgränsvärde bestämt enligt formel 3, från Gram & Ericsson (2017).

	Korrigering av ballast- gränsvärde (%)
Krossad fin ballast	- 3
Fingrus eller sand	0
Grov ballast av naturmaterial	+ 1
Grov ballast av krossat berg	0
Konsistens S1	+ 1,3
S2	0
S3	- 1,3
S4	a)

^{a)} Konsistensklasser över S3 bör tillverkas med flyttillsatsmedel. Korrigering sker för utgångssammanställningens konsistens, t.ex. +1,3 när denna är S1.

Figur 1. Finhetsmodulen (FM) = $0,92/2+0,85+0,77+0,58+0,46+0,30+0,12 = 4,22$. Från Gram & Ericsson (2017).



Figur 2 visar cementmängden som funktion av vct för olika FM. Cementmängden är beräknad med Ekvation (1) – (3) med följande förutsättningar:

- Anläggningscement
- Konsistens S2
- Grov ballast av krossat berg

Både vct och FM har stor inverkan på cementmängden. En ökning av vct från 0,45 till 0,55 kan medföra en reduktion av cementmängden med minst 80 kg/m^3 – reduktionen ökar dock med minskad FM. Reduktionen minskar däremot vid högre vct . Motsvarande värden är 60 respektive 50 kg/m^3 vid en ökning av vct från 0,50 till 0,60 och från 0,55 till 0,65.

Inverkan av FM på cementmängden kan bestämmas genom att derivata Ekvation (1) – (3) med avseende på FM.

$$\frac{dC}{dFM} = -\frac{10}{\frac{\rho_w}{\rho_c} + vct} \cdot \frac{dV_a}{dFM}$$

$$\frac{dV_a}{dFM} = \frac{dV_{a,max}}{dFM} = 4,6$$

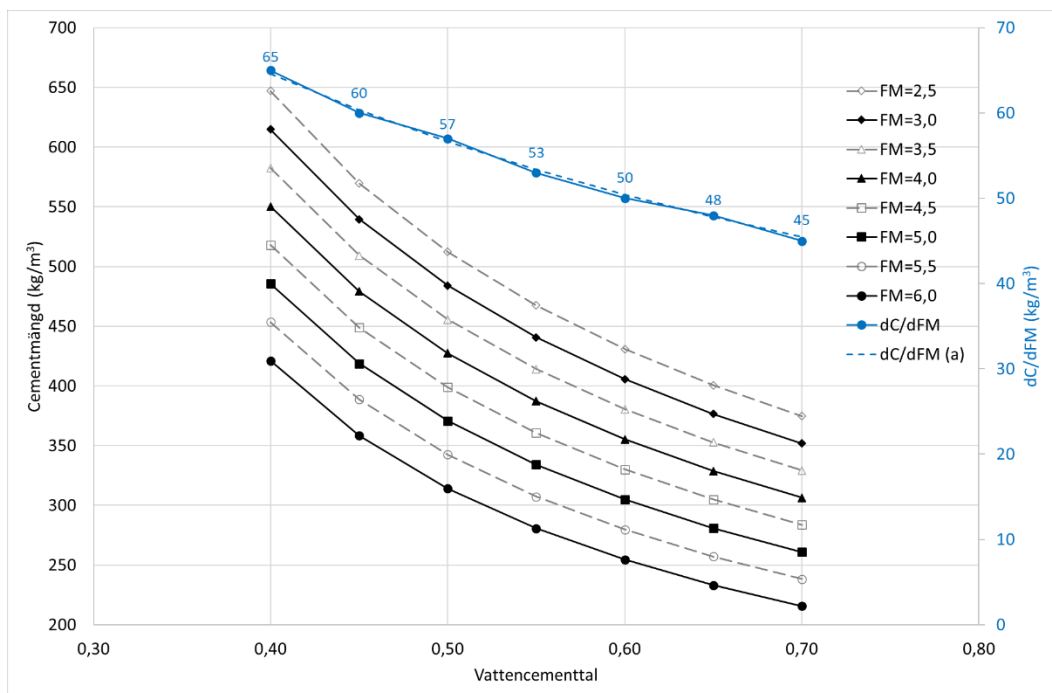
$$\frac{dC}{dFM} = -\frac{46}{\frac{\rho_w}{\rho_c} + vct} \quad (4)$$

Ekvation (4) presenteras med kurva dC/dFM (a) i Figur 2. Notera att diagrammet har två vertikala axlar och att den högra axeln gäller för Ekvation (4). Kurva dC/dFM är beräknad med hjälp av de kurvor som visas i figuren. dC/dFM visar den cementreduktion som erhålls när FM ökas med en enhet. Reduktionen minskar vid högre vct , vilket symboliseras av siffrorna vid punkterna i den blå kurvan i figur 2.

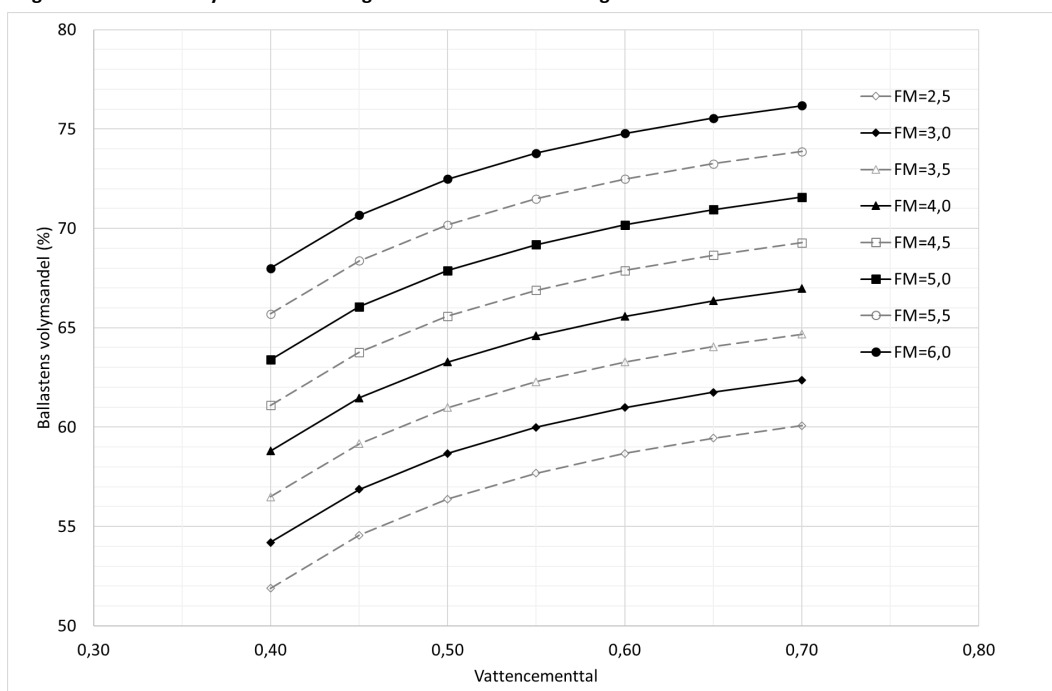
Figur 3 visar ballastens volymsandel i betong som funktion av betongens vct för olika FM för ballast. Ballastens volymsandel i betong ökar vid högre vct och ökad FM. För att

spara cement bör man därför, om möjligt, försöka maximera betongens v_{ct} och ballastens FM .

Figur 2. C och dC/dFM , som funktion av v_{ct} . Observera att diagrammet har två vertikala axlar.



Figur 3. Ballastens volymsandel i betong som funktionen av betongens v_{ct} för olika FM för ballast.



Den fräska betongens konsistens har viss inverkan på cementförbrukningen. En mer trögflytande konsistens leder till ökad cementmängd. Enligt Tabell 2 ökar $v_{ct_{min}}$ med

lösare konsistens. Enligt Tabell 3 minskar $V_{a,max}$ med styvare konsistens. Båda effekterna leder till minskad V_a , enligt Ekvation (2) och ökad C enligt Ekvation (1).

Tillsättning av luft i betong med luftporbildande medel kan också påverka cementmängden. Ekvation (1) skrivs om enligt nedan för att inkludera inverkan av lufttillsättning.

$$C = \frac{1000 - 10 \cdot V_{luft} - 10 \cdot V_a}{\frac{\rho_w}{\rho_c} + v_{ct}} \quad (5)$$

V_{luft} = luftandelen i betong (%)

Tillsättning av luft för att tillverka frostbeständig betong har försumbar inverkan på cementmängden.

4.3 INVERKAN AV BALLASTENS MAXIMALA STENSTORLEK

Ballastens maximala stenstorlek, även benämnd stenmax, (d_{max}) påverkar ballastens FM – FM ökar med ökad stenmax. Anledningen är att en kontinuerlig graderingskurva, d.v.s. en idealkurva (Gram & Ericsson, 2017), eftersträvas när ballastmaterialen sammansätts. I den idealkurvan utgör 4 mm-sikten gränsen mellan grov och fin ballast. Den mängd ballast som passerar 4-mm sikten betecknas y_0 . y_0 -värdet bestäms av d_{max} , enligt följande samband:

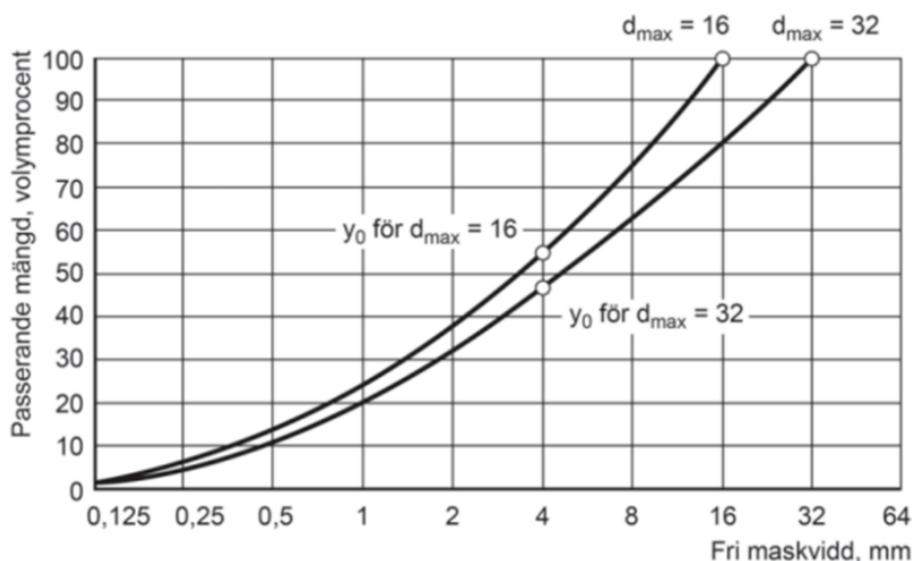
$$y_0 = 90 - 28,7 \cdot \log d_{max} \quad (6)$$

d_{max} = stenmax (mm)

$\log$ = logaritm med basen 10

Figur 4 visar idealkurvorna för $d_{max} = 16$ och $d_{max} = 32$ enligt (Gram & Ericsson, 2017). Referensen anger inte kurvornas matematiska samband. Därför är det inte möjligt att ta fram graderingskurvor för andra d_{max} , till exempel 64 mm.

Figur 4. y_0 för olika sammansatta graderingskurvor. y_0 är passerade mängd på 4 mm sikten, (Gram & Ericsson, 2017).



Gram (2017) presenterar ett samband för partikelpackning som Fuller och Thompson tog fram (1907). Sambandet, Ekvation (7) nedan, som är en ideal graderingskurva är känd som Fullers kurva.

$$V_{P,\%}/100 = (d/d_{max})^n \quad (7)$$

$V_{P,\%}$ = passerande volym partiklar genom siktöppning d (%)

d_{max} = stenmax (mm)

d = partikelstorlek (mm)

n = exponent

Ekvationen beskriver partikelstorleksfördelningen för att uppnå en optimal packning i ett omslutet utrymme, där $V_{P,\%}$ är passerande volym partiklar. Om partiklarna har samma skrymdensitet kan ekvationen även tillämpas för bestämning av den passerande partikelmassan. Här antas att skrymdensiteten är lika för samtliga ballastkorn. Därmed anger $V_{P,\%}$ volym- eller massandelen ballast som passerar genom en siktöppning.

Enlig Gram (2017) ligger n mellan 0,3 (kantiga korn) och 0,5 (runda korn). I denna rapport beräknas n med hjälp av Ekvation (6) och (7). Den mängd ballast som passerar 4 mm-sikten, y_0 , beräknas med Ekvation 6. Sedan beräknas $V_{P,\%}$ för en given d_{max} med Ekvation (7) och $d = 4$ mm. Resultatet presenteras i Tabell 4.

Figur 5 visar siktkurvor för ballastsammansättningar med $d_{max} = 16, 32$ och 64 mm. Siktkurvorna används för att bestämma ballastsammansättningarnas FM . Resultatet presenteras i Tabell 4. Det bör noteras att siktkurvorna för ballastsammansättningarna med $d_{max} = 22$ och 45 presenteras inte i Figur 5. Vid beräkning av FM har siktöppningar $\geq 0,125$ använts.

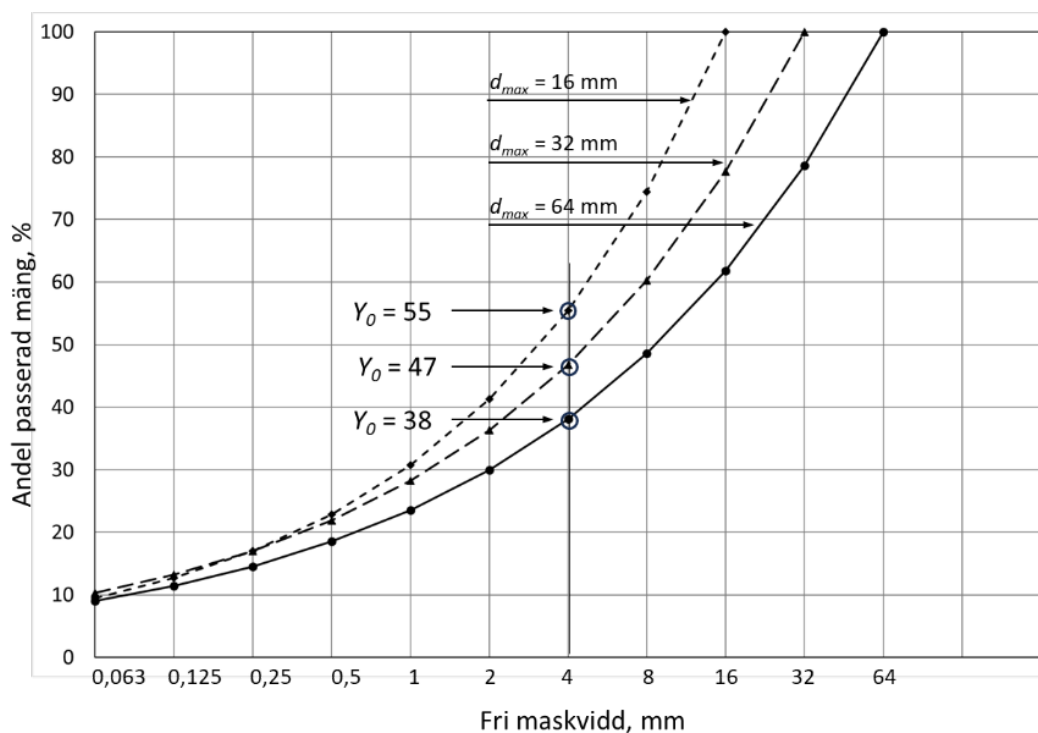
Tabell 4 och Figur 2 används för beräkning av den reducering av cement som uppnås genom ökning av d_{max} . Anta att betongens v_{ct} är 0,50. Enligt Figur 2 är $dC/FM = 57$ kg/m³. Vidare, anta att d_{max} ökar från 32 mm till 45 mm. Förändringen av $FM = 5,2 - 4,6 = 0,6$. Den mängd cement som sparas är $0,6 \times 57 = 34,2$ kg/m³. Resultatet visar att ökad

d_{max} leder till minskad cementmängd. Det bör dock noteras att siktkurvorna är idealkurvor för optimal packning. Det är möjligt att mer cement kan sparas genom att optimera ballastsammansättningen med experimentella metoder.

Tabell 4. γ_0 , n och FM för olika d_{max} .

d_{max} (mm)	γ_0 (%)	n	FM
16	55	0,43	4,1
22	51	0,39	4,3
32	47	0,37	4,6
45	43	0,35	5,2
64	38	0,35	5,4

Figur 5. Siktkurvor för ballastsammansättningar med olika d_{max} , beräknade enligt ekvation 7.



4.4 INVERKAN AV BETONGENS HÅLLFASTHETSKLASS

Betongens hållfasthet styrs framför allt av betongens vct . Tabell 5 presenterar rekommenderat vct för vald hållfasthetsklass för grov ballast av krossat berg (Gram & Ericsson, 2017). Det bör noteras att värdena i tabellen är rekommenderade värden och inga exakta värden. Betongens hållfasthetsklass kan bli högre eller lägre beroende på bl.a. ballastens egenskaper, lufttillsats och gjutningens utförande.

Som framgår av Tabell 5 ökar betongens tryckhållfasthet och hållfasthetsklass med minskat vct . För att spara cement bör man vara sparsam när man väljer betongens hållfasthetsklass. Man ska inte överdimensionera konstruktionerna och inte heller välja

starkare betong än vad som framgår av dimensioneringen. Exemplet nedan visar hur mycket cement som kan sparas om man sänker hållfasthetsklassen från C35/45 med $v_{ct} = 0,51$ till C30/37 med $v_{ct} = 0,59$.

Anta $d_{max} = 32$ mm vilket enligt Tabell 4 ger $FM = 4,3$. Med hjälp av de presenterade input och Figur 2 bestäms cementmängden för C35/45 och C30/37 till 390 respektive 330 kg/m³, d.v.s. en reduktion av cementmängd på 60 kg/m³. Om ballastens d_{max} dessutom ökas från 32 mm till 45 mm reduceras cementmängden ytterligare med 40 kg/m³, d.v.s. totalt 100 kg/m³.

Tabell 5. Rekommenderat v_{ct} för vald hållfasthetsklass för grov ballast av krossat berg, (Gram & Ericsson, 2017).

Hållfasthetsklass	Kompetensklass I–T	
	Lämplig medelkubhållfasthet	
	MPa	v_{ct}
C12/15	20	1,17
C16/20	25	0,96
C20/25	31	0,80
C25/30	37	0,69
C28/35	42	0,62
C30/37	44	0,59
C32/40	47	0,56
C35/45	52	0,51
C40/50	57	0,47
C45/55	62	0,43
C50/60	67	0,39

4.5 ERSÄTTA DEL AV PORTLANDCEMENTET MED MINERALISKA TILLSATSMATERIAL

Bindemedel till betong utgörs av finkorniga oorganiska mineraliska material och brukar delas in i tre typer efter deras reaktionstyp: hydrauliska, puzzolana eller latent hydrauliska. Bindemedel kan också vara en kombination av dessa (Löfgren 2017). Icke hydrauliska bindemedel behandlas inte i denna rapport.

Hydrauliska bindemedel är material som reagerar med vatten, i såväl vatten som luft, och bildar ett fast material. Det vanligaste hydrauliska bindemedlet är portlandcement, som huvudsakligen består av kalciumsilikater. När portlandcement blandas med vatten, bildas en kemisk reaktion som kallas hydratisering, vilket resulterar i hårdnandet av betong.

Puzzolana bindemedel består till största delen av kiseldioxid (SiO₂) och hårdnar inte själva vid blandning med vatten, men finmalda och vid närvaro av vatten reagerar de vid normal omgivningstemperatur med löst kalciumhydroxid (Ca(OH)₂, som bildas vid hydratationen av portlandcement) och bildar hållfasthetsutvecklande föreningar av kalciumsilikater och kalciumaluminater. Puzzolaner delas in i naturliga puzzolaner och industriella puzzolaner. Dessa föreningar liknar de som bildas vid hårdnandet av hydrauliska material.

För att latent hydrauliska bindemedel ska binda och hårdna krävs, förutom vatten, en aktivator som får bindemedlet att reagera som ett hydrauliskt bindemedel. Aktivatorn kan till exempel vara de hydroxyljoner ($-OH$) som frigörs när portlandcement reagerar med vatten eller alkalier.

Begreppet "alternativa bindemedel" används generellt för bindemedel som inte är portlandcement (CEM I). De benämns även *tillsatsmaterial typ II*, vilket avser reaktiva tillsatsmaterial som tillsätts när betong blandas, eller *andra huvudbeståndsdelar än portlandcementklinker* när de ingår i fabriksstillverkade cement. Andra termer som används är kort och gott *tillsatsmaterial* eller ibland SCM (den engelska förkortningen för "Supplementary Cementitious Materials"), Mortensen et al. 2023.

Under kommande avsnitt presenteras de mest använda tillsatsmaterialen i dagens betongkonstruktioner. I avsnitt 4.5.1 till 4.5.3 listas de tillsatsmaterial typ II som i dag är standardiserade i Europa och som kan tillsättas vid betongens beredning. I avsnitt 4.5.1 till 4.5.5 beskrivs huvudbeståndsdelar vilka, tillsammans med kalkrik flygaska, bränd skiffer och kalksten, är tillåtna för användning i ordinära cement enligt SS-EN 197-1:2011 och SS-EN 197-5:2021. Samtliga dessa tillsatsmaterial är vanliga komponenter i klimutförbättrad betong och beroende av betongens exponeringsklass är det tillåtet med olika mängder (SS 137003:2021+T1:2024). I takt med utvecklingen av nya cement ses också standarderna över kontinuerligt, uppdateringar sker snabbare idag och nya bindemedel introduceras snabbare på marknaden och i standarder än vad de gjort historiskt.

4.5.1 Kiselrik flygaska

Flygaska (V), sammansatt enligt SS-EN 450-1:2012, är ett puzzolant material som idag är godkänt både som tillsatsmaterial i betong och som en huvudbeståndsdel i ordinära cement enligt SS-EN 197-1:2011 och SS-EN 197-5:2021. SS 137003:2021+T1:2024 tillåter upp till 35 % kiselrik flygaska (i form av tillsatsmaterial) i samtliga exponeringsklasser (undantaget XA3, i kemiskt aggressiva miljöer). Mängdrestriktioner då flygaska utgör en del av cementet styrs i SS-EN 197-1:2011 och SS-EN 197-5:2021.

Flygaska som tillsatsmaterial används framförallt för att minska cementklinkerhalten i betongen och därigenom 1) minska betongens klimatavtryck och 2) minska dess värmeutveckling. Flygaska har även en viss stävande effekt på ASR pga. att den förbrukar kalciumhydroxid samt att den (genom att minska mängden portlandcement) minskar mängden lösliga alkalier i betongen. Flygaska ger också en "fillereffekt" som bidrar till en god arbetbarhet i betongen. Det råder dock viss oklarhet/oenighet om hur kloridtröskelvärdet påverkas; hur krympning och krypning påverkas då del av bindemedlet ersätts av flygaska; vid vilka mängder dessa påverkas; samt hur långtidsegenskaper och betongens frostbeständighet påverkas vid inblandning av flygaska.

Under mitten av 2010-talet introducerades *Anläggningscement FA* och *Bascement* (av typen CEM II/A-V), två flygaskecement med ca 15 % flygaska, som under en tid var de dominerande CEM II-cementen på den svenska marknaden. Bascementet har idag ersatts av två varianter: Bascement Plus (CEM II/B-M, i vilket 30 % av klinkern ersätts med flygaska och kalksten) och Bascement Slite (CEM II/A-LL, ett Portland-

kalkstenscement). Anläggningscement FA (CEM II/A-V) har i sin tur ersatt de traditionella anläggningscementen (CEM I) nästan helt.

