



CHALMERS



Vattentäta betongkonstruktioner

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet Byggingenjör

ARYA AZADRAD
PETTER HOLTSKOG

EXAMENSARBETE BOMX03-16-5

Vattentäta betongkonstruktioner

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

ARYA AZADRAD

PETTER HOLTSKOG

Institutionen för bygg- och miljöteknik
Avdeleningen för konstruktionsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2016

Vattentäta betongkonstruktioner
Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet
Byggingenjör
ARYA AZADRAD
PETTER HOLTSKOG

© ARYA AZADRAD/PETTER HOLTSKOG, 2016

Examensarbete BOMX03-16-5 / Institutionen för bygg- och miljöteknik,
Chalmers tekniska högskola 2016

Institutionen för bygg och miljöteknik
Avdelningen för konstruktionsteknik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:
Bassängkonstruktion av betong med rör genomföringar. Sweco 2016

Chalmers reproservice/Institutionen för bygg- och miljöteknik
Göteborg 2016

Vattentäta betongkonstruktioner

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet

Byggingenjör

ARYA AZADRAD

PETTER HOLTSKOG

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningen för konstruktionsteknik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

I dagens samhälle byggs många nya vattenbyggnadskonstruktioner som bland annat används till bassänger i vattenreningsanläggningar. Eftersom betong inte innehåller något organiskt material och har bra fukttålighet är betong ett vanligt förekommande byggmaterial vid byggnation av vattenbyggnadskonstruktioner. Dessa konstruktioner blir oftast inte helt vattentäta på grund av att betong är ett poröst material och att det kan uppkomma genomgående sprickor. Dessutom kan otätheter i rör genomföringar och fogar bidra till vattengenomträngning och läckage. Syftet med examensarbetet var att utreda hur betongkonstruktioner påverkas när de utsätts för vattentryck och undersöka olika konstruktiva utformningar för att uppfylla krav på vattentäthet.

Inom projektet gjordes litteraturstudier, intervjuer med ämnesspecifika experter och beräkningar på hur krympning och böjande moment påverkar sprickbildning i betongkonstruktioner för att komma fram till slutsatser och rekommendationer för projektering av betongkonstruktioner som ska vara vattentäta.

Betongmaterialets täthet beror på sammansättningen av betongens olika delmaterial där vattencementtalet till stor del är avgörande för hur tät betongen blir. För att uppnå en tät betong bör därför ett lågt vattencementtal väljas.

Förekomsten av genomgående sprickor i betongkonstruktionen har stor betydelse och är avgörande för hur tät konstruktionen blir. Utförda beräkningarna visar att armeringsmängden som fordras för att uppfylla höga täthetskrav blir mycket omfattande och att det inte är praktiskt möjligt att med enbart armering begränsa sprickvidder i betongkonstruktioner som ska uppfylla mycket höga täthetskrav. Att enbart använda armering för att begränsa sprickvidder till mycket små värden bör undvikas och andra kompletterande åtgärder bör vidtas. För att uppfylla kraven på vattentäthet bör betongtvärsnittets tryckta zon och det varierande sprickviddskravet utefter bassängväggens höjd utnyttjas. För att minska risken för genomgående krympsprickor bör betongkonstruktioners totala tvång minska.

Eftersom rör genomföringar blir tätast om de gjuts in direkt bör de planeras så tidigt som möjligt i projekteringsprocessen. För att även fogar ska bli täta bör fogbleck med svällband i kombination med injekterings slang tillämpas eftersom denna typ av utformning ger högst täthet.

Nyckelord: bassäng, vattentryck, vattentäthet, vattencementtal, sprickor, krympning, tvångsbelastning, rör genomföringar, fogar

Waterproof concrete structures

Diploma Thesis in the Engineering Programme

Building and Civil Engineering

ARYA AZADRAD

PETTER HOLTSKOG

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of Structural Engineering

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

In today's society a lot of hydraulic structures for purifying water is being built, for instance water basins. Since concrete does not contain any organic components and is moist resistant it is a material that is usually used for building water resistant structures. These structures do not always become completely waterproof, because concrete is a porous material and through cracks may occur. Pipe transits and joints may also lead to leakage. The purpose of this project was to investigate how concrete structures are affected under water pressure and examine various structural solutions to fulfill requirements concerning waterproofness.

In this project a literature study, interviews with subject-specific experts and calculations concerning how concrete shrinkage and bending moment affect cracking in concrete structures were carried out in order to reach conclusions and suggest recommendations for planning of waterproof concrete structures.

The tightness of the concrete material depends on the composition of the concrete's part materials, whereas the water-cement ratio is most essential for the tightness. Hence, a low water-cement ratio should be specified in order to reach a tight concrete.

Any through cracks result in leakage and have a major influence on water tightness. The calculations show that the amount of reinforcement needed to fulfill higher tightness demands is very extensive and that it is not possible in practice to limit crack widths with reinforcement steel only in such cases. Hence, to only use reinforcement to limit crack widths should be avoided and other additional measures should be taken. To fulfill requirements for water tightness the compressed zone of the concrete section and the varying acceptable crack width along the height of the wall can be utilized. To reduce the risk of through shrinkage cracks, the restraint of walls should be reduced.

Since pipe transits become as tightest when they are directly cast in place, these should be considered early in the planning process. Furthermore, to achieve tight casting joints metal water stops should be installed with coating and combined with injection tube, since this detailing gives the best result.

Key words: basin, water pressure, waterproofness, water-cement ratio, cracks, shrinkage, restraint force, pipe transit, joints

Innehållsförteckning

| | |
|--|-----|
| SAMMANFATTNING | I |
| ABSTRACT | II |
| INNEHÅLLSFÖRTECKNING | III |
| FÖRORD | VI |
| BETECKNINGAR | VII |
| | |
| 1 INLEDNING | 1 |
| 1.1 Bakgrund | 1 |
| 1.2 Problem | 1 |
| 1.3 Syfte | 1 |
| 1.4 Avgränsningar | 2 |
| 1.5 Metod | 2 |
| | |
| 2 OLIKA KONSTRUKTIONER MED KRAV PÅ VATTENTÄTHET | 3 |
| 2.1 Vattenbyggnadskonstruktioner | 3 |
| 2.2 Krav på vattentäta betongkonstruktioner | 3 |
| 2.2.1 Beständighet | 3 |
| 2.2.2 Vattentäthet | 5 |
| 2.3 Uppkomst av vattengenomträngning och läckage | 6 |
| | |
| 3 MATERIALET BETONG | 8 |
| 3.1 Betongens delmaterial | 8 |
| 3.1.1 Cement | 8 |
| 3.1.2 Vatten | 8 |
| 3.1.3 Ballast | 8 |
| 3.1.4 Tillsatsmedel | 9 |
| 3.1.5 Tillsatsmaterial | 9 |
| 3.2 Betongens struktur och täthet | 10 |
| 3.2.1 Betongens porsystem | 10 |
| 3.2.2 Vattencementtal och inverkan på betongens täthet | 11 |
| 3.2.3 Fuktransport i betong | 13 |
| 3.3 Krympning | 14 |
| 3.3.1 Uttorkningskrympning | 14 |
| 3.3.2 Autogen krympning | 14 |
| 3.3.3 Plastisk krympning | 15 |
| 3.4 Krypning | 15 |
| | |
| 4 PROBLEMATIK MED VATTENTÄTA BETONGKONSTRUKTIONER | 17 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Vattengenomträngning i osprucken betongkonstruktion | 17 |
| 4.2 | Vattengenomträngning i sprickor | 17 |
| 4.2.1 | Sprickors inverkan på betongkonstruktioners vattentätet | 17 |
| 4.2.2 | Temperatursprickor | 17 |
| 4.2.3 | Krympsprickor | 18 |
| 4.2.4 | Sprickor orsakat av stödförskjutning | 18 |
| 4.2.5 | Sättsprickor | 19 |
| 4.2.6 | Belastningssprickor | 19 |
| 4.3 | Vattengenomträngning i rör genomföringar och fogar | 19 |
| 4.4 | Beständighetsproblem | 19 |
| 5 | METODER FÖR ATT UPPFYLLA TÄTHETSKRAV | 22 |
| 5.1 | Osprucken betongkonstruktion | 22 |
| 5.2 | Sprickor i betongkonstruktioner | 22 |
| 5.3 | Rör genomföringar och fogar | 24 |
| 6 | PROJEKTERING AV VATTENTÄTA BETONGKONSTRUKTIONER | 29 |
| 6.1 | Begränsning av sprickor | 29 |
| 6.1.1 | Sprickor orsakade av böjande moment | 30 |
| 6.1.2 | Sprickor orsakade av krympning | 35 |
| 6.2 | Rör genomföringar och fogar | 40 |
| 7 | ANALYS OCH UTVÄRDERING | 41 |
| 7.1 | Inverkan av betongsammansättning | 41 |
| 7.2 | Inverkan av armering för sprickviddsbegränsning | 41 |
| 7.2.1 | Armeringsmängder avseende böjande moment | 41 |
| 7.2.2 | Armeringsmängder avseende krympsprickor | 44 |
| 7.2.3 | Alternativa åtgärder | 45 |
| 7.3 | Rör genomföringar och fogar | 45 |
| 8 | SLUTSATSER | 46 |
| 8.1 | Slutsatser | 46 |
| 8.2 | Vidare studier | 47 |
| 9 | REFERENSER | 48 |
| 9.1 | Skriftliga källor | 48 |
| 9.2 | Muntliga källor | 49 |

BILAGOR

Bilaga A – Beräkningar böjande moment

Bilaga B – Beräkningar krympning

Förord

Detta examensarbete är en del av vår utbildning till byggnadsingenjör vid Chalmers tekniska högskola och omfattar 15 högskolepoäng. Examensarbetet är genomfört på Institutionen bygg- och miljöteknik på uppdrag från Sweco Structures AB.

Ett tack riktas till vår examinator och handledare Björn Engström på Chalmers tekniska högskola som gett oss god vägledning och inspiration genom hela arbetet. Vi vill även rikta ett stort tack till vår handledare Per Langefors på Sweco Structures AB i Göteborg som på bästa sätt har stöttat oss och bidragit med goda idéer.

Under arbetets gång har arbetsfördelningen mellan oss båda varit lika. Utifrån intresse gjordes en uppdelning av ansvarsområden där Petter tagit mer ansvar för beräkningar och Arya för litteraturstudier.

Göteborg, juni 2016
Arya Azadrad & Petter Holtskog

Beteckningar

Latinska versaler

| | |
|------------|---|
| $A_{c,ef}$ | betongtvärsnittets effektiva area |
| A_{ef} | arean hos medverkande betong mellan sprickor |
| A_I | tvärsnittsarea i stadium I |
| $A_{I,ef}$ | effektiv tvärsnittsarea i stadium I |
| A_s | armeringens tvärsnittsarea |
| E_c | tangentvärde för betongens elasticitetsmodul |
| $E_{c,ef}$ | effektiv elasticitetsmodul för betong |
| E_{cm} | sekantvärde för betongens elasticitetsmodul |
| E_s | dimensioneringsvärde för armeringens elasticitetsmodul |
| F_c | tryckkraft i betong |
| F_{cs} | tvångskraft då armering förhindrar betongens fria krympning |
| F_s | dragkraft i armering |
| G_{kar} | karakteristiskt värde för en permanent last |
| H | väggens höjd |
| L | väggens längd |
| M | böjande moment |
| N_c | spricklast |
| R | tvångsfaktor |
| RH | relativ fuktighet |

Latinska gemena

| | |
|---------------|---|
| b | tvärsnittets bredd |
| c | täckande betongskikt hos längsgående armering |
| c_{min} | minsta täckande betongskikt |
| d | effektiv höjd |
| f_{cd} | dimensioneringsvärde för betongens tryckhållfasthet |
| f_{cm} | medelvärde för betongens cylindertryckhållfasthet |
| $f_{ctm}(t)$ | medelvärde för betongens draghållfasthet (vid ren dragning) för en viss ålder t |
| $f_{ctm,sus}$ | medelvärde för betongens draghållfasthet (vid ren dragning) för långtidslast |
| f_{yk} | karakteristiskt värde för armeringens sträckgräns |
| g | gravitationskraft |
| h | väggens tjocklek |
| k_1 | koefficient som beaktar den vidhäftande armeringens vidhäftningsegenskaper |
| k_2 | koefficient som beaktar töjningsfördelning |
| k_3 | nationell valbar parameter |
| k_4 | nationell valbar parameter |
| k_t | faktor som beaktar lastens varaktighet |
| n_{cr} | antal sprickor |
| q | variabel last |

| | |
|-------------|---|
| $s_{r,max}$ | övre karakteristiskt värde på sprickavstånd |
| w | sprickvidd |
| w_k | karakteristiskt värde på sprickvidd |
| w_{max} | maximalt värde på karakteristisk sprickvidd |
| x | tryckzonens höjd |
| z | hävvarmen för de inre krafterna i ett tvärsnitt |

Grekiska gemena

| | |
|---------------------------------|--|
| α | vinkel; kvot |
| α_{ef} | effektivt värde på förhållandet mellan armeringens och betongens E-modul |
| β | vinkel; kvot; koefficient |
| $\beta(f_{cm})$ | faktor som beaktar betongens hållfasthetsklass |
| $\beta(t_0)$ | faktor som beaktar betongens ålder vid pålastning |
| γ | partialkoefficient |
| γ_d | partialkoefficient som beaktar säkerhetsklass |
| $\gamma_{G,j,sup}$ | partialkoefficient för den permanenta lasten j vid beräkning av övre dimensioneringsvärden |
| $\varepsilon_{ca}(\infty)$ | slutligt värde på autogen krympning |
| $\varepsilon_{c,creep}(\infty)$ | slutlig kryptöjning |
| $\varepsilon_{cd}(\infty)$ | slutligt värde på uttorkningskrympning |
| ε_m | betongens medeltöjning mellan sprickor |
| $\varepsilon_{cs}(\infty)$ | slutligt krympmått |
| ε_{cu} | betongens brottstuckning |
| ε_s | töjning i armering |
| ε_{sm} | stålets medeltöjning inklusive effekt av påtvingad deformation |
| ε_{syd} | dimensionerande värde på flyttöjning |
| ρ | densitet |
| $\rho_{p,ef}$ | armeringskvot i effektiv betongarea |
| σ_{cc} | betongtryckspänning vid tryckt kant |
| σ_s | dragspänning i armering |
| $\varphi(\infty, t_0)$ | slutligt värde på kryptal |
| φ_{RH} | faktor som beaktar omgivningens relativa fuktighet RH |
| ϕ | diameter på armeringsjärn |

1 Inledning

I detta kapitel presenteras bakgrund, problem och syfte till arbetet. Vald metod samt avgränsningar av arbetet behandlas också i detta kapitel.

1.1 Bakgrund

En ökad befolkningsmängd, gamla befintliga vattenverk och krav på rent vatten är några av anledningarna till att det byggs många vatten- och avloppsreningsverk i Sverige. En av utmaningarna är att få bassängerna i dessa betongkonstruktioner vattentäta.

Betong är ett byggmaterial som ofta används vid byggnation av konstruktioner som ska vara vattentäta. Eftersom betong inte innehåller något organiskt material så kan den inte mögla eller ruttna, och i kombination med en bra fukttålighet är materialet lämpligt för konstruktioner som är hårt utsatta för vattentryck. Betong är även ett kostnadseffektivt material och lämpligt för utformning av komplicerade geometrier.

Ett av problemen med betongkonstruktioner som ska vara vattentäta är att det kan uppstå genomgående sprickor. Dessa sprickor kan uppkomma redan i byggskedet under gjutning av betongkonstruktionen. En anledning till att betongen kan spricka är att den vid härdning genomgår temperaturvariationer som kan ge upphov till dragspänningar. Dessa spänningar uppstår på grund av förhindrade sammandragningar vid motgjutning till befintlig konstruktion. Ett annat fenomen är krympsprickor som uppkommer då betongens volym minskar på grund av kemiska reaktioner samt uttorkning. En uppsprucken betongkonstruktion kan även medföra beständighetsproblem som resulterar i en minskning av betongens livslängd samt läckage av vatten.

1.2 Problem

Examensarbetet utredde olika faktorer som inverkar på betongens vattentäthet och uppkomst samt motåtgärder till sprickor i betongkonstruktioner. Även orsaker och rekommendationer för otätheter i rörgenomföringar och fogar utreddes.

1.3 Syfte

Examensarbetets syfte var att utreda hur betong påverkas i fuktiga och våta miljöer och undersöka vilka konstruktionsutformningar som är att föredra vid projektering och byggnation av vattentäta betongkonstruktioner.

För att bearbeta syftet behövdes följande delmål behandlas:

- Vad menas med vattentäthet och vilka krav ställs i olika situationer?
- Hur bör betongen sammansättas för att få en tät betong?
- Hur skiljer sig de konstruktiva utformningarna för att uppfylla de olika täthetsklasserna i standarden SS-EN 1992-3? Vilka armeringsmängder fordras för att få ned sprickvidderna för vattentäthetskravet till erforderliga nivåer för olika betongklasser?

- Hur bör bassängväggar som gjuts mot bottenplatta utformas för att minimera problemen med temperatur- och krympsprickor?
- Vilka är för- och nackdelarna för olika typer av utformningar av rörgenomföringar och fogar. Vilken typ av utformning är att föredra om vattentäthetskravet är högt?

1.4 Avgränsningar

Arbetets inriktning var på nybyggnation av vattentäta betongkonstruktioner. Åtgärder vid läckage av gamla befintliga konstruktioner skulle därför inte beaktas.

Arbetets fokus låg på betongkonstruktioners utformning för att uppnå en så tät konstruktion som kan accepteras. Därför skulle ytbeläggningar av andra material inte behandlas.

Endast överslagsberäkningar på böjande moment och krympning skulle utföras.

1.5 Metod

Inledningsvis gjordes en litteraturstudie på ämnet. Artiklar, avhandlingar och tidskrifter granskades för att undersöka vad som påverkar betongkonstruktioners täthet och för att få bättre kunskap om betong och dess egenskaper i våta miljöer. Studien skulle även ge ett bra underlag till fortsatt arbete av examensarbetet. Ett beräkningsexempel på en typsektion av en bassängvägg utformades för att jämföra olika konstruktiva utformningar för betongkonstruktioner med krav på vattentäthet.

Intervjuer med ämnesspecifika experter utfördes för att ta reda på vilka utformningar/metoder som är lämpligast och eventuella problem och svårigheter.

Utifrån resultatet från beräkningar och intervjuer gjordes en analys och utvärdering. Beräkningarna gav vägledning för hur bassängväggar bör utformas för att uppfylla de krav som ställs på vattentäta betongkonstruktioner. Resultaten jämfördes med varandra för att se hur mycket de konstruktiva utformningarna skiljde sig mellan olika täthetskrav.

2 Olika konstruktioner med krav på vattentätthet

Krav på vattentätthet är aktuellt för betongkonstruktioner som är utsatta för vattentryck. I detta kapitel beskrivs vilka typer av anläggningar som är aktuella och olika krav som ställs på dessa.

2.1 Vattenbyggnadskonstruktioner

Reningsverk är anläggningar som renar avloppsvatten och dagvatten som kan innehålla bakterier, patogener och andra skadliga ämnen som inte får komma ut i naturen. Vid rening av avloppsvatten och dagvatten används kemikalier som inte får tränga igenom bassängväggar till närliggande bassänger eller ut i omgivningen. Därför behövs tillräckligt täta bassänger som hindrar att det förorenade vattnet tränger igenom konstruktionen.

Vattenverk behandlar grund- och ytvatten så kallat råvatten. Råvatten är som regel ofarligt för miljön och därmed inte skadligt för varken betongkonstruktioner eller omgivningen. Däremot är de kemikalier som används vid rening av råvatten skadligt både för konstruktioner och miljön. Konstruktioner måste därför utformas för att motverka de beständighetsproblem som kan förorsakas av att kemikalier tränger igenom.

Vattenkraftverk utsätts för stora krafter från vattentryck vilket kräver grövre konstruktioner än konventionella bassänger. Vid gjutning av grova betongkonstruktioner kan stora temperaturskillnader uppkomma på grund av den kemiska reaktionen mellan cement och vatten. Förhindrade temperaturrörelser kan ge upphov till dragspänningar och genomgående sprickor.

2.2 Krav på vattentäta betongkonstruktioner

Bassänger till vattenbyggnadskonstruktioner behöver inte alltid vara helt vattentäta. Ofta kan man tillåta en viss grad av genomsläplighet i konstruktionen beroende på vilka krav som ställs. Kraven kan bero på vilka typer av vätskor som ska förvaras i bassängen eller miljön där konstruktionen kommer att befinna sig.

2.2.1 Beständighet

Enligt Burström (2007) och Fagerlund (1989) kan betongkonstruktioner, som är utsatta för vattentryck, utsättas för flera typer av påfrestningar. Dessa påfrestningar kan vara kemiskt angrepp, som orsakas av att kemiska ämnen bryter ner betongen, frostangrepp som resulterar i att betongen sprängs sönder eller armeringskorrosion som orsakas av att koldioxid eller klorider tränger in i betongen och når armeringen.

Beständighetskraven på dessa typer av konstruktioner är mycket höga. Om betongen skall klara av de krav som ställs måste den ha en mycket hög motståndsförmåga mot alla förväntade påfrestningar. Dessa typer beskrivs i avsnitt 4.4.

Beroende på vilken miljö betongen kommer att befinna sig i beror dess beständighet på de påfrestningar som kommer att vara betydande. Val av betongens

hållfasthetsklass, vattencementtal och delmaterial bestäms av vilken exponeringsklass konstruktionen kommer att ha. Exponeringsklasserna är grupperade efter vilka angreppsmekanismer som kommer att verka i den givna miljön, till exempel korrosion orsakad av karbonatisering eller frostangrepp. Totalt finns det 18 exponeringsklasser som är indelade efter sex olika angreppsmekanismer.

X0, inga angrepp

Ingen förväntad nedbrytning. Detta gäller för betongkonstruktioner inomhus i torra lokaler som är uppvärmda och där den relativa fuktigheten är mindre än 50 % under huvuddelen av året. I sådan miljö är frostangrepp eller armeringskorrosion inte aktuell.