4.5.2 Granulerad masugnsslagg

Granulerad masugnsslagg (S) är ett material som idag är godkänt både som tillsatsmaterial i betong och som en huvudbeståndsdel i ordinära cement enligt SS EN 197-1:2011 och SS-EN 197-5:2021. SS 137003:2021+T1:2024 tillåter upp till 35 % slagg (i form av tillsatsmaterial) i samtliga exponeringsklasser (undantaget XA3, i kemiskt aggressiva miljöer). I XF1 tillåts upp till 65 % masugnsslagg. Mängdrestriktioner då masugnsslagg utgör en del av cementet styrs i SS-EN 197-1:2011 och SS-EN 197-5:2021.

Granulerad masugnsslagg framställs genom snabb kylning av en lämpligt sammansatt smält slaggsnäla, som fås vid smältning av järnmalm i en masugn.

Mald granulerad masugnsslagg (GGBS) är ett huvudsakligen latent hydrauliskt bindemedel, krävs enligt SS-EN 15167-1:2006 och används främst som tillsatsmaterial – för att minska andelen portlandcementklinker – vid betongens beredning; men går även att använda som en delkomponent att tillsätta vid slutskedet av cementtillverkningen.

GGBS är ett restmaterial från tillverkningen av råjärn, vilket används som tillsatsmaterial för att minska cementklinkerhalten i betong och därigenom 1) minska betongens klimatavtryck och 2) minska dess värmeutveckling. Betong med granulerad masugnsslagg beskrivs också fördelaktiga egenskaper gällande arbetbarhet. Inblandning av GGBS i betong kan även öka betongens täthet och beständighet, t.ex. mot kloridinträngning eller sulfat- och syraangrepp; men dess negativa aspekter är att inblandning av GGBS kan påverka betongens uttorkningsegenskaper och att det gör dess reaktioner långsammare (längre tillstyvnadetid och härdningsförlopp). Det råder dock viss oklarhet/oenighet om bl.a. hur betongens karbonatiseringshastighet, hållfasthetsegenskaper och frostbeständighet påverkas vid inblandning av GGBS. Nilsson et al. (2024) visade att en referensbetong (utan inblandning av slagg eller flygaska) gav högst hållfasthetsutveckling över tid, men gällande värmeutveckling var det främst $v_{ct_{ekv}}$ som invercade (särskilt i det tidiga skedet) på betongens värmeutveckling. Vid inblandning av slagg eller flygaska reducerades värmeutvecklingen i det tidiga skedet (peak vid 24h) av hydratationsförloppet med någon enstaka grad vid v_{ct} 0,38, och ca 5°C vid v_{ct} 0,48. Gällande karbonatisering är det framförallt i betong ovan vatten som denna ökar, då karbonatiseringshastigheten är kopplad till omgivningens luftfuktighet (ej funktion av).

Luftkyld masugnsslagg (ABS) är en restprodukt från ståltillverkning som kan användas för att minska andelen kalk i den tidiga delen av cementtillverkningen. Upp till 5% ABS kan ingå som "Mindre beståndsdelar" i ordinära cement enligt SS-EN 197-1:2011, men Heidelberg Cement uppger att deras forskning visat att man kan minska andelen kalk med mellan fem och tio procent (<https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/nya-cementrecept-for-minskad-klimatpaverkan>).

Slagg har använts historiskt i Sverige sedan tidigt 1900-tal i bl.a. slaggcement (85% slagg), järnportlandcement (30% slagg) E-cement (30-50% slagg), vulkancement (25-50% slagg) och massivcement (65% slagg). Massivcementet användes i bl.a. vattenkraftanläggningar och kraftverksbyggnader, men då flera anläggningar

uppvisade sprickbildning, troligen till följd av en alltför långsam hållfasthetsutveckling i tidig ålder fick det inte något större genomslag (Ahlberg & Löfgren, 2022)

4.5.3 Silikastoft

Silikastoft är ett restmaterial från tillverkning av kisel- och järnkisel-legeringar. Silikastoft kan bearbetas, till exempel genom klassificering, selektion, blandning, förtätning eller slurrifiering, eller genom en kombination av dessa processer, i adekvata produktionsanläggningar. Sådant bearbetat silikastoft kan bestå av silikastoft från olika källor, som var och en uppfyller definitionen av silikastoft. Gemensamt för silikastoft är att det består av mycket små sfäriska partiklar innehållande >85% amorf kiseldioxid (SiO_2) och används ofta som en tillsats i betong och andra byggmaterial för att förbättra dess egenskaper, såsom hållfasthet, vidhäftning och beständighet mot kemiska angrepp.

Silikastoft (D) enligt SS-EN 13263-1:2005+A1:2009 är godkänt både som tillsatsmaterial i betong (SS137003:2021 +T1:2024) och som en delkomponent i ordinära cement enligt SS EN 197-1:2011. Ibland används benämningen "mikrosilika" (eng.: microsilica). Den höga halten kiseldioxid och den extrema finkornigheten gör materialet till en mycket reaktiv puzzolan, vilket begränsar hur stor andel av portlandcementet den kan ersätta. SS 137003:2021+T1:2024 tillåter upp till 10 % silikastoft (i form av tillsatsmaterial) i samtliga exponeringsklasser (undantaget XF3 – XF4, där endast 5 % tillåts; och XA2 – XA3, där särskilda förutsättningar gäller). Upp till 10% silikastoft tillåts då det ingår som huvudbeståndsdel i ett ordinärt cement. Mängdrestriktioner då silikastoft utgör en del av ett ordinärt cement styrs i SS-EN 197-1:2011.

Ca/Si-kvoten i betong sjunker vid inblandning av silikastoft och ger även CSH-gelen andra egenskaper än de vid rena portlandcement, vilket gör att den också kan binda mer alkalier och ger ett lägre pH i porvattnet. Silikastoft påverkar betongens reologi på ungefär samma sätt som luft. Det förbättrar betongens sammanhållning (kohesion) och stabilitet. Vid små mängder har silikastoft vanligen en gynnsam inverkan på betongens viskositet och pumpbarhet, men vid större mängder blir betongen styvare. Silikastoft kan också öka risken för plastisk sprickbildning pga. minskad vattenseparation (blödning), ökad plastisk krympning och ökat porundertryck (Löfgren 2017; Emborg et al. 2017).

4.5.4 Naturliga puzzolaner

Naturliga puzzolaner (P) är idag en godkänd delkomponent i ordinära cement enligt SS-EN 197-1:2011 och SS-EN 197-5:2021. Det är enligt SS 137003:2021+T1:2024 tillåtet med 6-35% naturliga puzzolaner i CEM II; 11-55% i CEM IV; 18-48% i CEM V och 6-20% i CEM VI. Man tillåter dock inte naturliga puzzolaner (ens som huvudbeståndsdel i cementet) i XF3 såvida det inte är del av ett CEM IV/A cement som har funktionsprovats enligt Bilaga T i SS 137003 (provning av frostbeständighet). För användning i XF4 och vid användning av CEM II/B och CEM IV/A eller om andelen klinker i bindemedelskombinationen understiger 80 % ska provning av frostbeständighet även utföras på provkroppar med karbonatiserad yta enligt SS 137244:2019 metod IA.

Naturliga puzzolaner beskrivs i den svenska puzzolanstandarden SS 137004:2024. Till naturliga puzzolaner räknas bl.a. material av vulkaniskt ursprung eller sedimentära bergarter. De är främst amorfa (glasiga, icke-kristallina) material med en kemisk och mineralogisk sammansättning (kisel- eller kiselaluminiumhaltig sammansättning eller en kombination av dessa) som gör dem milt reaktiva, eller som kan göras reaktiva genom bränning vid lägre temperaturer (naturliga kalcinerade puzzolaner, se avsnitt 4.5.5).

Puzzolana material ska vara korrekt preparerade, det vill säga utvalda, homogeniserade, torkade eller värmebehandlade och finfördelade beroende hur de produceras eller levereras. Reaktivitet och egenskaper är beroende av puzzolanernas ursprung (Löfgren 2017). Malaga & Helsing (2025; och referenser däri) beskriver att reaktiviteten hos naturliga puzzolaner främst är beroende av dess mineralogi och de fysiska egenskaperna hos dessa material. De konstaterar också att denna grupp alternativa bindemedel har en stor variation och variabilitet; och att förutsägelser gällande dess reaktivitet är betydligt svårare än med industriellt framställda alternativa bindemedel.

4.5.5 Aktiverade naturliga puzzolaner

Vissa naturliga puzzolaner som har för låg reaktivitet för att klassificeras som sådana kan få puzzolana egenskaper genom teknisk bearbetning, vilket kan utföras genom **värmebehandling (kalcinering)** eller **mekanisk bearbetning**.

I SS-EN 197-1:2011 och SS-EN 197-5:2021 ingår endast naturliga puzzolaner som aktiverats genom kalcinering. Dessa betecknas med Q.

Den vanligaste formen av mekanisk bearbetning innebär finmalning av materialen till mycket små partiklar, vilket ökar dess reaktivitet. Mekaniskt bearbetade aktiverade naturliga puzzolaner beskrivs i SS 137004:2024, men är ännu ej godkända som delmaterial enligt SS-EN 197-1:2011 eller SS-EN 197-5:2021.

Vulkanisk aska/tuff har använts i oarmerad betong sedan Romartiden och är inget nytt koncept. Forskning bedrivs på flera fronter i Sverige; flera institut och laboratorier i Sverige har visat lyckade resultat då vulkanisk aska blandats in som delmaterial i betong. I Sverige lanserades under hösten 2024 också ett nytt cement med vulkaniskt material (Volcanic Pozzolan Iceland, VPI) av Heidelberg Cement. Eftersom "produktionen" av vulkanisk aska är naturlig, räknas utsläppen från produktionen av vulkanisk aska som noll. Dock krävs att materialet finmals för att materialet ska få cement-liknande puzzolana egenskaper som kan användas i betong. Tillgången till vulkanisk aska internationellt är också god, varför den på sikt borde kunna fasa ut restprodukterna slagg och flygaska. Många vulkaniska glasmaterial innehåller dock relativt mycket vatten, som måste avlägsnas under bearbetningen. Detta resulterar i en hög vattenabsorption som måste tas i beaktning vid användning i betong.

Aktiverad lera innebär att lera som från början har en låg puzzolanitet aktiveras för att ge produkten en högre puzzolanitet. Forskning avseende mekaniskt aktiverade leror bedrivs bl.a. vid RISE, vilka presenterat sina resultat vid flera webinarier under 2023 och 2024. Aktiveringen sker genom kalcinering och/eller malning. Målet är att omvandla leran från kristallin (med hög vatten- och OH-halt) genom utdrivning av OH-joner, till ett amorft material utan OH-joner.

Några exempel på naturliga puzzolaner som kan aktiveras mekaniskt är kaolinit, smektit, klorit och illitlera. Lerans sammansättning tillsammans med aktiveringsmetod är dock avhängig för produkten. Exempelvis har kaolinit och smektit som kalcinerats högre reaktivitet än illit och klorit som kalcinerats, men malning av illit fungerar betydligt bättre än malning av kaolinit. Lerorna kan ingå som en delkomponent i cement eller utgöra ett tillsatsmaterial i betong. Resultaten visar att det går att ersätta upp till 50% av PC-klinkern och därigenom ge en CO₂-reduktion på upp till 40% (muntlig kommunikation Gilles Plusquelles).

5 Kravställning kopplat till konstruktionsförutsättningar och dess inverkan på cementförbrukning

5.1 KRAVSTÄLLNING – ALLMÄNT

RIDAS, Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet (2022) hänvisar bl.a. till följande standarder:

- SS-EN 1990, Eurokod – Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk (2014)
- SS-EN 1992, Eurokod 2 – Dimensionering av betongkonstruktioner (2008)
- EKS 11, Boverkets konstruktionsregler (2019)
- SS 137003:2015, Betong - Användning av SS-EN 206 i Sverige (2015)
- SS-EN 206:2013, Betong - Fordringar, egenskaper, tillverkning och Överensstämmelse (2016)

Dessa utgåvor saknar dock kopplingen till de senaste årens framsteg gällande utvecklingen av nya cementsorter och betongrecept, som utvecklats för att minska klimatpåverkan från betongkonstruktioner. Eftersom RIDAS (2022) är utformad som rekommendationer, men ovan standarder är krav, har rapportförfattarna valt att lägga en större vikt vid standarder och de senare versionernas kravställning.

RIDAS (2022) rekommenderar normalt tryckhållfasthetsklass C25/30 eller högre för vattenbyggnadskonstruktioner; samt exponeringsklass XC4/XF3 enl. SS-EN 206 (2013) för dämmande utomhus-konstruktioner. Vidare ges rekommendationer i RIDAS på vattentäthet (max sprickbredd 0,2-0,3), frostbeständighet (lufthaltskrav >4,0% från XF2 och uppåt samt provning av frostbeständighet för XF4), vct (av beständighetsskäl, se avsnitt 5.8) och användning av tillsatsmaterial, se avsnitt 5.6.

För att förenkla byggprocessen vid dammbyggnad används vanligen en betongkvalitet för hela anläggningen. Denna bestäms vanligen utifrån konstruktionens högsta krav, varför delar av konstruktionen också kommer byggas med betong av bättre kvalitet än vad som faktiskt krävs. Dessutom levereras ofta betong av högre kvalitet än vad som krävts – för att minimera risken att behöva kassera betongen om den inte uppfyller ställda krav.

Sammantaget påläggs ett antal säkerhetsfaktorer den specifika anläggningen, som borde kunna optimeras och sänkas om betongleverantörer, konstruktörer och entreprenörer hade ett närmare samarbete och varje led hade en ökad förståelse för dess klimatpåverkan.

I detta avsnitt beskrivs således några av de strategier inom områdena *Klimatförbättrad betong* och *Rätt betong på rätt plats* (Svensk betong, 2022) som kan användas för att minska klimatutsläppen från betongdammar.

5.2 EXPONERINGSKLASSER

Vanliga orsaker till nedbrytning i en betongkonstruktion beskrivs i SS-EN 1504-9:2008, Figur 1 och en indelning av nedbrytningsmekanismerna görs utifrån de fel som kan uppstå i **Betong** (på grund av orsaker som kan vara mekaniska, kemiska, fysikaliska eller brand) eller på grund av **Armeringskorrosion** (kopplat till karbonatisering, korrosionsföreningar eller läckströmmar). Nedbrytningsmekanismerna uppkommer i olika miljöer / exponeringsklasser, vilka beskrivs i SS-EN 206:2013+A2:2021 (18 st) och innefattar huvudgrupperna i Tabell 6.

Tabell 6. Nedbrytningsmekanismer kopplade till respektive exponeringsklass (SS-EN 206:2013+A2:2021)

Klass	Orsak till fel	Nedbrytningsmekanism	Skadeutveckling
X0		Ingen risk för korrosion eller angrepp	
XC	(Carbonation)	Korrosion orsakad av karbonatisering	När armering korroderar bildas korrosionsprodukter under volymökning, vilket åstadkommer spjälkkrafter i betongen, som därvid töjs. När gränstöjningen överskrids uppstår sprickor längs armeringen. Så småningom spräcks täcksiktet och armering friläggs. Risken för karbonatiseringsinitierad armeringskorrosion är fuktberoende. Karbonatisering sker snabbare när betongen är rel. torr, medan risken för armeringskorrosion är störst när betongen är rel. fuktig.
XD	(De-icing agents)	Korrosion orsakad av klorider som inte kommer från havsvatten, t.ex. tösalt	För kloridinitierad armeringskorrosion krävs att klorider trängt in till armeringen samtidigt som det finns tillgång till syre för korrosionsprocessen. Klorider kan härröra från t.ex. tösaltade vägar.
XS	(Sea water)	Korrosion orsakad av klorider från havsvatten	Kloridinitierad armeringskorrosion orsakad av klorider från havsvatten.
XF	(Frost)	Angrepp av frysning/upptining	Frostpåverkan kan ge både ytliga och inre skador samt urlakning som försämrar täthet och hållfasthet. Orsakas då fukttillståndet över en tillräckligt stor volymenhet av betongen överskrider ett visst kritiskt fukttillstånd samtidigt som en tillräckligt låg frystemperatur råder. Risken för frostsador ökar med ökande fuktnivå i betongen, lägre temperatur samt omväxlande frysning/upptining.
XA	(Chemical Attack)	Kemiskt angrepp	Betong utsätts för kemiska angrepp i naturlig jord och grundvatten, t.ex. av syra, sulfater eller urlakning. Orsakar nedbrytning av cementpastan, upplösning av CSH-gelen och urlakning.

Det är viktigt att notera att dessa nedbrytnings-mekanismer verkar från konstruktionens yta. Om konstruktionernas yttre del är motståndskraftig mot dessa nedbrytningsmekanismer skyddar den även konstruktionens inre delar.

För val av exponeringsklass enligt SS-EN 206:2021 hänvisas till Betongrapport nr 11 (Svenska Betongföreningen, 2023). som bl.a. beskriver att "Betongkonstruktioners beständighet bestäms av olika faktorer, av vilka de grundläggande är betongsammansättning, täckande betongskikt, önskad livslängd samt exponeringsmiljö. Exponeringsmiljön är avgörande för vilka krav som behöver ställas på betongsammansättning och täckande betongskikt för en viss livslängd."

När det gäller armerade vattenkraftkonstruktioner är XC och XF normalt styrande exponeringsklasser, se avsnitt 5.2.1 och 5.2.2. Vid oarmerade konstruktioner är endast XF styrande. För både XC och XF, är betongens fuktillstånd avgörande, se avsnitt 5.2.1 - 5.2.2.

5.2.1 Karbonatiseringsinitierad korrosion

Mest gynnsamt för karbonatiseringsinitierad korrosion är när fuktillståndet är ca 60 – 90 % RF. Betong med måttlig eller varierande fuktnivå (beskrivs med XC3 respektive XC4) är mer ogynnsam ur korrosionssynpunkt än betong som antingen är våt eller torr. Störst risk för karbonatiseringsinitierad armeringskorrosion föreligger i XC4 och till viss del i XC3, medan risken är lägst i XC1, se tabell 7.

Dammkonstruktioner bör hänföras till exponeringsklass XC1 (ytor ståendes under vatten), XC2 (ytor inom regleringsamplituden) eller XC4 (ytor ovan vattenlinjen samt horisontella ytor som utsätts för nederbörd). Kan man med hjälp av klimatanläggningar få ner den relativa luftfuktigheten under 60%, så borde en nedströmssida innanför en klimatvägg hänföras exponeringsklass XC1.

Tabell 7. Exponeringsklasser kopplade till armeringskorrosion orsakad av karbonatisering.

Exponerings- klass	Beskrivning enligt SS-EN 206:2013 +A2:2021	Förklaring enligt SS-EN 206:2013+A2:2021	Tolkning av begrepp som används i SS-EN 206, Tabell 1; Tabell 3.1, Betongrapport nr 11 (2023)
XC1	Torr eller ständigt våt	Betong inomhus med låg fuktighet	Relativ luftfuktighet mestadels mellan 50 och 60%.
		Betong ständigt stående under vatten	Betong som är under lägsta grundvattenyta eller minst 1 m under lägsta lågvattenyta.
XC2	Våt, sällan torr	Betongytor utsatta för långvarig kontakt med vatten Många grundläggningar	Betong som är i långvarig kontakt med vatten eller i jämvikt med luft som har en relativ luftfuktighet >85% och som har möjlighet att torka ut endast under kortare perioder.
XC3	Måttlig fuktighet	Betong inomhus med måttlig eller hög luftfuktighet	Relativ luftfuktighet mestadels mellan 60 och 98%
		Utvändig betong skyddad mot regn	Relativ luftfuktighet mellan 60 och 85%.
XC4	Omväxlande våt och torr	Betongytor utsatta för kontakt med vatten, vilka inte hänförs till XC2	Betong som omväxlande är i jämvikt med a) luft med låg relativ luftfuktighet (RF 50 – 60%) och b) vatten eller luft med RF 85 – 100 %)

5.2.2 Frost

Generellt hänförs dammkonstruktioner till exponeringsklass XF1 eller XF3, se tabell 8. Ytor på en dammkonstruktions uppströmssida, ovan vattenlinjen samt ytor på nedströmssidan hänförs exponeringsklass XF1, medan ytor längs vattenlinjen hänförs exponeringsklass XF3. I de fall dammkrön sammanfaller med väg som saltas kan denna hänföras exponeringsklass XF4. Betongdelar under isfritt djup saknar exponeringsklass för frost, varför karbonatisering istället blir styrande och dessa konstruktionsdelar hänförs till exponeringsklass XC1, se tabell 6 och 7.

Konstruktionens potentiella livslängd kan ökas genom åtgärder som ökar skillnaden mellan kritiskt och verkligt fukttillstånd, t.ex. genom att öka lufthalten i betongen eller att sänka betongens vct (Fagerlund 1979; 1987).

Frostskador kan initieras av sprickbildning orsakad av andra mekanismer, såsom plastiska sätt-/krympsprickor, rörelsesprickor, brister i arbetsutförande eller ASR. När frostpåverkan sker kan det orsaka både ytliga och inre skador samt urlakning som försämrar täthet och hållfasthet (SS-EN 206:2013+A2:2021).

Risken för frostsador ökar med ökande fuktnivå i betongen, lägre temperatur samt omväxlande frysning/upptining. Följdeffekter såsom urlakning sker vanligen i anslutning till sprickor eller otäta partier och orsakar en porositet i betongen såväl som en sänkning av pH, vilket kan leda till ytterligare läckage, hållfasthetsnedsättning och en ökad risk för armeringskorrosion pga. sänkt pH (RIDAS 2020).

Tabell 8. Exponeringsklasser kopplade till angrepp av frysning/upptining (frost).

Exponerings- klass	Beskrivning enligt SS- EN 206:2013+A2:2021	Förklaring enligt SS-EN 206:2013+A2:2021	Tolkning av begrepp som används i SS-EN 206, Tabell 1; Tabell 3.1, Betongrapport nr 11 (2023)
XF1	Måttlig vattenmättnad, utan avisningsmedel	Vertikala betongytor utsatta för regn och frysning	Vattenmättnad i betong efter kort tids (mindre än 1 dygn) vätning från yta täckt med fritt vatten
XF2	Måttlig vattenmättnad, med avisningsmedel	Vertikala betongytor på vägkonstruktioner utsatta för frysning och luftburna avisningsmedel	Vattenmättnad i betong efter kort tids (mindre än 1 dygn) vätning från yta täckt med fritt vatten
XF3	Hög vattenmättnad, utan avisningsmedel	Horisontella betongytor utsatta för regn och frysning	Vattenmättnad i betong efter längre tids (mer än 1 dygn) vätning från yta täckt med fritt vatten
XF4	Hög vattenmättnad, med avisningsmedel eller havsvatten	Väg- och brobanor utsatta för avisningsmedel Betongytor utsatta för direkt stänk innehållande avisningsmedel samt frysning Skvalpzon hos marina konstruktioner utsatta för frysning	Vattenmättnad i betong efter längre tids (mer än 1 dygn) vätning från yta täckt med fritt vatten

5.3 OMGIVNINGSKATEGORI

Omgivningskategorier används för att kategorisera betongens omgivning med hänsyn till ballastens benägenhet att utveckla alkalisilikareaktioner (ASR). Tre nivåer särskiljs (E1 – E3), vilka beskrivs nedan:

- E1: Betongen är i huvudsak skyddad från utvändigt fukt.
- E2: Betongen utsätts för utvändigt fukt.
- E3: Betongen utsätts för utvändigt fukt och ytterligare förvärrande faktorer, till exempel tö-saltning, frysning och upptining, omväxlande uppfuktning och torkning i marin miljö eller fluktuerande laster.

Tabell 9. Koppling mellan exponeringsklass och omgivningskategorier, från SS 137003:2021+T1:2024.

Exponerings-klass	Omgivningskategori vid entydig koppling	Kommentar
X0	E1	-
XC1	-	E1 eller E2 beroende på om det är inomhus med låg fuktighet eller ständigt stående under vatten. Konstruktioner med tjocklek > 0,5 m bör hänföras till E2.
XC2	E2 ^a	-
XC3	E2 ^a	-
XC4	E2 ^a	-
XD1	-	E2 eller E3 beroende på risk för kloridanrikning i ytan
XD2	E3	-
XD3	E3	-
XS1	-	E2 eller E3 beroende på risk för kloridanrikning i ytan
XS2	E3	-
XS3	E3	-
XF1	E2	b
XF2	E3	b
XF3	E2	b
XF4	E3	b
XA1	-	Avgörs från fall till fall
XA2	-	Avgörs från fall till fall
XA2	-	Avgörs från fall till fall

Exponerings- klass	Omgivningskategori vid entydig koppling	Kommentar
		^a Omgivningskategorin kan höjas till E3 om de förvärrande faktorerna förhöjd temperatur i vått tillstånd under längre tid eller betongvägar utsatta för belastningsvariationer föreligger.
		^b Generellt utsätts alla utomhuskonstruktioner i Sverige utsatt för utvändig fukt, frysning och upptining. Konstruktioner i XF1 (måttlig vattenmättnad, och inga avisningsmedel) hänförs till kategori E2. Konstruktioner i XF3 (hög vattenmättnad och inga avisningsmedel) kan också normalt hänföras till kategori E2, såvida inga andra förvärrande faktorer föreligger.

Kopplingen mellan omgivningskategori och exponeringsklass visas i tabell 9.

5.4 CEMENT

Idag finns sex huvudtyper av ordinära cement och 27 accepterade cementprodukter, av vilka endast CEM I, CEM II/A-LL, CEM II/A-V, CEM II/A-S och CEM II/A-M kan användas i XF3 utan inskränkningar (med max $v_{ct_{ekv}}$ 0,55, se avsnitt 5.8). Ingående huvudbeståndsdelar i dessa cement är PC-klinker (>80%) samt kalksten (<20%), kiselrik flygaska (<20%), granulerad masugnsslagg (<20%) och/eller silikastoft (max 10%). Dock kan sammansatta cement med högre andel tillsatsmaterial (upp till 35% slagg och/eller flygaska) användas om de kvalifikationsprovats enligt bilaga T, SS137003:2021+T1:2024.

Se även tabell 10 för accepterade cement och dess huvudbeståndsdelar enligt SS-EN 197-1: 2011 och SS-EN 197-5:2021.

Tabell 10. Dagens cement och dess huvudbeståndsdelar.

Huvud- typ	Benämning av ordinära cement	Huvudbeståndsdelar		Begränsningar huvudbeståndsdelar
		PC-klinker (K)	Andra huvudbeståndsdelar än portlandcement- klinker ¹⁾	A: ≥80% PC-klinker B: 65–79 % PC-klinker C: <65% PC-klinker
CEM I	Portland-cement	>95 %		Endast PC-klinker ⁷⁾
CEM II ²⁾	Sammansatta Portland-cement	50–94 %	6–50 % S, D, P, Q, V, W, T, L, LL	A/B tillåtna, max 1 andra huvud- beståndsdelar än K ⁷⁾ , med följande undantag: CEM II/A-M, CEM II/B-M: inga begränsningar avseende antal huvudbeståndsdelar ⁷⁾ CEM II/C-M: 50–64% K. Max 2 andra huvud-beståndsdelar än K ⁸⁾
CEM III ³⁾	Slagg-cement	5–64 %	36–95 % S	A/B/C tillåtna, inga huvudbeståndsdelar utöver K och S tillåtna ⁷⁾
CEM IV ⁴⁾	Puzzolan-cement	45–89 %	11–55 % D, P, Q, V, W	A/B tillåtna, utan begränsningar avseende antal huvudbeståndsdelar ⁷⁾
CEM V ⁵⁾	Komposit-cement	20–64 %	18–49 % S + 18–49 % P, Q, V	A/B tillåtna, utan begränsningar avseende antal huvudbeståndsdelar ⁷⁾
CEM VI ⁶⁾	Komposit-cement	35–49 %	31–59 % S + 0–20 % P, V, L, LL	Max 2 andra huvud-beståndsdelar än K ⁸⁾

¹⁾ S: Granulerad masugnsslagg, GGBS, D: Silikastoft (max 10%), P: Naturliga puzzolaner, Q: Naturliga kalcinerade puzzolaner, V: Kiselrik flygaska, W: Kalkrik flygaska, T: Bränd skiffer, L: Kalksten, LL: Kalksten.

²⁾ Beteckningen A betyder att 6–20 % av PC-klinkern har ersatts, B att 21–35 % ersatts och C att upp till 50% av PC-klinkern har ersatts med en annan huvudbeståndsdel (som kan vara S, D (max 10 %), P, Q, V, W, T, L eller LL).

³⁾ Slaggcement innehållande minst 5 % PC-klinker och i vilket endast S är tillåten som alternativ huvudbeståndsdel.

⁴⁾ Endast puzzolant material kan ersätta PC-klinker som huvudbeståndsdel (kan vara D (max 10%), P, Q, V eller W).

⁵⁾ Kompositcement där 36–80 % av PC-klinkern har ersatts av 18–49 % S och minst ett av materialen P, Q eller V.

⁶⁾ Kompositcement med 35–49 % PC-klinker, 31–59 % masugnsslagg och 0–20% P, V, L eller LL.

⁷⁾ SS-EN 197-1:2011

⁸⁾ SS-EN 197-5:2021

5.5 BALLAST

Ballast ska uppfylla krav enligt SS 137003:2021+T1:2024, vilket innebär att den petrografiska beskrivningen bör innehålla ett utlåtande om ballastens lämplighet som betongballast. Frostbeständighet ska kunna påvisas för grov ballast, genom vattenabsorption- eller frostbeständighetsprovning. Svavelföreningar ska analyseras om

den petrografiska analysen eller ballastens ursprung gör att den kan misstänkas innehålla svavel. Ballast ska kunna påvisas vara oskadlig med avseende på alkalisilikareaktivitet enligt de metoder och gränsvärden som rekommenderas i bilaga U, SS137003:2021+T1:2024. Metod för utvärdering av ballastens reaktivitet fastställs vid den petrografiska analysen. Tillämpas AMA Anläggning 23, avsnitt EBE.1 ska utvärderingar gällande ballastens alkalireaktivitet utföras av ett organ som ackrediterats för dessa metoder enligt förordning (EG) nr 765/2008.

Kornstorlek ($d_{\max}$) upprättas utifrån det täckande betongskiktets storlek och avstånd mellan armering, se även avsnitt 4.3.

5.6 TILLSATSMATERIAL

RIDAS (2020) anger ej rekommendationer avseende halter tillsatsmaterial, utan hänvisar till SS-EN 137003:2015, vilken i XF3 (vanligen den strängaste exponeringsklassen som hänförs betongdammar inom vattenkraften) endast tillät upp till 35% granulerad masugnsslagg eller flygaska då tillsatsmaterialen ingår som **huvudbeståndsdelar i cement** (dvs. CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM II/A-LL och CEM II/A-M eller CEM II/B-M).

Dock accepteras i exponeringsklass XF3 endast CEM II/A-V (6-20% FA) med max v_{tekv} 0,55, CEM II/B-V (21-35% FA) med max v_{tekv} 0,45 vid ständigt hög fuktbelastning, samt CEM IV/A (V) med max 35 % FA och max v_{tekv} 0,45 vid ständigt hög fuktbelastning).

Med hänsyn till vattenkraftens krav på beständighet, täthet, rekommenderade hållfasthetsklasser och v_{tekv} är det därför endast praktiskt möjligt att nå en klimatreduktion motsvarande nivå 2 med klimatförbättrad betong – för att inte frångå gällande regelverk.

Appliceras istället SS-EN 137003:2021+T1:2024 kan upp till totalt max 35% slagg eller flygaska användas tillsammans med CEM I eller CEM II/A (med LL, S eller V). Notera att halten S, V och/eller LL som ingår i cementet ska medräknas i totalhalten. Används upp till 10% silikastoft (D) ska användningskriterier som fastställs vid kvalifikationsprovning enligt bilaga T, SS137003:2021+T1:2024 gälla. Dock kvarstår krav på högsta v_{tekv} 0,45 vid användning av CEM II/B och CEM II/A vid ständigt hög fuktbelastning.

Med detta resonemang kan nivå 3 (Svensk betong, 2022) nås. I Appelquist et al. (2024) beskrivs tre vattenkraftprojekt där flygaskebetong använts inom dessa ramar. Studier visar också att kylbehovet kan minskas vid användning av dessa tillsatsmaterial, vilket ytterligare reducerar klimatpåverkan från projekten (Nordström & Hassanzadeh 2018; Nordström et al. 2022).

Genom ytterligare avsteg som verifieras med funktionsprovningar kan branschen troligen nå längre, men det är viktigt att känna till att tillgängliga funktionsprovningar inte är utvecklade för alternativa bindemedel, utan tagits fram med hjälp av rena portlandcement, även om de idag också appliceras på alternativa bindemedel.

5.7 HÅLLFASTHETSKLASS/BÄRFÖRMÅGA BETONG

RIDAS (2022) beskriver att tryckhållfasthetsklass C25/30 eller högre normalt används i vattenkraftkonstruktioner, men anger också med hänsyn till temperaturutvecklingen i grova konstruktioner, att man ej bör använda "onödigt hög hållfasthet", eftersom det leder till högre cementhalter, vilket i sin tur ger ökad risk för temperaturrelaterad sprickbildning, något som har en negativ inverkan på betongens täthet. Dessutom bedöms betongdammars tyngd viktigare än dess hållfasthetsklass med hänsyn till dammarnas glid- och stjälpstabilitet.

Glidstabilitet handlar om dammens förmåga att motstå rörelse längs dess grundläggningsyta. För att säkerställa tillräcklig glidstabilitet måste man ta i beaktande de krafter som verkar på dammen, inklusive vattentryck, upptryck från grundvatten i undergrunden (och eventuella seismiska belastningar). Genom att designa dammen med en tillräcklig basbredd kan man förbättra glidstabiliteten. Ytterligare åtgärder som kan vidtas inkluderar att förankra dammen i berggrunden genom användning av olika förankringsmetoder såsom stålkablar eller bultar.

Stjälpstabilitet refererar till dammens motstånd mot att välta eller tippa över under påverkan av externa krafter (framförallt ensidigt vattentryck). Detta är särskilt viktigt vid höga vattennivåer eller under kraftiga flöden som kan generera stora vattenkraftmoment på dammens ovansida. För att motverka detta utformas betongdammar med en tillräcklig tyngd och en låg tyngdpunkt. I praktiken innebär det att dammen ofta har en bred bas och en gradvis avsmalnande profil uppåt för att säkerställa att tyngdkraftsmomentet motverkar de potentiella tippningsmomenten.

För optimering av betongens hållfasthet se avsnitt 4.4.

5.8 VCT

Kravställning av betongens vct eller vct-ekvivalent (vct_{ekv}) görs bl.a. utifrån exponeringsklass och det cement / de bindemedel som används i betongen, se tabell 11.

Enligt RIDAS (2020) bör vattencementtalet (vct), vid användning av rena portlandcement, ej överstiga 0,55 enligt tabell 8a i SS137003:2015. Vidare anger RIDAS att om blandcement eller ersättning av andelar av cementet med tillsatsmaterial används bör, av beständighetsskäl, vct_{ekv} inte överstiga 0,45 för konstruktioner i exponeringsklass XF3 vilka utsätts för ständigt hög fuktbelastning (till exempel alla dämmande konstruktioner). RIDAS (2020) krav är dels en skärpning mot SS137003:2015 gällande vct_{ekv} vid användning av alla blandcement eftersom betongtillämpningsstandarden endast krävde max vct_{ekv} 0,45 vid användning av "blandcement" med <80% PC-klinker. Dock accepterades i SS 137003:2015 endast rena portlandcement (CEM I), portland-slaggcement (CEM II/A-S, CEM II/B-S), portland-flygaskecement (CEM II/A-V, CEM II/B-V), portland-kalkstenscement (CEM II/A-LL) och portland-kompositcement (CEM II/A-M, CEM II/B-M) i XF3; och max 35% flygaska eller slagg om det ingick som huvudbeståndsdel i cementet i XF3. RIDAS (2020) anger inte heller några begränsningar avseende vilka cement eller tillsatsmaterial som får användas i betongen, men rekommenderar att betong i konstruktioner med höga krav på nötningsbeständighet (till exempel skibord och pelarsidor i utskov) ej bör ha vct över 0,50 vid användning av rena portlandcement.

Tabell 11. Övergripande kravställning på bindemedel och $v_{ct,ekv}$ för exponeringsklasser relevanta för betongdammar, enligt SS137003:2021+T1:2024.

Krav-element	X0		XC2	XC4	XD2	XD3	XF1	XF3
Cement enligt SS-EN 197-1:2011 och SS-EN 197-5:2021	Alla.	CEM I	0,60	0,55	0,45	0,40	0,60	0,55
		CEM II/A-LL						
	Inget krav på högsta $v_{ct,ekv}$	CEM II/A-V						
		CEM II/A-S						
		CEM II/A-M ^b						
		CEM II/A-D	0,60	0,55	0,45	0,40	0,60	a
		CEM II/B-S	0,55 ^{c, e}	0,50 ^{c, e}	0,45	0,40	0,60 ^c	0,55 ^{c, d}
		CEM II/B-V			c	c		
		CEM II/B-M ^b						
		CEM II/C-M ^b	0,55 ^e	0,50 ^e	0,45	0,40	0,60	-
		CEM III/A						
		CEM III/B	-	-	-	-	-	-
		CEM IV/A (V)	0,55 ^{c, e}	0,50 ^{c, e}	0,45	0,40	0,60 ^c	
					c	c		
		CEM IV/A (D-V)	0,55 ^{c, e}	0,50 ^{c, e}	0,45	0,40	0,60 ^c	a
					c	c		
		CEM V/A (S-V)	0,55 ^e	0,50 ^e	0,45	0,40	0,60	-
		CEM VI (S-V)						
		CEM VI (S-LL)						
		Övriga CEM II/A, CEM II/B, CEM IV/A	a	a	a	a	a	a
		Övriga CEM II/C-M, CEM V/A, CEM VI	a	a	a	a	a	-
Andel av binde-medelf :		-						
Silikastoft	≤ 10				≤ 10			≤ 5 ⁱ
Flygaska	≤ 35 ^h				≤ 35 ^h			≤ 35
GGBS	≤ 70 ^h				≤ 65			≤ 35
PC-klinker	≥ 30 ^g				≥ 35			≥ 65

Krav-element	X0	XC2	XC4	XD2	XD3	XF1	XF3
^a	Kan användas med vissa användningskriterier, se bilaga T, SS137003:2021+T1:2024.						
^b	Kan användas med vissa begränsningar gällande huvudbeståndsdelar, se tabell 7 - tabell 10, SS137003:2021+T1:2024.						
^c	Vid LL överstigande 20 % ska högsta v_{ctekv} sänkas med 0,05 enheter. Om kalkstenshalten ≤ 20 % ska detta kunna påvisas.						
^d	Högsta v_{ctekv} 0,45 vid användning av CEM II/B och CEM IV/A vid ständigt hög fuktbelastning, till exempel i delar av vattenkraftanläggningar.						
^e	Genom kvalifikationsprovning enligt bilaga T, SS137003:2021+T1:2024 kan ett högre högsta v_{ctekv} tillämpas för ett specifikt cement eller specifik bindemedelskombination. Högsta v_{ctekv} får dock inte överskrida det högsta tillåtna i exponeringsklassen.						
^f	Vid tillämpning av k-värdeskonceptet och för tillsatser upp till 20 % av bindemedelsmängden gäller högsta v_{ctekv} för CEM II/A i aktuell exponeringsklass. Vid tillsatser mellan 21 % och 35 % av bindemedelsmängden gäller högsta v_{ctekv} för CEM II/B. Vid tillsatser mellan 36 % och 65 % gäller högsta v_{ctekv} för CEM III/A. I dessa andelar ska både det som ingår som huvudbeståndsdel i cementet och det som tillsätts vid blandningen medräknas.						
^g	Lägre andel får tillämpas om tillsatsmaterialet enbart ingår som en huvudbeståndsdel i ett ordinärt cement enligt SS-EN 197-1:2011 eller i en motsvarande bindemedelskombination med påvisad likvärdig prestanda enligt bilaga O, SS137003:2021+T1:2024.						
^h	Högre andel får tillämpas om tillsatsmaterialet enbart ingår som en huvudbeståndsdel i ett ordinärt cement enligt SS-EN 197-1:2011 eller i en motsvarande bindemedelskombination med påvisad likvärdig prestanda enligt bilaga O, SS137003:2021+T1:2024.						
ⁱ	Andelar ≤ 10 % får tillämpas om tillsatsmaterialet ingår som en huvudbeståndsdel i ett ordinärt cement enligt SS-EN 197-1:2011 eller i en bindemedelskombination som båda ska ha kvalifikationsprovats enligt bilaga T, SS137003:2021+T1:2024.						

Ska en säkerhetsmarginal motsvarande RIDAS (2020) krav på -0,05 för mer utsatta konstruktioner tillsammans med en säkerhetsmarginal på -0,10 gälla vid användning av alternativa bindemedel skulle rekommendationen vara $v_{ctekv} < 0,40$ vid användning av Anläggningscement FA i exempelvis utskovspelare och skibord. Appliceras istället kraven i 2024 års tillämpningsstandard avseende dagens accepterade cement bör dock exempelvis Anläggningscement FA kunna användas med max v_{ctekv} 0,55 i de flesta konstruktionsdelar, men med säkerhetsmarginalen -0,05 (max v_{ctekv} 0,50) i betong till utskovspelare och skibord. Vidare bör, om kraven för XF3 i SS137003:2021+T1:2024 ska uppfyllas, max v_{ctekv} 0,55 appliceras på betong med portlandcement eller sammansatta cement innehållande kalksten, flygaska, slagg och/eller silikastoft och med minst 80% PC-klinker (CEM II/A). Är halten PC-klinker 65-79% (CEM II/B) och halten kalksten över 20% bör v_{ctekv} vara max 0,50 oavsett betongkonstruktion; men i de fall CEM II/B eller CEM IV/A används bör v_{ctekv} max vara 0,45 om betongen utsätts för ständigt hög fuktbelastning (såsom betongdammar).

Baserat på resonemanget ovan ges generella rekommendationer för max v_{ctekv} i tabell 12, se även avsnitt 7.9.

Tabell 12. Rekommenderad $v_{ct_{ekv}}$ baserat på RIDAS (2020) säkerhetsmarginal samt krav i SS137003:2021+T1:2024.

Cement	Anläggningsdel	$v_{ct_{ekv}}$
CEM I	Dammdelar som utsätts för ensidigt vattentryck	0,55
CEM II/A-LL		
CEM II/A-V		
CEM II/A-S		
CEM II/A-M ^b	Utskovspelare, skibord	0,50
CEM II/B		
CEM IV/A		
	Dammdelar som utsätts för ensidigt vattentryck	0,45
	Utskovspelare, skibord	0,40

6 Alternativa bygg- / utförandemetoder

Kopplat till strategierna *Resurseffektiv konstruktion* och *Rätt betong på rätt plats* (Svensk betong, 2022) beskrivs i detta avsnitt metoder som kan användas för att minska klimatutsläppen från betongdammar.

6.1 SPARSTEN, INJEKTERINGSBETONG OCH STENFYLLD BETONG

Användning av sparsten och injekteringsbetong är historiska metoder som kan liknas vid "stenfylld betong" (eng. Rock Filled Concrete, RFC, se avsnitt 6.1.3), varför de behandlas i samma avsnitt. De främsta likheterna är att större block omsluts av oarmerad betong och den största skillnaden är att sparsten användes i mindre volymer. Sparstenen var också oordnad, samt omgavs av trögare betong. I injekteringsbetong användes större volymer block, men dessa var oordnade och omsluts av en mer trögflytande betong. I stenfylld betong läggs blocken ut i en ordnad stenfyllning som senare omsluts av självkompakterande betong. Användning av självkompakterande betong är nödvändig för att betongen ska omsluta stenarna och inte få alltför stora håligheter. Stenfylld betong är också den metod som ger störst effekt (mindre cementåtgång). I samtliga fall används åtgärderna för att reducera betong- och cementåtgången.

6.1.1 Sparsten

Historiskt (sent 1800-tal till tidigt 1900-tal) har sparsten använts i betong i främst grova konstruktioner såsom massivdammar och slussar. Användningen av sparsten, som också kallas procentsten, i betong är en historisk metod för att reducera mängden cement, som var ett relativt dyrt material och betong som innehåller sparsten kallas även sparbetong. Samma regler gällde som för vanlig ballast, dvs. att sparstenen skulle vara rengjord, vatteninträkt, fri från föroreningar och organiska ämnen, ovittrad, samt uppfylla krav på tryckhållfasthet i oarmerad betong. Sparstenar (block) skulle dessutom vara uppvärmda till minst 5°C vid vintergjutning.

De första svenska betongdammar (1900–1910) som projekterades och uppfördes med hjälp av erfarenheter från utländska massivdammar, är gjorda av mager icke vibrerad stampbetong som är en betong av en "jordstyv konsistens". Denna utfyllnadsbetong göts vanligen med sparsten (upp till 20 % av betongens volym) inne i konstruktionen. Fetare betong användes mot vattensidan och i ett bärande lager mot berggrunden/undergrunden.

Ett minst 10 cm tjockt lager med färsk betong lades ut i botten av konstruktionen. Sparsten lades sedan ut med spetsen nedåt vid gjutningen för att få så bra vidhäftning som möjligt. Max vikt definierades som "mansbörda storlek". I utfyllnadsbetongen var cementhalten generellt 200 kg/m³, medan cementhalten i den fetare betongen var 200–240 kg/m³. På uppströmssidan och på skibord kompletterades ofta tätskiktet (ca 150 mm tjockt) med en stensättning för att minska risken för nötning.

Tabell 13. Vattenbyggnadsbyråns anvisningar gällande sparsten

År	Avstånd mellan sparsten	Avstånd mellan sparsten och formbyggnad	Tillåten mängd sparsten
1910	15 cm	15 cm	Max. 20 % av betongens volym
1924	20 cm	10 cm	Max. 20 % av betongens volym
1942/ 1945	20 cm	10 cm	Max 15 % av betongens volym
1943/ 1954			Max 10–20 % av betongens volym i konstruktioner med tjocklek $\geq 1,5$ m

Betongbestämmelserna (tabell 13) reglerade den maximala mängden sparsten i betong till högst 20 % av betongens volym (1910), avståndet mellan sparstenarna och avstånd mellan sparsten och formbyggnad till 15 cm (1910). Sparsten fick inte heller användas i konstruktionsdelar med risk för knäckning eller i områden med dragspänningar.

1924 ändrades kraven till minst 20 cm avstånd mellan sparstenarna och 10 cm avstånd mellan sparsten och formbyggnad. Det infördes även en ny regel att sparsten inte fick läggas direkt på redan hårdnad betong utan att det först skulle läggas ett minst 10 cm tjock lager av färsk betong. Under 40- och 50-talet justerades anvisningarna för användning av sparsten till att max 10–20 % av betongens volym fick utgöras av sparsten i konstruktionsdelar med en tjocklek av $>1,5$ m.