XC (Carbonation), karbonatisering

Vid höga eller mycket låga fuktnivåer är risken för karbonatiseringsinitierad korrosion liten. Antigen är betongen för torr eller så är porerna vattenfyllda så att ingen koldioxid kan tränga in. För att korrosion ska kunna ske behöver därför betongen vara så pass våt att korrosion kan uppstå samt att den är så torr att den karbonatiseras. Exponeringsklasserna för korrosion orsakad av karbonatisering är uppdelade från XC1 till XC4 där XC4 är den mest ogynnsamma. Om vattencementtalet, *vct*, är mindre än 0,40 samt att betongen är ordentligt komprimerad och härdad kan man bortse från karbonatiseringsinitierad korrosion. För att motverka karbonatisering krävs att koldioxiden som finns i omgivningen förhindras att tränga igenom konstruktionen. Detta krav uppfylls genom att välja lämpligt täckskikt och *vct*.

XD (De-icing agents), korrosion orsakad av tösalt

Armeringskorrosion som orsakas av klorider (som inte kommer från havsvatten, till exempel tösalt) kräver att klorider kan tränga in till armeringen samt att det finns syre till korrosionsprocessen. Som för exponeringsklass XC sker ingen korrosion om det är för torrt eller för hög fuktnivå. Störst risk för korrosion uppkommer då betongen är cykliskt våt och torr. Risken är lägre om kloriderna är luftburna. Exponeringsklasserna är uppdelade från XD1 till XD3. För att korrosion inte ska uppstå krävs att tösalt som finns i omgivningen förhindras att tränga igenom konstruktionen. Detta krav uppfylls genom att välja lämpligt täckskikt och vattencementtal, *vct*.

XS (Sea water), korrosion orsakad av havssalt

För exponeringsklass XS gäller samma förutsättningar som för XD. Skillnaden är att kloriderna kommer från havsvattnet. Exponeringsklasserna är uppdelade från XS1 till XS3. För att förhindra korrosion krävs att havsvattnet som finns i omgivningen inte tränger igenom konstruktionen. För att uppfylla detta krav väljs lämpligt täckskikt och *vct*.

XF (Frost), frostangrepp

Med ökad fuktnivå och exponering för klorider blir risken för frostsador större. Exponeringsklasserna delas upp från XF1 till XF4, där XF1 och XF3 beror på vattenmättnaden och XF2 och XF4 beror på vattenmättnaden och kloridhalten. För att konstruktioner ska vara beständiga mot frostsador krävs att vattnet i betongen kan expandera när det fryser. Genom att tillsätta luftporbildande medel i betongen får vattnet vid frysning utrymme att expandera. Alternativt kan ett lägre *vct* väljas som resulterar i en tätare betong och därmed försvårar vattengenomträngningen.

XA (chemical Attack), kemiskt angrepp

Exponeringsklasserna avser kemiskt utsatta miljöer i naturlig jord och grundvatten där temperaturen är mellan 5 °C och 25 °C och vattnets hastighet är så låg att den kan försummas. Exponeringsklass väljs beroende på hur stor mängd av den skadliga kemiska komponenten som finns. Är det flera komponenter som verkar väljs en högre exponeringsklass där XA1 är den lägsta och XA3 är den högsta och mest utsatta. Vid dimensionering av betongkonstruktioner för exponeringsklass XA krävs att kemikalier inte bryter ner betongen eller orsakar armeringskorrosion. Genom att öka täcksiktet och välja en tätare betong kan konstruktioner skyddas mot kemiskt angrepp.

Utförligare beskrivning och krav av varje exponeringsklass finns redovisade i SS-EN 206 (SIS, 2013).

2.2.2 Vattentäthet

Enligt standarden SS 137003 (SIS, 2015) finns krav på motstånd mot vattengenomträngning som anses vara uppfyllt om betongen är sammansatt enligt följande:

- Ekvivalent vattencementtal, vct_{ekv} , ska vara högst 0,60. vct_{ekv} , beskrivs i avsnitt 3.2.2.
- Den sammanlagda vikten av cement, tillsatsmaterial och ballast med kornstorlek < 0,25 mm måste minst vara 2 gånger den totala vikten vatten i betongmassan.

För betongkonstruktioner med krav på att vattengenomträngning inte får förekomma eller som utsätts för ensidigt vattentryck gäller även andra kompletterande krav som bland annat kan avse maximal tillåten sprickvidd. Dessa krav specificeras i standarden SS-EN 1992-3 (SIS, 2006). Standarden anger principer och tillämpningar som är specificerade för betongkonstruktioner vars syfte är att innehålla flytande vätskor.

Konstruktioner som ska förvara vätskor delas in i olika täthetsklasser med hänsyn till aktuellt behov av täthet.

| Täthetsklass | Krav |
|---------------------|---|
| 0 | Viss grad av läckage tillåtet eller läckage tillåts |
| 1 | Läckage skall begränsas. Fuktiga/blöta fläckar tillåts i viss mängd |
| 2 | Läckaget skall vara minimalt, inga fläckar tillåts |
| 3 | Läckage tillåts ej |

Tabell 2.1 Täthetsklasser.

För täthetsklass 0 så räcker bestämmelserna i avsnitt 7.3.1 i standarden SS-EN 1992-1-1 (SIS, 2005). Dessa regler avser endast sprickvidd med avseende på beständighet och inte vattentäthet. Den anger en övre gräns för tillåten karakteristisk sprickvidd, w_{max} , där värdet på w_{max} återfinns i standarden SS 137010 (SIS, 2002).

För konstruktioner i täthetsklass 1 skall genomgående sprickor som förväntas uppstå begränsas till en maximal karakteristisk sprickvidd, w_{kl} , som beror på vattentrycket mot väggen, h_D , och väggens tjocklek, h . För

$$\frac{h_D}{h} \leq 5 \rightarrow w_{kl} = 0,2 \text{ mm och för}$$

$$\frac{h_D}{h} \geq 35 \rightarrow w_{kl} = 0,05 \text{ mm}$$

För mellanliggande värden på h_D/h kan maximal sprickvidd interpoleras fram genom formeln,

$$w_{kl} = -0,005 \cdot \frac{h_D}{h} + 0,225$$

Vattentrycket verkar som en triangulär utbredd last och varierar utefter väggens höjd vilket leder till att även sprickviddskravet varierar utefter väggens höjd. Detta på grund av att kvoten h_D/h ändras beroende på vattentrycket och vägg tjockleken där ett litet vattentryck och ökad vägg tjocklek ger ett lägre sprickviddskrav. Högt upp i väggen är det alltså ett lägre sprickviddskrav medan det längst ner i väggen är ett högre sprickviddskrav.

Bestämmelserna i avsnitt 7.3.1 i standarden SS-EN 1992-1-1 kan även tillämpas för täthetsklass 1, dock fordras att två ytterligare krav är uppfyllda.

- Vissa delar av konstruktionens tvärsnitt ska vara konstant tryckta inom en tryckzonshöjd av minst $x_{\min} = \min(50 \text{ mm}; 0,2 \cdot h)$, där h är väggens tjocklek.
- Genomgående sprickor som inte överstiger 0,2 mm kan förväntas självläka, förutsatt att töjningsvariationer, till exempel på grund av last eller temperaturvariationer, inte är större än $150 \cdot 10^{-6}$ (dimensionslös). Töjningsvidd avser töjning i armering.

För täthetsklass 2 krävs generellt att genomgående sprickor ska förhindras om inte andra åtgärder vidtas till exempel membran eller liknande ytbeläggning. Konstruktioner som inte tillåts läcka eller släppa igenom fukt hänförs till täthetsklass 3, vilket kräver att betongens yta beläggs med membran eller liknande ytbeläggning. Vid dimensionering för täthetsklass 2 och 3 ska de tryckta delarna av konstruktionens tvärsnitt vara minst $x_{\min} = \min(50 \text{ mm}; 0,2 \cdot h)$. Om tvärsnittet utsätts för växlande krafter i motsatta riktningar ska sprickor betraktas som genomgående om det inte kan visas att en del av tvärsnittet ständigt är tryckt.

2.3 Uppkomst av vattengenomträngning och läckage

Vattengenomträngning och läckage i betongkonstruktioner kan ske genom betongens porer, sprickor genom konstruktionen eller otätheter i rör genomföringar och fogar. Figur 2.1 visar vattengenomträngning i sprickor och fogar.



Figur 2.1 Vattengenomträngning i sprickor och fogar. Författarnas egen bild.

Om betongkonstruktioner utsätts för ständigt vattentryck kommer betongens porssystem att fyllas med vatten vilket resulterar i vattengenomträngning. Om betongkonstruktioner även är uppspruckna och otäta i rörgenomföringar och fogar kommer vattengenomträngningen och läckaget att vara större och mer problematiskt. För att uppfylla krav på vattentäthet måste alla dessa möjligheter till läckage beaktas vid projektering och byggnation av vattentäta betongkonstruktioner.

3 Materialet betong

Begreppet ”vattentät betong” är en sanning med modifikation eftersom betong alltid är mer eller mindre genomsläpplig för vatten. Detta beror bland annat på att betong är ett poröst material som är sammansatt av olika delmaterial. Det finns ett flertal faktorer som påverkar vattentätheten, bland annat val av delmaterial, förhållandet mellan vatten och cement i blandningen och betongens porstruktur.

Detta kapitel är huvudsakligen baserat på PG. Burström (2007) och B. Engström (2011).

3.1 Betongens delmaterial

Betong är ett byggnadsmaterial som består av cement, vatten och bergmaterial. Bergartsmaterialet som finns i olika fraktioner (sten, grus, sand) utgör ballast i betongen. Ballasten limmas ihop av cementpastan som bildas när cement blandas med vatten. Därutöver kan olika tillsatsmedel och tillsatsmaterial användas för att förbättra betongens egenskaper.

3.1.1 Cement

Det hydrauliska bindemedlet cement tillverkas av kalksten som huvudråvara tillsammans med lera. Materialen finmals och bränns i hög temperatur för att sedan kylas ner till formen av kulor eller små klumpar som kallas cementklinker. Cementklinker mals sedan tillsammans med gips för att erhålla cementet. Cement i reaktion med vatten blir cementpasta som hårdnar och bildar en produkt som är beständig mot vatten.

3.1.2 Vatten

Dålig vattenkvalitet kan medföra försämring av betongens hållfasthet och beständighet. Starkt salthaltigt vatten bör till exempel inte användas vid betongtillverkning.

3.1.3 Ballast

Ballast görs av bergarter i olika fraktioner (sten, grus, sand) och utgör en huvudbeståndsdel i betong. De stenar som används vid betongtillverkning kan vara i form av makadam eller singel. Makadam är ett krossat material med ojämn kornform och singel är ett okrossat material med rundade korn. Idag används krossat material som den största delen stenmaterial i betong.

Eftersom strävan är att få en så kompakt betong som möjligt är det av stor betydelse att bergartsmaterialet innehåller korn av varierande storlek och form för att fylla de hålrum som bildas mellan kornen. Återstående hålrumsvolym fylls av cementpastan för att sammanbinda bergartsmaterialet.

Ballastens kornstorleksfördelning kan beskrivas med hjälp av en siktkurva som anges i logaritmisk skala. Utseendet på denna kurva beskriver hur en viss uppvägd mängd bergartsmaterial passerar genom många olika siktar med gradvis avtagande maskvidd.

Man kan genom denna metod bestämma hur stor mängd bergartsmaterial som passerat varje sikt och därmed bestämma ballastens kornstorleksfördelning.

3.1.4 Tillsatsmedel

Tillsatsmedel används för att påverka betongens egenskaper och anpassa den till olika önskemål. Nedan nämns några av de vanligaste typerna.

Flyttillsatsmedel ger en lättflytande betong med god sammanhållning. Medlet gör att vattenhalten i betongen kan minskas med 10 - 30 % utan att bearbetbarheten går förlorad. Detta medför ökad hållfasthet och reducerad krympning. Flyttillsatsmedel är det vanligaste använda tillsatsmedlet.

Vattenreducerande tillsatsmedel ger minskad friktion mellan betongens fasta partiklar vilket medför möjlighet att minska betongens vatteninnehåll utan att bearbetbarheten går förlorad och därmed fås ökad hållfasthet.

Luftporbildande tillsatsmedel gör att det bildas små finfördelade luftporer i cementpastan som medför att betongen blir frostbeständig. Vid övergång från vatten till is sker en volymökning på ca 9 %. Luftporerna ger vattnet i betongen möjlighet att expandera vid isbildning och därmed minskar risken för frostsprängning.

Accelererande och retarderande tillsatsmedel används för att påverka betongens hållfasthetstillväxt samt tillstyvnadsförlopp där acceleratorer påskyndar och retardrar fördröjer processerna.

3.1.5 Tillsatsmaterial

Lindvall & Löfgren (2013) beskriver att användning av tillsatsmaterial kan förbättra betongens egenskaper i både färskt och hårdnat tillstånd. Materialen ersätter delvis cement och ger betongen en tätare struktur samt förbättrad beständighet. Tillsatsmaterialen är oftast puzzolana material vilket betecknar att de reagerar med kalciumhydroxid. Puzzolana material kräver därför tillgång till kalciumhydroxid för att reaktioner ska kunna uppstå. När tillsatsmaterial blandas med cement och vatten uppstår puzzolana reaktioner med kalciumhydroxiden som frigörs vid cementets hydrattation. Detta medför att andra reaktioner sker jämfört med om endast cement används. Detta resulterar i att betongen får andra egenskaper vid användning av tillsatsmaterial. Reaktionen med puzzolana material fortsätter till dess att all kalciumhydroxid är förbrukad och för att fullständig reaktion skall ske finns därför en gräns för hur mycket tillsatsmaterial som kan tillsättas.

I AMA Anläggning 13 (Svensk byggtjänst, 2014), betongstandarden SS-EN 206 och den svenska tillämpningsstandarden SS 137003 regleras användningen av tillsatsmaterial. Standarden SS-EN 206 tar hänsyn till effektivitetsfaktorn, k , vilken inverkan tillsatsmaterialen har på betongen och hur stor mängd som får tas med i beräkningen av det effektiva vattencementtalet, vct_{ekv} . Den mängd tillsatsmaterial som överstiger de tillåtna värdena i SS-EN 206 får inte räknas med i vct_{ekv} . Standarden SS 137003 anger vilka mängder tillsatsmaterial som får användas med hänsyn till exponeringsklass. AMA Anläggning 13 anger ytterligare regleringar om vilka

mängder som får användas. De vanligaste tillsatsmaterial till betong är flygaska, silikastoft och mald granulerad masugnsslagg.

Flygaska är ett tillsatsmaterial som utgörs av en restprodukt från kolpulvereldade kraftverk och består av den mineraliska delen av kolet som inte går att elda. Flygaskans effekt på betongen beror på flera faktorer, bland annat temperaturen under härdning, cementets egenskaper och dosering av tillsatsämnen. Fördelen med flygaska är att betongen får en tätare struktur, lägre värmeutveckling, långsammare tillstyvnad och långsammare hållfasthetsutveckling samt att den går att bearbeta under en längre tidsperiod. Vid gjutning i lägre temperaturer kan ett långsammare tillstyvnade vara en nackdel som dock går att lösa med hjälp av accelererande tillsatsmedel. Eftersom flygaska innehåller rester av obränt kol absorberar dessa luftporbildare och minskar således dess effekt vilket medför att mängden luftporbildare tillsatsmedel vanligtvis måste ökas.

Silikastoft används för att ge betongen en tätare struktur, bättre sammanhållning, mindre blödning (blödning innebär att vattnet tränger upp och lägger sig ovanpå betongen) i färsk betong och för att öka hållfastheten i den hårdnade betongen. Tillsatsmaterialet är ett finkornigt pulver som utgörs av en restprodukt från stålindustrin. För att få maximal effekt av silikastoftet behöver vattenreducerande tillsatsmedel appliceras i betongen. Detta på grund av att vattenbehovet med hänsyn till konsistens ökar vid inblandning av silikastoft. En annan effekt med silikastoft är att risken för plastiska krympsprickor ökar.

Masugnsslagg bildas vid järnframställning. Slagget består av gråberg och kalk som kyls ner och därefter krossas för att få snarlik finhet som cement. Masugnsslagg bidrar till en bättre bearbetbarhet, långsammare tillstyvnad, lägre värmeutveckling och minskat vattenbehov med ca 1 - 10 % beroende på mängden tillsatt slagg. Risk för blödning av betongen ökar vid inblandning av masugnsslagg där ökad finhet hos slagget medför mindre blödning. Enligt Johansson, Ljungkrantz, Möller och Peterson (1997) kan dock inblandning av masugnsslagg i betong med lågt vattencementtal, *vct*, minska hållfastheten.

3.2 Betongens struktur och täthet

I detta avsnitt beskrivs hur fukt- och väsketransport i betong sker genom materialets porsystem samt hur mängden cement och mängden vatten, vattencementtalet, inverkar på betongens täthet.

3.2.1 Betongens porsystem

Johansson (2005) beskriver att betong alltid innehåller en viss mängd vatten som är mer eller mindre bundet till materialet. Kemiskt bundet vatten är det vatten som ingår i betongens struktur. Utöver det kemiskt bundna vattnet finns fysikaliskt bundet vatten i betongens porsystem. Det är absorberat på poryterna och bundet i porsystemet på grund av kapillärkondensation eller kapillärsugning.

Betongens porsystem består av porer med mycket varierande storlek och form. Olika stora porer absorberar olika kraftigt. Det kapillära undertrycket, eller sugningen, är större i små porer. Däremot sugs vatten betydligt snabbare in i stora porer. Detta beror

på att vattnets friktion mot porväggarna är större i små porer. Man kan dela in porerna i olika grupper.

Gelporer är av storleksordningen 1 - 7 nm och de minsta porerna i porsystemet. Vattenmolekylerna i gelporena är så hårt bundna att de inte kan delta i fukttransport.

Kapillärporer är av storleksordningen 0,1 - 100 µm och därmed större än gelporena. Kapillärporer är sammanhängande porer där fukttransport är möjlig.

Luftporer är betydligt större än kapillärporerna. De är enskilda sfäriska porer som inte är i kontakt med varandra men däremot är förbundna med kapillärporsystemet. Luftporerna har lägre sugförmåga än kapillärporerna. Detta resulterar i att när vatten suggs upp i betongen fylls kapillärporerna medan luftporerna förblir luftfyllda och därmed inte bidrar till kapillärsugningen.

3.2.2 Vattencementtal och inverkan på betongens täthet

Betong består av cement, vatten och ballast där beståndsdelarna cement och vatten bildar cementpasta som binder ihop ballastkornen och därmed utgör betongens bindemedel. Egenskaperna hos cementpastan bestäms av förhållandet mellan mängden cement och mängden vatten, vattencementtalet, vct , och definieras

$$vct = \frac{W}{C}$$

där

W är mängden blandningsvatten [kg]
 C är mängden cement [kg]

Lindvall & Löfgren (2013) beskriver att betongens vattencementtal, vct , förändras vid användning av tillsatsmaterial. Materialens inverkan på hållfastheten måste beaktas genom ekvivalent vattencementtal, vct_{ekv} , som definieras

$$vct_{ekv} = \frac{W}{C + k \cdot A}$$

där

W är mängden blandningsvatten [kg]
 C är mängden cement [kg]
 k är en effektivitetsfaktor som beaktar tillsatsmaterialens hållfasthet i förhållande till cementets
 A är mängden tillsatsmaterial [kg]

Nedan visas en tabell på olika tillsatsmaterials effektivitetsfaktor.

| Tillsatsmaterial | Effektivitetsfaktor, k |
|------------------|--------------------------|
| Flygaska | 0,2 - 0,5 |
| Silikastoft | 2,0 |
| Masugnsslagg | 0,6 - 0,8 |

Tabell 3.1 Effektivitetsfaktor, k , för olika tillsatsmaterial.

När betongens olika delmaterial blandas uppstår kemiska reaktioner då cement reagerar med vatten, så kallat hydratation, som gör att betongens hållfasthetsutveckling startar. Reaktionshastigheten är högst under de första timmarna efter blandning och avtar sedan succesivt på grund av att gelstrukturen blir tätare. Den uppnådda hydratationen vid en viss tidpunkt kallas för hydratationsgrad, α , och definieras

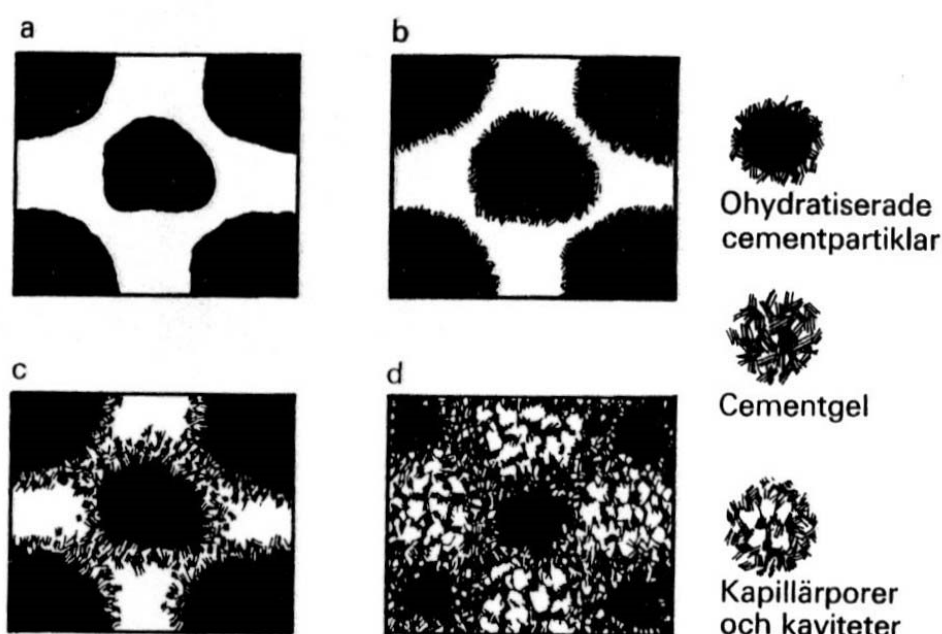
$$\alpha = \frac{C_n}{C}$$

där

C_n är mängden fullständigt hydratiserat cement [kg]

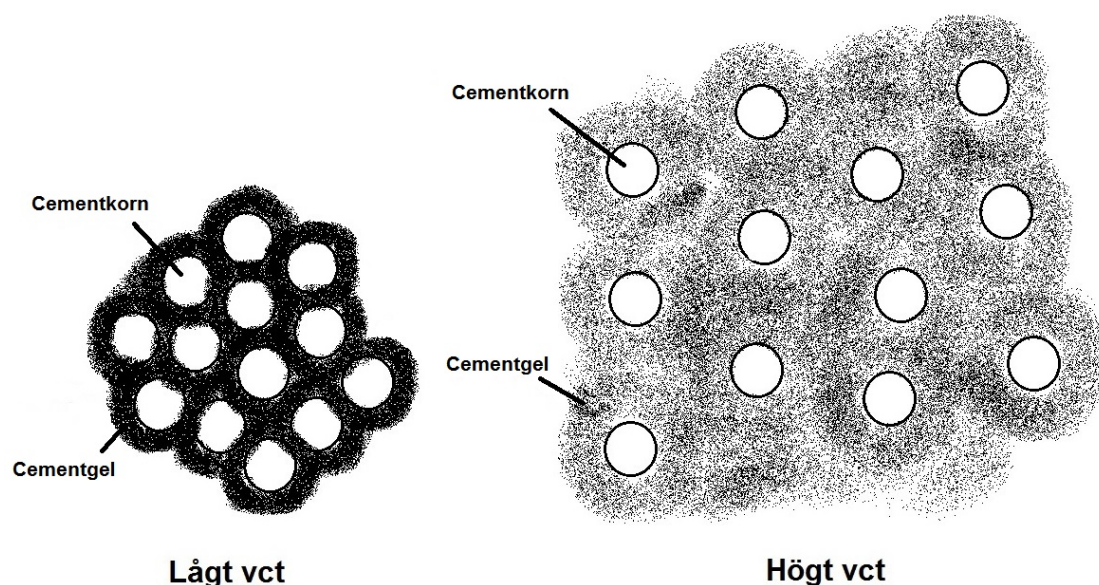
C är totala mängden cement [kg]

Reaktionsprodukterna som uppkommer vid hydratationen bildar en extremt finporös massa så kallad cementgel som omger cementkornens yta och innehåller fina gelporer. Figur 3.1 visar schematiskt cementpastans strukturutveckling när cementkornen reagerar med vatten. Cementgelens volym är större än den volym av cementkorn som reagerat vilket gör att när reaktionen fortgår fylls det ursprungliga porutrymmet mellan cementkornen ut av cementgelen. Cementpastan blir därmed tätare och starkare. Normalt fylls inte allt porutrymme ut av cementgelen. Det kvarstår vissa större hålrum, så kallade kapillärporer, som bidrar till cementpastans permeabilitet.