I bestämmelserna från 1943 tillkommer definitionen på sparsten där sparsten beskrivs som en sten med större "styckestorlek än makadam eller singel". I Vattenbyggnadsbyråns anvisningar för betongarbete från 1943 står också att sparsten inte fick användas i "turbinsnäckors bottenkonstruktioner" samt att sparsten skulle "ställas med en spets nedåt" vid gjutningen för att undvika undermålig kringgjutning.

Avstånd mellan sparstenar var generellt 15–20 cm och avstånd till formbyggnad 10–15 cm. Tillåten mängd sparsten var max 10–20% av betongens volym, i konstruktionsdelar med tjocklek $\geq 1,5$ m (Vattenbyggnadsbyrån, 1954).

I 1954 års upplaga av Vattenbyggnadsbyråns anvisningar finns det sex betongblandningar som exempel, från vilka två innehåller sparsten, se tabell 14.

Mängden cement och/eller filler kunde dock anpassas efter beställarens önskemål så länge man kunde prova att en "fullgod betong" erhöles.

Tabell 14. Betongblandningar enligt Vattenbyggnadsbyråns anvisningar 1954.

Betongsort	Cement (kg/m ³)	Filler	Ballast (mm)	Konstruktioner
(L/S) A1	350	Tilläts	Sand Sten ≤ 32	Utsatta för ensidigt vattentryck.
(L/S) A3	330	Tilläts	Sand Sten ≤ 64	Utsatta för ensidigt vattentryck och med en tjocklek ≥ 1,5 m. Minst 10 % sparsten.
(L/S) A5	310	Tilläts	Sand Sten ≤ 128	Utsatta för ensidigt vattentryck och med en tjocklek ≥ 1,5 m.
(L/S) U1	310	-	Sand Sten ≤ 32	Ej utsatta för ensidigt vattentryck.
(L/S) U3	290	-	Sand Sten ≤ 64	Ej utsatta för ensidigt vattentryck och med en tjocklek ≥ 1,5 m. Minst 10 % sparsten.
(L/S) U5	270	-	Sand Sten ≤ 128	Ej utsatta för ensidigt vattentryck och med en tjocklek ≥ 1,5 m.

L = LH-cement, S = Std-cement. A = betong som uppfyller högst ställda krav på vattentäthet, för konstruktioner med ensidig vattentryck eller "omspolade av vatten". U = betong för konstruktioner som "icke bli utsatta för ensidigt vattentryck eller omspolade av vatten"

6.1.2 Injekteringsbetong

Två typer av injekteringsbetong förekommer, vilka i denna rapport benämns äldre och modern injekteringsbetong.

I äldre konstruktioner lades eller hällades vanligen oordnade block ut (utan packning) och fylldes senare ut med en relativt trögflytande betong. Eftersom blocken var oordnade och betongen trögflytande är det inte ovanligt att denna betong har större håligheter pga. att betongen inte lyckats omsluta blocken på dess undersida. Det är inte lätt att hitta litteratur om denna typ av betong, utan texten bygger på författarnas erfarenheter.

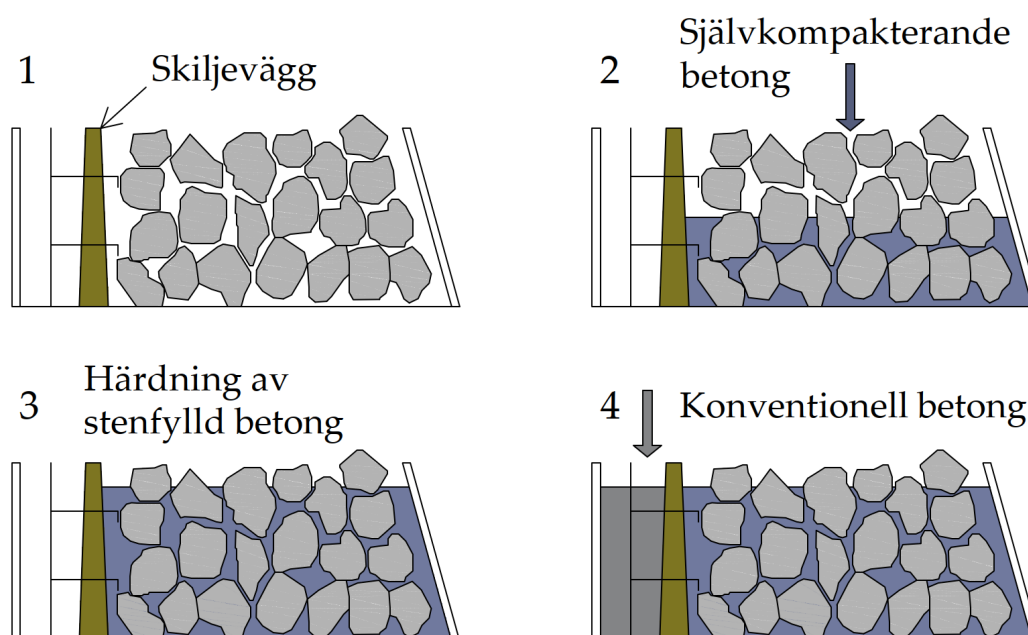
Metoden har förfinats genom åren och när man idag pratar om injekteringsbetong avses en metod som används för att minimera effekterna av betongens uttorkningskrympning. Grov ballast läggs ut och packas noga i formen innan cementbruk pumpas in för att binda samman stenarna. Metoden benämns också prepaktbetong (Rosenqvist 2018).

6.1.3 Stenfylld betong (Rock-filled concrete, RFC)

Under 2000-talet introducerades en ny metod för konstruktion av massiva betongdammar i Kina. Metoden benämns i denna rapport stenfylld betong (eng. Rock-Filled Concrete, RFC) och utförs vanligen i fyra steg (figur 6) för att skapa en konstruktion som exempelvis kan bestå av (1) en yttre armerad betongvägg, (2) en skiljevägg som separerar den yttre och "inre" delen, genom vilken armeringen också fortsätter för att sammanbinda skiljeväggen med den inre och yttre delen och (3) en oarmerad inre del / nedströmsdel som endast utgörs av stenfylld betong (Jin & Huang 2022):

1. Form- och armeringsarbeten av uppströmsdel samt uppförande av ev skiljevägg / murverksvägg genom vilken armeringen ska gå. Stora stenblock (>300 mm) läggs ut i ett ordnat mönster nedströms skiljevägg. 55–60% av dammen utgörs av stenblock. Dammens inre del / nedströmsdel är oarmerad.
2. Självkompakterande betong pumpas ned i formen och fyller tomrummet mellan blocken på grund av dess goda flytbarhet.
3. Härdning av oarmerad stenfylld betong.
4. Konventionell betong gjuts i konstruktionens armerade uppströmsdel.

Figur 6. Exempel på koncept för utförande av massivdamm med stenfylld betong (från Jin & Huang 2022).



Betonegenskaperna påverkas av stenblockens storlek, form och gradering, men främst av den självkompakterande betongens egenskaper.

Fördelarna är dels att stenblocken kan utvinnas lokalt nära anläggningen och att de inte behöver krossas (som "vanlig ballast"), vilket minimerar transporter och andra utsläpp; men framför allt kan cementåtgången reduceras med ca 40–50% jämfört med vanlig betong pga. att mängden betong minskas avsevärt. I jämförelse med äldre injekteringsbetong där man vanligen använde stampbetong fyller också den

självkompakterande betongen ut runt stenblocken på ett helt annat sätt. Sprickor i betongen reduceras genom korrekt utförande (Svenska Betongföreningen, 2020).

6.2 VÄLTBETONG I DAMMAR (ROLLER COMPACTED CONCRETE, RCC)

Vältbetong (eng. Roller Compacted Concrete, RCC) är en oarmerad beläggning av betong med en jordfuktig konsistens (vebe ≥ 120) som man packar med vibrerande vält. Vältbetongen läggs ut i horisontella kontinuerliga gjutskikt. Benämningen vältbetong eller RCC används internationellt för både beläggningar och grova konstruktioner, trots att det är få likheter mellan de olika metoderna. Högkvalitativ vältbetong används vanligen i beläggningar pga. dess höga slitstyrka och vältbetong med låg cementshalt i grova konstruktioner såsom dammar. Vältbetong kan även användas för förstärkning av jorddammar och erosionsskydd (Andersson 1992).

Vältbetong i grova konstruktioner kan delas in i tre kategorier beroende på sammansättning och produktionsteknik (se även Andersson 1992):

1. Dammar av vältbetong med mycket låg cementshalt (bindemedelshalt < 80 kg/m³, varav 40% kan vara flygaska). Ttäteten säkerställs med hjälp av tätskikt av gjuten betong på dammens uppströmssida.
2. Dammar med vattentät kärna av vältbetong. Vattentätheten säkerställs i dammen vilket ställer stora krav på täthet i vältbetongen och även i de horisontella fogarna.
3. Dammar av vältbetong med hög halt flygaska (ca 70%).

Dimensionering av vältbetongdammar sker på likartat sätt som för gjutna betongdammar och krav ställs framförallt på stabiliteten. Acceptabel stabilitet kan uppnås utan krav på vidhäftning mellan gjutskikt eller draghållfasthet - om nedströmsslutningen utförs med en flack lutning.

För vältbetong till dammar ställs även krav på permeabilitet (vattentäthet) samt beständighet (klimat och nötningsbeständighet). Kravet på frostbeständighet kan inte uppfyllas genom tillsats av luftporbildare, utan andra metoder krävs för att dammarna ska uppfylla kravet på frostbeständighet. Vanligen gjuts ett lager frostbeständig betong utanför vältbetongen, men även prefabelement kan användas som ett skyddande skal runt vältbetongen.

Fördelar som kan nämnas gällande vältbetong är bl.a. det snabba, enkla utförandet med hög utläggningskapacitet. Vältbetongen visar också låg risk för krympning och mindre behov av fogar, kräver mindre volym mikrobruk och armering är ej nödvändig. Dessutom är tidig belastning möjlig, och då man jobbar på stora öppna ytor på samma nivå upplevs en förbättrad arbetsmiljö vid jämförelse med betongdammar. Konstruktionstypen är också mindre känslig för dålig undergrund och har lägre anläggningskostnader (Andersson 1992).

Nackdelar som beskrivs är att vältbetong är känsligare för avvikelser i arbetsutförande än vanligt gjuten betong; det krävs speciell utrustning för att få en hög ytjämnhet och hög friktion; samt risker med att säkerställa tätheten i det stora antalet horisontella fogar. Det går inte heller att göra vältbetongen frostbeständig med hjälp av luftporbildare. Vid behov av en frostbeständig konstruktion kan detta istället

säkerställas med ett 1-3 m tätskikt av gjuten betong eller sammangjutna prefabricerade betongelement runt den inre vältbetongen (Andersson 1992).

6.3 ÅTERBRUK (RIVNINGSMASSOR OCH BERGSCHAKTMASSOR)

Ballast av återvunna rivningsmaterial (definieras som ballast som erhållits genom bearbetning av oorganiska material som tidigare använts till byggande) bör generellt inte användas i betong för vattenkraftkonstruktioner i de fall man använder en betongkvalitet för hela konstruktionen och hänför denna till den striktare klassen (exponeringsklass XF3).

5 % av den totala ballastmängden får dock alltid utgöras av ballast av krossad restbetong eller ballast återvunnen ur färsk betong.

Mängden tillåtna återvunna rivningsmaterial, för användning i betong, beror av typen av material (A eller B) samt vilken exponeringsklass betongen ska hänföras till, se tabell 15.

Potentiellt skulle återvunna rivningsmaterial kunna användas i de inre delarna av grövre konstruktioner (>1,5m) om de är godkända enligt SS-EN 12620+A1:2008 och kan hänföras exponeringsklass X0 eller XC1. I dessa fall kan ballast av återvunna rivningsmaterial, för betong, utgöra upp till 50% av den totala mängden ballast, beroende av exponeringsklass och typ av rivningsmaterial. Återvunna rivningsmaterial skulle i detta avseende kunna vara t.ex. återvunnen betong som tidigare använts till byggande, restbetong eller legoblock av spillbetong. Typ B ska dock inte användas i hållfasthetsklasser högre än C30/37. Avseende dammkonstruktioner och dess stjälp- och glidstabilitet rekommenderas Typ A, se avsnitt 5.7 avseende konstruktionens egentynghet.

Notera att det ska säkerställas att ballast av återvunna rivningsmaterial har minst samma hållfasthetsklass och minst uppfyller kraven som gäller för den exponeringsklass i vilken den nya betongen ska användas.

Pga. att sprickbildning kan uppstå i de inre delarna bör konstruktören också överväga att tillsätta luft i betongen, för att säkra dess frostbeständighet, även om de tillförs exponeringsklass X0/XC1.

Tabell 15. Exponeringsklasser, i vilka återvunna rivningsmaterial är tillåtna (från SS137003:2021+T1:2024).

	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1, XS1	Alla andra exponeringsklasser
Ballast av återvunna rivningsmaterial typ A (densitet $\geq 2100 \text{ kg/m}^3$)	50 %	30 %	30 %	0 %
Ballast av återvunna rivningsmaterial typ B (densitet $\geq 1700 \text{ kg/m}^3$)	50 %	20 %	0 %	0 %

7 Betongkonstruktioner som består av olika delar med olika betongegenskaper

7.1 BAKGRUND

Vattenbyggnadskonstruktioner som byggdes i Sverige i början av förra seklet utformades i flera skikt. När det gäller cementbaserade material användes olika bruks- och betongsammansättningar som hade specifika funktioner i konstruktionen. Tabell 16 visar olika bruk- och betongsammansättningar som användes i början av förra seklet för konstruktionen av en sluss nedströms Vänern. I vissa delar användes även 20 volymprocent sparsten, se avsnitt 6.1.1. Figur 7 visar en del av slusskonstruktionen. Dock är varken den bärande betongen eller utfyllnadsbetongen frostbeständig, vilket har medfört nedbrytning orsakad av en kombination av inre frostangrepp och urlakning. Konstruktionen har cementinjekterats flera gånger under de över 100 åren som den har varit i drift. När slussen byggdes var betongtekniken inte utvecklad, och man hade ringa kunskaper om de olika mekanismer som bryter ner en betongkonstruktion. Trots detta står betongkonstruktionen kvar 100 år senare.

Tabell 16. Olika bruks- och betongsammansättningar som i början av förra seklet användes i vattenbyggnadskonstruktioner (Sweco, 2016)).

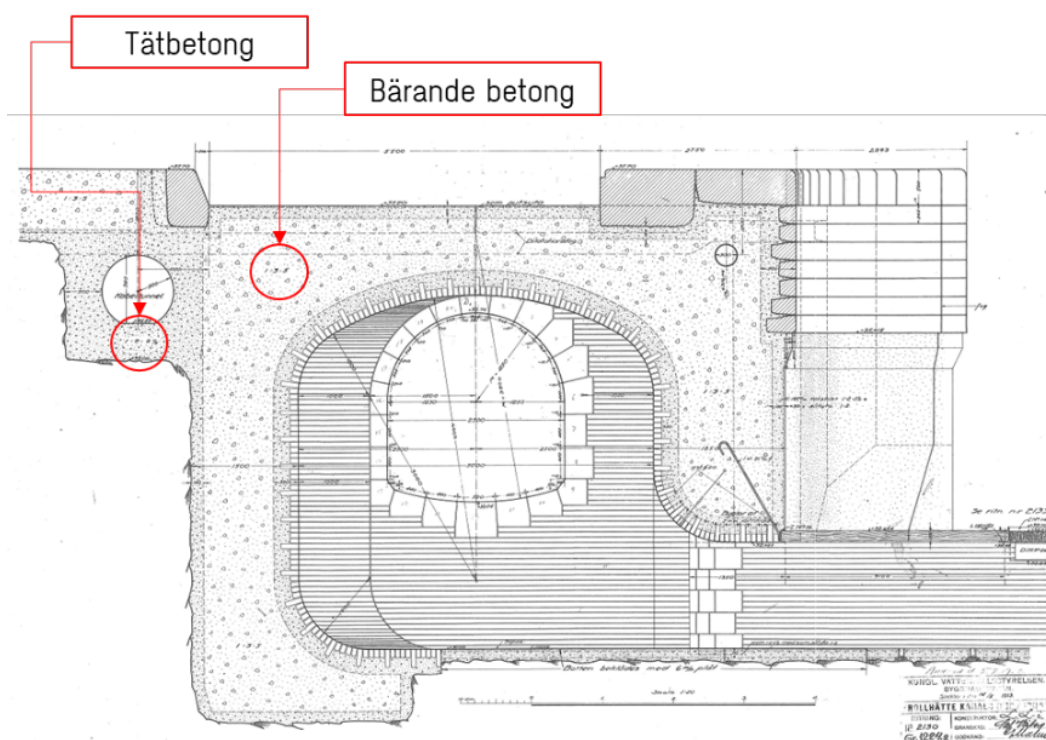
C/S/M Andelar	C [kg/m ³]	V [kg/m ³]	S [kg/m ³]	M [kg/m ³]	Användning
1/5/7	148	89	866	1342	Utfyllnadsbetong med/utan 20 volym % sparsten
1/3/5	207	124	725	1338	Bärande betong
1/2/2,5	321	193	749	1037	Tätbetong
1/3	432	259	1513	0	Murbruk (cementbruk)
1/1,5	613	368	1072	0	Tätbruk (tätt cementbruk)

C = cement, V = vatten, S = sand, M = makadam

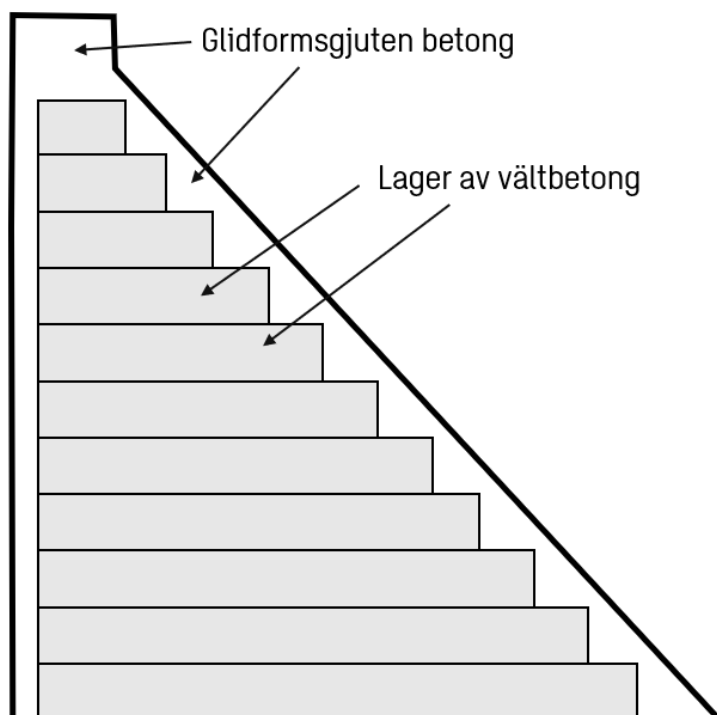
Figur 8, och stenfylld betong, se Figur 9. En vältbetongdamm består av en yttre del av konventionell betong och en inre del av vältbetong, se avsnitt 6.2. Stenfylld betong, se avsnitt 6.1.3 består av en yttre del av armerad betong och en inre del som består av ingjutna stenblock. Stenfylld betong byggs vanligen genom att först bygga formen och montera armeringen och därefter placera stenblocken på insidan av formen. Slutligen fylls formen med självkompakterande betong, se utförande i Figur 6 och Figur 10.

Genom att bygga konstruktioner med olika delar med olika betongsammansättningar kan betydande mängder cement sparas. Figur 11 visar en skiss över en konstruktion som har en yttre del av tät och beständig betong med god förmåga att motstå belastningar och samverka med den inre delen, samt en inre del av betong som kan hänföras till mildare exponeringsklass och täthetskrav jämfört med betongen i de yttre delarna.

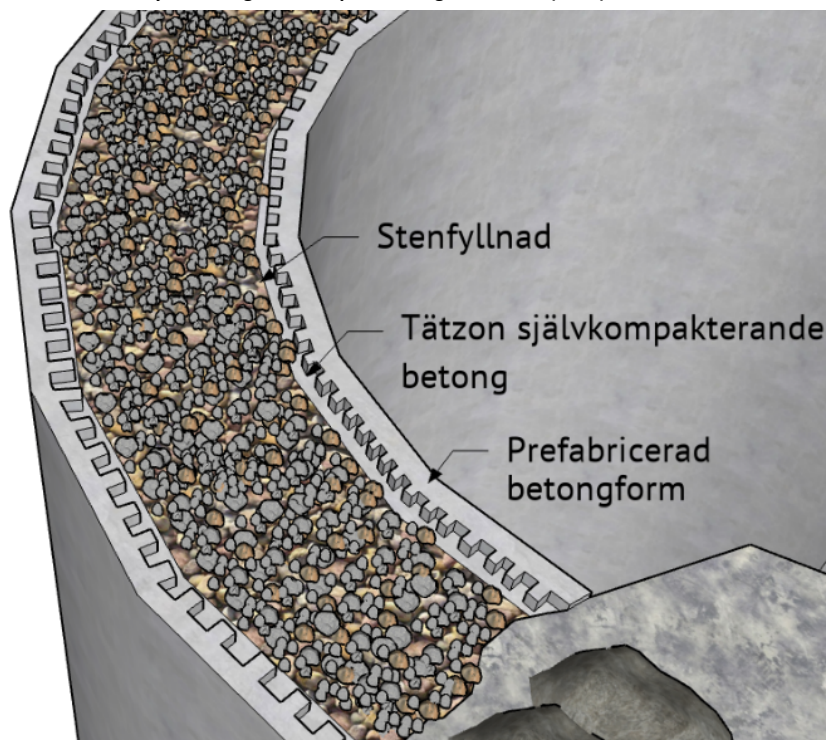
Figur 7. En konstruktionsdel i en mer än 100 år gammal sluss (Sweco, 2016).



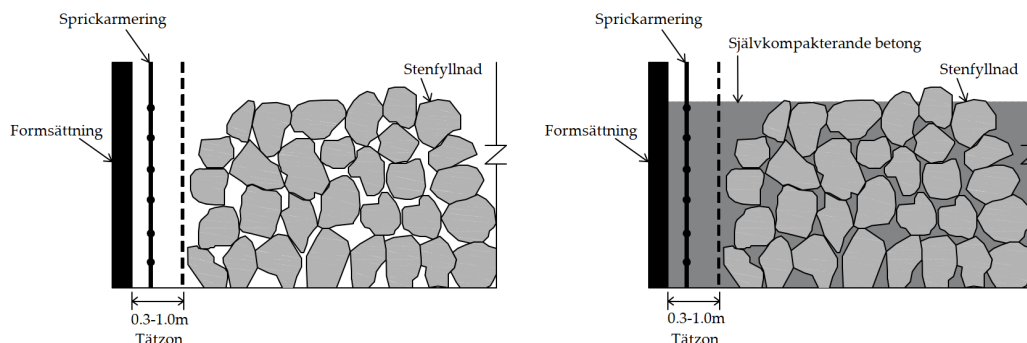
Figur 8. Utförande av damm med vältbetong. "Skalet" kan utgöras av t.ex. glidformsgjuten betong eller prefabricerade betongelement.



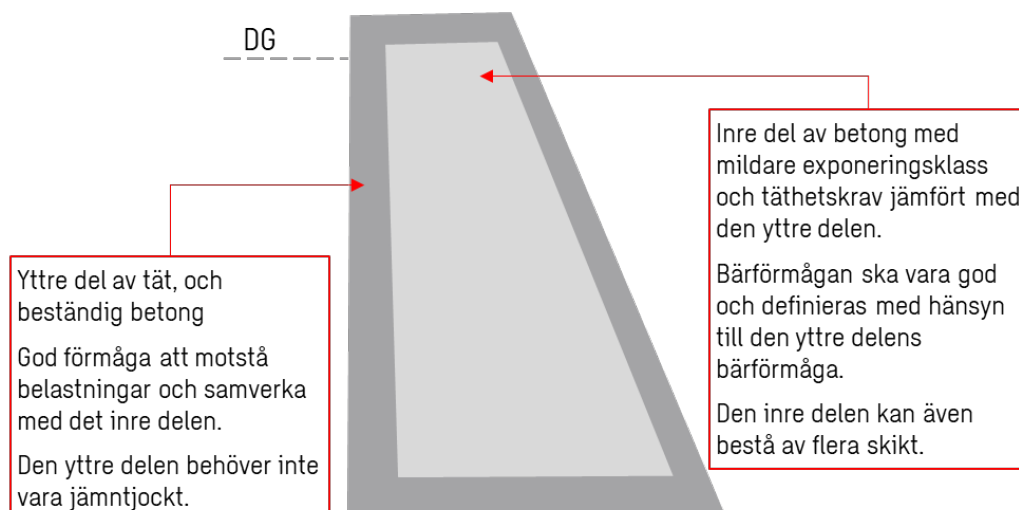
Figur 9. Utförande av damm med stenfylld betong, baserad på underlag från ICOLD (2020).



Figur 10. Utförande av dammkonstruktion med stenfylld betong, baserad på underlag från ICOLD (2020).



Figur 11. Förslag på utformning av en betongkonstruktion som består av en tät och beständig yttre betong med en inre betongdel med mildare krav på beständighet.



7.2 INVERKAN AV EXPONERINGSMILJÖ PÅ VATTENKRAFTENS KONSTRUKTIONER

De exponeringsklasser enligt SS-EN 206 som bör beaktas för vattenkraften betongkonstruktioner är:

- X0 – ingen risk för korrosion eller angrepp,
- XC – korrosion orsakad av karbonatisering
- XD – korrosion orsakad av klorider som inte kommer från havsvatten
- XF – angrepp av frysning/upptining med eller utan avsningsmedel
- (XA – kemiskt angrepp)

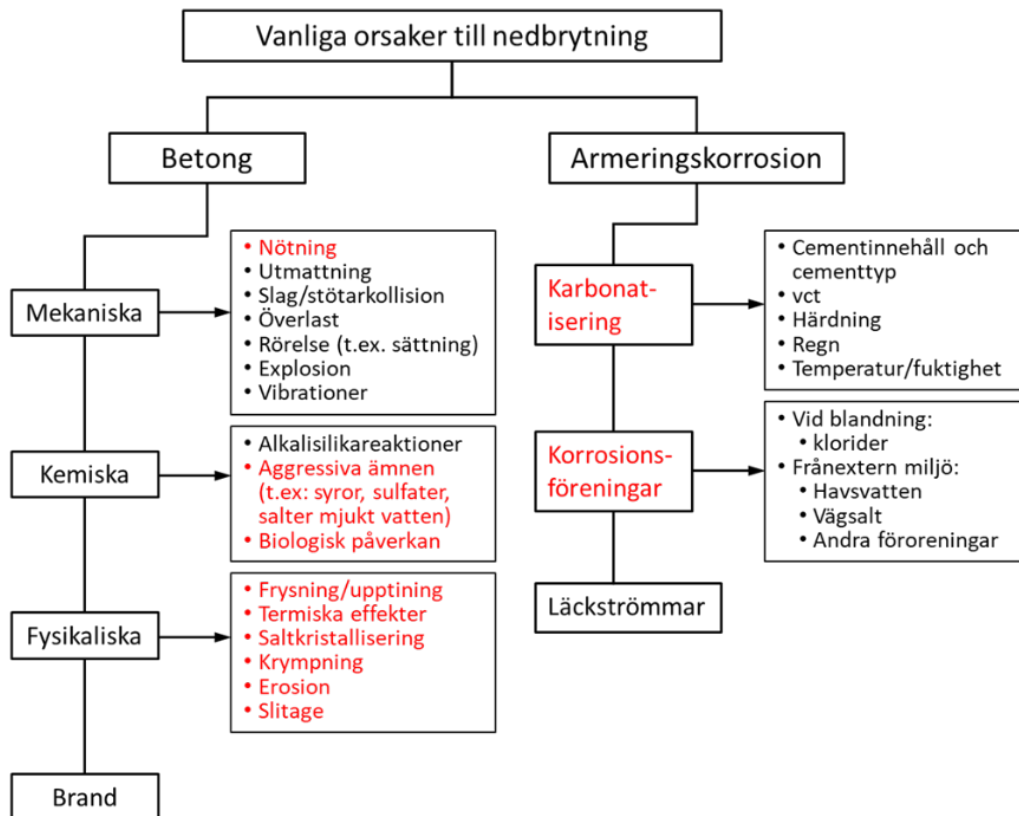
X0 styr inte valet av betongkvaliteten i vattenkraftsmiljön. Det gör inte heller XA, eftersom de kemiska komponenter som anges i SS-EN 206 sällan, om någonsin, förekommer i de svenska vattenkraftsmiljöerna. Både XC och XF är viktiga

exponeringsmiljöer för vattenkraftens betongkonstruktioner. XC består av 4 klasser XC1-XC4, vilka kan förekomma kring vattenkraftens konstruktioner. XF består också av 4 klasser, varav XF1 och XF3 är aktuella för vattenkraftens konstruktioner. Däremot förekommer XF2 och XF4, som är miljöer med avisningsmedel, undantagsvis i vattenkraftsmiljöerna och beaktas inte vid dimensionering av vattenkraftens konstruktioner. XD3 kan förekomma om dammen även utgör eller ansluter till en brobana där vägsalt används.

Det finns andra skademekanismer som kan bryta ner en betongkonstruktion, som inte beaktas av klassificeringen i SS-EN 206. I SS-EN 1504–9 presenteras en sammanställning av "vanliga orsaker till nedbrytning", Figur 12, som inkluderar de flesta skademekanismerna och indelar dem med hänsyn till deras verkningssätt. De skadeorsaker som är skrivna med rött typsnitt angriper från konstruktionens yta. Termiska effekter och krympning kan ha djup inverkan, d.v.s. sprickor som tränger djupt in i konstruktionen, men dessa effekter påverkar sällan valet av betongens kvalitet.

Att beakta nedbrytningsmekanismens verkningssätt och dess djupverkan är viktigt vid val av betongens kvalitet. Betongkonstruktioner som är utsatta för en nedbrytningsmekanism ska dimensioneras på ett sådant sätt att de kan motstå dessa mekanismer under den föreskrivna livslängden. Man ska alltid välja en betongkvalitet som uppfyller livslängdskraven med god säkerhet. Frågan är då om även konstruktionens inre delar, som inte direkt är utsatta för den aktuella nedbrytningsprocessen, ska uppfylla kraven – eller om det räcker att konstruktionens yttre skal (vars tjocklek är dimensionerad för att motstå nedbrytningsmekanismen under den föreskrivna livslängden) uppfyller kraven. Detta är en intressant fråga som berör betongens beständighet och livslängd.

Figur 12. Vanliga orsaker till nedbrytning av betongkonstruktioner enligt SS-EN 1504–9. Rödmarkerad text väsentlig för vattenkraftkonstruktioner.



Om man försöker besvara frågeställningen på ett konventionellt sätt, bör hela konstruktionen, inklusive de inre delarna, beaktas vid val av betongkvalitet, även om de inte direkt utsätts för nedbrytningsmekanismer. Detta beror på flera faktorer:

1. Kombinerad påverkan: Inre delar kan påverkas av fukt, temperaturvariationer och andra faktorer som kan leda till nedbrytning över tid. Om dessa delar inte är tillräckligt motståndskraftiga kan det leda till problem i hela konstruktionen.
2. Strukturell integritet: Även om den yttre delen är dimensionerad för att motstå nedbrytning, kan brister i de inre delarna påverka den övergripande strukturella integriteten och säkerheten.
3. Kostnadseffektivitet: Att använda en högre betongkvalitet i hela konstruktionen kan i många fall vara mer kostnadseffektivt, eftersom det minskar risken för reparationer och underhåll.
4. Livslängd och säkerhet: Om hela konstruktionen uppfyller livslängdskrav och säkerhetsstandarder minskar risken att konstruktionens beständighet och funktion äventyras.
5. Även om det kan verka tillräckligt att endast dimensionera det yttre skalet, är det ofta bäst att också överväga en likvärdig kvalitet på de inre delarna för att

säkerställa en säker konstruktion under hela konstruktionens livslängd.
(Frågeställningen bör konsulteras med ingenjörer och byggstandarder för specifik vägledning baserat på det aktuella projektets förutsättningar.)

Problemet med det konventionella betraktelsesättet är att cement enbart kan sparas genom betongtekniska metoder, vilket begränsar möjligheten till ytterligare klimatreduktion. Nedan kommenteras de konventionella motiveringarna:

1. Förklaringen i punkt 1 ovan stämmer. När det gäller fukt visas längre fram i denna rapport (avsnitt 7.4) att fuktförhållandena i de inre delarna av grova betongkonstruktioner är relativt stabila och att uttorkningen som sker för att konstruktionen ska nå ett jämviktsläge med sin omgivning sker relativt långsamt och utan betydande gradienter.

En betongkonstruktion reagerar snabbare på temperaturvariationer än på yttre fuktighetsvariationer. Relativt stora temperaturgradienter kan uppstå. Om de inre och yttre delarna har samma värmeledningsförmåga, vilket oftast är fallet för normal och fuktig betong, beter sig en sammansatt betongkonstruktion som en homogen betongkonstruktion och får temperaturgradienter som liknar de homogena betongkonstruktionernas.

Om de inre och yttre delarna har samma längdutvidgningskoefficienter och elasticitetsmoduler, vilket inte är svårt att åstadkomma, uppstår liknande spänningsfält i båda konstruktionsdelarna.

När det gäller spricktillväxt påverkar en rad olika faktorer som inte går att generalisera. Det krävs beräkningar för att kunna optimera konstruktionens sammansättning. En stark och seg (till exempel armerad betong) yttre del med en inre del som består av betong med låg längdutvidgningskoefficient och elasticitetsmodul har bättre förutsättningar att begränsa spricktillväxten jämfört med en homogen konstruktion som består av betong med hög elasticitetsmodul och längdutvidgningskoefficient.

2. De mekanismer som kan bryta ner de inre delarna är frostangrepp, urlakning, alkalisilikareaktioner (ASR) och sulfatangrepp. Den inre delen kan göras frostbeständig även om betong med högre *vct* används. Som nämndes ovan är fuktförhållandena stabila och betongen torkar långsamt.

Urlakning är en mekanism som verkar från ytan. Om den yttre delen är tät sker ingen urlakning av de inre delarna. Om det finns sprickor som går tvärs över konstruktionen, genom vilka vatten rinner, kan de inre delarna bli utsatta för urlakning. Om den inre delen är frostbeständig blir processen dock långsam. Sprickor kan tätas och den här typen av skada förekommer även i homogena konstruktioner.

ASR kan medföra att betongen expanderar. Den här typ av nedbrytning förekommer i de betongkonstruktioner som innehåller alkalireaktiv ballast. Ballasten ska väljas med omsorg oavsett typ av konstruktion.

Sulfatangrepp från den yttre miljön påverkar inte de inre delarna. Vidare är det sällsynt inom vattenkraften. Sulfatangrepp på grund av betongens sammansättning och försenad ettringitbildning är en nedbrytningsmekanism

som kan förekomma i alla typer av betongkonstruktioner om förutsättningar för detta finns.

Således ska en sammansatt konstruktion dimensioneras för en föreskriven grad av mekanisk och fysikalisk samverkan mellan de inre och yttre delarna för att dels bära de yttre mekaniska belastningarna, dels motstå den nedbrytning som kan ske i konstruktionens respektive exponeringsmiljö.

3. Erfarenheter från vattenkraftkonstruktioner visar att skador ofta är ytliga och endast når fram till armeringen eller några centimetrar innanför den yttersta armeringen. Orsaken till skadorna är ofta bristande frostbeständighet, erosion och urlakning. Genom att använda betong som är frostbeständig och har högt erosionsmotstånd kan skadeutveckling vanligen stoppas på ytan.

En annan typ av skador som ofta förekommer är djupare eller genomgående sprickbildning orsakad av temperaturgradienter, se punkt 1 ovan.

4. Författarna anser inte att det är någon större skillnad mellan sammansatta betongkonstruktioner och homogena. I början av förra seklet byggdes många sammansatta vattenkraftkonstruktioner i Sverige med dåtidens teknik och resultaten har varit förvånansvärt goda. Trots den ringa kunskap som fanns om exempelvis frostbeständighet och att konstruktionerna utformats utan tillsatt luft står många av dem kvar efter >100 år. Visserligen med stora underhållsbehov, men med dagens utvecklade teknik och kunskap borde, om rätt krav ställs på rätt delar, den förväntade livslängden kunna förlängas på betongdammar med liknande utformning.
5. Rekommendationen i punkt 5 ovan anses korrekt, se vidare sista stycket i punkt 2 ovan.

7.3 GROVA BETONGKONSTRUKTIONER I VATTENKRAFTSMILJÖ

Det är svårt att fastställa mått för en grov konstruktion. I denna rapport betraktas konstruktionens storlek från perspektivet cementförbrukning och möjligheten att på olika sätt kunna reducera cementförbrukningen. Cementförbrukning kan reduceras på olika sätt, till exempel genom att maximera stenmax i betong eller att använda sparsten, stenfyllt betong, vältbetong, injekteringsbetong eller genom att bygga en konstruktion som består av flera delar med betong med olika egenskaper. När det gäller stenmax i vanlig betong anges följande i "Betong och armering" (2012):

"Huvudregeln är att stenstorleken i betong inte bör vara större än en fjärdedel (1/4) av konstruktionens minsta tvärmått. Vidare får armering inte utgöra ett galler som hindrar stenar passage varför stenstorleken begränsas av fria avståndet mellan stängerna minskat med 5 mm.

Ska betongmassan vid gjutning passera ett flertal lager armering rekommenderas en maximal stenstorlek motsvarande ca två tredjedelar (2/3) av det fria avståndet mellan stängerna. Ballast till golvbruk ges normalt en största kornstorlek, som inte bör vara större än en tredjedel (1/3) av golvtyjockleken."

De övriga metoderna har också specifika regler för valet av partikelstorlek och metodens tillämpbarhet. Denna rapport fokuserar inte på dessa specifika regler, utan

betraktar de grova konstruktionerna på ett mer subjektivt sätt. Figur 13 visar exempel på grova betongkonstruktioner i vattenkraftsmiljö.

Figur 13. Exempel på grova betongkonstruktioner i vattenkraftsmiljö.



Tabell 17 visar exempel på volymen hos dammkonstruktioners olika delar. Tabellen visar även volymen hos ett typiskt fundament för ett vindkraftverk (grundlagt på jord och på berg). Volymen hos en medelstor lamelldammsmonolit bestående av en pelare och frontplatta är 680 m³, vilket är ungefär lika stor som ett vindkraftsfundament grundlagt på jord. Stora mängder cement kan sparas om konstruktionen byggs med betong med högre *vct*, om konstruktionen byggs skiktat bestående av betong med olika *vct*, eller om konstruktionen byggs som stenfylld betong.

Figur 2 visar cementmängd i betong som funktion av *vct* och *FM*. Cementmängden för en betong med *vct* = 0,5 och *FM* = 5,0 är 375 kg/m³. Om *FM* ökas till 5,5, d.v.s. att ballastens största partikelstorlek ökas, reduceras cementmängden till 340 kg/m³. Om *vct* dessutom ökas till 0,55 minskar cementmängden till 300 kg/m³. Reduktionerna i cementmängden kan leda till totalt 23,8 ton respektive 51 ton cement för lamelldammsmonoliten. Större besparing kan göras om delar av konstruktionen byggs med stenfylld betong.

Tabell 17. Exempel på olika konstruktionsdelars volym.

	Lamelldamm 1			Lamelldamm 2	
Vattenpelare (m), vid DG	32	18	24	-	-
	Monolit 1	Monolit 2	Monolit 3	Monolit 1	Monolit 2
Frontplatta					
Vert. projicerad höjd (m)	35	20	19	15	15
Tjocklek i botten, m	2,7	2,8	2,3	3	2,7
Tjocklek i toppen, m	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Bredd	8	8	8	8	8
Volym (m³)	546	320	266	252	234
Pelare					
Höjd	36	20	24	17,3	17,2
Längd i s.-riktningen, m	3	3	3	3	3
Längd i s.-riktningen, m	28,5	15	26	12,7	12,4
Bredd	2	2	1,5	2,4	2,4
Volym (m³)	1134	360	522	326	318
Skibordsplatta / bottenplatta					
Volym (m³)			512		
Vindkraftsverks fundament, platta på mark (m³)			650		
Vindkraftsverks fundament, bergförankrat (m³)			250		

7.4 FUKT- OCH TEMPERATURVARIATIONER I GROVA BETONGKONSTRUKTIONER

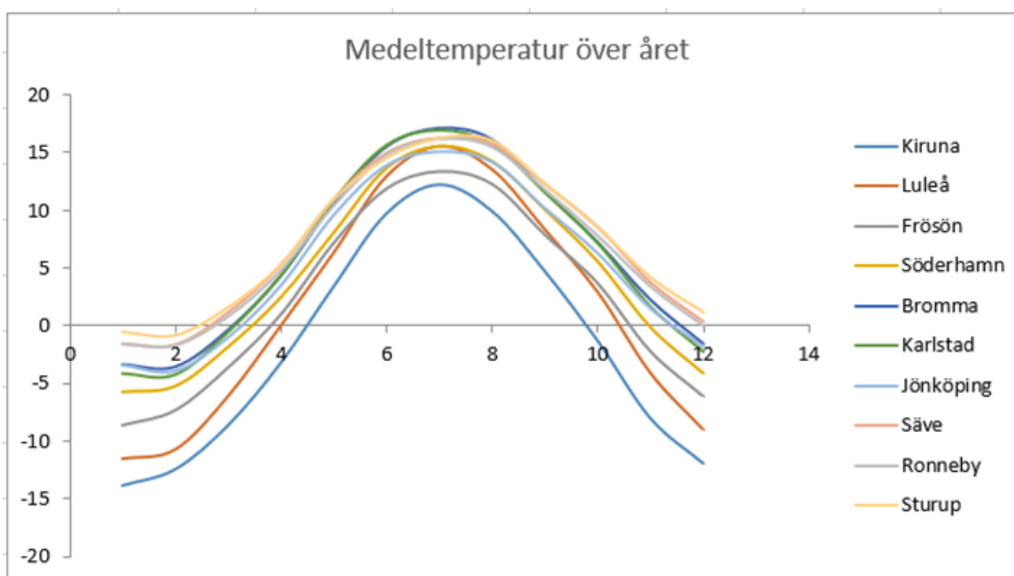
7.4.1 Allmänt

De nedbrytningsmekanismer som främst påverkar vattenkraftkonstruktioner är frostangrepp, urlakning och karbonatisering av betong, vilket kan leda till armeringskorrosion. Dessa nedbrytningsmekanismer verkar från konstruktionens yta och deras inverkan styrs av betongens fuktillstånd. Därför är det viktigt att studera betongkonstruktionens fuktprofil under dess livslängd. Konstruktionens temperaturprofil är också viktig, men temperaturprofilen ändras mycket snabbare än fuktprofilen, vilket visas nedan.

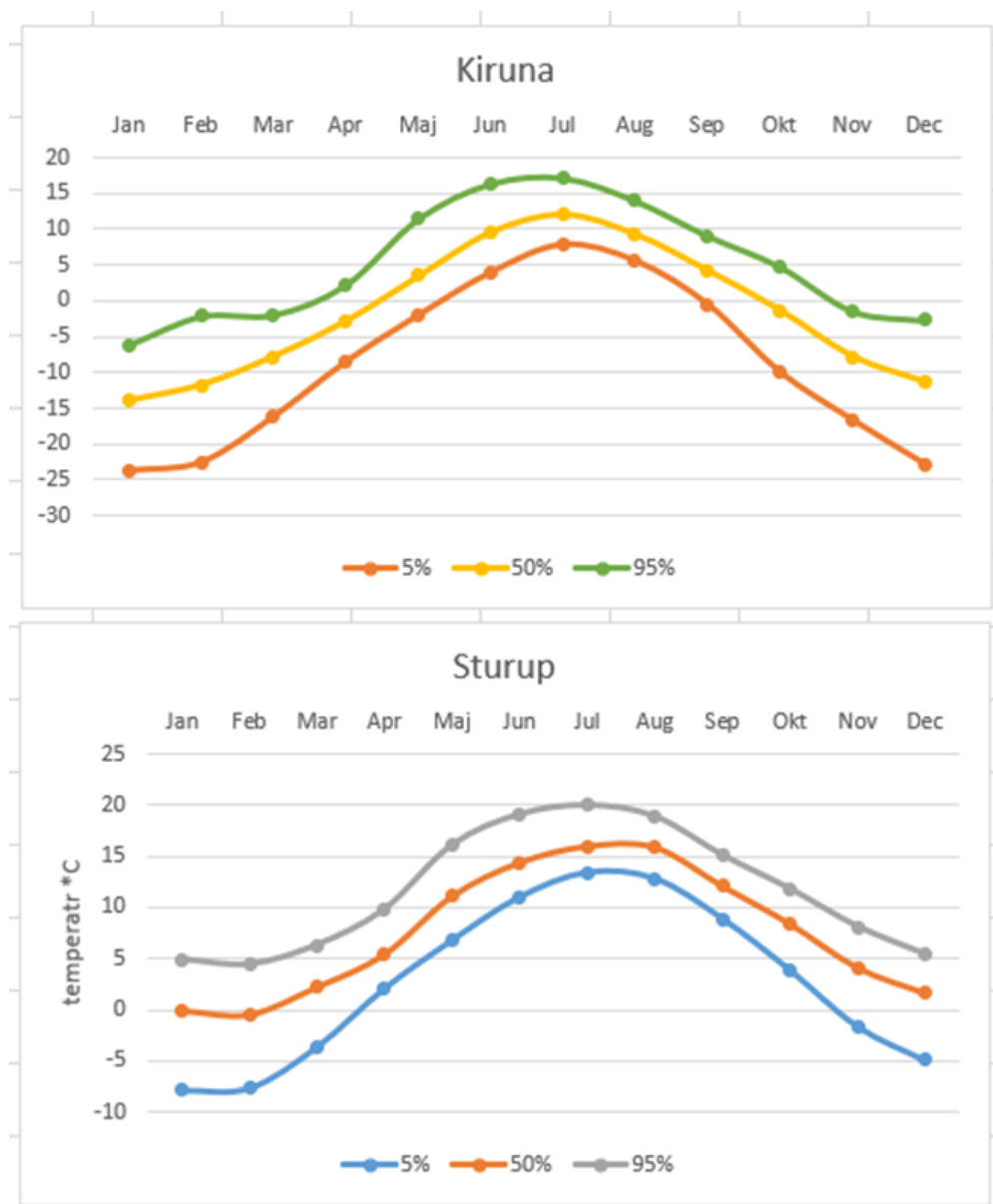
7.4.2 Variationen av utomhusluftens temperatur och relativa fuktighet över året

En grov betongkonstruktion som omges av utomhusluften når efter en längre tid ett fuktjämviktsläge som styrs av luftens årliga fukt- och temperaturvariationer samt den nederbörd som konstruktionens ytor utsätts för. Figur 14 – 15 visar variationen av utomhusluftens medeltemperatur över året på olika platser i Sverige. En betongkonstruktion som till exempel är placerad i Kiruna kommer att utsättas för en medeltemperaturvariation som visas av den nedre kurvan i Figur 14.