Figur 3.1 Strukturutveckling hos cementpasta. a) Direkt efter blandning. b) Efter några minuter. c) Vid bindning. d) Efter några månader (Burström, 2007).

Lågt v_{ct} ger en cementpasta med mycket låg porositet och därmed en högpresterande och tät betong. Figur 3.2 visar att avståndet mellan cementkornen minskar vid ett lågt v_{ct} och bildar en tätare porstruktur än vid ett högt v_{ct} .



Figur 3.2 Skillnaden i porstruktur och avstånd mellan cementkorn vid lågt respektive högt v_{ct} .

Ett gränsvärde då kapillärporerna försvinner och helt ersätts med cementgel är vid $v_{ct} = 0,40$. Detta innebär att det vid $v_{ct} > 0,4$ alltid kommer att finnas en viss mängd kapillärporer även när all cement har reagerat. Mängden kapillärporer ökar därmed med ökande vattenhalt i cementpastan. Enligt Nilsson (1997) ökar även fukttransportkoefficienten med ökande v_{ct} , vilket leder till ökad vattentransport genom betongen.

3.2.3 Fukttransport i betong

Nilsson (1997) beskriver att fukt i betong transporteras genom porer i materialet, främst i ång- och vätskefas. Beroende på den relativa fuktigheten i materialet så är det olika mekanismer som dominerar. Vid låg relativ fuktighet transporteras fukten genom att vattenångmolekyler diffunderar genom porerna. Molekylerna absorberas sedan på porväggarna och vid en viss relativ fuktighet så har porerna absorberat så pass mycket att det bildas menisker (vätskan får en konkav/konvex yta). Därefter transporteras fukt genom diffusion i de stora porerna, genom kapillärkondensation och avdunstning i meniskerna samt vätsketransport i de små porerna. När den relativa fuktigheten är hög blir diffusionen mindre betydande och vätskeflödet mer dominerande.

Vätsketransporten i betongen beror på fukttransportkoefficienten, δ . Fukttransportkoefficienten ökar när den relativa fuktigheten ökar eftersom kapillärsugning sker i övervägande del av porsystemet. När den relativa fuktigheten är 100 % så transporteras vattenmolekylerna genom vätsketransport där alla porer förutom luftporerna är fyllda.

3.3 Krympning

Betongens krympning beror på volymminskning som orsakas av kemiska reaktioner vid betongens hydratation samt avdunstning vid uttorkning. Krympning startar redan i ung betong och utvecklas med tiden. Efter lång tid kan krympningen antas nå ett slutligt värde, $\varepsilon_{cs}(\infty)$, och vara i storleksordningen $0,1 \cdot 10^{-3}$ - $0,5 \cdot 10^{-3}$. Det slutliga värdet på betongens krympning är beroende av den omgivande miljöns relativa fuktighet. Betongens krympning beror på olika krympningsfenomen. De kemiska reaktioner som sker i betongen orsakar rörelser inuti dess struktur. Autogen krympning, ε_{ca} , äger rum inne i betongen och är i grunden beroende av dessa kemiska reaktioner. Autogen krympning inträffar helt utan fuktutbyte med den yttre miljön. Ett annat krympningsfenomen är så kallad uttorkningskrympning, ε_{cd} , som utvecklas sakta under lång tid och som genom fuktavgång till omgivningen beror på vattenförlust i betongens inre struktur.

Slutligt krympmått avser medelvärdet över tvärsnittet av betongens fria krympning efter lång tid och beskrivs enligt Eurocode 2 som

$$\varepsilon_{cs}(\infty) = \varepsilon_{cd}(\infty) + \varepsilon_{ca}(\infty)$$

där

$\varepsilon_{cs}(\infty)$ är det totala krympmålet

$\varepsilon_{cd}(\infty)$ är det slutliga värdet på uttorkningskrympningen

$\varepsilon_{ca}(\infty)$ är det slutliga värdet på autogen krympning

Esping & Löfgren (2005) beskriver att det dessutom finns så kallad plastisk krympning. Plastisk krympning uppstår hos betong i plastiskt tillstånd, det vill säga då betongmassan fortfarande är lös och det egentliga hårdnandet inte har börjat.

3.3.1 Uttorkningskrympning

Uttorkningskrympning beror på fuktutbyte med den yttre miljön. En blandning av betong med hög vattenhalt medför att en betydande del vatten inte kommer att delta i hydratiseringsprocessen utan vara lagrat i den hårdnande betongens porsystem. Denna mängd lagrat vatten kommer vid torkning att minska med tiden vilket medför en volymminskning av betongen. Således om betongen innehåller en stor mängd lagrat vatten i porsystemet kommer denna betong att krympa mer. Detta betyder att vattenmängden i betongen har väsentlig inverkan på dess uttorkningskrympning. Även den omgivande miljön har stor betydelse. Om en betongkonstruktion innehållande stor mängd lagrat vatten placeras på en plats där den omgivande miljön är torr, kommer denna att krympa mer och snabbare än på en plats där miljön är fuktig. Förhållandet mellan betongens volym och area av de ytor som påverkas av uttorkning är också en bidragande faktor som påverkar krympningen. Dessutom påverkas utvecklingen av betongens krympning av dess permeabilitet, som är avgörande för fukttransporten.

3.3.2 Autogen krympning

Till skillnad från uttorkningskrympning sker autogen krympning helt utan fuktutbyte med omgivningen. Den uppstår på grund av den kemiska reaktion, hydratation, som

inträffar under betongens härdningsprocess. Autogen krympning har större inverkan på betong med lågt vattencementtal, vct , alltså högpresterande och tät betong. I denna typ av betong kommer den större delen av det tillsatta vattnet att bidra till hydratiseringsprocessen och därmed vara kemiskt bundet till strukturen. Esping & Löfgren (2005) beskriver att om vattentillgången i betongen är begränsad kommer tomma porer med vattenmenisker och ett kapillärt sammandragande undertryck att bildas. Detta leder till autogen krympning där alltså inget fuktutbyte sker till omgivningen.

3.3.3 Plastisk krympning

Enligt Esping & Löfgren (2005) kan plastisk krympning uppkomma i betongens plastiska tillstånd. I detta tillstånd är betongens töjbarhet liten och dess krympning stor. Plastisk krympning innefattar både autogen krympning och avdunstningskrympning och uppkommer om ytan utsätts för tidig uttorkning. När den unga betongens yta utsätts för avdunstning bildas vattenmenisker (krökta vattenytor) mellan partiklarna vid ytan som skapar ett sammandragande undertryck i kapilläerna. Detta undertryck ger upphov till krympning i betongen som beror på att avståndet mellan partiklarna närmst ytan minskar.

3.4 Krypning

Krypning av en betongkonstruktion uppstår vid långtidsbelastning. Det är en spänningsberoende deformation som ökar med tiden. Den totala spänningsberoende deformationen kan delas upp i en initiell elastisk deformation och en krypdeformation. Initiell elastisk deformation av en betongkonstruktion uppkommer direkt vid pålastning och kan återgå till sitt ursprungliga läge då belastningen avlägsnas. Vid långvarig belastning tillkommer en krypdeformation. Denna krypdeformation ökar succesivt vid belastning under lång tid, men kan antas nå ett slutligt värde efter ca 70 år. Eriksson och Fritzon (2014) beskriver att betongkonstruktionens ålder vid pålastning har stor inverkan på krypdeformationen. Om betongen utsätts för pålastning vid tidig ålder kommer dess krypning vara större än om betongen utsätts för samma pålastning vid senare ålder. Kryptöjningen är därmed relaterad till både betongens faktiska ålder t och dess ålder vid pålastning t_0 . Krypdeformation definieras med hjälp av ett tidsberoende kryptal $\varphi(t, t_0)$.

När betong under lång tid utsätts för konstant spänning, σ_c , kan den slutliga kryptöjningen enligt Eurocode 2 definieras som

$$\varepsilon_{c,creep}(\infty) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c}$$

där

| | |
|------------------------|-----------------------------------|
| $\varphi(\infty, t_0)$ | är det slutliga kryptalet |
| t_0 | är betongens ålder vid pålastning |
| σ_c | är betongspänningen |
| E_c | är betongens elasticitetsmodul |

Enligt Eurocode 2 kan det slutliga kryptalet uppskattas som

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

där

φ_{RH} är en faktor som beaktar den relativa fuktigheten, RF, hos omgivningen

$\beta(f_{cm})$ är en faktor som beaktar betongens hållfasthetsklass

$\beta(t_0)$ är en faktor som beaktar betongens ålder vid pålastning

Det slutliga kryptalet är normalt av storleksordningen 1 - 3 och beroende av betongens ålder vid pålastning, betongens sammansättning, omgivningens relativa fuktighet och tvärsnittets storlek. Detta betyder att krypning påverkas av samma faktorer som uttorkningskrympning, vilket antyder att även krypning påverkas av betongens fukttransport. En annan effekt är att krypning minskar tvångsspänningar genom att betongen vid krypning anpassar sig till tvången. Detta innebär att betongens inre spänningar orsakat av dess krympning minskar efter lång tid genom krypning.

4 Problematik med vattentäta betongkonstruktioner

I detta kapitel beskrivs viktiga faktorer som kan ha en negativ inverkan på vattentäta betongkonstruktioners funktion över tid. Orsaker till vattengenomträngning i osprucken betongkonstruktion, sprucken betongkonstruktion samt vattengenomträngning i rörgenomföringar och fogar behandlas.

4.1 Vattengenomträngning i osprucken betongkonstruktion

Enligt Nilsson (1997) beskriver betongens permeabilitet dess egenskap att släppa igenom vätska som står under tryck. Permeabiliteten i betongen, som är motsatsen till materialets täthet, bestäms av cementpastans permeabilitet, som i sin tur styrs av dess vattencementtal, w/c , och hydratationsgrad. När vätskan tar sig igenom betongkonstruktioner sker det endast genom öppna kontinuerliga porer. Den mängd vätska som tar sig igenom beror på vattentrycket och porernas fördelning, storlek och sammanhängning.

Transport av vätska genom en betongsektion från sida till sida kan delas upp i två skeden. Det första skedet är ett inträngningsförlopp som beror på såväl kapillärsugning som övertryck. I detta skede fylls samtliga porer allt eftersom vattnet tar sig igenom betongen. Vid lägre övertryck blir kapillärsugning mer dominerande. I det andra skedet nås jämvikt och den tillförda mängden vatten är lika stor som den bortförda.

4.2 Vattengenomträngning i sprickor

Betongkonstruktioners totala täthet är inte enbart beroende av betongens täthet. Sprickor i konstruktioner har också stor betydelse. Dessa sprickor kan uppstå under byggskedet men även under bruksskedet. I detta avsnitt beskrivs orsaker till sprickbildning och dess inverkan på vattengenomträngningen.

4.2.1 Sprickors inverkan på betongkonstruktioners vattentäthet

Nilsson (1997) beskriver att vattengenomträngningen ökar avsevärt om en betongkonstruktion har sprickor. Exempelvis genom en 200 mm tjock betongplatta till en bassäng med 10 m vattendjup läcker ca $1 \text{ kg}/(\text{dygn} \cdot \text{m}^2)$. Om det i samma platta finns en 0,1 mm bred och 1 m lång spricka per m^2 blir läckaget ca $2500 \text{ kg}/(\text{dygn} \cdot \text{m}^2)$. För att kontrollera om en betongkonstruktion uppfyller kraven på vattentäthet kan denna testas genom att bassängen fylls upp för att sedan mäta hur mycket vattenytan har sänkts efter en vecka.

4.2.2 Temperatursprickor

Enligt Peterson (1997) frigörs värme under hydratationsprocessen, först i blandaren och sedan när cementet börja binda. Blandningen når sin värmetopp efter 10 till 20 timmar. Dessa temperaturskillnader uppstår när de yttre delarna svalnar av snabbare och får en lägre temperatur än de centrala delarna av konstruktionen. Temperaturskillnader leder till inbördes olika behov av temperaturrörelser vilket kan orsaka sprickor. Emborg, Bernander, Ekerfors, Groth och Hedlund (1997) beskriver

att begränsad möjlighet för den nygjutna betongen att röra sig i förhållande till yttre tvång också kan orsaka sprickor. Även omgivningens temperatur har inverkan på uppkomsten av dessa sprickor. Temperatursprickor är vanligast i grova betongkonstruktioner eftersom temperaturökningen i konstruktionen kan bli långvarig, ojämn och stor. Dessa sprickor kan dock även uppstå i tunnare konstruktioner om temperaturskillnaden blir stor mellan den nygjutna betongen och den motgjutna konstruktionen. Temperatursprickor kan förekomma som genomgående sprickor eller som ytsprickor.

När den nygjutna betongen svalnar kan sprickor som går rakt igenom betongtvärsnittet, genomgående sprickor, uppstå om konstruktionens rörelsemöjlighet är förhindrad. Dessa kan uppkomma till exempel när betongen motgjutts mot andra betongkonstruktioner. Genomgående sprickor kan även uppkomma under uppvärmningsfasen genom att den motgjutna konstruktionen utsätts för en påtvingad förlängning.

Eftersom temperaturen varierar över betongtvärsnittet kan ytsprickor uppstå. Dessa uppstår tidigt under temperaturökningen. Betongens inre del blir vanligtvis varmare och behöver expandera mer än den yttre delen vilket leder till dragspänningar i den yttre delen som kan orsaka ytsprickor.

4.2.3 Krympsprickor

Engström (2011) beskriver att uppkomsten av sprickor i betongkonstruktioner orsakade av krympning beror på att den fria krympningen förhindras, vilket ger upphov till dragspänningar i betongen. När dessa dragspänningar uppnår betongens draghållfasthet uppkommer krympsprickor. I praktiken kan fri krymprörelse förhindras genom inre eller yttre tvång. Inre tvång beror på att olika delar av ett tvärsnitt har olika behov av krymprörelser, till exempel skillnaden mellan betong och armering medan yttre tvång beror på låsningar vid konstruktionens ränder.

Esping & Löfgren (2005) beskriver att de bidragande faktorer som påverkar uppkomsten av krympsprickor är:

- Betongsammansättning
- Omgivningens klimat
- Avdunstningshastighet
- Tidig uttorkning
- Bristfälliga uttorkningsåtgärder (täckning, vattenbegjutning och membranhärdning)
- Betongens härdning
- Konstruktioners tjocklek
- Konstruktioners fuktisolering

4.2.4 Sprickor orsakat av stödförskjutning

Enligt Peterson (1997) kan sättningar i marken under en betongkonstruktion ge upphov till tvångskrafter vilket kan leda till att det uppkommer sprickor. Eftersom hela konstruktionen i någon form är sammanhängande med marken kan sprickor framkomma även på sekundärkonstruktioner till exempel mellanväggar och inåtgående hörn.

4.2.5 Sättsprickor

Peterson (1997) beskriver att vattenseparationen i nygjuten betong ger upphov till sättningar som resulterar i att betongens överyta sjunker. Om betongen lokalt hindras att sätta sig, till exempel på grund av armering, så bildas sättsprickor när ytan blir tillräckligt hård. Sprickorna uppkommer tidigt, oftast 1 - 3 timmar efter gjutning. Sprickorna blir inte djupa men kan däremot bli breda, uppåt 5 mm. Om täcksiktet är tunt blir sprickbildningen mer omfattande.

4.2.6 Belastningssprickor

Enligt Peterson (1997) uppstår belastningssprickor i betongkonstruktioner som regel när den utsätts för normala brukslaster. Genom lämplig armeringsutformning kan en god sprickfördelning med många och fina sprickor uppnås, oftast med en sprickvidd mindre än 0,3 mm. Om en betongkonstruktion utsätts för lokal överbelastning eller om täcksiktet är litet och vidhäftningsspänningarna är höga kan även detta leda till sprickbildning.

4.3 Vattengenomträngning i rör genomföringar och fogar

Vid byggnation av vattentäta betongkonstruktioner resulterar ofta rör genomföringar och fogar i otätheter. Nedan sammanställs en intervju med Langefors (2016-03-22) som utfördes för att beskriva täthetsproblematiken med rör genomföringar och fogar.

Rör genomföringar i betongkonstruktioner kan utföras genom att röret gjuts in i betongkonstruktionen eller att en öppning för rör genomföringen sågas upp i befintlig betongkonstruktion. Oavsett metod uppstår kritiska kontaktytor som kan leda till otätheter. När konstruktionen belastas kan hål även innebära lokala försvagningar i konstruktionen som kan resultera i spänningskoncentrationer och sprickbildning. Dessa försvagningar beaktas genom att placera extra armering lokalt runt rör genomföringen för att förhindra att sprickor kan tillväxa och utbreda sig obehindrat.

Fogar är i regel otäta. Vid motgjutning till befintlig betongkonstruktion blir den nygjutna konstruktionsdelen inte homogent förbunden med den befintliga utan fogen utgör ett svaghetsplan där vatten kan tränga fram. För att förhindra vattengenomträngning i fogar kan olika typer av utformningar användas. Dessa typer beskrivs i avsnitt 5.3.

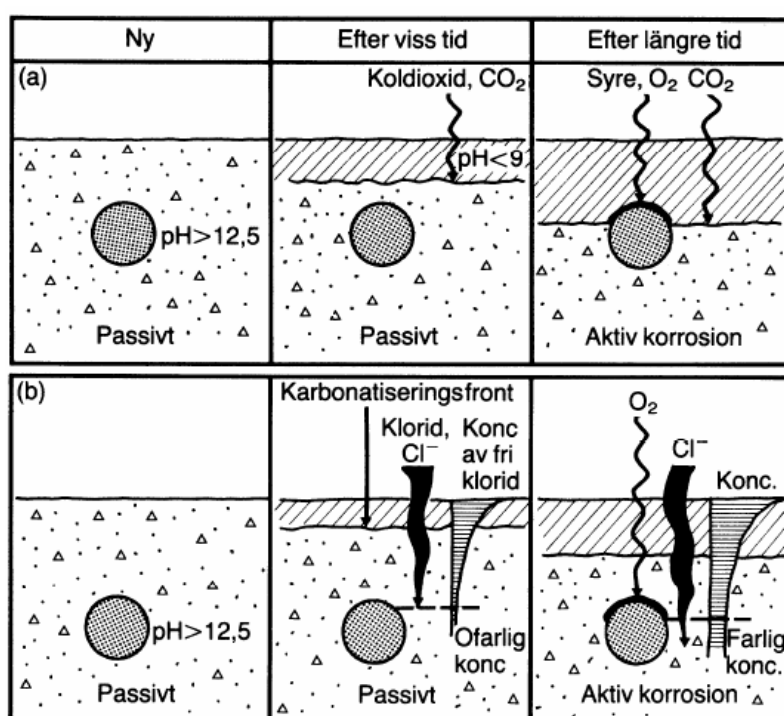
4.4 Beständighetsproblem

Burström (2007) beskriver olika beständighetsproblem som kan uppstå hos betongkonstruktioner. Nedan listas några av de vanligaste typerna.

Frostangrepp kan ske genom att vatten i betongens porer fryser till is. Porvattnet vid frysning genomgår en volymutvidgning på 9 %. Betongen har en begränsad volymtöjningsförmåga vilket leder till att vattnet i betongens porer inte kan expandera fritt. Detta medför att det kan uppstå så pass stora spänningar inne i betongen att den sprängs sönder.

Armeringskorrosion kan leda till att betongkonstruktioners bärförmåga påverkas genom att stålet får en reducerad tvärsnittsarea. Stålets volymökning vid omformning till rost kan även leda till att betongen spricker. Detta beror på att korrosionsprodukterna som bildas upptar en större volym än det ursprungliga armeringsstålet vilket skapar ett inre tryck i betongen.

Armeringskorrosion kan uppkomma av två orsaker, karbonatisering av betongen eller kloridinträngning, se Figur 4.1. I vissa miljöer sker kloridinträngning i betongen och ger en kloridkoncentration som avtar inåt i konstruktionen. Om halten av fria kloridjoner överstiger ett visst värde kan koncentrationen orsaka korrosion av armeringsstålet. Karbonatisering orsakas av att koldioxid (CO_2) från luften i omgivningen tränger in i betongen och kemiskt reagerar med dess kalciumhydroxid. Denna kemiska reaktion bildar en zon av karbonatiserad betong med ett skadligt lågt pH-värde. När denna zon når armeringsstålet börjar stålet rosta.