Figur 14. Variationen av utomhusluftens medeltemperatur över året på olika platser i Sverige. Data från SMHI.



Figur 15. Variationen av utomhusluftens medeltemperatur samt temperaturvariationens nedre och övre 5 % fraktilerna, över året i Kiruna och Sturup. Data från SMHI.

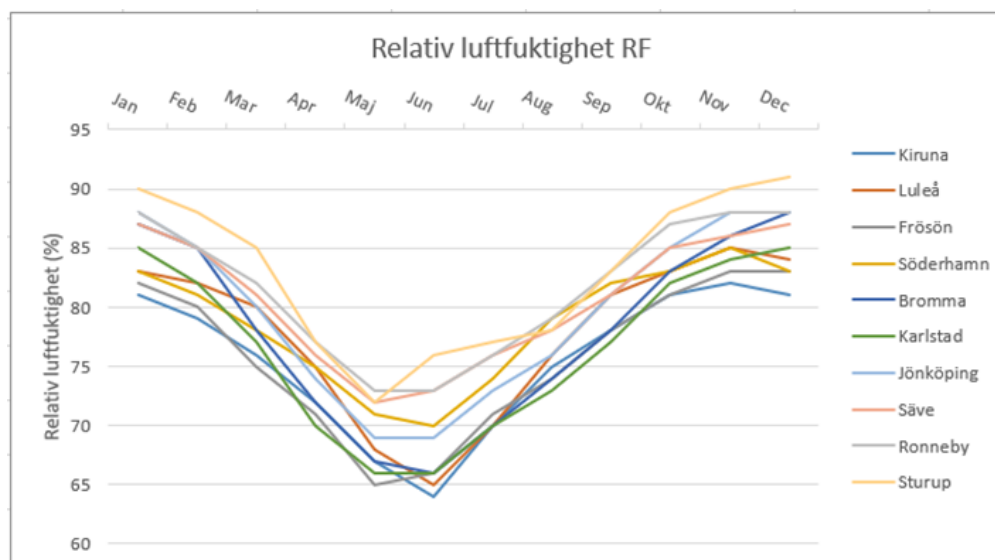


Figur 14 visar utomhusluftens medeltemperatur. För ett givet tidsintervall kan utomhusluftens temperatur bli kallare eller varmare än den medeltemperatur som visas i figuren. Figur 15 visar variationen av utomhusluftens medeltemperatur samt temperaturvariationens nedre och övre 5 % fraktiler över året i Kiruna och Sturup. Som framgår av Figur 14 - 15 kan temperaturen bli betydligt kallare eller varmare än medeltemperaturen.

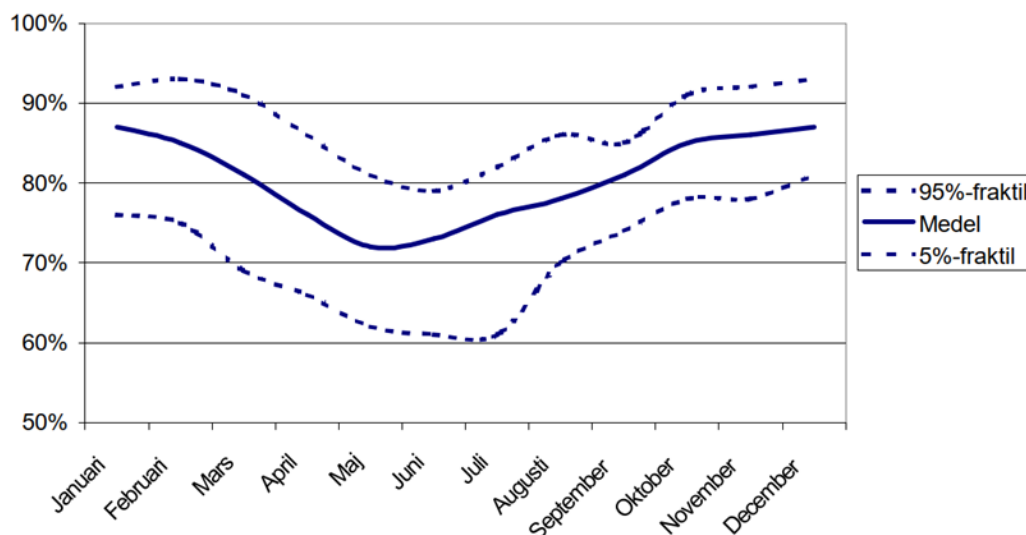
Figur 16 visar variationer av utomhusluftens genomsnittliga relativa luftfuktighet (RF) under året på olika platser i Sverige. Som framgår av figuren är utomhusluftens RF högst under vintern och lägst under sommaren. För ett givet tidsintervall kan utomhusluftens RF bli större eller mindre än medelvärde. Figur 17 visar

månadsmedelvärde samt 5 %- och 95 %-fraktilerna för uppmätta relativa luftfuktigheter i Göteborg (Säve).

Figur 16. Variationer av utomhusluftens genomsnittliga relativa luftfuktighet (RF) under året på olika platser i Sverige. Data från SMHI.



Figur 17. Månadsmedelvärde samt 5 %- och 95 %-fraktilerna för uppmätta relativa luftfuktigheter i Göteborg (Säve), (Lindvall & Andersen, 2000).



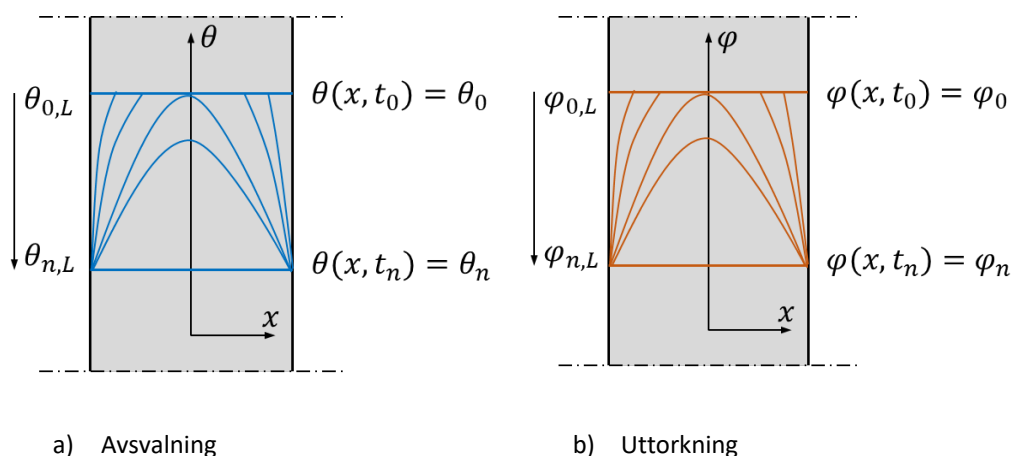
7.4.3 Grova konstruktioners fukt- och temperatur-profil

Temperatur- och fuktfördelning i betongkonstruktioner styrs av deras dimensioner samt omgivningens temperatur- och fuktighetsvariationer. Figur 18 visar en schematisk bild av temperatur- och fuktfördelningarna i en betongkonstruktion under avsvälning och uttorkning när omgivningsluftens temperatur och relativa fuktighet minskar från $\theta_{0,L}$ och $\varphi_{0,L}$ till $\theta_{n,L}$ och $\varphi_{n,L}$. Konstruktionen antas att ha endimensionellt

värme- och fuktutbyte med sin omgivning, vilket innebär att utbytet sker enbart i x-riktningen.

Figur 18a visar en betongkonstruktions avsvälning från tiden t_0 och temperaturen θ_0 till tiden t_n och temperaturen θ_n . Figur 18b visar betongkonstruktionens uttorkning från tiden t_0 och relativa fuktigheten φ_0 till tiden t_n och relativa fuktigheten φ_n . φ representerar den relativa fuktigheten i luften i betongens porer. Indexen "0" respektive "n" i Figur 18 refererar till initiering respektive avslutning av processerna. Betongens avsvälning och uttorkning börjar från ett jämviktsläge vid tiden t_0 och avslutar vid tiden t_n . Temperaturen och fuktigheten är jämnt fördelade över konstruktionens tjocklek vid både initiering och avslutning av processerna.

Figur 18. Schematisk bild av temperatur- och fuktighetsfördelningarna i en betongkonstruktion under avsvälning och uttorkning.



När omgivningens temperatur sänks bildas en temperaturgradient i konstruktionen. Till en början påverkas områden nära kanterna, men gradvis fortplantar sig gradienten inåt med tiden. När gradienten når mitten av konstruktionen sjunker temperaturen även där. Gradienten och temperaturen minskar med tiden. Avsvälningsprocessen avslutas när gradienten har försvunnit och temperaturen återigen är jämnt fördelad över konstruktionens tjocklek.

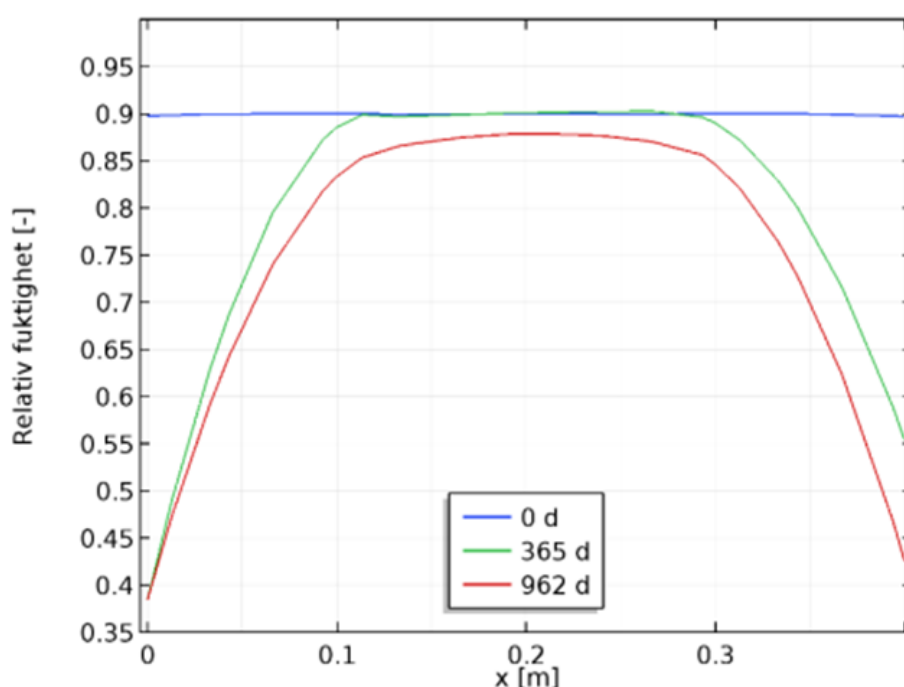
Processen styrs av konstruktionens tjocklek, temperatursänkningen, materialets värmeledningsförmåga och värmekapacitet samt värmeövergångsmotståndet mellan konstruktionen och luften. Bortsett från de fysikaliska egenskaperna har konstruktionens tjocklek stor inverkan på gradientens storlek och den tid det tar för konstruktionen att gå från ett jämviktsläge till ett annat. Gradientens storlek och avsvälningstiden ökar med konstruktionens tjocklek. En avsvälningsprocess som tar några timmar i en tunn konstruktion kan ta flera dygn för en tjock konstruktion. De gradienter som uppstår är större i en tjock konstruktion jämfört med en tunn konstruktion.

Uttorkningsprocessen är betydligt långsammare än avsvälningsprocessen. Det kan ta flera månader för en nygjuten 100 mm tjock betongplatta att komma i jämvikt med en omgivning med en relativ luftfuktighet på 65 %. Samma process kan ta flera decennier för en 1000 mm tjock platta.

Figur 19 visar schematiska fuktighetsfördelningar i en nygjuten 100 mm tjock betongplatta som torkas i en omgivning med en relativ luftfuktighet på 65 %.

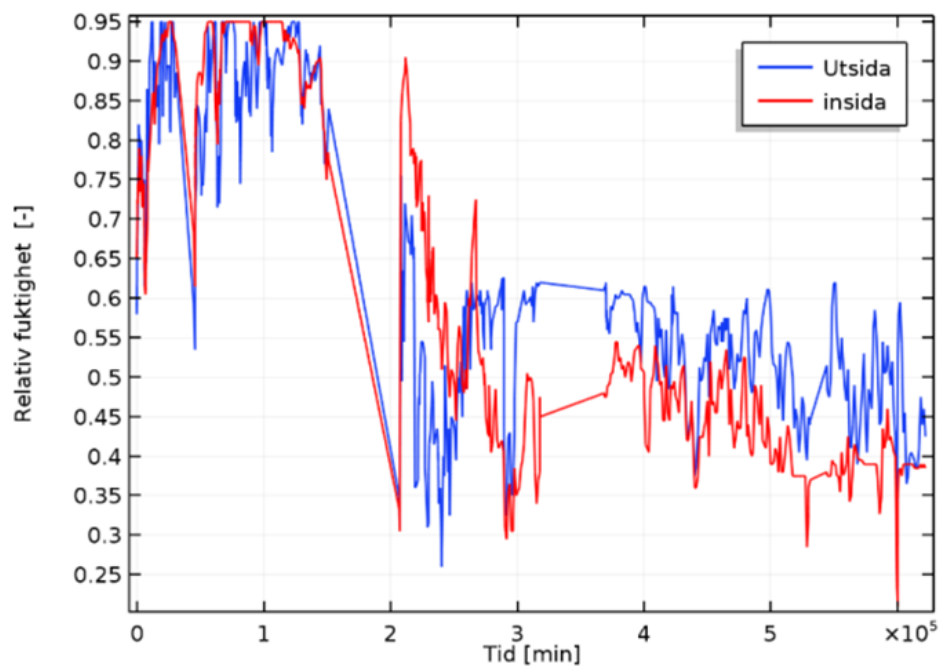
Figur 20 visar mättningsresultat av omgivningens RF. Mättningsresultaten, inklusive variationerna, har beaktats vid beräkning av uttorkningsprocessen. Uttorkningsberäkningen utgick från ett initialt fuktillstånd på 90 % RF. Figur 19 – 20 visar att uttorkning är en relativ långsam process. De inre delarnas fuktillstånd ändras långsamt. Fukttransportens tröghet medför att fuktillståndet i konstruktionens inre delar inte påverkas av kortvariga variationer i den omgivande luftens fuktighet, utan det är den omgivande luftens medelfuktighet under långa tidsintervall som påverkar uttorkningen och fuktighetsgradienten i konstruktionen.

Figur 19. Beräknad fuktfördelning, uttryckt som jämvikt RF, i en 400 mm tjock betongvägg som torkar dubbelsidigt i en torr miljö (Åhs et al. 2019).



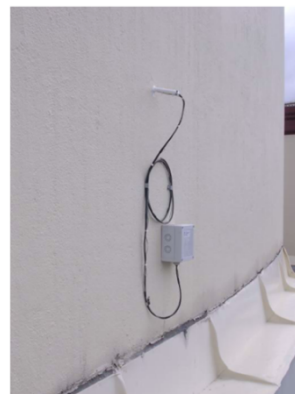
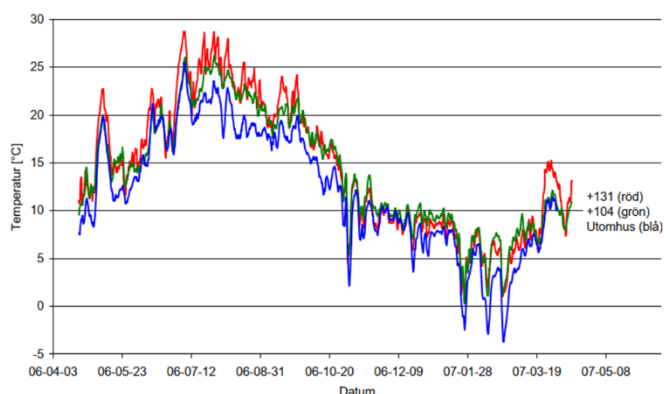
Vattenkraftens betongkonstruktioner har tjocklekar som ofta överstiger 800 mm. En 800 mm tjock vägg i samma miljö som den 400 mm tjocka väggen torkar betydligt långsammare, antagligen med en fjärdedel av hastigheten hos den 400 mm tjocka väggen. Uttorkningen blir ännu långsammare om konstruktionen placeras i en fuktig miljö, såsom vattenkraftens utomhusmiljöer.

Figur 20. Mätningresultat av omgivningens RF – 10^5 min = 0,19 år (Åhs et al. 2019).
Figur 21 -



Figur 23 visar temperatur- och fuktmätningar i en hög betongkonstruktion någonstans på västkusten - konstruktionen är inte skyddad mot slagregn. Mätningarna har utförts på nivåerna +104 och +131, där markplan är på nivå +100. Givarna för mätning av betongens temperatur och fukt var monterade i borrarade hål 30 mm in i betongen. Givarna i borrhålen skyddades mot den omgivande uteluftens direkta inverkan. Luftens temperatur och relativa fuktighet (RF) mättes också.

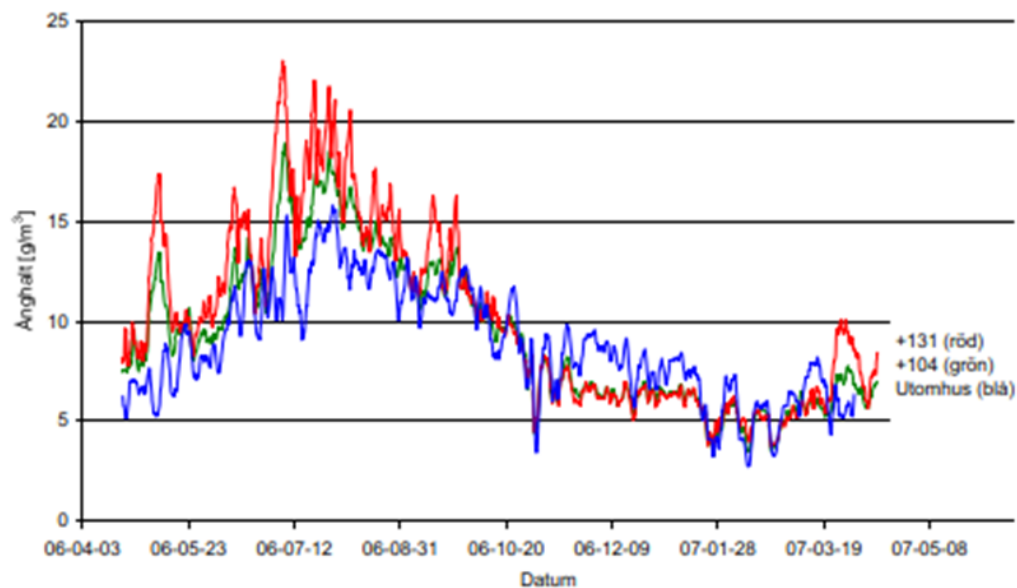
Figur 21. Variationen av temperaturen 30 mm in i betongen samt i omgivningen. Markplan är +100 (Nilsson & Johansson, 2009).



Figur 21 visar temperaturvariationerna i konstruktionen och den omgivande luften. Som framgår av figuren, följer temperaturen i konstruktionens yttre 30 mm skikt omgivningens temperaturvariationer, men konstruktionens temperatur är särskilt under sommaren högre än den omgivande luftens temperatur.

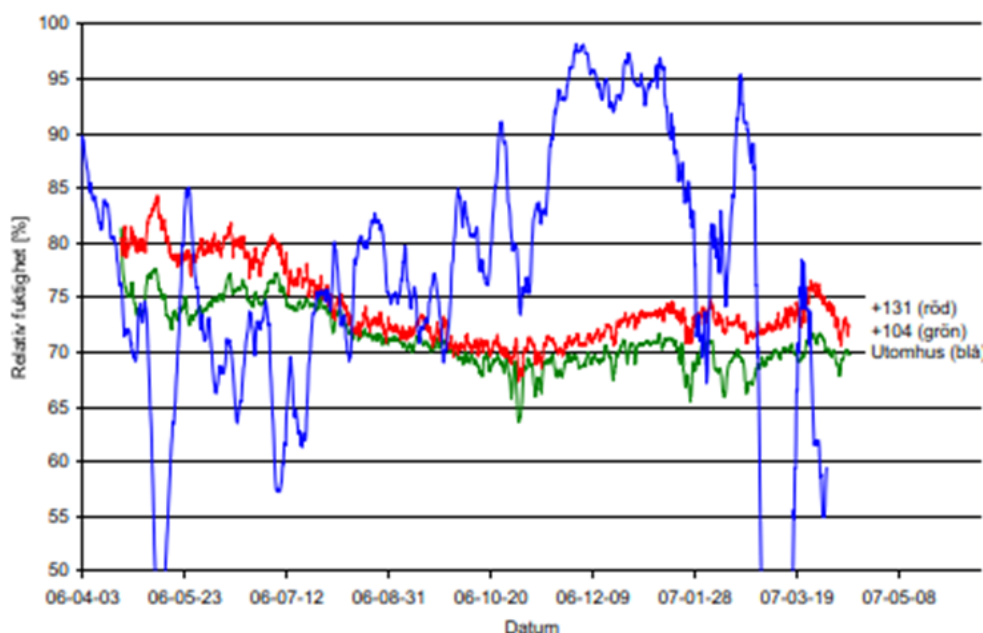
Figur 22 visar variationen av ånghalten i den omgivande luften och i betongens porer vid 30 mm djup. Under vinterhalvåret är skillnaden mellan ånghalten i de olika miljöerna liten. Under sommarhalvåret är betongens ånghalt högre, antagligen på grund av att den är varmare än uteluften och kan innehålla mer fukt. Fukthalten på nivå +104 är lägre än på nivå +131. Skillnaden beror antagligen på att konstruktionens lägre delar är bättre skyddade mot slagregn.

Figur 22. Variationen av ånghalten i utemiljön och inne i betongens porer vid 30 mm djup (Nilsson & Johansson, 2009).



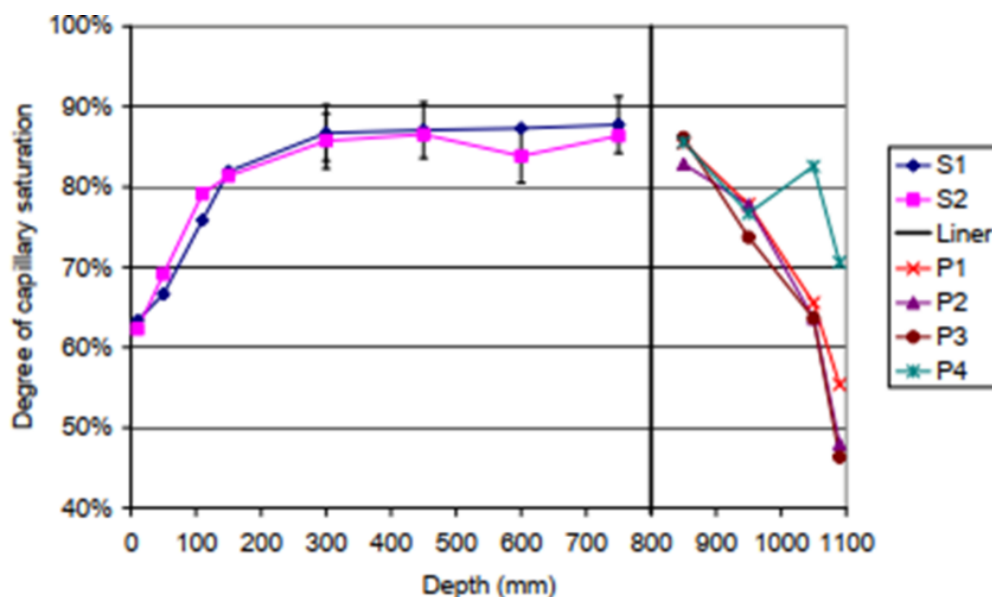
Figur 23 visar variationen av RF i den omgivande luften och inne i betongens porer vid 30 mm djup. De relativt stora svängningarna i uteluftens RF jämnas ut av det 30 mm tjocka betongskiktet. Betongskiktets RF varierar mellan 70 och 80 % RF. Om det täckande betongskiktet är 50 mm jämnas svängningarna ut ännu mer vid armeringsnivå.