Figur 4.1 Olika stadier i korrosionsprocessen. a) Korrosion orsakad av karbonatisering. b) Korrosion orsakad av kloridinträngning (Burström, 2007).

Kemiskt angrepp kan uppkomma på grund av ämnen som antingen tränger in i och reagerar med betongen eller ämnen som löser upp den. Oorganiska syror, till exempel salt-, salpeter- och svavelsyra, är ämnen som löser upp cementpastans komponenter på grund av att cementpastan är så starkt basisk. Rent vatten som sipprar in genom betongen kan också förstöra den. Detta kallas kalkurlakning och orsakas av att vattnet gradvis löser ut den kalciumhydroxid som bildats i cementpastan varvid porositeten ökar, och hållfastheten minskar. Enligt Fagerlund (1989) kan även vissa ballastmaterial reagera med cementpastan varvid en fuktupptagande, svällande och sprängande gel bildas. Detta sker då det alkalirika porvattnet i cementpastan reagerar

med så kallad sprängande ballast som innehåller alkalilöslig kiselsyra. Detta angrepp är mycket farligt och kan förstöra betongen fullständigt.

5 Metoder för att uppfylla täthetskrav

I detta kapitel behandlas olika åtgärder som påverkar betongkonstruktioners täthet. Metoder för att minimera uppkomsten av sprickor, minimera sprickvidd samt olika typer av rör genomföringar och fogar beskrivs.

5.1 Osprucken betongkonstruktion

Informationen i detta avsnitt baseras huvudsakligen på intervju med Andersson (2016-04-28) som redovisar typiska åtgärder som entreprenören gör på byggsplatsen.

Enligt Andersson (2016-04-28) kontrolleras en följesedel när betongen anländer till byggarbetsplatsen för att försäkra sig om att rätt betong har levererats. På följesedeln står bland annat vilket vattencementtal (*vct*) som betongen har samt hur stor mängd av varje delmaterial som finns i betongblandningen.

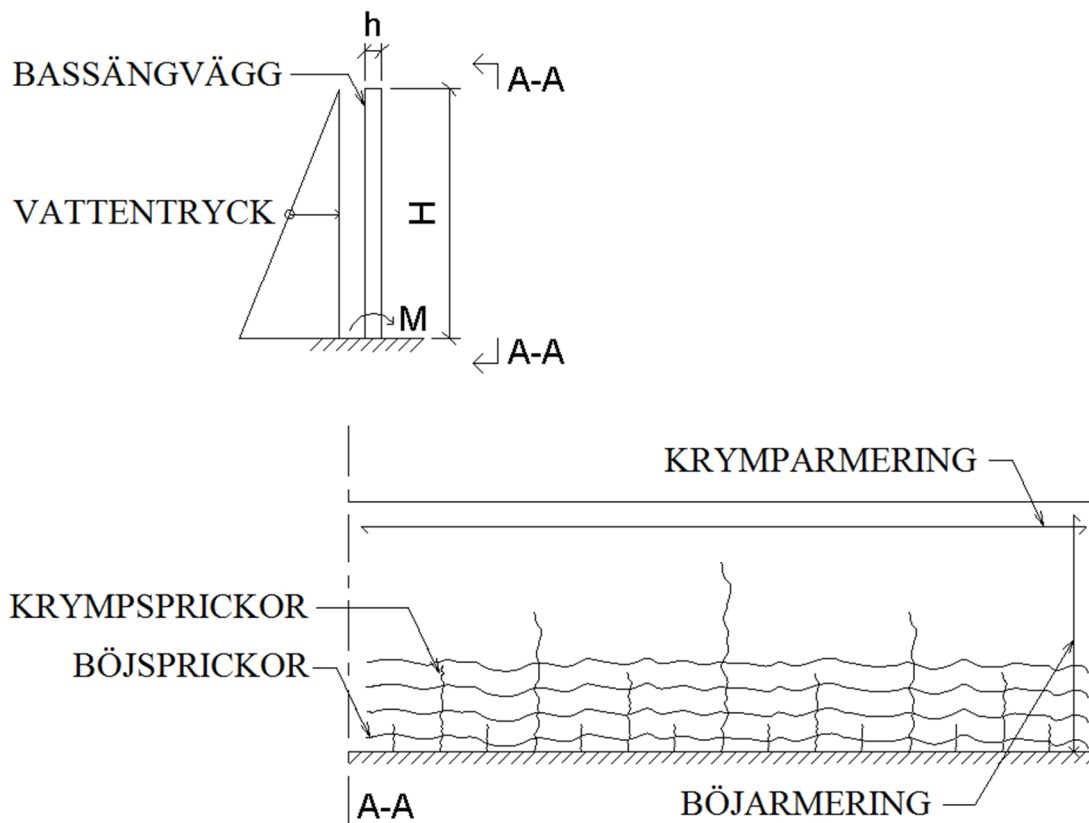
Gjuthöjderna är viktiga för att säkerhetsställa en tät betong. Vid gjutning av betongväggar är en gjuthöjd om ca 1 m lämpligt för att kunna vibrera betongen. Det är även viktigt att hålla rätt vibreringstider för att minimera risken för sprickbildning.

För den som ansvarar för utförandet av betongkonstruktioner ställer standarden SS 137006 (SIS, 2015) krav på kompetens som delas in i tre kompetensklasser I-U, II-U och III-U. Kompetensklassen I-U ställer högst krav på erfarenhet och utbildning och III-U ställer lägst krav där endast erfarenhet av betongarbeten krävs. Krav som är av intresse vid gjutning av vattentäta betongkonstruktioner är bland annat arbete med betongklasser över C25/30 som innefattas av kompetensklass I-U samt utförande av betong med krav på vattengenomträngning som innefattas av kompetensklass II-U.

5.2 Sprickor i betongkonstruktioner

Sprickor i betongkonstruktioner resulterar ofta i otätheter och läckage. Sprickor behöver därför beaktas vid projektering av vattentäta betongkonstruktioner. I avsnitt 4.2 beskrivs orsaker till sprickbildning som bland annat kan vara att konstruktionen utsätts för yttre laster i form av vattentryck eller att rörelser på grund av betongens krympning helt eller delvis förhindras genom tvång.

Figur 5.1 visar en typsektion av en bassängvägg som utsätts för vattentryck. Vattentrycket på bassängväggens insida varierar utefter höjden som en triangulärt fördelad utbredd last och ger upphov till ett böjande moment i väggens nederkant som kan orsaka böjsprickor.



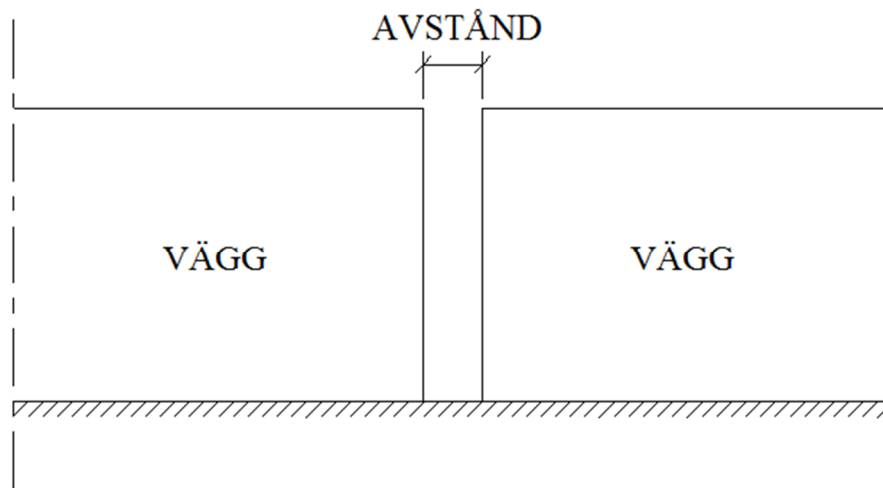
Figur 5.1 Typsektion av en bassängvägg som utsätts för vattentryck.

För att begränsa uppkomsten av horisontala böjsprickor armeras konstruktionen med vertikal böjarmering enligt figur 5.1.

Eftersom vattentrycket på bassängväggens insida varierar utefter höjden varierar också det böjande momentet. Högt upp i bassängväggen är det böjande momentet litet jämfört med längre ner vilket leder till att såväl väggjocklek som armeringsmängd kan tillåtas variera utefter höjden.

När betongväggar gjuts mot befintlig bottenplatta uppkommer en fastlåsning i anslutningen mellan vägg och bottenplatta som kan resultera i krympsprickor i väggen. Tvånget innebär att betongväggens fria krympning förhindras vilket leder till dragspänningar och risk för krympsprickor. För att begränsa sprickvidden hos vertikala krympsprickor armeras konstruktionen med horisontal krymparmering enligt figur 5.1.

Betongväggar gjuts ofta i etapper med antingen breda eller smala fogar mellan väggdelarna. Indelning av gjutetapper görs för att minska den gjutna väggens totala tvång. Figur 5.2 visar principen för en gjutetapp av en bassängvägg. Eftersom väggdelen inte är fastgjuten i sidorna utsätts den endast för tvång i nedkant i anslutning till bottenplatta. Avståndet mellan väggarna fylls sedan med betong.



Figur 5.2 Princip för en gjutetapp av en bassängvägg.

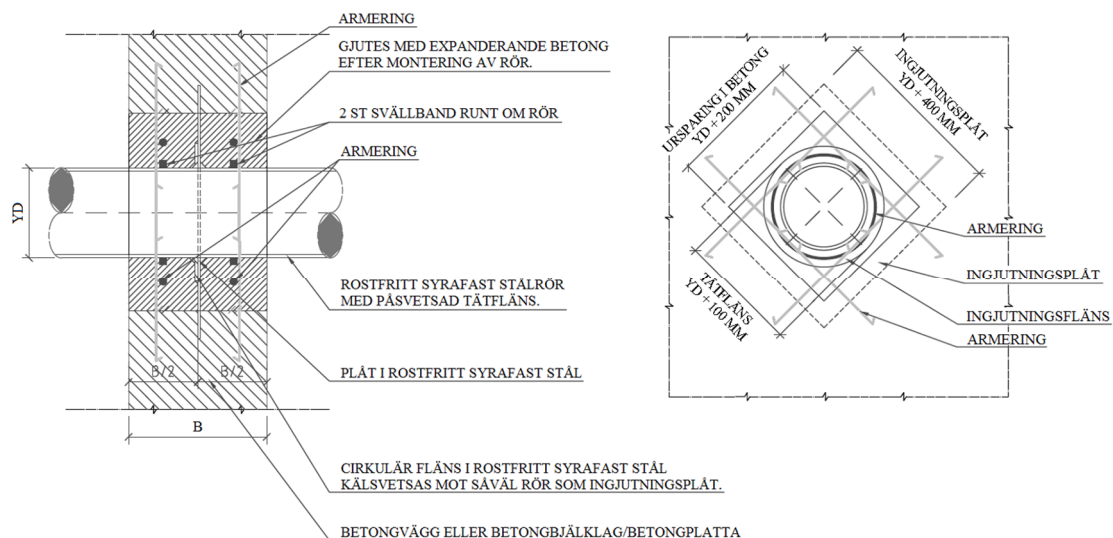
5.3 Rör genomföringar och fogar

I detta avsnitt beskrivs vanliga typer av rör genomföringar och fogar som används vid projektering av vattentäta betongkonstruktioner på Sweco Structures AB.

Rör genomföring med ingjutningsplåt vid nyproduktion

Figur 5.3 visar ett typiskt exempel på rör genomföring med ingjutningsplåt. Ingjutningsplåt gjuts in vid formsatt ursparning och ett hål för röret skärs upp i ingjutningsplåten. Röret kälsvetsas mot ingjutningsplåt och svällband samt armering placeras runt om röret. Ursparning kringgöts sedan med expanderande betong.

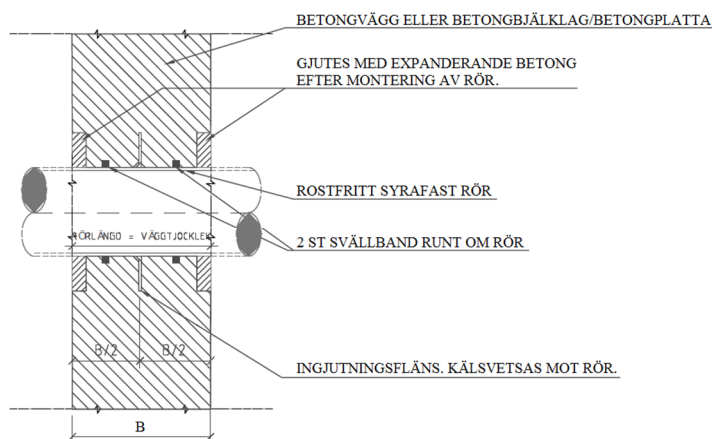
Ingjutningsplåt får inte roteras. Den ska placeras med spets nedåt enligt figur 5.3 så att luftfickor i betongen undviks.



Figur 5.3 Rör genomföring med ingjutningsplåt.

Rör genomföring med kälsvetsad fläns, anslutning av rör på båda sidor, vid nyproduktion

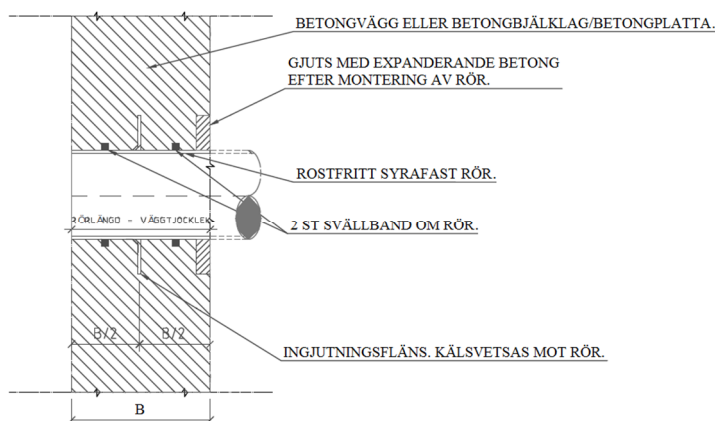
Figur 5.4 visar ett typiskt exempel på rör genomföring med kälsvetsad fläns, anslutning av rör på båda sidor. Rör med kälsvetsad tätfläns placeras i gjutform och svällband samt armering placeras runt om röret. För att montagesvetsa anslutande rör utförs en ursparing runt om röret på båda sidor. Efter att anslutande rör har montagesvetsats kringgjuts röret med expanderande betong.



Figur 5.4 Rör genomföring med kälsvetsad fläns, anslutning av rör på båda sidor.

Rör genomföring med kälsvetsad fläns, anslutning av rör på en sida, vid nyproduktion

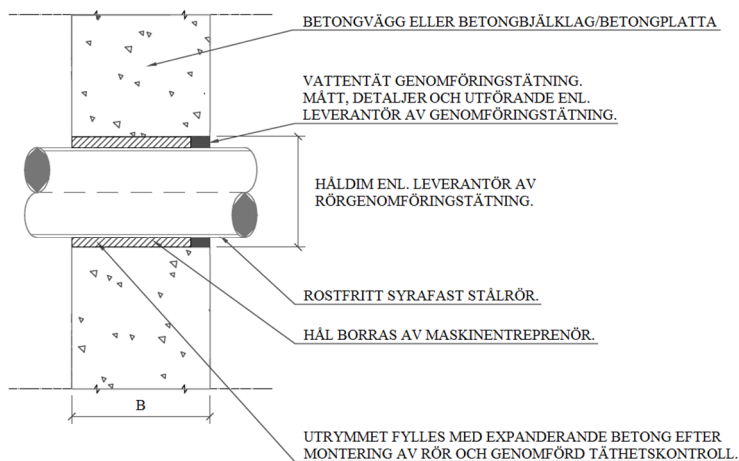
Figur 5.5 visar ett typiskt exempel på rör genomföring med kälsvetsad fläns, anslutning av rör på en sida. Rör med kälsvetsad tätfläns placeras i gjutform och svällband samt armering placeras runt om röret. För att montagesvetsa anslutande rör utförs en ursparing runt om röret på en sida. Efter att det anslutande röret har montagesvetsats kringgjuts röret med expanderande betong.



Figur 5.5 Rör genomföring med kälsvetsad fläns, anslutning av rör på en sida.

Rör genomföring i befintlig betongkonstruktion

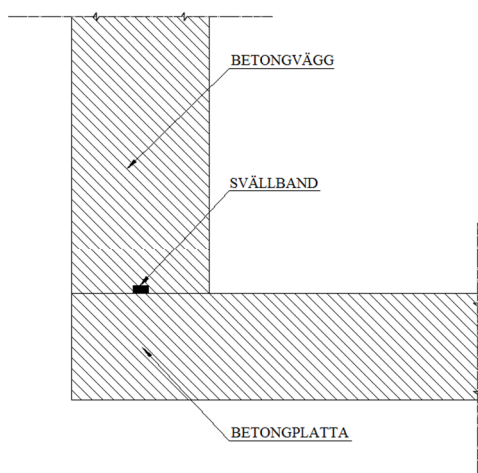
Figur 5.6 visar ett typiskt exempel på rör genomföring i befintlig konstruktion. Rör genomföringen utförs genom att ett cirkulärt hål borras i färdiggjuten betongkonstruktion för att placera röret i hålet. Utrymmet mellan rör och konstruktion fylls med expanderande betong. För extra täthet appliceras en vattentät genomföringstätning vid öppningen.



Figur 5.6 Rör genomföring i befintlig betongkonstruktion.

Fog med svällband

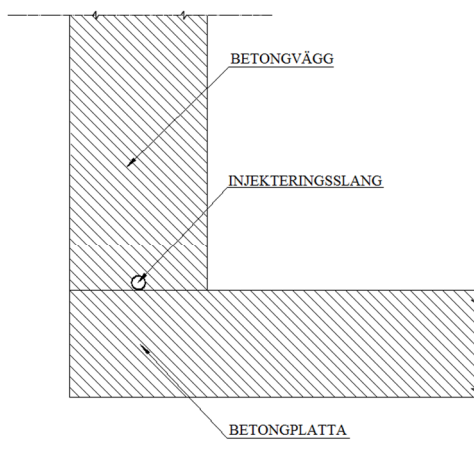
Figur 5.7 visar ett typiskt exempel på fog med svällband. Svällband av bentonitlera eller syntetiskt material placeras på befintlig betongkonstruktion som ska motgjutas för att motverka vattengenomträngning vidare in i fogen.



Figur 5.7 Fog med svällband.

Fog med injekterings slang

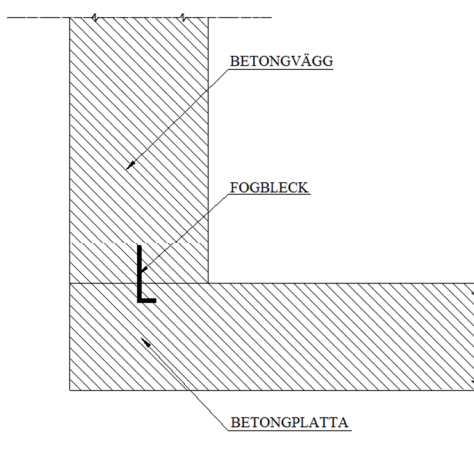
Figur 5.8 visar ett typiskt exempel på fog med injekterings slang. Slang med små hål placeras i fogen vid motgjutning till befintlig konstruktion som vid läckage injekteras med en massa som expanderar och förhindrar vattengenomträngning.



Figur 5.8 Fog med injekterings slang.

Fog med fogbleck

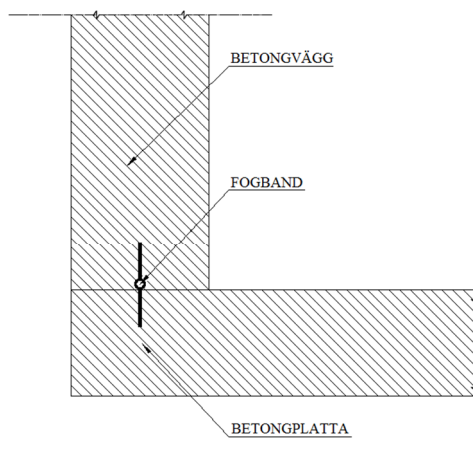
Figur 5.9 visar ett typiskt exempel på fog med fogbleck. Denna typ av fog utförs genom att ett stålbleck ställs ovanpå överkantsarmeringen i bottenplattan och gjuts in i fogen mellan vägg och bottenplatta. Fogblecket förhindrar att vatten tränger vidare in i fogen. Denna typ av utformning finns i kombination med svällband som appliceras på fogblecket för ökad täthet.



Figur 5.9 Fog med fogbleck.

Fog med fogband

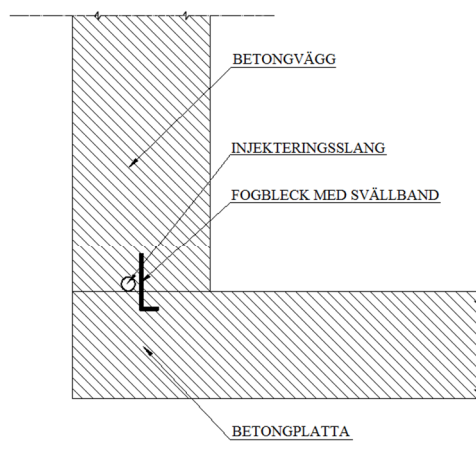
Figur 5.10 visar ett typiskt exempel på fog med fogband. Band av syntetiskt gummi placeras i fog mellan vägg och bottenplatta för att förhindrar vattengenomträngning vidare in i fogen.



Figur 5.10 Fog med fogband.

Fog med injekterings slang + fogbleck med svällband

Figur 5.11 visar ett typiskt exempel på fog med injekterings slang + fogbleck med svällband. Denna kombination ger en ökad täthet med hänsyn till vattengenomträngning. Slangen placeras på den torra sidan av fogblecket för att inte bli vattenfylld vid eventuellt läckage.



Figur 5.11 Fog med injekterings slang + fogbleck med svällband.

6 Projektering av vattentäta betongkonstruktioner

Risken för sprickor och otätheter i rör genomföringar och fogar behöver beaktas vid projektering av vattentäta betongkonstruktioner. För att minimera vattengenomträngning och läckage dimensioneras betongkonstruktioner för att uppfylla olika täthetskrav.

6.1 Begränsning av sprickor

Vid dimensionering av vattentäta betongkonstruktioner ställs bland annat krav på sprickvidd som beror på armeringsmängden i betongtvärsnittet. I detta kapitel redovisas beräkningar avseende böjande moment och krympning där olika erforderliga armeringsmängder för att uppfylla sprickviddskrav sammanställs.

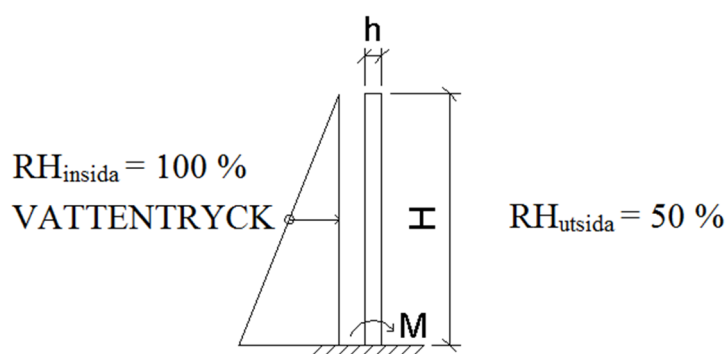
Jämförelsen avser endast konstruktioner innehållande dricksvatten vilket gör att exponeringsklass XC2 kan tillämpas. Bassänger i vattenbyggnadskonstruktioner är ofta placerade i inomhusmiljö vilket gör att fuktigheten på utsidan av bassängen är $RH_{\text{utsida}} = 50\%$. Eftersom konstruktionen innehåller vatten på bassängens insida antogs $RH_{\text{insida}} = 100\%$. För att förenkla beräkningar med avseende på krympning användes ett medelvärde mellan bassängens in- och utsida,

$$RH_{\text{medel}} = \frac{RH_{\text{utsida}} + RH_{\text{insida}}}{2} = 75\%.$$

Eftersom applicering av membran eller liknande ytbeläggning inte beaktas gjordes inga beräkningar i täthetsklass 3.

Centrumavståndet mellan armeringsstängerna, s , bör vara minst 100 mm. Uppfylls inte detta krav blir genomförandet vid gjutning problematiskt samt svårt för byggarbetarna att armera konstruktionen.

För att jämföra erforderliga armeringsmängder för olika täthetsklasser utformades en typsektion av en bassängvägg enligt figur 6.1.

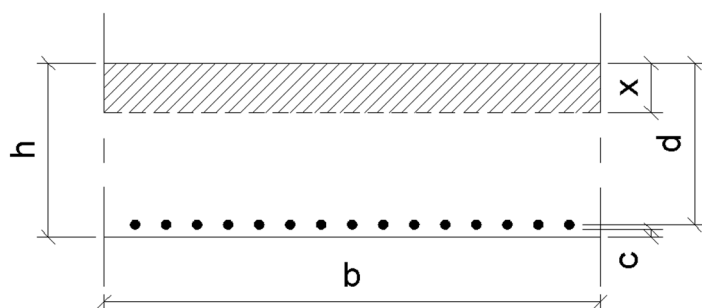


Figur 6.1 Typsektion av en bassängvägg.

6.1.1 Sprickor orsakade av böjande moment

I detta avsnitt presenteras beräkningar avseende böjande moment enligt standarden SS-EN 1992-1-1 (SIS, 2005) som tolkas med hjälp av fib Model Code 2010, fib (2013). Nedan sammanställs olika armeringsmängder som krävs för att uppfylla krav på sprickvidd för de olika täthetsklasserna som beskrivs i avsnitt 2.2.2.

Figur 6.2 illustrerar ett horisontellt tvärsnitt genom en bassängvägg utsatt för böjande moment från vattentryck.



Figur 6.2 Horisontellt tvärsnitt genom bassängvägg utsatt för böjande moment från vattentryck.

| | |
|--|-----------------------------------|
| c_{\min} | Minsta täckande betongskikt |
| $c = c_{\min} + 10 \text{ mm}$ | Täckande betongskikt med tolerans |
| $d = h - c - \frac{\phi}{2}$ | Effektiv tvärsnittshöjd |
| $\phi = \{8, 10, 12, 16, 20, 25, 32\}$ | Armeringsstångernas diameter |

Vid beräkning av dragspänningen i armeringen avseende böjande moment i bruksgränstillstånd togs ingen hänsyn till krympningen inverkan på neutrallagrets läge. Detta beror på att krympningen har liten inverkan på dragspänningen i armeringen.

Beräkningarna utfördes i konstruktionens värsta snitt som är där momentet är som störst. Detta snitt är längst ner i väggen där väggen möter bottenplatta.

Vid dimensionering med hänsyn till sprickviddskrav ökades armeringsmängden, A_s , tills kravet uppfylldes att karakteristisk sprickvidd, w_k , är mindre än acceptabel sprickvidd, w_{\max} .

Last

Permanent last:

$$\gamma_{\text{vatten}} = \rho_{\text{vatten}} \cdot g$$

$$G_{\text{kar, vatten}} = \gamma_{\text{vatten}} \cdot H$$

Säkerhetsklass 3: $\gamma_d = 1,0$

Lastkombination

Enligt standarden SS-EN 1990 (SIS, 2002)

Brottgränstillstånd (ULS):

Ekvation 6.10a

$$q_{\text{ULS}} = \gamma_d \cdot \gamma_{G,j,\text{sup}} \cdot G_{\text{kar, vatten}}$$

Moment

$$M_{\text{ULS}} = \frac{q_{\text{ULS}} \cdot H^2}{6}$$

Bruksgränstillstånd (SLS):

Ekvation 6.16a

$$q_{\text{SLS}} = G_{\text{kar, vatten}}$$

Moment

$$M_{\text{SLS}} = \frac{q_{\text{SLS}} \cdot H^2}{6}$$

6.1.1.1 Täthetsklass 0

Förutsättningar

Vid beräkningar av armeringsmängd i täthetsklass 0 valdes vct och sprickvidd enligt avsnitt 7.3.1 i standarden SS-EN 1992-1-1 som tar hänsyn till beständighetskrav. Exponeringsklass XC2 ställer krav på att maximalt vattencementtal högst ska vara $vct = 0,60$ och ett minsta täckande betongskikt, $c_{\text{min}} = 25$ mm.

Geometri:

Vägghöjd, $H = 5,0$ m

Väggtvärnsnittets höjd, $h = 350$ mm

Väggtvärnsnittets bredd (enhetsbredd), $b = 1,0$ m

Exponeringsklass:

XC2

Max $vct_{\text{ekv}} = 0,6$

$c_{\text{min}} = 25$ mm $\rightarrow c = 35$ mm

Sprickviddskrav, $w_k < w_{\text{max}} = 0,4$ mm

Livslängd:

L 100

Betong:

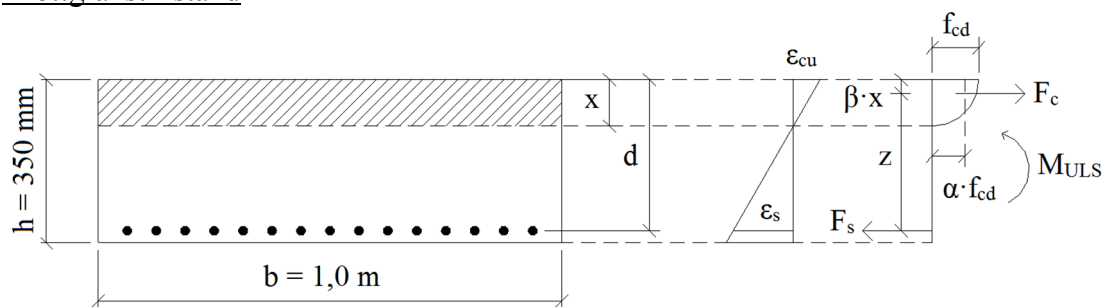
C30/37

Armering:

Föga korrosionskänslig armering

$\phi 20$ B500B

Brottgränstillstånd



Figur 6.3 Tvärsnittsmodell för analys i brottgränstillstånd.

Krafter:

$$F_c = \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$F_s = \sigma_s \cdot A_s$$

Kraftjämvikt:

$$F_c = F_s$$

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x = \sigma_s \cdot A_s$$

Moment kring F_s :

$$M_{ULS} = F_c \cdot (d - \beta x) = \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \cdot (d - \beta x)$$

$$\rightarrow x = 62 \text{ mm.}$$

Ståltöjning:

$$\varepsilon_s = \frac{d - x}{x} \cdot \varepsilon_{cu} \geq \varepsilon_{syd}$$

Insättning av x i kraftjämvikt:

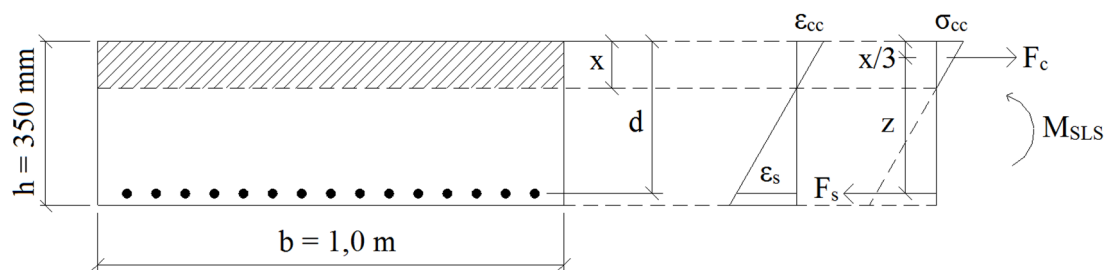
$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x = \sigma_s \cdot A_s$$

$$\rightarrow A_s = 2318 \text{ mm}^2$$

Se bilaga A för beräkningar.

Svar: Erforderlig armeringsmängd för dimensionering i brottgränstillstånd ger $A_s = 2318 \text{ mm}^2/\text{m}$, vilket motsvarar $\phi 20$, s136.

Bruksgränstillstånd



Figur 6.4 Tvärsnittmodell för analys i bruksgränstillstånd.

Som ett ingångsvärde vid beräkning av sprickvidd användes som en första ansats samma armeringsmängd som erfordrades vid beräkning i brottgränstillstånd. Om armeringsmängden inte var tillräcklig för att uppfylla sprickviddskravet ökades armeringsmängden tills kravet uppfylldes.

Slutligt kryptal:

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1,659$$

Effektiva E-moduler:

$$\alpha_{ef} = \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi(\infty, t_0)) = 16,114$$

Slutligt krypmått:

$$\varepsilon_{cs}(\infty) = \varepsilon_{cd}(\infty) + \varepsilon_{ca}(\infty) = 2,733 \cdot 10^{-4}$$

Tyngdpunktsekvation:
$$b \cdot x \cdot \frac{x}{2} = \alpha_{ef} \cdot A_s \cdot (d - x)$$

$$\rightarrow x = 121 \text{ mm}$$

Moment kring F_c :
$$M_{SLS} = F_s \cdot z = \sigma_s \cdot A_s \cdot (d - \frac{x}{3})$$

$$\rightarrow \sigma_s = 316 \text{ MPa}$$

Karakteristisk sprickvidd:
$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs})$$

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,ef}} = 0,244 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ctm}(t)}{\rho_{p,ef}} \cdot (1 + \alpha \cdot \rho_{p,ef})}{E_s} + \varepsilon_{cs}$$

$$= 1,639 \cdot 10^{-3} > 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 9,47 \cdot 10^{-4}$$

$$w_k = 0,4 \text{ mm}$$

Se bilaga A för beräkningar.

Svar: Erforderlig armeringsmängd för dimensionering i bruksgränstillstånd, för att klara sprickviddskravet, $w_k < w_{max} = 0,40 \text{ mm}$, ger $A_s = 2495 \text{ mm}^2/\text{m}$, vilket motsvarar $\phi 20, s126$.

Resultat

Bruksgränstillstånd blir dimensionerande och ger armeringsmängden $A_s = 2495 \text{ mm}^2/\text{m}$, vilket motsvarar $\phi 20, s126$. Vald stångdiameter $\phi 20$ är den minsta som krävs för att klara minsta avstånd mellan armeringsstängerna, $s100$. Mindre stångdiameter ger därmed mindre avstånd mellan armeringsstängerna.

6.1.1.2 Täthetsklass 1

Förutsättningar

Täthetsklass 1 har ett högre täthetskrav på betongen än täthetsklass 0 och därför valdes ett lägre v_{ct} med en högre betongklass. I avsnitt 3.2.1 beskrivs att det finns ett gränsvärde för vattencementtalet som resulterar i en tätare betong. Detta gränsvärde är $v_{ct} = 0,40$ och används därför vid dimensionering i täthetsklass 1.

Ett annat krav som skiljer sig mellan täthetsklass 1 och täthetsklass 0 är sprickviddskravet som blir högre. Se avsnitt 2.2.2.

Med aktuell vägg tjocklek på 350 mm och med vägg höjden 5,0 m beräknas acceptabel sprickvidd, $w_{kl} = -0,005 \cdot \frac{5}{0,350} + 0,225 = 0,154 \text{ mm}$.

Geometri: Vägg höjd, $H = 5,0 \text{ m}$
 Vägg tvärsnittets höjd, $h = 350 \text{ mm}$

Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd), $b = 1,0$ m

Exponeringsklass: XC2
 $c_{\min} = 32$ mm $\rightarrow c = 42$ mm

Livslängd: L 100

Betong: C40/50
 $v_{ct} = 0,40$

Armering: Föga korrosionskänslig armering
 $\phi 20$ B500B

Brottgränstillstånd

Se bilaga A för beräkningar.

Svar: Erforderlig armeringsmängd för dimensionering i brottgränstillstånd ger $A_s = 2220$ mm²/m, vilket motsvarar $\phi 20$, s142.

Bruksgränstillstånd

Se bilaga A för beräkningar.

Svar: Erforderlig armeringsmängd för dimensionering i bruksgränstillstånd, för att klara sprickviddskravet, $w_k < w_{k1} = 0,154$ mm, ger $A_s = 10900$ mm²/m, vilket motsvarar $\phi 32$, s74.

Resultat

Bruksgränstillstånd blir dimensionerande och ger armeringsmängden $A_s = 10900$ mm²/m, vilket motsvarar $\phi 32$, s74. Vald stångdiameter $\phi 32$ som är den största som finns tillgänglig ger ett avstånd mellan armeringsstängerna som är mindre än $s100$ vilket försvårar armeringsutförandet för konstruktionen.

6.1.1.3 Täthetsklass 2

Förutsättningar

Sprickor i täthetsklass 2 ska förhindras. Men för att få en uppfattning om vilken armeringsmängd som skulle fordras i täthetsklass 2, utan applicering av membran eller annan ytbeläggning, gjordes beräkningar med hänsyn till aktuellt sprickviddskrav.

Enligt avsnitt 2.2.2 är acceptabel sprickvidd $w_{\max} = 0,05$ mm.

Geometri: Vägghöjd, $H = 5,0$ m
Väggtvårsnittets höjd, $h = 350$ mm
Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd), $b = 1,0$ m

Exponeringsklass: XC2
 $c_{\min} = 20$ mm $\rightarrow c = 30$ mm

| | |
|------------|--|
| Livslängd: | L 100 |
| Betong: | C40/50 $v_{ct} = 0,40$ |
| Armering: | Föga korrosionskänslig armering $\phi 20$ B500B |

Brottgränstillstånd

Se bilaga A för beräkningar.

Svar: Erforderlig armeringsmängd för dimensionering i brottgränstillstånd ger $A_s = 2220 \text{ mm}^2/\text{m}$, vilket motsvarar $\phi 20$, s142.

Bruksgränstillstånd

Se bilaga A för beräkningar.

Svar: Det går inte att dimensionera tvärsnittet för det mycket stränga sprickviddskravet, $w_k < w_{\max} = 0,05 \text{ mm}$.

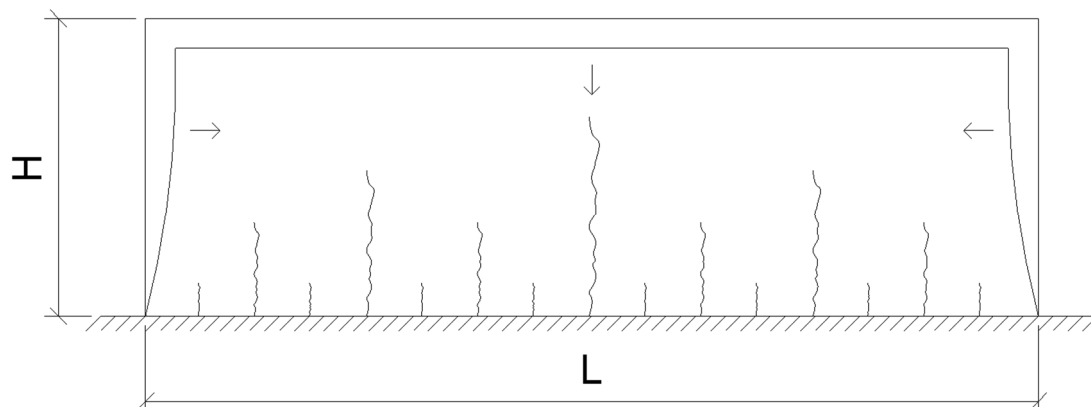
Resultat

Beräkningarna för bruksgränstillstånd med sprickviddskravet, $w_k < w_{\max} = 0,05 \text{ mm}$, visar att det inte går att uppnå täthetsklass 2. Detta för att det inte går att dimensionera armeringen för så små sprickvidder.

6.1.2 Sprickor orsakade av krympning

I detta avsnitt presenteras beräkningar avseende krympsprickor enligt metod av Engström (2014). Nedan sammanställs olika armeringsmängder som krävs för att uppfylla krav på sprickvidd för de olika täthetsklasserna som beskrivs i avsnitt 2.2.2.

Figur 6.5 illustrerar uppkomst av sprickor på grund av förhindrad krymprörelse i bassängvägg.



Figur 6.5 Sprickor på grund av förhindrad krymprörelse i bassängvägg.

Enligt Annex L i standarden SS-EN 1992-3 (SIS, 2006) kan tvånget i olika delar av väggen på grund av motgjutning i underkant uppskattas genom en tvångsgrad, R , med värden som redovisas i tabell 6.1.

| L/H | Tvångsgrad, R , i underkant | Tvångsgrad, R , i överkant |
|-----|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0,5 | 0 |
| 2 | 0,5 | 0 |
| 3 | 0,5 | 0,05 |
| 4 | 0,5 | 0,3 |
| > 8 | 0,5 | 0,5 |

Tabell 6.1 Tvångsgrader i under- och överkant av en bassängvägg (SIS, 2006).

Beräkningar utfördes för en bassängvägg som gjuts mot härdad bottenplatta.

Vid dimensionering med hänsyn till sprickviddskrav ökades armeringsmängden, A_s , tills kravet uppfylldes att karakteristisk sprickvidd, w_k , är mindre än acceptabel sprickvidd, w_{max} .

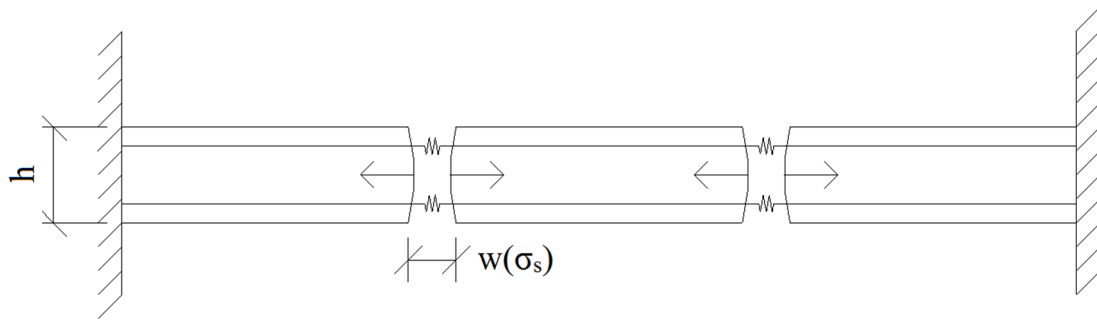
6.1.2.1 Täthetsklass 0

Förutsättningar

Vid beräkningar av armeringsmängd för sprickviddsbegränsning av krympsprickor i täthetsklass 0 användes i huvudsak samma förutsättningar som vid beräkning med hänsyn till böjande moment i täthetsklass 0, se avsnitt 6.1.1.1.

| | |
|-------------------|---|
| Geometri: | Vägglängd, $L = 10,0$ m Vägghöjd, $H = 5,0$ m Väggvärsnittets höjd, $h = 350$ mm Väggvärsnittets bredd (enhetsbredd), $b = 1,0$ m |
| Tvångsgrad: | $R = 0,5$ i underkant (enligt tabell 6.1) $R = 0$ i överkant (enligt tabell 6.1) |
| Exponeringsklass: | XC2 Max $v_{ct_{ekv}} = 0,6$ $c_{min} = 25 \text{ mm} + \phi 20 \rightarrow c = 35 + 20 = 55 \text{ mm}$ Sprickviddskrav, $w_k < w_{max} = 0,4 \text{ mm}$ |
| Livslängd: | L 100 |
| Betong: | C30/37 |
| Armering: | Föga korrosionskänslig armering $\phi 12$ B500B |

Figur 6.6 illustrerar en modell för beräkning av krympsprickors bredd med hänsyn till tvång. Modellen betraktar sprickor orsakade av förhindrade krymprörelser som en fjäder.



Figur 6.6 Modell för beräkning av krypsprickors bredd med hänsyn till tvång.

Grundvärden för krypning och krympning

Slutligt kryptal: $\varphi(\infty, t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1,659$

Effektiva E-moduler: $\alpha_{ef} = \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi(\infty, t_0)) = 16,114$

Slutligt krypmått: $\varepsilon_{cs}(\infty) = \varepsilon_{cd}(\infty) + \varepsilon_{ca}(\infty) = 2,733 \cdot 10^{-4}$

Krypkraft (tvång från armering): $F_{cs} = \varepsilon_{cs}(\infty) \cdot E_s \cdot A_s = 108 \text{ kN}$

Tvårsnittskonstanter

Ekvivalent betongtvärsnitt: $A_{i,ef} = (h \cdot b) + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_s$

Effektiv betongarea:

$$A_{c,ef} = 2 \cdot h_{c,ef} \cdot b$$

$$h_{c,ef} = \min \left[2,5 \left(c + \frac{\phi}{2} \right), \frac{h}{2} \right]$$

Bedömning av sprickrisk

Sprickvillkor:

$$R \cdot \varepsilon_{cs}(\infty) = 1,367 \cdot 10^{-4} \leq \frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi(\infty, t_0)) = 9,669 \cdot 10^{-5}$$

Beräkning av karakteristisk sprickvidd

Vid beräkning av sprickviddens medelvärde, w_m , antogs en stålspänning som itererades tills sprickviddskravet uppfylldes.