Figur 23. Variationen av RF i utemiljön och inne i betongens porer vid 30 mm djup (Nilsson & Johansson, 2009).



Figur 24 visar en fuktprofil i en betongkonstruktion som har delats av en stålplåt i två skikt. Det yttre skiktet, till vänster i figuren, torkas mot utomhusluften, medan det inre skiktet, till höger i figuren, torkas mot inomhusluften. Konstruktionen är placerad någonstans längs västkusten och är inte skyddad mot regn. Konstruktionens insida kan bli varm och torr. Uttorkningen har pågått i över 30 år.

Den vertikala axeln visar betongens kapillära vattenmättnadsgrad. Kapillär vattenmättnadsgrad är kvoten mellan betongens aktuella vattenhalt (kg/m^3) och den vattenmängd (kg/m^3) som betongen maximalt kan kapillärt suga in. Kvoten anges även i procent. Den kapillära vattenmättnadsgraden bestäms genom provning. Provningsen utförs i princip på följande sätt: 1) provkroppens vikt (M_1) bestäms 2) provkroppen placeras i vatten och dess vikt (M_2) mäts vid olika tillfällen tills viktökning avstannar eller uppnår ett försumbart värde 3) provkroppen torkas vid 105°C och vägs (M_3) 4) kapillärmättnadsgraden beräknas som $(M_1 - M_3)/(M_2 - M_3)$.



Figur 24. Mätning av fuktprofil i betongvägg som delats av en stålplåt i två skikt, varav det yttre skiktet (till vänster i figuren) torkas mot utomhusluften medan det inre skiktet (till höger i figuren) torkas mot inomhusluften (Oxfall, 2016).

Det bör noteras att vattenmättnadsgrad utan att hänvisa till de kapillära porerna avser materialets öppna porositet. Öppna porer, inklusive de kapillära porerna, är de porer genom vilka vatten kan transporteras in och ut från materialet. Materialets öppna porositet är större än dess kapillära porositet. Vattenmättnadsgraden med hänsyn till den öppna porositeten bestäms på följande sätt: 1) provkroppens vikt (M_1) bestäms 2) provkroppen torkas vid 105 °C och dess vikt bestäms (M_3) 3) provkroppen placeras i en exsickator och utsätts för vakuum för att all luft ska lämna materialets porer 4) exsickatorn fylls med vatten 5) efter några dagar bestäms provkroppens vikt (M_4) 6) mättnadsgraden beräknas som $(M_1 - M_3) / (M_4 - M_3)$.

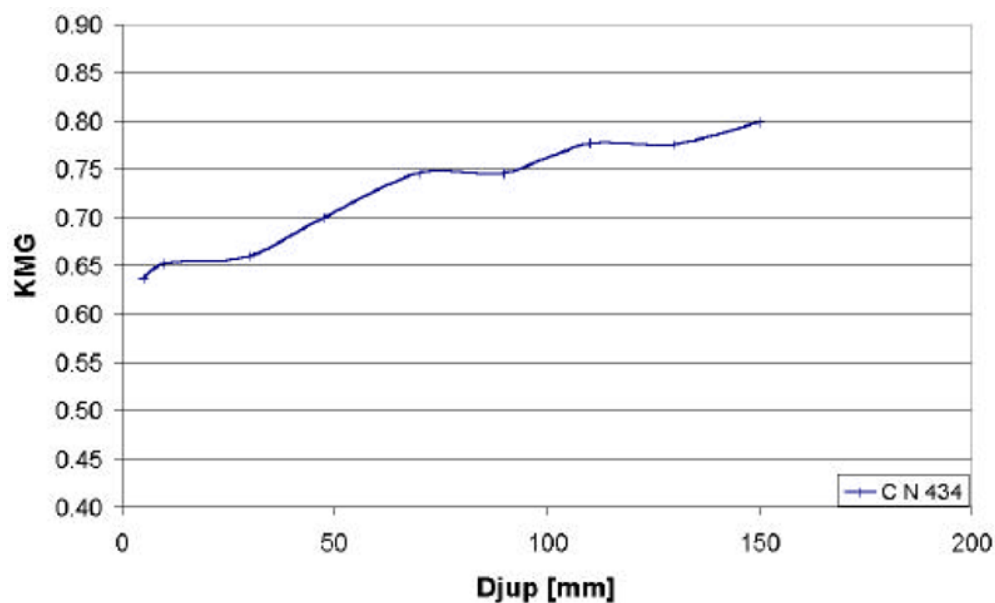
Den kapillära vattenmättnadsgraden och mättnadsgraden av den öppna porositeten och fukthalten (kg/m^3) är de enda användbara parametrar för att uttrycka betongens fuktighet vid höga fuktnivåer. När betongens jämvikts-RF överstiger ca 98 % kan betongens fuktighet inte bestämmas genom att mäta dess jämvikts-RF. Dessutom är RF temperaturberoende medan de övriga parametrarna inte är det. Det bör dock noteras att mäta RF är en betydligt enklare, snabbare och billigare metod än de övriga metoderna men RF-mätning kan inte tillämpas när betongens jämvikts-RF överstiger ca 98 %.

Den vänstra fuktprofilen i Figur 24 motsvarar fuktprofilen hos en 1,6 m tjock betongkonstruktion som får torka dubbelsidigt i en utomhusmiljö under 30 år. En vertikal betongkonstruktion i en vattenkraftsmiljö som är omgiven av utomhusluft kan ha en liknande fuktprofil. Som framgår av figuren är det enbart det yttre 200 mm skiktet som uppvisar märkbar uttorkning. Den inre delen av det väggskikt som torkar mot insidan visar inte heller någon märkbar uttorkning, trots att skiktet är tunnare än det yttre skiktet.

Figur 25 visar kapillärmättnadsgraden för betong i en bropelare som är placerad under bron och vänd bort från trafiken. Bron är belägen i Göteborgsområdet. Figur 17 visar

månadsmedelvärde samt 5 %- och 95 %-fraktilerna för uppmätta relativa luftfuktigheter i Göteborgsområdet (Säve). Det är svårt att räkna om kapillärmättnadsgrad till jämviktsrelativ fuktighet om betongens sorptionskurva inte är tillgänglig. Men Figur 25 visar att betongen torkar ut trots att den är placerad i en fuktig miljö.

Figur 25. Kapillärmättnadsgrad (KMG) för betong i en bropelare som är placerad under bron och vänd bort från trafiken (Lindvall & Andersen, 2000).



Resultaten i Figur 24 (vänster kurva) gäller för uttorkning av en betongkonstruktion som inte är skyddad mot nederbörd/slagregn, medan resultaten i Figur 25 gäller för uttorkning av en betongkonstruktion som är skyddad mot nederbörd. Resultaten i båda figurerna visar att betongen torkar ut och ställer in sig i jämvikt med medelfuktigheten i sin exponeringsmiljö.

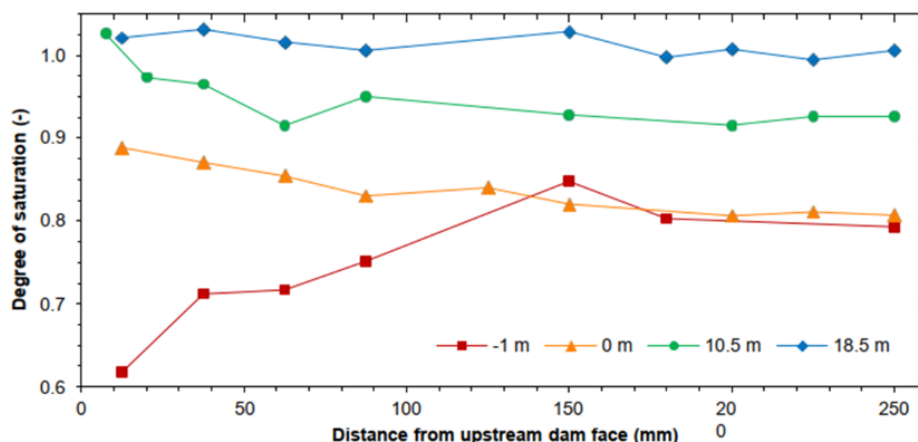
Figur 26 visar betongens vattenmättnadsgrad vid olika nivåer i en frontplatta i en damm. Mätningarna genomfördes på borrhärlor som togs från frontplattans uppströmssida. Frontplattans betong var lufttillsatt.

I

Figur 26 motsvarar Nivå 0 den normala vattennivån. Nivå -1 motsvarar en nivå som är en meter över den normala vattennivån. Nivåerna 10,5 m respektive 18,5 m är nivåer under den normala vattennivån som är utsatta för vattentryck. Betongens kapillära vattenmättnadsgrad uppskattas till 0,8 (80 %, Rosenqvist, 2016).

Betongens vattenmättnadsgrad på frontplattans nedströmssida bestämdes också. Vattenmättnadsgraden var 0,7 vid Nivå 0 m och Nivå 10,5 m. Vattenmättnadsgraden är lägre än den kapillära vattenmättnadsgraden, vilket tyder på att frontplattan torkar ut mot nedströmssidan. Vattenmättnadsgraden vid Nivå 18,5 m var 0,9, vilket tyder på att uttorkningen på frontplattans nedströmssida är långsammare än den vattenmängd som transporteras från uppströmssidan. Det bör dock noteras att det kan finnas andra faktorer som inte är kända för författarna till denna rapport.

Figur 26. Vattenmättnadsgrad vid några nivåer i en frontplatta i en damm (Rosenqvist, 2016).



Den betong som är placerad över den normala vattennivån torkar ut mot både uppströmssidan och nedströmssidan. Betongens vattenmättnadsgrad är lägre än den kapillära vattenmättnadsgraden, vilket tyder på att uttorkningen är snabbare än den fukttilförsel som kan ske via kapillär sugning eller nederbörd.

Den betong som är placerad vid den normala vattennivån torkar inte mot uppströmssidan men torkar tydligt mot nedströmssidan, eftersom vattenmättnadsgraden avtar mot nedströmssidan och att denna nivå vattenmättnadsgrad på nedströmssidan är lägre än den kapillära vattenmättnadsgraden.

Den betong som är utsatt för vattentryck förblir i ett vattenmättat tillstånd.

Sammanfattningsvis kan det noteras att temperaturen i vattenkraftens grova betongkonstruktioner inte uppnår ett jämviktsläge utan följer omgivningens temperatursvängningar. Temperaturfördelningen och temperaturgradienternas storlek i konstruktionen beror på dess storlek och randvillkor. Fuktillståndet i vattenkraftens betongkonstruktioner kan däremot uppnå ett jämviktsläge som motsvarar omgivningens medelfuktillstånd, men detta tar lång tid – relativt grova konstruktioner uppnår förmodligen inte jämviktsstillståndet under sin dimensionerade livslängd. Ett relativt tunt yttre skikt (några centimeter) av en grov betongkonstruktion påverkas endast av svängningarna i den yttre miljöns fuktillstånd. Den inre delen av konstruktionen går ständigt mot det fuktjämviktsläge som motsvarar omgivningens medelfuktighet.

7.5 YTTRE DEL UPPFYLLER KRAV FÖR EXPONERINGSMILJÖ

7.5.1 Allmänt

De flesta mekanismer som bryter ner betongkonstruktionerna i en vattenkraftsmiljö verkar från konstruktionens yta, se avsnitt 7.1. De exponeringsklasser som anges av SS-EN 206 och som gäller för vattenkraftens betongkonstruktioner är XF1 och XF3 (Angrepp av frysning/upptining utan avisningsmedel) samt XC1-XC4 (Korrosion orsakad av karbonatisering). Utöver materialets motstånd mot den nedbrytande mekanismen är konstruktionsytans utformning och egenskaper viktiga för att motstå den nedbrytande mekanismen. En slät och vertikal yta behåller inte regnvattnet, medan

en horisontell och ojämn yta behåller regnvattnet längre, vilket kan öka betongens fukthalt och leda till frostangrepp. En fuktig betongyta, däremot, försvårar för koldioxid att tränga in i betongen och sänker karbonatiseringstakten.

Enligt Betongrapport 11 (Svenska Betongföreningen, 2023) lutar en horisontell yta mindre än 30° mot horisontalplanet och en vertikal yta lutar mer än 30° mot horisontalplanet.

7.5.2 Vertikal konstruktion

Figur 27 visar en vertikal grov betongkonstruktion, som antas vara en frontplatta. Uppströmssidan är till vänster i figuren. Dämningsgränsen (DG) visas i figuren. Frontplattans yttre skikt är markerade i figuren. Följande exponeringsklasser/miljöer kan observeras:

1. Frontplattans uppströmsdel över DG och nedströmsdel

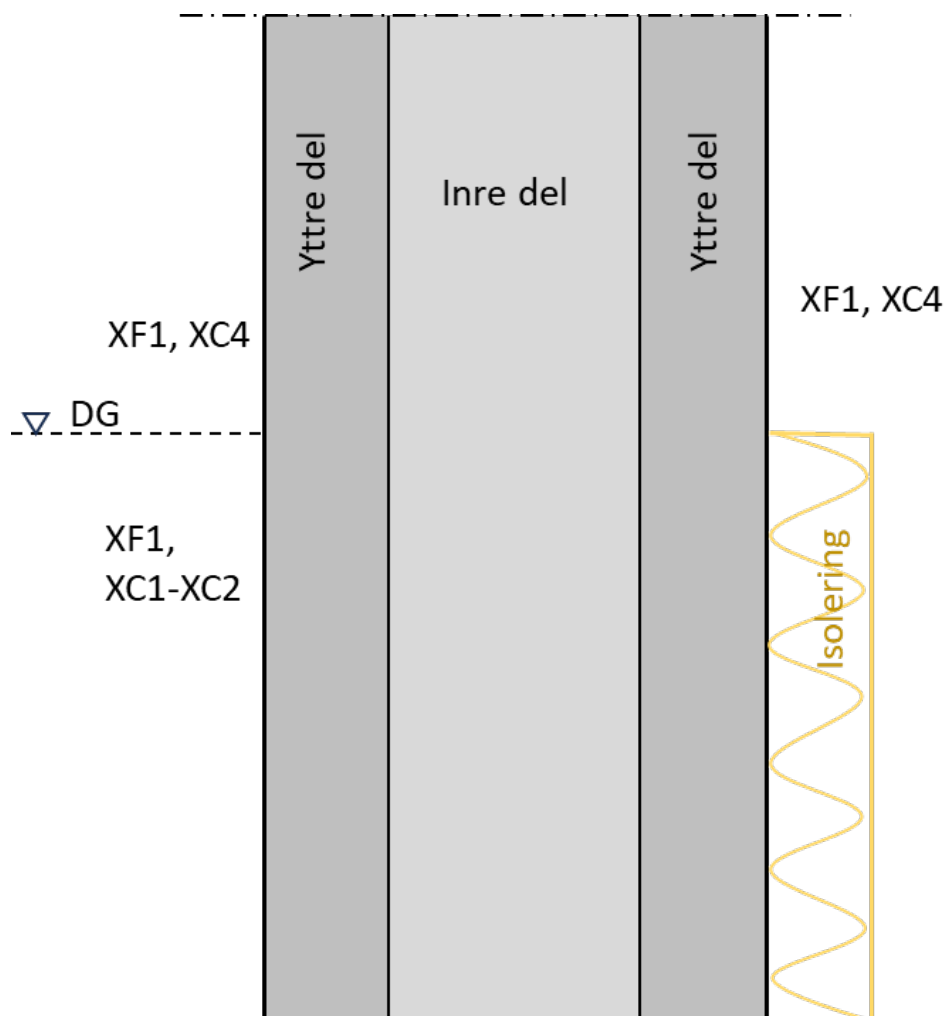
Som beskrevs i avsnitt 7.4, torkar de konstruktionsdelar som är ovanför vattenytan och kommer så småningom i jämvikt med omgivningens medelfuktighet. Svängningar i omgivningens fuktighet påverkar fukttillståndet tillfälligt och tränger bara några centimeter in i betongen. Detta gäller även frontplattans nedströmssida. Det bör dock noteras att frontplattans nedre del på nedströmssidan kan vara fuktigare än de högre belägna delarna. Den rekommenderade exponeringsklassen är XF1 och XC4.

2. Frontplattans uppströmsdel under DG

Som beskrevs i avsnitt 7.4 torkar de konstruktionsdelar som hamnar under vattenytan inte. Betongens vattenmättnadsgrad är relativ hög, ca 0,9 i de övre delarna och 1 i de djupare belägna delarna. En lufttillsatt betong med en vattenmättnadsgrad på 0,9 kan knappt klara av sträng och långvarig kyla. Lösningen är att betongens lufthalt ökas så att det tar lång tid innan porerna vattenfylls, samt att välja ett lågt *vct* för betongen. Den rekommenderade exponeringsklassen är XF3 och XC1-XC2.

Porerna i de djupt belägna betongytorna fylls med vatten, vilket är en tidskrävande process. Andelen tillsatta luftporer, betongens täthet, antal frysningssyklar i närvaro av ofruset vatten samt det rådande vattentrycket på betongens yta styr den tid som det tar för porerna att bli vattenfyllda. Ingen betong klarar av nedfrysning (låga temperaturer) när dess porer är vattenfyllda. Det rekommenderas att frontplattans nedströmssida skyddas mot nedfrysning, särskilt de delar som ligger under DG.

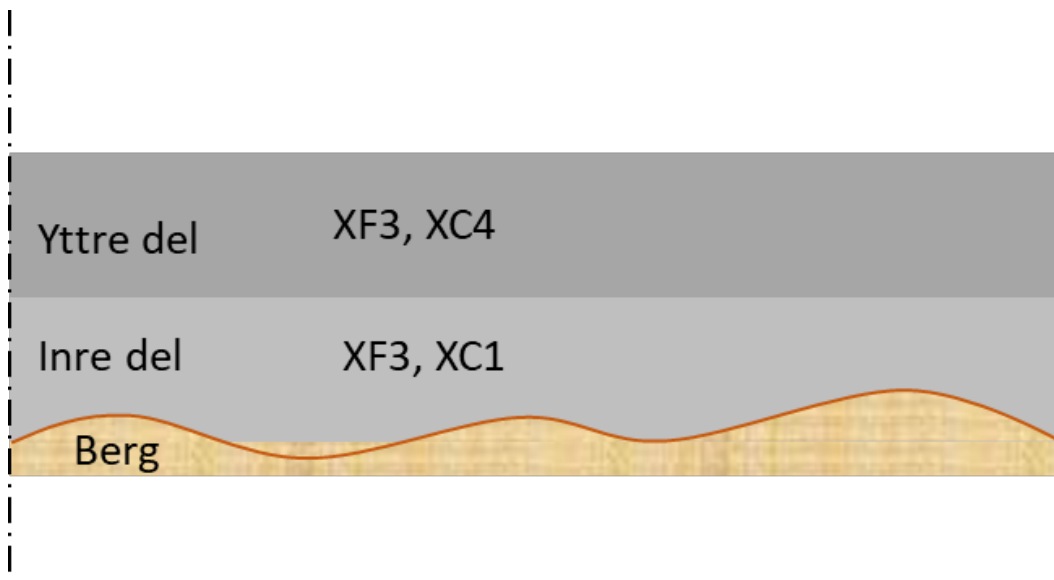
Figur 27. Yttre delar i en vertikal konstruktion.



7.5.3 Horisontell konstruktion

Figur 28 visar en horisontell grov betongkonstruktion, som antas vara en platta grundlagd på berg. Plattans övre del bör dimensioneras för exponeringsklass XF3 och XC4, medan plattens nedre del bör dimensioneras för exponeringsklass XF3 och XC1.

Figur 28. Yttre delar i en Horisontell konstruktion.



7.5.4 De yttre delarnas tjocklek och egenskaper

De yttre delarnas tjocklek bör väljas med hänsyn till konstruktionens stabilitet och bärförmåga samt beständighet och livslängd. I denna rapport antas att konstruktionens stabilitet och bärförmåga alltid kontrolleras och att utformningar som inte uppfyller kraven för stabilitet och bärförmåga inte väljs. Nedan presenteras enbart lösningar som uppfyller beständighetskraven i vattenkraftsmiljöer.

I en vattenkraftsmiljö är det viktigt att konstruktionens yttre del har egenskaper som skyddar armeringen mot korrosion. Det täckande betongskikt ($d_{t,btg}$) som skyddar armeringen och överför spänningar från betongen till armeringen måste vara tät och intakt, vilket innebär att det inte får karbonatisera och inte brytas ner p.g.a. frostangrepp. Betongen bortom armeringen bör också ha goda egenskaper. Den ska vara frostbeständig och tillräckligt stark för att överföra spänningar mellan betong och armering. Den yttre delens minsta tjocklek bestäms med följande samband:

$$d_y = 2d_{t,btg} + d_{l,arm} \quad (8)$$

d_y = den yttre delens tjocklek

$d_{t,btg}$ = det täckande betongens tjocklek

$d_{l,arm}$ = armeringslagrens tjocklek

Exempel 1 – 1 lager armering

Armeringsstång Ø25 mm, bygelarmering Ø12

$d_{g,bls}$ = 45 mm (ballastens maximala storlek)

$d_{t,btg}$ = 50 mm

$d_{l,arm}$ = 25 + 12 = 37 mm

$d_y = 2d_{t,btg} + d_{l,arm} = 2 \times 50 + 37 = 137 \text{ mm}$

Exempel 2 – 2 lager armering

Armeringsstång Ø25 mm, bygelarmering Ø12

$$d_{g,bls} = 45 \text{ mm (ballastens maximala storlek)}$$

$$d_{a,arm} = d_{g,bls} + 5 \text{ mm, avståndet mellan två armeringslager, avsnitt 8.2 SS-EN 1992-1-1:2005}$$

$$d_{t,btg} = 50 \text{ mm}$$

$$d_{l,arm} = 12 + 25 + 45 + 5 + 25 = 112 \text{ mm}$$

$$d_y = 2d_{t,btg} + d_{l,arm} = 2 \times 50 + 112 = 212 \text{ mm}$$

Ett annat sätt att välja tjockleken hos den yttre delen är att ta hänsyn till konstruktionens fuktprofil. Konstruktioner som är i kontakt med vatten som frontplatta inom nivåerna DG (dämningsgräns) och SG (sänkningsgräns), skibord och betongplattor som utsätts för spillning, uppnår ett fuktjämviktsläge som motsvarar deras kapillära vattenmättnadsgrad eller högre. Vertikala konstruktioner som endast utsätts för luftens fuktighet och nederbörd torkar och deras yttre del kan få vattenmättnadsgrader som är lägre än den kapillära.