Sprickviddens medelvärde:

$$w_m = 1,24 \cdot 0,42 \cdot \left[\frac{\phi \cdot \sigma_s^2}{0,22 \cdot f_{cm} \cdot E_s \cdot (1 + \alpha_{ef} \cdot \frac{A_s}{2 \cdot A_{ef}})} \right]^{0,826} + 4\phi \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 0,307 \text{ mm}$$

Slutlig stålspänning:

$$R \cdot \left(\varepsilon_{cs} \cdot L + \frac{F_{cs}}{E_{c,ef} \cdot A_{I,ef}} \cdot L \right) + \frac{\sigma_s \cdot A_s}{E_{c,ef} \cdot A_{I,ef}} \cdot L + n_{cr} \cdot \frac{\sigma_s}{\sigma_{s,ref}} \cdot w_m = 0 \rightarrow \sigma_s = 243 \text{ MPa}$$

Kraft på de ospruckna partierna: $N = \sigma_s \cdot A_s = 479 \text{ kN}$

Kraft för att initiera ny spricka: $N_{cr} = f_{ctm,sus} \cdot A_{I,ef} = 661 \text{ kN}$

Om $N > N_{cr}$ kommer fler sprickor att bildas. Vid beräkning av stålspänningen, σ_s , valdes antal sprickor, n_{cr} , tills dess att $N < N_{cr}$.

När sprickbildningen har avstannat vid en viss stålspänning, σ_s , kunde den karakteristiska sprickvidden beräknas.

Karakteristisk sprickvidd: $w_k = 1,3 \cdot w_m = 0,4 \text{ mm}$

Se bilaga B för beräkningar.

Resultat

Erforderlig armeringsmängd för att klara sprickviddskravet, $w_k < w_{max} = 0,40 \text{ mm}$, med antal sprickor, $n_{cr} = 1$, ger $A_s = 1975 \text{ mm}^2/\text{m}$, vilket motsvarar $\phi 12$, s115. Vald stångdiameter $\phi 12$ är den minsta som krävs för att klara minsta centrumavstånd mellan armeringsstängerna, s100. Mindre stångdiameter ger därmed mindre avstånd mellan armeringsstängerna och grövre stänger ger större sprickvidder vilket skulle öka erforderlig armeringsmängd.

6.1.2.2 Täthetsklass 1

Förutsättningar

Vid beräkning av armeringsmängd avseende sprickviddsbegränsning av krympsprickor i täthetsklass 1 användes i huvudsak samma förutsättningar som vid beräkning med hänsyn till böjande moment i täthetsklass 1, se avsnitt 6.1.1.2.

Geometri: $V\ddot{a}ggl\ddot{a}ngd, L = 10,0 \text{ m}$
 $V\ddot{a}ggh\ddot{o}jd, H = 5,0 \text{ m}$
 $V\ddot{a}ggtv\ddot{a}rsnittets h\ddot{o}jd, h = 350 \text{ mm}$
 $V\ddot{a}ggtv\ddot{a}rsnittets bredd (enhetsbredd), b = 1,0 \text{ m}$

Sprickviddskrav: $w_k < w_{max} = 0,154 \text{ mm}$

Tvångsgrad: $R = 0,5$ i underkant (enligt tabell 6.1)
 $R = 0$ i överkant (enligt tabell 6.1)

Exponeringsklass: XC2
 $c_{min} = 25 \text{ mm} + \phi 32 \rightarrow c = 35 + 32 = 67 \text{ mm}$

Livslängd: L 100

| | |
|-----------|--|
| Betong: | C40/50 $v_{ct} = 0,40$ |
| Armering: | Föga korrosionskänslig armering $\phi 25$ B500B |

Krympberäkning

Se bilaga B för beräkningar.

Resultat

Erforderlig armeringsmängd för att klara sprickviddskravet, $w_k < w_{\max} = 0,154$ mm, med antal sprickor, $n_{cr} = 1$, ger $A_s = 7800$ mm²/m, vilket motsvarar $\phi 25$, s126. Vald stångdiameter $\phi 25$ är den minsta som krävs för att klara minsta centrumavstånd mellan armeringsstängerna, s100. Mindre stångdiameter ger därmed mindre avstånd mellan armeringsstängerna.

6.1.2.3 Täthetsklass 2

Förutsättningar

Vid beräkning av armeringsmängd avseende sprickviddsbegränsning av krympsprickor i täthetsklass 2 användes i huvudsak samma förutsättningar som vid beräkning med hänsyn till böjande moment i täthetsklass 2, se avsnitt 6.1.1.3.

| | |
|-----------|--|
| Geometri: | Vägglängd, $L = 10,0$ m Vägghöjd, $H = 5,0$ m Väggvärsnittets höjd, $h = 350$ mm Väggvärsnittets bredd (enhetsbredd), $b = 1,0$ m |
|-----------|--|

| | |
|------------------|----------------------------|
| Sprickviddskrav: | $w_k < w_{\max} = 0,05$ mm |
|------------------|----------------------------|

| | |
|-------------|---|
| Tvångsgrad: | $R = 0,5$ i underkant (enligt tabell 6.1) $R = 0$ i överkant (enligt tabell 6.1) |
|-------------|---|

| | |
|-------------------|---|
| Exponeringsklass: | XC2 $c_{\min} = 32$ mm + $\phi 32 \rightarrow c = 42 + 32 = 74$ mm |
|-------------------|---|

| | |
|------------|-------|
| Livslängd: | L 100 |
|------------|-------|

| | |
|---------|---------------------------|
| Betong: | C40/50 $v_{ct} = 0,40$ |
|---------|---------------------------|

| | |
|-----------|--|
| Armering: | Föga korrosionskänslig armering $\phi 32$ B500B |
|-----------|--|

Krympberäkning

Se bilaga B för beräkningar.

Resultat

Erforderlig armeringsmängd för att klara sprickviddskravet, $w_k < w_{\max} = 0,05$ mm, med antal sprickor, $n_{cr} = 1$, ger $A_s = 23500$ mm²/m, vilket motsvarar $\phi 32$, s69. Vald

stångdiameter $\phi 32$ ger ett avstånd mellan armeringsstångerna som är mindre än $s100$ vilket försvårar armeringsutförandet för konstruktionen.

6.2 Rör genomföringar och fogar

Informationen i detta avsnitt baseras huvudsakligen på intervju av Andersson (2016-04-28).

Rör genomföring med ingjutningsplåt enligt figur 5.3 är en utformning som är svår att utföra på grund av komplicerad svetsning. Det är svårt att skära upp ett symmetriskt hål för röret samt att komma åt för att svetsa fast röret mot plåten. Det komplicerade svetsarbetet kan leda till extra arbete för att få rör genomföringen tät.

Rör genomföring med kälsvetsad fläns enligt figur 5.4 och figur 5.5 är de vanligast förekommande typerna. Eftersom rör genomföringen gjuts in i konstruktionen är denna typ av utformning mycket tät samt enkel att utföra. Den höga tätheten som uppnås beror på att rör genomföringen omringgijuts på ett bra sätt samt att den kälsvetsade flänsen förhindrar vattnet att tränga vidare in i fogen.

Rör genomföring i befintlig betongkonstruktion enligt figur 5.6 är en utformning som ger större anpassbarhet avseende var man vill placera röret samt är billig att utföra. Dock är denna typ tidskrävande eftersom den expanderande betongen måste härda innan konstruktionen kan tas i bruk.

Fog med svällband enligt figur 5.7 är en typ av utformning som är väldigt bra om utförandet blir korrekt. För att uppnå full effekt måste bandet ligga direkt mot den befintliga bottenplattan. Om bandet förflyttas när betongen hålls i formen kan hålrum mellan band och bottenplatta uppkomma som resulterar i otätheter i fogen. Svällband finns i olika material bland annat bentonitlera som sväller vid kontakt med vatten. En nackdel med denna typ är att den vid regn kan börja svälla redan innan formen fyllts med betong vilket resulterar i att bandet förlorar sin funktion. Dock finns det även vissa svällband av syntetiskt material som enbart sväller vid kontakt med cement.

Fog med injekterings slang enligt figur 5.8 är en typ av utformning som är ovanlig då den oftast används i kombination med andra tätningsmetoder.

Fog med fogbleck enligt figur 5.9 är en enkel och billig utformning vid tätning av fogar. Eftersom fogblecket gjuts fast i bottenplattan säkerställs det att blecket vid gjutning av bassängväggen inte förflyttas då betongen hålls i formen.

Fog med fogband enligt figur 5.10 är en äldre typ av utformning vid tätning av fogar. En fördel med denna typ är att den kan användas i konstruktioner där stora rörelser förväntas uppstå.

Fog med injekterings slang + fogbleck med svällband enligt figur 5.11 är en väldigt bra typ av utformning vid tätning av fogar. Kombinationen med svällband som appliceras på fogblecket och injekterings slang ger en mycket god täthet.

7 Analys och utvärdering

I detta kapitel redovisas hur betongens sammansättning, armering för sprickviddsbegränsning samt rörgenomföringar och fogar bör väljas och utformas för att betongkonstruktioner ska uppfylla de krav som ställs på vattentäthet.

7.1 Inverkan av betongsammansättning

Genom noggrann sammansättning av betongens olika delmaterial går det i allra högsta grad att påverka betongens täthet. Eftersom betongens permeabilitet bestäms av cementpastans permeabilitet har vattencementtalet, vct , och tillsatsmaterial i betongen stor inverkan på tätheten.

Vattencementtal, vct , har stor inverkan på betongens täthet. För att få en tät betong bör ett lågt vct väljas, helst $vct \leq 0,40$. Detta på grund av att andelen kapillärporer i betongen, där majoriteten av all fukttransport sker, försvinner och helt ersätts med cementgel.

Tillsatsmaterial påverkar betongens egenskaper och kan bland annat bidra till en tätare och mer hållfast betong, vilket beskrivs i avsnitt 3.1.5. Mängden tillsatsmaterial regleras enligt SS-EN 206, SS 137003 och AMA Anläggning 13, vilket ska beaktas vid projektering. Obegränsade mängder av tillsatsmaterial får inte användas vilket kan ge såväl fördelar som nackdelar. Så länge konstruktörer följer de mängder tillsatsmaterial som föreskrivs i bestämmelserna kan de förbättrade egenskaperna förväntas.

I den litteratur som har studerats inom detta projekt återfinns inga djupare studier i vilken omfattning tillsatsmaterialen enskilt eller tillsammans påverkar betongen. Med denna ovisshet finns ingen direkt kunskap om mer eller mindre av något tillsatsmaterial resulterar i en tätare betong. Eftersom varje tillsatsmaterial påverkar betongen på olika sätt får man göra en bedömning av hur mycket av varje tillsatsmaterial som ska tillsättas. Tillsatsmaterial kan påverka betongens egenskaper positivt i vissa avseenden medan de kan påverka negativt ur andra.

7.2 Inverkan av armering för sprickviddsbegränsning

I detta avsnitt presenteras sammanställningar av beräknade armeringsmängder som krävs för att uppfylla sprickviddskrav som ställs på de olika täthetsklasserna i avsnitt 2.2.2. Beräkningar som avser valda typfall är presenterade i avsnitt 6.1. Alternativa åtgärder för att uppfylla täthetskrav behandlas också i detta avsnitt.

7.2.1 Armeringsmängder avseende böjande moment

Av beräkningarna framgår det att bassängkonstruktioner skiljer sig åt beroende på den aktuella täthetsklassen. Tabell 5.1 och tabell 5.2 redovisar erforderlig armeringsmängd för den dragna sidan av betongtvärsnittet med hänsyn till sprickviddskrav i brott- och bruksgränstillstånd för täthetsklass 0, 1 och 2 med väggtjockleken 350 mm. För täthetsklass 0 kan konstruktioner utföras i en lägre betongklass med ett högre vct och mindre armeringsmängd jämfört med

konstruktioner i täthetsklass 1 och 2. För att uppfylla kraven för täthetsklass 1 och 2 blir armeringsmängden mycket omfattande och till och med orimlig. En konstruktion som skall uppfylla täthetsklass 1 och 2 med aktuell väggjocklek 350 mm, där sprickvidder ska begränsas till mycket små värden, går därför inte rimligen att utföra enbart med hjälp av armering (det vill säga utan applicering av membran eller annan ytbeläggning).

| Brottgränstillstånd, ULS Väggjocklek, 350 mm | | | | | | | |
|---|--------------------|-------|---------------|-----------------------------|----------------|------|---|
| Täthetsklass | Betongklass | vct | w_k [mm] | A_s [mm ²] | ϕ [mm] | s | Tryckt zon, x [mm] |
| 0 | C30/37 | 0,60 | 0,4 | 2318 | 20 | s136 | 62 |
| 1 | C40/50 | 0,40 | 0,154 | 2220 | 20 | s142 | 45 |
| 2 | C40/50 | 0,40 | 0,05 | 2220 | 20 | s142 | 45 |

Tabell 5.1 Erforderlig armeringsmängd för den dragna sidan av betongtvärsnittet med hänsyn till sprickviddskrav i brottgränstillstånd för täthetsklass 0, 1 och 2 med väggjockleken 350 mm.

| Bruksgränstillstånd, SLS Väggjocklek, 350 mm | | | | | | | |
|---|--------------------|-------|---------------|-----------------------------|----------------|------|---|
| Täthetsklass | Betongklass | vct | w_k [mm] | A_s [mm ²] | ϕ [mm] | s | Tryckt zon, x [mm] |
| 0 | C30/37 | 0,60 | 0,4 | 2495 | 20 | s126 | 121 |
| 1 | C40/50 | 0,40 | 0,154 | 10900 | 32 | s74 | 181 |
| 2 | C40/50 | 0,40 | 0,05 | - | 32 | - | - |

Tabell 5.2 Erforderlig armeringsmängd för den dragna sidan av betongtvärsnittet med hänsyn till sprickviddskrav i bruksgränstillstånd för täthetsklass 0, 1 och 2 med väggjockleken 350 mm.

En åtgärd för att lättare uppfylla kraven för täthetsklass 1 och 2 kan vara att öka väggjockleken. Beräkningar utfördes där väggjockleken ökades till 500 mm, i övrigt samma förutsättningar som tidigare beräkningar, se bilaga A. Av beräkningarna framgår det att erforderlig armeringsmängd, A_s , minskar med ökande väggjocklek. Detta beror på att betongtvärsnittets effektiva höjd blir större. I tabell 5.3 och tabell 5.4 redovisas erforderlig armeringsmängd för den dragna sidan av betongtvärsnittet med hänsyn till sprickviddskrav i brott- och bruksgränstillstånd för täthetsklass 0, 1 och 2 med väggjockleken 500 mm.

| Brottgränstillstånd, ULS Väggjocklek, 500 mm | | | | | | | |
|---|-------------|-------|---------------|-----------------------------|----------------|------|----------------------------|
| Täthetsklass | Betongklass | vct | w_k [mm] | A_s [mm ²] | ϕ [mm] | s | Tryckt zon, x [mm] |
| 0 | C30/37 | 0,60 | 0,4 | 1468 | 16 | s137 | 39 |
| 1 | C40/50 | 0,40 | 0,175 | 1425 | 16 | s141 | 29 |
| 2 | C40/50 | 0,40 | 0,05 | 1425 | 16 | s141 | 29 |

Tabell 5.3 Erforderlig armeringsmängd för den dragna sidan av betongtvärsnittet med hänsyn till sprickviddskrav i brottgränstillstånd för täthetsklass 0, 1 och 2 med väggjockleken 500 mm.

| Bruksgränstillstånd, SLS Väggjocklek, 500 mm | | | | | | | |
|---|-------------|-------|---------------|-----------------------------|----------------|------|----------------------------|
| Täthetsklass | Betongklass | vct | w_k [mm] | A_s [mm ²] | ϕ [mm] | s | Tryckt zon, x [mm] |
| 0 | C30/37 | 0,60 | 0,4 | 1655 | 16 | s121 | 131 |
| 1 | C40/50 | 0,40 | 0,175 | 4650 | 25 | s106 | 183 |
| 2 | C40/50 | 0,40 | 0,05 | - | 32 | - | - |

Tabell 5.4 Erforderlig armeringsmängd för den dragna sidan av betongtvärsnittet med hänsyn till sprickviddskrav i bruksgränstillstånd för täthetsklass 0, 1 och 2 med väggjockleken 500 mm.

Resultatet visar att det vid en ökning av väggjockleken går att uppfylla kraven som ställs för täthetsklass 1 men att det inte rimligen går att uppfylla kraven som ställs för täthetsklass 2. Armeringsmängden blir så pass omfattande att konstruktionen svårigen går att utföra. Armeringens utnyttjande i betongtvärsnittet är mycket liten i förhållande till stålets kapacitet. En sådan stor mängd armering med så låg utnyttjandegrad blir därmed slöseri av material och en icke effektiv metod för dimensionering av en vattentät betongkonstruktion.

Eftersom beräkningsresultaten för bruksgränstillstånd visar att mängden armering blir mycket omfattande kan en kompletterande åtgärd för att uppfylla täthetskrav vara att utnyttja betongtvärsnittets tryckta zon enligt standarden SS-EN 1992-3. Sprickor som förväntas uppstå kan betraktas som icke genomgående om det går att visa att en del av tvärsnittet ständigt är tryckt. I avsnitt 2.2.2 beskrivs krav för den tryckta zonen. Enligt beräkningarna för bruksgränstillstånd av en ensidigt belastad vägg framgår det att kravet för den tryckta zonen uppnås, $x > x_{min}$, för det studerade lastfallet. Detta innebär att böjsprickorna som uppstår kan betraktas som icke genomgående och att armeringsmängden därmed kan minskas så länge kravet på betongtvärsnittets tryckta zon uppfylls. Andra lastfall än det studerade kan dock innebära att tryckzonshöjden minskar eller ändrar läge i tvärsnittet.

Ett annat förhållande som bör uppmärksammas är sprickviddskravet och det böjande momentet som på grund av vattentrycket varierar utefter bassängväggens höjd. Mängden armering som krävs för att uppfylla sprickviddskraven på varje enskild nivå av väggen kan därmed minskas avsevärt genom avkortning. Man kan även låta

vägg tjockleken variera utefter bassängväggens höjd. Om vägg tjockleken i bassängväggens nederkant ökas så att armeringen blir genomförbar kan möjligtvis en tjockare vägg med mycket armering längst ner accepteras.

7.2.2 Armeringsmängder avseende krympsprickor

Tabell 5.5 redovisar erforderlig armeringsmängd för hela betongtvärsnittet för täthetsklass 0, 1 och 2 med vägglängden 10 m. Armeringsmängd och stångdiameter ökar avsevärt med hänsyn till strängare sprickviddskrav för de högre täthetsklasserna. För täthetsklass 0 och 1 är beräknad armeringsmängd och stångdiameter rimlig medan det för täthetsklass 2 krävs en armeringsmängd som är mycket omfattande och därmed orimlig.

| Vägglängd, 10 m | | | | | | |
|-----------------|-------------|-------|---------------|-----------------------------|----------------|------|
| Täthetsklass | Betongklass | vct | w_k [mm] | A_s [mm ²] | ϕ [mm] | s |
| 0 | C30/37 | 0,60 | 0,4 | 1975 | 12 | s115 |
| 1 | C40/50 | 0,40 | 0,154 | 7800 | 25 | s126 |
| 2 | C40/50 | 0,40 | 0,05 | 23500 | 32 | s69 |

Tabell 5.5 Erforderlig armeringsmängd för hela betongtvärsnittet för täthetsklass 0, 1 och 2 med vägglängden 10 m.

En åtgärd för att uppfylla kraven för täthetsklass 2 kan vara att minska vägglängden. Beräkningar har utförts där gjutlängden minskat till 5 m, se bilaga B. I tabell 5.6 redovisas erforderlig armeringsmängd för hela betongtvärsnittet för täthetsklass 0, 1 och 2 med vägglängden 5 m.

| Vägglängd, 5 m | | | | | | |
|----------------|-------------|-------|---------------|-----------------------------|----------------|------|
| Täthetsklass | Betongklass | vct | w_k [mm] | A_s [mm ²] | ϕ [mm] | s |
| 0 | C30/37 | 0,60 | 0,4 | 1250 | 10 | s126 |
| 1 | C40/50 | 0,40 | 0,154 | 6000 | 20 | s105 |
| 2 | C40/50 | 0,40 | 0,05 | 22500 | 32 | s72 |

Tabell 5.6 Erforderlig armeringsmängd för hela betongtvärsnittet för täthetsklass 0, 1 och 2 med vägglängden 5 m.

Resultatet tyder på att en minskning av vägglängden genererar en liten och knappt lönsam minskning av armeringsmängden för täthetsklass 2. Det visar också att en konstruktion som ska uppfylla kraven för täthetsklass 2 blir svår att utföra enbart med hjälp av armering.

Det går även med avseende på krympsprickor att utnyttja att sprickviddskravet beror på höjdläget i väggen. Som beskrivs i avsnitt 2.2.2 minskar sprickviddskravet utefter bassängväggens höjd vilket resulterar i att mängden armering kan minskas avsevärt högre upp i väggen.

En kompletterande åtgärd som kan vidtas för att minska armeringsmängden avseende sprickviddsbegränsning av krympsprickor skulle kunna vara att frigöra

bassängväggen från bottenplattan, vilket resulterar i minskat tvång. Genom att gjuta en klack på bottenplattans ovansida och gjuta bassängväggen fritt innanför klacken med en rörelsefog blir bassängväggen frikopplad från bottenplattan så att inget tvång uppstår. Dock behöver fogen mellan bassängvägg och bottenplatta utformas omsorgsfullt eftersom rörelsefogen gör att konstruktionsdelarna inte blir homogent förbundna. Denna kompletterande åtgärd resulterar även i att lasterna som uppstår på grund av vattentrycket måste tas upp på annat sätt än tidigare.

7.2.3 Alternativa åtgärder

Eftersom det enbart med hjälp av armering visar sig vara svårt att uppfylla stränga sprickviddskrav bör andra alternativa åtgärder vidtas. Nedan beskrivs olika alternativa åtgärder för att uppfylla täthetskrav.

Förspänning kan utföras genom före- eller efterspänning av spännstålsenheter, vilket kan resultera i att hela tvärsnittet blir tryckt. Genom förspänning kan vissa typer av sprickor, till exempel böjsprickor, helt förhindras för valda lastnivåer, till exempel för långtidslast.

Membran eller annan ytbeläggning kan appliceras på betongytans insida om kravet på vattentäthet är högt (täthetsklass 2 och 3). Membran kan appliceras på enskilda bassängväggar om läckage endast uppstår lokalt och resterande ytor är täta. Om inget läckage är tillåtet kan membran appliceras på alla ytor av betongkonstruktionen. Denna alternativa åtgärd är kostsam och vidtas enbart om vattengenomträngning inte alls får förekomma.

7.3 Rör genomföringar och fogar

Vid projektering av vattentäta betongkonstruktioner är det bäst att så tidigt som möjligt fastställa var rör genomföringarna skall placeras för att kunna gjuta in röret. Eftersom genomföringar som gjuts in oftast blir tätast samt att de tar minst tid att utföra är rör genomföringarna som visas i figur 5.4 och figur 5.5 att föredra. Genomföringen som visas i figur 5.3 kräver extra armering samt att hålet till röret måste skäras upp och röret svetsas fast i plåten. Slutligen ska ursparingen gjutas igen. Alla dessa moment kräver mer tid än att gjuta in ett skarvrör direkt samt att den expanderande betongen som gjuts i ursparningen måste få tid till att härda. Detta gäller även för rör genomföringen enligt figur 5.6.

Täta fogar är också viktigt att säkerställa vid projektering av vattentäta betongkonstruktioner. Att täta fogar med svällband är en vanlig typ av utformning men kräver mer noggrannhet vid applicering jämfört med fogbleck. Fogbleck är en smidigare typ av utformning som inte kräver lika mycket noggrannhet som svällband, är en tillförlitlig lösning som ger en god täthet. Att den dessutom går att kombinera med injekterings slang och svällband enligt figur 5.11 ger extra försäkran om att fogen blir tät.

8 Slutsatser

I detta kapitel redovisas slutsatser baserat på resultat och information som framkommit genom projektet samt vad som skulle vara intressant att studera vidare inom området vattentäta betongkonstruktioner.

8.1 Slutsatser

- Materialet betong är inte vattentätt eftersom det är ett poröst material vilket gör det möjligt för vatten att tränga igenom. Dock går det genom noggrann sammansättning av betongens olika delmaterial att påverka vattengenomträngningen. I betong sker majoriteten av fukt- och vätsketransporten genom betongens kapillärporer. Genom att minska andelen kapillärporer kan en mycket tät betong uppnås där betongens ena sida förblir torr.
- Vattentäthetskrav i olika situationer bestäms utifrån exponeringsklass, vattentryck, betongkonstruktionens geometri, betongtvärsnittets tryckta zon samt vilken grad av vattengenomträngning som får förekomma.
- Genom att välja en betong med lågt *vct* (högst 0,40) uppnås en tät betong där kapillärporerna i stort sett försvinner. Användning av tillsatsmaterial kan påverka betongens egenskaper både positivt och negativt.
 - **Flygaska** ger en tätare betong och lägre värmeutveckling som kan minska risken för sprickbildning i samband med produktion. Dock absorberas luftporbildare vilket gör att mängden luftporbildande tillsatsmedel måste ökas.
 - **Silikastoft** ger en tätare och mer hållfast betong. Dock ger inblandning av silikastoft ökad risk för sprickbildning vid tillverkning samt ökat vattenbehov.
 - **Masugnsslagg** ger en lägre värmeutveckling och minskat vattenbehov. För betong med lågt *vct* kan dock användning av masugnsslagg försämra betongens hållfasthet.
- Standarden SS-EN 1992-3 ställer krav på mängden vatten som tillåts tränga igenom betongkonstruktioner bland annat genom sprickviddskrav för olika täthetsklasser. Armeringsmängderna som fordras för att begränsa sprickvidderna varierar mycket mellan de olika täthetsklasserna eftersom kraven som ställs ökar med ökande krav på vattentäthet. Täthetsklass 0 har ett lägre sprickviddskrav och därför fordras inte så stor mängd armering för att uppfylla kravet på vattentäthet. Sprickviddskraven för täthetsklass 1 och 2 är mycket högre jämfört med täthetsklass 0 vilket därmed fordrar en betydligt större armeringsmängd. Det går genom ökade vägg tjocklekar att uppfylla sprickviddskravet för täthetsklass 1 med rimlig mängd armering. Det är dock omöjligt att utföra en betongkonstruktion som ska begränsa sprickvidderna för kraven som ställs på täthetsklass 2 med enbart armering.
- Att enbart använda armering för dimensionering med avseende på mycket små sprickvidder bör undvikas. Det blir slöseri av material eftersom bara en liten

del av stålets kapacitet utnyttjas. Alternativa eller kompletterande åtgärder bör därför vidtas för att uppfylla kraven på vattentätethet.

- Betongens krympning har betydande inverkan på stålets dragspänning vid dimensionering med avseende på mycket små sprickvidder. Dess inverkan ökar därmed med ökande sprickviddskrav och bör därför beaktas vid dimensionering av små sprickvidder.
- För att uppfylla kraven på vattentätethet bör betongtvärsnittets tryckta zon, x , utnyttjas. Om kraven som ställs på den tryckta zonen uppfylls enligt standarden SS-EN 1992-3 kan sprickor som förväntas uppstå betraktas som icke genomgående och bidrar därför inte till vattengenomträngning och läckage.
- Det varierande vattentrycket utefter bassängväggens höjd som resulterar i olika sprickviddskrav på olika nivåer av väggen bör utnyttjas. Det varierande sprickviddskravet innebär att bassängväggens tjocklek kan minska utefter höjden och att även mängden armering kan minskas.
- Väggen längd har inte så stor betydelse för den mängd armering som fordras för att begränsa sprickvidd hos krympsprickor.
- Det går genom indelning av gjutetapper att minska risken för temperatur- och krympsprickor under tillverkningskedet. Indelning av gjutetapper gör att betongkonstruktioners totala tvång under tillverkningskedet minskas då den enbart utsätts för tvång i bassängväggens underkant.
- Eftersom rör genomföringar och fogar kan resultera i otätheter bör dessa uppmärksammas tidigt i projekteringsprocessen så att lämpliga utformningar kan väljas och specificeras. Nedan listas de typer av utformningar som är att föredra vid höga vattentäthetskrav.
 - Rör genomföring med kälsvetsad fläns i kombination med svällband enligt figur 5.4 och figur 5.5 är att föredra.
 - Fog med fogbleck enligt figur 5.9 är att föredra och kan kombineras med svällband och injekterings slang enligt figur 5.11 för säkerställa god vattentäthet.

8.2 Vidare studier

Under arbetets gång har några möjligheter identifierats som skulle vara intressanta att tillämpa vid projektering av vattentäta betongkonstruktioner. Två av de mest intressanta möjligheterna bör undersökas genom vidare studier. Dessa är:

- Utforma en vattentät betongkonstruktion som ska uppnå täthetsklass 2 med hjälp av de kompletterande åtgärderna som redovisas i rapporten. Syftet skulle vara att undersöka hur varierande vägg tjocklek, avkortning av armering och minskat tvång påverkar sprickbildning och erforderlig armeringsmängd.
- En mer djupgående undersökning om hur och i vilken omfattning tillsatsmaterial enskilt och tillsammans påverkar betongens täthet.

9 Referenser

9.1 Skriftliga källor

Burström, PG. (2007). *Byggnadsmaterial: Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Lund: Studentlitteratur AB.

Cementa AB (2013). *Bascement: Teknisk Beskrivning* [Produktblad]. Stockholm: Cementa AB. Hämtad från <http://www.cementa.se/sv/bascement-slite>

Emborg, M. Bernander, S. Ekerfors, K. Groth, P. Hedlund, H. (1997). *Temperatursprickor i betongkonstruktioner: Beräkningsmetoder för hydratationsspänningar och diagram för några vanliga typfall*. Hämtad från: <http://pure.ltu.se/portal/files/3312898/TEK-1997-02.pdf>

Engström, B. (2011). *Bärande konstruktioner: Del 1* (Rapport, nr 2011:11). Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Engström, B. (2011). *Bärande konstruktioner: Del 2* (Rapport, nr 2011:1). Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Engström, B. (2014). *Restraint cracking of reinforced concrete structures* (Report, nr 2007:10). Göteborg: Chalmers University of Technology.

Eriksson, M. Fritzson, E. (2014). *Crack Control of Extended Concrete Walls* (Master's Thesis 2014:143). (Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Division of Structural Engineering).

Esping, O. Löfgren, I. (2005). *Plastiska krympsprickor: Materialsammansättning och arbetsplatsåtgärder*. (Rekommendationer från Färdig Betong, 1). Göteborg: Färdig Betong

Fagerlund, G. (1989). *Vattenbyggnadsbetong*. Hämtad från: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1292183&fileId=4174583>

fib (2013). *fib Model Code for Concrete Structure 2010*. Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Germany.

Johansson, N. (2005). *Uttorkning av betong: Inverkan av cementtyp betongkvalitet och omgivande fuktförhållanden* (Licentiatuppsats, Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial). Hämtad från: <http://www.fuktsakerhet.se/sv/fakta/Documents/TVBM-3124.pdf>

Johansson, S-E. Ljungkrantz, C. Möller, G. Petersons, N. (1997). Tillsatsmaterial. S-E. Ljungkrantz, C. Möller, G. Petersons, N (Red.), *Betonghandboken: Material* (s 123-145). Stockholm: AB Svensk Byggtjänst.

Lindvall, A. Löfgren, I. (2013). *Effektiva Betongkonstruktioner – funktionella materialkrav*. Thomas Concrete Group, 2013.

Nilsson, L-O. (1997). Fukt och betong. S-E. Ljungkrantz, C. Möller, G. Petersons, N (Red.), *Betonghandboken: Material* (s 485-524). Stockholm: AB Svensk Byggtjänst.

Peterson, N. (1997). Sprickor. S-E. Ljungkrantz, C. Möller, G. Petersons, N (Red.), *Betonghandboken: Material* (s 669-710). Stockholm: AB Svensk Byggtjänst.

Svensk byggtjänst. (2014). *AMA Anläggning 13*. Västerås: Svensk byggtjänst

SIS. (2002). SS 137010. Betongkonstruktioner – Täckande betongskikt. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

SIS. (2002). SS-EN 1990. Eurokod – Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

SIS. SS 137003:2015. Betong – Användning av SS-EN 206 i Sverige. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

SIS. SS-EN 1992-1-1:2005. Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

SIS. SS-EN 1992-3:2006. Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 3: Behållare och avskiljande konstruktioner för vätskor och granulära material. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

SIS. SS-EN 206:2013. Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse. Stockholm: SIS Förlag AB. Hämtad från <https://enav.sis.se/>

9.2 Muntliga källor

Andersson (2016-04-28). NCC AB. Arbetsledare.

Langefors (2016-03-22). Sweco Structures AB. Konstruktör.

Bilaga A - Beräkningar böjande moment

Täthetsklass 0, ULS, h = 350 mm

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brottgränstillstånd (ULS)

$$\gamma_{G.j.\text{sup}} := 1.35$$

$$q_{\text{ULS}} := \gamma_d \cdot \gamma_{G.i.\text{sup}} \cdot G_{\text{kar.vatten}} = 67.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{ULS}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot H^2}{6} = 281.25 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

| | |
|--|--------------------------------------|
| $c_{\text{min}} := 25\text{mm}$ | Täckande betongskikt |
| $c_{\text{m}} := c_{\text{min}} + 10\text{mm} = 0.035 \text{ m}$ | Basmått (tolerans) |
| $\phi := 20\text{mm}$ | Armeringens diameter |
| $b := 1 \cdot \text{m}$ | Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd) |
| $h := 350\text{mm}$ | Väggtvårsnittets höjd |
| $d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.305 \text{ m}$ | Effektiv höjd |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{ct_{ekv}} = 0,60$ Sprickviddskrav $w_{max} = 0,4 \text{ mm}$

Livslängd L100

Betong

Klass C30/37

 $f_{ck} := 30 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_c := 1.5$ $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.5} = 20 \cdot \text{MPa}$ $f_{ctm} := 2.9 \cdot \text{MPa}$ $E_{cm} := 33 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{cu} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.02 \text{ m}$ $f_{yk} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_s := 1.15$ $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_s := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{syd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 2.174 \times 10^{-3}$

4. Brottgränstillstånd

Krafter

$$F_c := \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$F_s := \sigma_s \cdot A_s$$

Kraftjämvikt

$$F_c := F_s$$

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x = \sigma_s \cdot A_s$$

Moment kring F_s

$$x_1 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 0.062 \text{ m}$$

$$x_2 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 0.671 \text{ m}$$

$$x := x_1$$

Stältöjning

$$\varepsilon_s := \frac{(d - x) \cdot \varepsilon_{cu}}{x} = 0.014$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_{syd} \Rightarrow \sigma_s := f_{yd}$$

Armeringsmängd

$$A_s := \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x}{\sigma_s} = 2.318 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 7.377$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 0.136$$

Täthetsklass 0, SLS, h = 350 mm

Som ingångsvärde till beräkning av sprickvidd i bruksgränstillstånd används samma A_s som ges vid beräkning i brottgränstillstånd. Om armeringsmängden inte är tillräcklig ändras A_s så att sprickviddskravet uppfylls.

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g_{\text{v}} := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H_{\text{v}} := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brukgränstillstånd (SLS)

$$q_{\text{SLS}} := G_{\text{kar.vatten}} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{SLS}} := \frac{q_{\text{SLS}} \cdot H^2}{6} = 208.333 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

$$c_{\text{min}} := 25 \text{mm}$$

$$c_{\text{m}} := c_{\text{min}} + 10 \text{mm} = 0.035 \text{m}$$

$$\phi := 20 \text{mm}$$

$$b := 1 \cdot \text{m}$$

$$h := 350 \text{mm}$$

$$d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.305 \text{m}$$

Täckande betongskikt

Basmått (tolerans)

Armeringens diameter

Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd)

Väggtvårsnittets höjd

Effektiv höjd

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{\text{tekv}} = 0,60$ Sprickviddskrav $w_{\text{max}} = 0,4 \text{ mm}$

Livslängd L100

Betong

Klass C30/37

 $f_{\text{ck}} := 30 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{c}} := 1.5$ $f_{\text{cd}} := \frac{f_{\text{ck}}}{1.5} = 20 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{cm}} := 38 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{ctm}} := 2.9 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{cm}} := 33 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{\text{cu}} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.02 \text{ m}$ $f_{\text{yk}} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{s}} := 1.15$ $f_{\text{yd}} := \frac{f_{\text{yk}}}{\gamma_{\text{s}}} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{s}} := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{\text{syd}} := \frac{f_{\text{yd}}}{E_{\text{s}}} = 2.174 \times 10^{-3}$ $A_{\text{s}} := 2.495 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$

Ändras så att sprickviddskravet uppfylls

4. Brukgränstillstånd

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 0.35 \text{ m}^2$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c \cdot 1000}{u \cdot m} = 700$$

$$\beta_{f,cm} := 2.73$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.2} = 1.245$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.659$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 16.114$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.356 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 2.233 \times 10^{-4}$$

Uttorkningskrympning

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} - 10 \right) \cdot 10^{-6} = 5 \times 10^{-5}$$

Autogen krympning

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.733 \times 10^{-4}$$

Slutligt krympmått

Tyngdpunktsekvation

$$\frac{b \cdot x^2}{2} := \alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot (d - x)$$

$$x_1 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) - \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = -0.202 \text{ m}$$

$$x_2 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) + \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = 0.121 \text{ m}$$

$$x := x_2$$

Moment kring F_c

$$\sigma_s := \frac{M_{\text{SLS}}}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right)} = 315.683 \cdot \text{MPa}$$

Karakteristisk sprickvidd

$$k_1 := 0.8$$

$$k_2 := 0.5$$

$$k_3 := 7 \cdot \frac{\phi}{c} = 4$$

$$k_4 := 0.425$$

$$h_{\text{c.ef}} := \min \left[\frac{h}{2}, 2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3} \right] = 0.076 \text{ m}$$

$$A_{\text{ef}} := h_{\text{c.ef}} \cdot b = 0.076 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{p.ef}} := \frac{A_s}{A_{\text{ef}}} = 0.033$$

$$s_{\text{r.max}} := k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{\text{p.ef}}} = 0.244 \text{ m}$$

$$k_t := 0.4$$

$$\alpha_1 := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.061$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \Delta\varepsilon := \frac{\sigma_s - (1 + \alpha_1 \cdot \rho_{p.ef}) \cdot k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p.ef}}}{E_s} + \varepsilon_{cs,\infty} = 1.639 \times 10^{-3}$$

$$0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 9.47 \times 10^{-4} < \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}$$

$$w_k := s_{r,max} \cdot \Delta\varepsilon = 0.4 \cdot \text{mm}$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 7.942$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 0.126$$

Täthetsklass 1, ULS, h = 350 mm

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brottgränstillstånd (ULS)

$$\gamma_{G,j,\text{sup}} := 1.35$$

$$q_{\text{ULS}} := \gamma_d \cdot \gamma_{G,i,\text{sup}} \cdot G_{\text{kar.vatten}} = 67.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{ULS}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot H^2}{6} = 281.25 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

| | |
|--|--------------------------------------|
| $c_{\text{min}} := 20\text{mm}$ | Täckande betongskikt |
| $c_{\text{m}} := c_{\text{min}} + 10\text{mm} = 0.03\text{ m}$ | Basmått (tolerans) |
| $\phi := 20\text{mm}$ | Armeringens diameter |
| $b := 1 \cdot \text{m}$ | Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd) |
| $h := 350\text{mm}$ | Väggtvårsnittets höjd |
| $d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.31\text{ m}$ | Effektiv höjd |

Exponeringsklass

XC2

Max vct_{ekv} = 0,40Sprickviddskrav $w_{k1} := -0.005 \cdot \frac{H}{h} + 0.225 = 0.154$ (mm)

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

 $f_{ck} := 40 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_c := 1.5$ $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.5} = 26.667 \cdot \text{MPa}$ $f_{ctm} := 3.5 \cdot \text{MPa}$ $E_{cm} := 35 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{cu} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.02 \text{ m}$ $f_{yk} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_s := 1.15$ $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_s := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{syd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 2.174 \times 10^{-3}$

4. Brottgränstillstånd

Krafter

$$F_c := \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$F_s := \sigma_s \cdot A_s$$

Kraftjämvikt

$$F_c := F_s$$

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x = \sigma_s \cdot A_s$$

Moment kring F_s

$$x_1 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 0.045 \text{ m}$$

$$x_2 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 0.701 \text{ m}$$

$$x := x_1$$

Stältöjning

$$\epsilon_s := \frac{(d - x) \cdot \epsilon_{cu}}{x} = 0.021$$

$$\epsilon_s > \epsilon_{syd} \Rightarrow \sigma_s := f_{yd}$$

Armeringsmängd

$$A_s := \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x}{\sigma_s} = 2.22 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 7.066$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 0.142$$

Täthetsklass 1, SLS, h = 350 mm

Som ingångsvärde till beräkning av sprickvidd i bruksgränstillstånd används samma A_s som ges vid beräkning i brottgränstillstånd. Om armeringsmängden inte är tillräcklig ändras A_s så att sprickviddskravet uppfylls.

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g_{\text{v}} := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H_{\text{v}} := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brukgränstillstånd (SLS)

$$q_{\text{SLS}} := G_{\text{kar.vatten}} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{SLS}} := \frac{q_{\text{SLS}} \cdot H^2}{6} = 208.333 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

$$c_{\text{min}} := 32 \text{mm}$$

$$c_{\text{m}} := c_{\text{min}} + 10 \text{mm} = 0.042 \text{m}$$

$$\phi := 32 \text{mm}$$

$$b := 1 \cdot \text{m}$$

$$h := 350 \text{mm}$$

$$d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.292 \text{m}$$

Täckande betongskikt

Basmått (tolerans)

Armeringens diameter

Väggtvärsnittets bredd (enhetsbredd)

Väggtvärsnittets höjd

Effektiv höjd

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{\text{tekv}} = 0,40$ Sprickviddskrav $w_{\text{k1}} := -0.005 \cdot \frac{H}{h} + 0.225 = 0.154$ (mm)

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

 $f_{\text{ck}} := 40 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{c}} := 1.5$ $f_{\text{cd}} := \frac{f_{\text{ck}}}{1.5} = 26.667 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{cm}} := 48 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{ctm}} := 3.5 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{cm}} := 35 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{\text{cu}} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.032 \text{ m}$ $f_{\text{yk}} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{s}} := 1.15$ $f_{\text{yd}} := \frac{f_{\text{yk}}}{\gamma_{\text{s}}} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{s}} := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{\text{syd}} := \frac{f_{\text{yd}}}{E_{\text{s}}} = 2.174 \times 10^{-3}$ $A_{\text{s}} := 10.900 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$

Ändras så att sprickviddskravet uppfylls

4. Brukgränstillstånd

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 0.35 \text{ m}^2$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c \cdot 1000}{u \cdot m} = 700$$

$$\beta_{f,cm} := 2.43$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.2} = 1.151$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.365$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 13.512$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.315 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 1.976 \times 10^{-4}$$

Uttorkningskrympning

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} - 10 \right) \cdot 10^{-6} = 7.5 \times 10^{-5}$$

Autogen krympning

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.726 \times 10^{-4}$$

Slutligt krympmått

Tyngdpunktsekvation

$$\frac{b \cdot x^2}{2} := \alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot (d - x)$$

$$x_1 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) - \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = -0.475 \text{ m}$$

$$x_2 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) + \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = 0.181 \text{ m}$$

$$x := x_2$$

Moment kring F_c

$$\sigma_s := \frac{M_{\text{SLS}}}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right)} = 82.491 \cdot \text{MPa}$$

Karakteristisk sprickvidd

$$k_1 := 0.8$$

$$k_2 := 0.5$$

$$k_3 := 7 \cdot \frac{\phi}{c} = 5.333$$

$$k_4 := 0.425$$

$$h_{\text{c.ef}} := \min \left[\frac{h}{2}, 2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3} \right] = 0.056 \text{ m}$$

$$A_{\text{ef}} := h_{\text{c.ef}} \cdot b = 0.056 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{p.ef}} := \frac{A_s}{A_{\text{ef}}} = 0.193$$

$$s_{\text{r.max}} := k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{\text{p.ef}}} = 0.252 \text{ m}$$

$$k_t := 0.4$$

$$\alpha_1 := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.714$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \Delta\varepsilon := \frac{\sigma_s - (1 + \alpha_1 \cdot \rho_{p.ef}) \cdot k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p.ef}}}{E_s} + \varepsilon_{cs,\infty} = 6.088 \times 10^{-4}$$

$$0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 2.475 \times 10^{-4} < \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}$$

$$W_k := s_{r,max} \cdot \Delta\varepsilon = 0.154 \cdot \text{mm}$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 13.553$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 0.074$$

Täthetsklass 2, ULS, h = 350 mm

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brottgränstillstånd (ULS)

$$\gamma_{G,j,\text{sup}} := 1.35$$

$$q_{\text{ULS}} := \gamma_d \cdot \gamma_{G,i,\text{sup}} \cdot G_{\text{kar.vatten}} = 67.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{ULS}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot H^2}{6} = 281.25 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

| | |
|---|--------------------------------------|
| $c_{\text{min}} := 20\text{mm}$ | Täckande betongskikt |
| $c_{\text{eff}} := c_{\text{min}} + 10\text{mm} = 0.03\text{m}$ | Basmått (tolerans) |
| $\phi := 20\text{mm}$ | Armeringens diameter |
| $b := 1 \cdot \text{m}$ | Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd) |
| $h := 350\text{mm}$ | Väggtvårsnittets höjd |
| $d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.31\text{m}$ | Effektiv höjd |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{ct_{ekv}} = 0,40$ Sprickviddskrav $w_{max} = 0,05 \text{ mm}$

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

 $f_{ck} := 40 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_c := 1.5$ $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.5} = 26.667 \cdot \text{MPa}$ $f_{ctm} := 3.5 \cdot \text{MPa}$ $E_{cm} := 35 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{cu} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.02 \text{ m}$ $f_{yk} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_s := 1.15$ $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_s := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{syd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 2.174 \times 10^{-3}$

4. Brottgränstillstånd

Krafter

$$F_c := \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$F_s := \sigma_s \cdot A_s$$

Kraftjämvikt

$$F_c := F_s$$

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x = \sigma_s \cdot A_s$$

Moment kring F_s

$$x_1 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 0.045 \text{ m}$$

$$x_2 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 0.701 \text{ m}$$

$$x := x_1$$

Stältöjning

$$\epsilon_s := \frac{(d - x) \cdot \epsilon_{cu}}{x} = 0.021$$

$$\epsilon_s > \epsilon_{syd} \Rightarrow \sigma_s := f_{yd}$$

Armeringsmängd

$$A_s := \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x}{\sigma_s} = 2.22 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 7.066$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_n := \frac{1}{n} = 0.142$$

Täthetsklass 2, SLS, h = 350 mm

Som ingångsvärde till beräkning av sprickvidd i bruksgränstillstånd används samma A_s som ges vid beräkning i brottgränstillstånd. Om armeringsmängden inte är tillräcklig ändras A_s så att sprickviddskravet uppfylls.