Figur 24 visar fuktprofilen hos en tjock betongvägg efter mer än 30 års uttorkning mot utomhusluften. Den inre delen har en jämn fuktprofil med en kapillärmättnadsgrad på ca 87 %. Betongen närmast utomhusluften har en kapillärmättnadsgrad på ca 62 %. Den del som ligger mellan utomhusluften och den inre delen med jämnt fördelad fuktprofil, yttre delen, är ca 250 mm tjock. Den yttre delens tjocklek har vuxit från noll till ca 250 mm under mer än 30 år och denna process kommer att fortsätta tills en jämn fuktfördelning bildas över genom hela konstruktionens tjocklek.

En yttre del med en tjocklek på 200–300 mm kan vara tillräcklig, förutsatt att den samverkar med den inre delen och att de tillsammans uppfyller kraven för konstruktionens bärförmåga och stabilitet.

7.6 INRE KONSTRUKTIONSDELAR MED MILDARE KRAV PÅ BESTÄNDIGHET

Kravet för exponeringsklass XC gäller inte för konstruktionens inre delar eftersom dessa dels omges av en yttre del som inte får karbonatiseras under konstruktionens livslängd, dels att huvuddelen av armeringsstängerna normalt placeras inom den yttre delen.

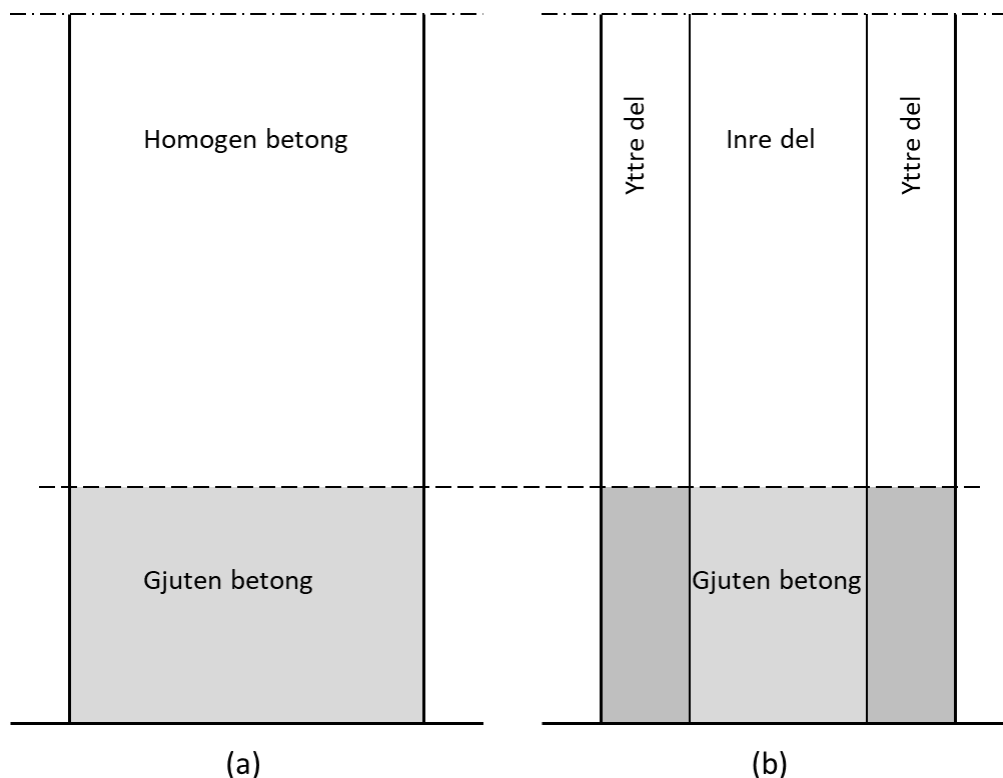
När det gäller frostbeständighet kan exponeringsklass XF1 användas för de delar som inte är utsatta för vattentryck. För konstruktioner som frontplatta, se avsnitt 7.5.2, ska XF3 tillämpas för de delar som är under dämningsgräns.

7.7 BÄRFÖRMÅGA HOS EN KONSTRUKTION SOM BESTÅR AV DELAR MED OLIKA MATERIALEGENSKAPER

Bärförmågan hos en konstruktion som är sammansatt av delar med olika materialegenskaper styrs av de olika delarnas egenskaper samt samverkan mellan dessa. Figur 29 visar schematiskt gjutningen av en homogen vertikal konstruktion och en konstruktion som är sammansatt av två yttre delar och en inre del. Under varje

etapp av gjutningen pumpas betong in i formen. Lager om 30 cm, normal pallhöjd, betong pumpas in i formen och vibreras ihop med underliggande lager. Gjutningens stighastighet är 0,5 m/timme, normal stigningshastighet.

Figur 29. Gjutning av en vertikal homogen konstruktion och en vertikal konstruktion som är sammansatt av olika delar.



Skillnaden mellan fall (a) och fall (b) i Figur 29 är att konstruktionen i fall (a) är homogen, medan konstruktionen i fall (b) består av tre delar, där betongen i de yttre delarna skiljer sig från betongen i den inre delen. Om alla delars betong pumpas in samtidigt och vibreras, bildas en mjuk övergång mellan de olika delarna. Betongens draghållfasthet varierar inom övergångsområdet från ett högre värde i de yttre delarna till ett lägre värde i den inre delen. För att full samverkan mellan de olika delarna ska råda, ska drag- och skjuvspänningarna inom övergångsområdet vara lägre än det svagaste materialets drag- och skjuvhållfasthet. Om dessa villkor är uppfyllda krävs inga extra åtgärder.

Om gjutningen genomförs på annat sätt, till exempel genom att de yttre delarna först gjuts och därefter den inre delen, måste man kontrollera att vidhäftningshållfastheten mellan de olika delarna är tillräcklig för att uppfylla kraven för full samverkan. Man kan förbättra samverkan mellan de olika delarna genom gjuttekniska metoder.

Samma förutsättningar som ovan gäller för horisontella konstruktioner.

7.8 UTFÖRANDET AV KONSTRUKTIONER SOM BESTÅR AV FLERA DELAR

Det finns välutvecklade metoder för byggandet av grova betongkonstruktioner med injekteringsbetong, stenfylld betong och vältbetong. Det krävs dock teknikutveckling

för att kunna gjuta betongkonstruktioner som består av flera delar med konventionella metoder. Teknikutveckling krävs för:

- Formbyggnad
- Armeringsteknik
- Placering av betong i formen
- Betongsammansättning – till exempel måste de olika betongblandningarnas konsistens optimeras

7.9 KRAVSTÄLLNING OLIKA DAMMDELAR

Nedan visas förslag på hur olika dammdelar kan klassas utifrån författarnas erfarenheter samt resultat från workshop. Klassning bygger på *dimensioneringssituationer* (ensidig vattenlast, islast), *miljöer* (låg, måttlig, hög vattenmättnad eller omväxlande våt och torr miljö) och *nedbrytningsmekanismer* (t.ex. korrosion orsakad av klorider från tösaltning, erosion vid höga vattenhastigheter under avbördning, frysning inne i konstruktionen vid mycket låg temperatur; eller urlakning i anslutning till sprickor) *typiska i betongdammar*. Klassning tar ej hänsyn till skador/nedbrytningsmekanismer som kan uppstå pga. t.ex. skadlig ballast (t.ex. ASR eller sulfidangrepp) eller ett bristfälligt utförande.

Notera också att betong längs vattenlinjen utsätts för en kombination av olika miljöbelastningar över året, såsom karbonatisering, ensidigt vattentryck (kan leda till kalkurlakning), erosion (strömmande vatten och isnötning) och frost. För andra konstruktionstyper benämns området längs vattenlinjen ofta skvalpzon, men med skvalpzon avses ett område där betongen är omväxlande våt/fuktigt pga. naturliga nivå-fluktuationer, vind, vågor etc. Längs dammars vattenlinje kan vattnet vara relativt stilla i långa perioder, men ytnivån, liksom strömmande rörelser kan också variera stort beroende på dammanläggningens regleringsamplitud.

Pga. den höga mekaniska belastning som betongkonstruktionerna utsätts för längs vattenlinjen, på skibord och vid utskov och intag ges här ett förslag att hänföra dessa delar till XF4, trots att XF4 avser betong som är utsatta för frysning vid närvaro av avisningsmedel eller havsvatten (salter). Eftersom betongen är utsatt för frysning och upptining i närvaro av icke fruset vatten, dessutom i hög rörelse, är förklaringen att samma mekanism kommer påverka betongen, som när det gäller nedbrytning av betong i närvaro av avisningsmedel. Dessutom urlakas betong lättare när den är utsatt för vatten med låga temperaturer. När de yttre porerna urlakas fylls de direkt med vatten som höjer porens vattenmättnadsgrad som leder till avskalning vid frysning, (se även resonemang i Rosenqvist 2016).

Tabell 18. Förslag till exponeringsklass för olika dammdelar.

Dammdel	X0	XC	XD ¹⁾	XF ¹⁾	Max vct _{ekv} ²⁾	Sprick- bredds- krav ⁴⁾	Vanligaste nedbrytningsmekanismer
Horisontella ytor, generellt		XC4		XF3	0,55	0,30	Avskalning (frostsador), ytsprickor (härtningsrelaterade)
Frontplatta, ovan vattenlinjen		XC4		XF1	0,55	0,30	Armeringskorrosion orsakad av karbonatisering, valvbildning
Frontplatta, vid vattenlinjen		XC4		XF3	0,55	0,20	Erosion, avskalning (frostsador)
Frontplatta, under vattenlinjen ⁵⁾		XC1		XF3	0,55	0,20	Erosion
Frontplatta, inre delar		XC1		^a	0,55	0,20	Armeringskorrosion
Frontplatta, inre oarmerade delar	X0			^a	0,55	0,20	Last-/rörelsesprickor
Pelare, ovan vattenlinjen		XC4		XF1	0,55	0,30	Armeringskorrosion, karbonatisering
Pelare, vid vattenlinjen		XC4		XF3	0,55	0,20	Erosion, avskalning (frostsador)
Pelare, under vattenlinjen ⁵⁾		XC1		XF3	0,55	0,20	Erosion
Pelare, n.s.-sida (ej utskov)		XC4		XF1	0,55	0,30	Armeringskorrosion, karbonatisering
Pelare inre delar		XC1		^a	0,55	0,20	Armeringskorrosion
Pelare inre oarmerade delar	X0			^a	0,55	0,20	Last-/rörelsesprickor
Utskov, ovan vattenlinjen		XC4		XF1	0,55	0,30	Armeringskorrosion, karbonatisering
Utskov, vid vattenlinjen		XC4		XF4	0,50 ³⁾	0,20	Kraftig erosion/nötning, frysning
Utskov, under vattenlinjen ⁵⁾		XC1		XF3	0,50 ³⁾	0,20	Kraftig erosion/nötning, frysning
Utskov, inre delar		XC1		^a	0,55	0,20	Armeringskorrosion
Utskov, inre oarmerade delar	X0			^a	0,55	0,20	Last-/rörelsesprickor

Dammdeel	X0	XC	XD ¹⁾	XF ¹⁾	Max vct _{ekv} ²⁾	Sprick- bredds- krav ⁴⁾	Vanligaste nedbrytningsmekanismer
Ledmur, ovan vattenlinjen		XC4		XF1	0,55	0,30	Armeringskorrosion, karbonatisering
Ledmur, vid vattenlinjen		XC4		XF3	0,55	0,30	Erosion, frysning
Ledmur, under vattenlinjen		XC1		XF3	0,55	0,30	Erosion
Ledmur n.s. utskov		XC4		XF3	0,50	0,30	
Skibordsplatta, yttre delar		XC2		XF4	0,50 ³⁾	0,30	Kraftig erosion/nötning, frysning
Skibordsplatta, inre delar		XC3		^a	0,55	0,30	Armeringskorrosion
Skibordsplatta, inre oarmerade delar	X0			^a	0,55	0,30	Last-/rörelsesprickor, sättningsprickor
Brokana, där avisningssalt används		XC4	XD3	XF2/4	0,55	0,30	Avskalning (frostsador), ytsprickor (härtningsrelaterade)
Intag, ovan vattenlinjen		XC4		XF1	0,55	0,30	Armeringskorrosion, karbonatisering
Intag, vid vattenlinjen (yttre del)		XC4		XF4	0,50 ³⁾	0,20	Kraftig erosion/nötning, frysning
Intag, under vattenlinjen		XC1		XF3	0,50 ³⁾	0,20	Erosion, frysning
Intag, inre delar		XC1		^a	0,55	0,30	
Intag, inre oarmerade delar		XC1		^a	0,55	0,30	
Öppningar, genom konstruktionens utsida		XC1- XC4		XF1, XF3	0,55	0,20– 0,30	

Dammdel	X0	XC	XD ¹⁾	XF ¹⁾	Max vct _{ekv} ²⁾	Sprick- bredds- krav ⁴⁾	Vanligaste nedbrytningsmekanismer
¹⁾ Dammdelar med ovanliggande brobana där avisningsmedel används, bör hanteras som XD1: ovan vattenlinjen (måttlig fuktighet), XD2: under vattenlinjen (våt, sällan torr), XD3: vid vattenlinjen (omväxlande våt och torr); samt XF2: ovan vattenlinjen (måttlig vattenmättnad, med avisningsmedel); XF3: under vattenlinjen (hög vattenmättnad, utan avisningsmedel), XF4: i vattenlinjen (hög vattenmättnad, med avisningsmedel eller havsvatten / skvalpzon).							
²⁾ vct _{ekv} vid användning av CEM I, CEM II/A-LL, CEM II/A-V, CEM II/A-S, CEM II/A-M. Vid CEM IV/A(V), CEM II/B-S, CEM II/B-V, CEM II/B-M bör en säkerhetsfaktor på 0,10 enheter användas, se avsnitt 5.8.							
³⁾ CEM IV/A(V), CEM II/B-S, CEM II/B-V, CEM II/B-M bör användas med försiktighet. Högsta vct _{ekv} 0,45 och kvalifikationsprovning samt användningskriterier enligt bilaga T SS137003:2021+T1:2024 bör tillämpas om dessa cement används.							
⁴⁾ Sprickbredd enligt RIDAS (2022) bör ej överstiga 0,20 mm. I vissa fall kan dock tillåtas att w = 0,30 mm. Notera att minimiarmering ej behandlas i denna rapport.							
⁵⁾ Avser dammdelar som värmeisoleras/isfrihålles, alternativt att betongen är på så pass stort djup att vattnet ej fryser.							
^a Hänsyn tas till konstruktionens förutsättningar och vald betongsammansättning. Tillsatt luft rekommenderas i samtliga fall.							

8 Slutsatser

Utifrån resonemanget i föreliggande rapport är författarnas bedömning att kraftindustrin endast kan nå en begränsad klimatförbättring om metoder utgår från vedertagna arbetssätt och dagens kravställning. Vill kraftindustrin göra ytterligare koldioxidbesparingar krävs nya arbetssätt och tankebanor. För en ökad hållbarhetsprestanda i vattenkraftprojekt kan t.ex. en dammkonstruktion inte behandlas som enhet, där samtliga krav ska uppfyllas i hela dammkonstruktionen, utan förslaget är att istället utgå från olika kravställning för olika dammdelar där dess detaljer och specifika krav omhändertas. Krävs betong med likartade egenskaper (t.ex. kvalitet, täthet, frostbeständighet, nötningsmotstånd, armering) i hela konstruktionen så kan däremot optimering utifrån exponeringsklass och geometri uteslutas. Samtidigt bör förstås vissa generaliseringar göras, då det inte kan anses motiverat att behandla varje separat del i en dammkropp som en egen gjutetapp. Gjutetapper bör således nog planeras och konservativa antaganden göras i vissa dammdelar, medan kraven kan sänkas i andra delar.

För större koldioxidbesparingar anser författarna att det krävs att vi jobbar med flera av punkterna nedan:

- Genom avsteg från gängse normer, som verifieras med funktionsprovningar, kan vi nå längre än fastställda normer tillåter. Dock är dagens funktionsprovningar inte väl anpassade till vattenkraftkonstruktioner eller de alternativa bindemedel som finns på marknaden, varför dessa funktionsprovningar bör omarbetas/verifieras för att säkerställa att provningen motsvarar ett verkligt förlopp.
- Kraftindustrin kan jobba för att ändra regelverken, men det tar lång tid! Med ändrade normer/krav, som är väl beprövade gällande materialsammansättning kan dock större klimatbesparingar göras än vad som görs idag, utan avkall på kvalitet, säkerhet och hållbarhet.
- Ytterligare klimatbesparingar kan göras om konstruktionen delas in i flera olika delar med varierande betongsammansättningar. Med detta tillvägagångssätt kan dagens regelverk uppfyllas samtidigt som cement-/bindemedelsmängden minskas – om det anses acceptabelt att betongen hänförs till olika exponeringsklasser i olika delar av konstruktionen.
- Inre delar kan bestå av olika delmaterial – utifrån anläggningens specifika förutsättningar – och med hänsyn till mekanisk belastning.
- Tekniken finns för användandet av nya konstruktionsmetoder, men dessa kommer, åtminstone i början, att kosta mer än dagens metoder gör.

Genom att tidigt i ett projekt planera för minskade cementmängder, finns stora möjligheter redan idag att minska klimatpåverkan från dammkonstruktioner och uppnå klimatförbättringar på upp till nivå 4. För detta krävs att vissa avsteg från standarder/riktlinjer/normer görs och en samverkan mellan beställare, konsulter, betongleverantörer och entreprenörer. Ansvarsfrågan kommer dock falla tillbaka på beställaren som bör vara väl införstådd med de avsteg som görs.

9 Referenslista

- Ahlberg S.O & Löfgren E., reds. (2022). *Betong – Material konstruktion åtgärder skador arkitektur historia*. Göteborgs Universitet, 258 pp. ISBN 978-91-986946-7-3.
- Andersson R. (1992). *Välthetong*. Kapitel 21 i Svensk Byggtjänst: Betonghandbok Arbetsutförande. p. 543-564.
- Appelquist K., Fredrich B. & Hassanzadeh M. (2024). *Erfarenheter av flygaskebetong*. Energiforsk rapport 2024:1028. 103pp.
- Cementbranschen. (2023). *Färdplan för konkurrenskraft och nettonollutsläpp*, utgåva 2. Fossilfritt Sverige. 22pp.
- Emborg M., Carlsson C.A. & Jonasson J.-E. (2017). *Tidig egenskapstillväxt och hårdnande betong*. Kapitel 9 i Svensk Byggtjänst: Betonghandbok Material, Del 1. p. 327-390.
- Gram H.-E. (2017). *Proportionering generellt*. Kapitel 11 i Svensk Byggtjänst: Betonghandbok Material, Del 1. p. 447-465.
- Gram H.-E. & Ericsson J. (2017). *Proportionering av betong*. Kapitel 12 i Svensk Byggtjänst: Betonghandbok Material, Del 1. p. 467-502.
- ICOLD (International Commission on Large Dams). (2020). *Cemented Material Dam: Design and Practice – Rock-Filled Concrete Dam*. ICOLD Committee on Cemented Material Dams.
- Jin F. & Huang D. (2022). *Design of Rock-Filled Concrete Gravity Dam*. In: Rock-Filled Concrete Dam. Hydrosience and Engineering. Springer, Singapore, pp. 135-177. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8298-8_5
- Lindvall A. & Andersen A. (2000). *Undersökning av kloridinträngning, armeringskorrosion, frysning och fukttillstånd på sju brokonstruktioner exponerade för tössalter*. Publikation P-00:8. Institutionen för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sverige.
- Löfgren, I. (2017). *Tillsatsmaterial*. Kapitel 6 i Svensk Byggtjänst: Betonghandbok Material, Del 1. p. 139-191.
- Mortensen G.M., Tarras H., Göransson M., Taromi Sandström O., Malaga K., Helsing E., Utgenannt P. & Sundling E. (2023). *Alternativa bindemedel till betong – En sammanfattning av kunskapsläget, i ett hållbarhetsperspektiv*. Rapport 31-841/2022, 77 pp.
- Nordström E. & Hassanzadeh M. (2018). *Inblandning av flygaska i vattenbyggnadsbetong*. Energiforsk rapport 2018:478. 54 pp.
- Nordström E., Löfgren I., Berrocal G.C. (2022). *Klimatförbättrad vattenbyggnadsbetong utan kylbehov*. Bygg och teknik 6/2022.
- Oxfall M. (2016). *Climatic conditions inside nuclear reactor containments - Evaluation of moisture condition in the concrete within reactor containments and interaction with the ambient compartments*. Report TVBM-1035, Division of Building materials, Lund University, Lund.

- Rosenqvist M. (2016). *Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures Interactions between water absorption, leaching and frost action*. Report TVBM-1036, Division of Building materials, Lund University, Lund.
- Rosenqvist M. (2018). *Betongteknikens utveckling och betydelse för svensk vattenkraftsutbyggnad*. Energiforsk rapport 2018:481. 266pp.
- SMHI Open data. <https://www.smhi.se/data/temperatur-och-vind/temperatur/dataserier-med-normalvarden-for-perioden-1961-1990>
- Svensk betong. (2022). *Vägledning klimatförbättrad betong*, utgåva 2. 24pp.
- Svenska Betongföreningen. (2020). *Självkompakterande betong, Rekommendationer för användning*. Betongrapport nr 10, utgåva 2. 149 pp.
- Svenska Betongföreningen. (2023). *Vägledning för val av exponeringsklass enligt SS-EN 206*. Betongrapport nr 11, utgåva 4. 30pp.
- Sveriges Byggindustrier. (2012). *Betong- och Armeringsteknik*. Entreprenörskolan, Sveriges byggindustrier, 255pp.
- Sweco. (2016). *Fördjupad byggt teknisk utredning Vänersjöfarten 2015–2016*, Sjöfartsverket (DNR 15-00896). Uppdragsnummer 5471710000.
- Åhs M., Malm R., Bernstone C., Könönen M. (2019). *Reaktorinneslutningars Mekaniska Långtidsbeteende*. Rapport 2019:632, Energiforsk, Stockholm, Sverige.

Standarder & kravspecifikationer

- Boverkets konstruktionsregler (2019) EKS 11
- Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS: 2022
- SS 137003:2015. Betong - Användning av SS-EN 206 i Sverige
- SS 137003:2021+T1:2024. Betong - Användning av SS-EN 206:2013+A2:2021 i Sverige
- SS-EN 197–1:2011. Cement – Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement
- SS-EN 197–5:2021. Cement – Del 5: Portland-kompositcement CEM II/C-M och kompositcement CEM VI
- SS-EN 206:2013. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse
- SS-EN 206:2013+A1:2016. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse
- SS-EN 206:2013+A2:2021. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse
- SS-EN 450-1: 2012. Flygaska för betong – Del 1: Definition, specifikationer och kriterier för överensstämmelse

SS-EN 15167-1:2006. Mald granulerad masugnsslagg för användning i betong, bruk och injekteringsbruk – Del 1: Definitioner, specifikationer och kriterier för överensstämmelse

METODER FÖR ATT REDUCERA CEMENTÅTGÅNG VID DAMMBYGGNAD

En betydande reduktion av cementåtgången vid dammbyggnad kan uppnås genom en kombination av metoder, inklusive resurseffektiva konstruktioner, användning av rätt betong på rätt plats, och klimatförbättrad betong, i vilken en del av cementet ersätts med mer hållbara bindemedel. Att dessutom dela in konstruktionen i olika delar med variabla krav baserat på respektive dels exponeringsklass och geometri möjliggör ytterligare cementreduktion. För en ökad hållbarhetsprestanda, men med bibehållen prestanda, kan krav på konstruktionens inre delar sänkas förutsatt att de yttre delarna fortsatt uppfyller dagens höga krav gällande t.ex. frostbeständighet, täthet och nötningsmotstånd.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