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brukgränstillstånd (SLS)

$$q_{\text{SLS}} := G_{\text{kar.vatten}} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{SLS}} := \frac{q_{\text{SLS}} \cdot H^2}{6} = 208.333 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

$$c_{\text{min}} := 32 \text{ mm}$$

$$c := c_{\text{min}} + 10 \text{ mm} = 0.042 \text{ m}$$

$$\phi := 32 \text{ mm}$$

$$b := 1 \cdot \text{m}$$

$$h := 350 \text{ mm}$$

$$d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.292 \text{ m}$$

Täckande betongskikt

Basmått (tolerans)

Armeringens diameter

Väggtvärsnittets bredd (enhetsbredd)

Väggtvärsnittets höjd

Effektiv höjd

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{\text{tekv}} = 0,40$ Sprickviddskrav $w_{\text{max}} = 0,05 \text{ mm}$

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

 $f_{\text{ck}} := 40 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{c}} := 1.5$ $f_{\text{cd}} := \frac{f_{\text{ck}}}{1.5} = 26.667 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{cm}} := 48 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{ctm}} := 3.5 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{cm}} := 35 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{\text{cu}} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.032 \text{ m}$ $f_{\text{yk}} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{s}} := 1.15$ $f_{\text{yd}} := \frac{f_{\text{yk}}}{\gamma_{\text{s}}} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{s}} := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{\text{syd}} := \frac{f_{\text{yd}}}{E_{\text{s}}} = 2.174 \times 10^{-3}$ $A_{\text{s}} := 100000.000 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$

Ändras så att sprickviddskravet uppfylls

4. Brukgränstillstånd

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 0.35 \text{ m}^2$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c \cdot 1000}{u \cdot m} = 700$$

$$\beta_{f,cm} := 2.43$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.2} = 1.151$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.365$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 13.512$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.315 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 1.976 \times 10^{-4}$$

Uttorkningskrypning

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} - 10 \right) \cdot 10^{-6} = 7.5 \times 10^{-5}$$

Autogen krypning

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.726 \times 10^{-4}$$

Slutligt krypmaß

Tyngdpunktsekvation

$$\frac{b \cdot x^2}{2} := \alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot (d - x)$$

$$x_1 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) - \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = -2.703 \times 10^3 \text{ m}$$

$$x_2 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) + \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = 0.292 \text{ m}$$

$$x := x_2$$

Moment kring F_c

$$\sigma_s := \frac{M_{\text{SLS}}}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right)} = 0.011 \cdot \text{MPa}$$

Karakteristisk sprickvidd

$$k_1 := 0.8$$

$$k_2 := 0.5$$

$$k_3 := 7 \cdot \frac{\phi}{c} = 5.333$$

$$k_4 := 0.425$$

$$h_{\text{c.ef}} := \min \left[\frac{h}{2}, 2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3} \right] = 0.019 \text{ m}$$

$$A_{\text{ef}} := h_{\text{c.ef}} \cdot b = 0.019 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{p.ef}} := \frac{A_s}{A_{\text{ef}}} = 5.17 \times 10^3$$

$$s_{\text{r.max}} := k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{\text{p.ef}}} = 0.224 \text{ m}$$

$$k_t := 0.4$$

$$\alpha_1 := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.714$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \Delta\varepsilon := \frac{\sigma_s - (1 + \alpha_1 \cdot \rho_{p.ef}) \cdot k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p.ef}}}{E_s} + \varepsilon_{cs,\infty} = 2.326 \times 10^{-4}$$

$$0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 3.21 \times 10^{-8} < \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}$$

$$W_k := s_{r,max} \cdot \Delta\varepsilon = 0.052 \cdot \text{mm}$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 1.243 \times 10^5$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\wedge} := \frac{1}{n} = 8.042 \times 10^{-6}$$

Täthetsklass 0, ULS, h = 500 mm

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brottgränstillstånd (ULS)

$$\gamma_{G,j,\text{sup}} := 1.35$$

$$q_{\text{ULS}} := \gamma_d \cdot \gamma_{G,i,\text{sup}} \cdot G_{\text{kar.vatten}} = 67.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{ULS}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot H^2}{6} = 281.25 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

| | |
|--|--------------------------------------|
| $c_{\text{min}} := 25\text{mm}$ | Täckande betongskikt |
| $c_{\text{m}} := c_{\text{min}} + 10\text{mm} = 0.035 \text{ m}$ | Basmått (tolerans) |
| $\phi := 16\text{mm}$ | Armeringens diameter |
| $b := 1 \cdot \text{m}$ | Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd) |
| $h := 500\text{mm}$ | Väggtvårsnittets höjd |
| $d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.457 \text{ m}$ | Effektiv höjd |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{ct_{ekv}} = 0,60$ Sprickviddskrav $w_{max} = 0,4 \text{ mm}$

Livslängd L100

Betong

Klass C30/37

 $f_{ck} := 30 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_c := 1.5$ $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.5} = 20 \cdot \text{MPa}$ $f_{ctm} := 2.9 \cdot \text{MPa}$ $E_{cm} := 33 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{cu} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.016 \text{ m}$ $f_{yk} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_s := 1.15$ $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_s := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{syd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 2.174 \times 10^{-3}$

4. Brottgränstillstånd

Krafter

$$F_c := \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$F_s := \sigma_s \cdot A_s$$

Kraftjämvikt

$$F_c := F_s$$

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x = \sigma_s \cdot A_s$$

Moment kring F_s

$$x_1 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 0.039 \text{ m}$$

$$x_2 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 1.059 \text{ m}$$

$$x := x_1$$

Stältöjning

$$\epsilon_s := \frac{(d - x) \cdot \epsilon_{cu}}{x} = 0.037$$

$$\epsilon_s > \epsilon_{syd} \Rightarrow \sigma_s := f_{yd}$$

Armeringsmängd

$$A_s := \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x}{\sigma_s} = 1.468 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 7.302$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 0.137$$

Täthetsklass 0, SLS, h = 500 mm

Som ingångsvärde till beräkning av sprickvidd i bruksgränstillstånd används samma A_s som ges vid beräkning i brottgränstillstånd. Om armeringsmängden inte är tillräcklig ändras A_s så att sprickviddskravet uppfylls.

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brukgränstillstånd (SLS)

$$q_{\text{SLS}} := G_{\text{kar.vatten}} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{SLS}} := \frac{q_{\text{SLS}} \cdot H^2}{6} = 208.333 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

$$c_{\text{min}} := 25 \text{mm}$$

$$c := c_{\text{min}} + 10 \text{mm} = 0.035 \text{m}$$

$$\phi := 16 \text{mm}$$

$$b := 1 \cdot \text{m}$$

$$h := 500 \text{mm}$$

$$d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.457 \text{m}$$

Täckande betongskikt

Basmått (tolerans)

Armeringens diameter

Väggtvärsnittets bredd (enhetsbredd)

Väggtvärsnittets höjd

Effektiv höjd

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{\text{tekv}} = 0,60$ Sprickviddskrav $w_{\text{max}} = 0,4 \text{ mm}$

Livslängd L100

Betong

Klass C30/37

 $f_{\text{ck}} := 30 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{c}} := 1.5$ $f_{\text{cd}} := \frac{f_{\text{ck}}}{1.5} = 20 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{cm}} := 38 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{ctm}} := 2.9 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{cm}} := 33 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{\text{cu}} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.016 \text{ m}$ $f_{\text{yk}} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{s}} := 1.15$ $f_{\text{yd}} := \frac{f_{\text{yk}}}{\gamma_{\text{s}}} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{s}} := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{\text{syd}} := \frac{f_{\text{yd}}}{E_{\text{s}}} = 2.174 \times 10^{-3}$ $A_{\text{s}} := 1.655 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$

Ändras så att sprickviddskravet uppfylls

4. Brukgränstillstånd

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 0.5 \text{ m}^2$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c \cdot 1000}{u \cdot m} = 1 \times 10^3$$

$$\beta_{f,cm} := 2.73$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.2} = 1.216$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.62$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 15.878$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.356 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 2.233 \times 10^{-4}$$

Uttorkningskrympning

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} - 10 \right) \cdot 10^{-6} = 5 \times 10^{-5}$$

Autogen krympning

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.733 \times 10^{-4}$$

Slutligt krympmått

Tyngdpunktsekvation

$$\frac{b \cdot x^2}{2} := \alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot (d - x)$$

$$x_1 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) - \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = -0.183 \text{ m}$$

$$x_2 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) + \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = 0.131 \text{ m}$$

$$x := x_2$$

Moment kring F_c

$$\sigma_s := \frac{M_{\text{SLS}}}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right)} = 304.529 \cdot \text{MPa}$$

Karakteristisk sprickvidd

$$k_1 := 0.8$$

$$k_2 := 0.5$$

$$k_3 := 7 \cdot \frac{\phi}{c} = 3.2$$

$$k_4 := 0.425$$

$$h_{\text{c.ef}} := \min \left[\frac{h}{2}, 2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3} \right] = 0.108 \text{ m}$$

$$A_{\text{ef}} := h_{\text{c.ef}} \cdot b = 0.108 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{p.ef}} := \frac{A_s}{A_{\text{ef}}} = 0.015$$

$$s_{\text{r.max}} := k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{\text{p.ef}}} = 0.289 \text{ m}$$

$$k_t := 0.4$$

$$\alpha_1 := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.061$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \Delta\varepsilon := \frac{\sigma_s - (1 + \alpha_1 \cdot \rho_{p.ef}) \cdot k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p.ef}}}{E_s} + \varepsilon_{cs,\infty} = 1.384 \times 10^{-3}$$

$$0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 9.136 \times 10^{-4} < \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}$$

$$w_k := s_{r,max} \cdot \Delta\varepsilon = 0.4 \cdot \text{mm}$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 8.231$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 0.121$$

Täthetsklass 1, ULS, h = 500 mm

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brottgränstillstånd (ULS)

$$\gamma_{G,j,\text{sup}} := 1.35$$

$$q_{\text{ULS}} := \gamma_d \cdot \gamma_{G,i,\text{sup}} \cdot G_{\text{kar.vatten}} = 67.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{ULS}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot H^2}{6} = 281.25 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

| | |
|--|--------------------------------------|
| $c_{\text{min}} := 16\text{mm}$ | Täckande betongskikt |
| $c_{\text{m}} := c_{\text{min}} + 10\text{mm} = 0.026\text{m}$ | Basmått (tolerans) |
| $\phi := 16\text{mm}$ | Armeringens diameter |
| $b := 1 \cdot \text{m}$ | Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd) |
| $h := 500\text{mm}$ | Väggtvårsnittets höjd |
| $d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.466\text{m}$ | Effektiv höjd |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{\text{tekv}} = 0,40$ Sprickviddskrav $w_{\text{k1}} := -0.005 \cdot \frac{H}{h} + 0.225 = 0.175$ (mm)

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

 $f_{\text{ck}} := 40 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{c}} := 1.5$ $f_{\text{cd}} := \frac{f_{\text{ck}}}{1.5} = 26.667 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{ctm}} := 3.5 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{cm}} := 35 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{\text{cu}} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.016 \text{ m}$ $f_{\text{yk}} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{s}} := 1.15$ $f_{\text{yd}} := \frac{f_{\text{yk}}}{\gamma_{\text{s}}} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{s}} := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{\text{syd}} := \frac{f_{\text{yd}}}{E_{\text{s}}} = 2.174 \times 10^{-3}$

4. Brottgränstillstånd

Krafter

$$F_c := \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$F_s := \sigma_s \cdot A_s$$

Kraftjämvikt

$$F_c := F_s$$

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x = \sigma_s \cdot A_s$$

Moment kring F_s

$$x_1 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 0.029 \text{ m}$$

$$x_2 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 1.092 \text{ m}$$

$$x := x_1$$

Stältöjning

$$\epsilon_s := \frac{(d - x) \cdot \epsilon_{cu}}{x} = 0.053$$

$$\epsilon_s > \epsilon_{syd} \Rightarrow \sigma_s := f_{yd}$$

Armeringsmängd

$$A_s := \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x}{\sigma_s} = 1.425 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 7.085$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 0.141$$

Täthetsklass 1, SLS, h = 500 mm

Som ingångsvärde till beräkning av sprickvidd i bruksgränstillstånd används samma A_s som ges vid beräkning i brottgränstillstånd. Om armeringsmängden inte är tillräcklig ändras A_s så att sprickviddskravet uppfylls.

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brukgränstillstånd (SLS)

$$q_{\text{SLS}} := G_{\text{kar.vatten}} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{SLS}} := \frac{q_{\text{SLS}} \cdot H^2}{6} = 208.333 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

$$c_{\text{min}} := 25 \text{mm}$$

$$c := c_{\text{min}} + 10 \text{mm} = 0.035 \text{m}$$

$$\phi := 25 \text{mm}$$

$$b := 1 \cdot \text{m}$$

$$h := 500 \text{mm}$$

$$d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.452 \text{m}$$

Täckande betongskikt

Basmått (tolerans)

Armeringens diameter

Väggtvärsnittets bredd (enhetsbredd)

Väggtvärsnittets höjd

Effektiv höjd

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{\text{tekv}} = 0,40$ Sprickviddskrav $w_{\text{k1}} := -0.005 \cdot \frac{H}{h} + 0.225 = 0.175$ (mm)

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

 $f_{\text{ck}} := 40 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{c}} := 1.5$ $f_{\text{cd}} := \frac{f_{\text{ck}}}{1.5} = 26.667 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{cm}} := 48 \cdot \text{MPa}$ $f_{\text{ctm}} := 3.5 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{cm}} := 35 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{\text{cu}} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.025 \text{ m}$ $f_{\text{yk}} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_{\text{s}} := 1.15$ $f_{\text{yd}} := \frac{f_{\text{yk}}}{\gamma_{\text{s}}} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_{\text{s}} := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{\text{syd}} := \frac{f_{\text{yd}}}{E_{\text{s}}} = 2.174 \times 10^{-3}$ $A_{\text{s}} := 4.650 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$

Ändras så att sprickviddskravet uppfylls

4. Brukgränstillstånd

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 0.5 \text{ m}^2$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c \cdot 1000}{u \cdot m} = 1 \times 10^3$$

$$\beta_{f,cm} := 2.43$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.2} = 1.127$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.336$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 13.351$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.315 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 1.976 \times 10^{-4}$$

Uttorkningskrypning

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} - 10 \right) \cdot 10^{-6} = 7.5 \times 10^{-5}$$

Autogen krypning

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.726 \times 10^{-4}$$

Slutligt krypmaat

Tyngdpunktsekvation

$$\frac{b \cdot x^2}{2} := \alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot (d - x)$$

$$x_1 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) - \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = -0.307 \text{ m}$$

$$x_2 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) + \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = 0.183 \text{ m}$$

$$x := x_2$$

Moment kring F_c

$$\sigma_s := \frac{M_{\text{SLS}}}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right)} = 114.433 \cdot \text{MPa}$$

Karakteristisk sprickvidd

$$k_1 := 0.8$$

$$k_2 := 0.5$$

$$k_3 := 7 \cdot \frac{\phi}{c} = 5$$

$$k_4 := 0.425$$

$$h_{\text{c.ef}} := \min \left[\frac{h}{2}, 2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3} \right] = 0.106 \text{ m}$$

$$A_{\text{ef}} := h_{\text{c.ef}} \cdot b = 0.106 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{p.ef}} := \frac{A_s}{A_{\text{ef}}} = 0.044$$

$$s_{\text{r.max}} := k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{\text{p.ef}}} = 0.272 \text{ m}$$

$$k_t := 0.4$$

$$\alpha_1 := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.714$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \Delta\varepsilon := \frac{\sigma_s - (1 + \alpha_1 \cdot \rho_{p.ef}) \cdot k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p.ef}}}{E_s} + \varepsilon_{cs.\infty} = 6.457 \times 10^{-4}$$

$$0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 3.433 \times 10^{-4} < \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}$$

$$W_k := s_{r.max} \cdot \Delta\varepsilon = 0.175 \cdot \text{mm}$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 9.473$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 0.106$$

Täthetsklass 2, ULS, h = 500 mm

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brottgränstillstånd (ULS)

$$\gamma_{G,j,\text{sup}} := 1.35$$

$$q_{\text{ULS}} := \gamma_d \cdot \gamma_{G,i,\text{sup}} \cdot G_{\text{kar.vatten}} = 67.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{ULS}} := \frac{q_{\text{ULS}} \cdot H^2}{6} = 281.25 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

| | |
|--|--------------------------------------|
| $c_{\text{min}} := 16\text{mm}$ | Täckande betongskikt |
| $c_{\text{m}} := c_{\text{min}} + 10\text{mm} = 0.026\text{m}$ | Basmått (tolerans) |
| $\phi := 16\text{mm}$ | Armeringens diameter |
| $b := 1 \cdot \text{m}$ | Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd) |
| $h := 500\text{mm}$ | Väggtvårsnittets höjd |
| $d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.466\text{m}$ | Effektiv höjd |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{ct_{ekv}} = 0,40$ Sprickviddskrav $w_{max} = 0,05 \text{ mm}$

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

 $f_{ck} := 40 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_c := 1.5$ $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.5} = 26.667 \cdot \text{MPa}$ $f_{ctm} := 3.5 \cdot \text{MPa}$ $E_{cm} := 35 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{cu} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.016 \text{ m}$ $f_{yk} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_s := 1.15$ $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_s := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{syd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 2.174 \times 10^{-3}$

4. Brottgränstillstånd

Krafter

$$F_c := \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$F_s := \sigma_s \cdot A_s$$

Kraftjämvikt

$$F_c := F_s$$

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x = \sigma_s \cdot A_s$$

Moment kring F_s

$$x_1 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 0.029 \text{ m}$$

$$x_2 := \frac{\frac{d}{\beta}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\frac{d}{\beta}}{2}\right)^2 - \frac{M_{ULS}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot \beta}} = 1.092 \text{ m}$$

$$x := x_1$$

Stältöjning

$$\epsilon_s := \frac{(d - x) \cdot \epsilon_{cu}}{x} = 0.053$$

$$\epsilon_s > \epsilon_{syd} \Rightarrow \sigma_s := f_{yd}$$

Armeringsmängd

$$A_s := \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x}{\sigma_s} = 1.425 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 7.085$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 0.141$$

Täthetsklass 2, SLS, h = 500 mm

Som ingångsvärde till beräkning av sprickvidd i bruksgränstillstånd används samma A_s som ges vid beräkning i brottgränstillstånd. Om armeringsmängden inte är tillräcklig ändras A_s så att sprickviddskravet uppfylls.

1. Indata

$$\rho_{\text{vatten}} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g := 10 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Permanent last

$$\gamma_{\text{vatten}} := \rho_{\text{vatten}} \cdot g = 10 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$H := 5 \cdot \text{m} \quad \text{Väggens höjd}$$

$$G_{\text{kar.vatten}} := \gamma_{\text{vatten}} \cdot H \cdot 1 \cdot \text{m} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\gamma_d := 1 \quad \text{Säkerhetsklass 3}$$

2. Lastkombination enligt SS-EN 1990

Brukgränstillstånd (SLS)

$$q_{\text{SLS}} := G_{\text{kar.vatten}} = 50 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{\text{SLS}} := \frac{q_{\text{SLS}} \cdot H^2}{6} = 208.333 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

3. Förutsättningar

$$c_{\text{min}} := 32 \text{mm}$$

$$c := c_{\text{min}} + 10 \text{mm} = 0.042 \text{m}$$

$$\phi := 32 \text{mm}$$

$$b := 1 \cdot \text{m}$$

$$h := 500 \text{mm}$$

$$d := h - c - \frac{\phi}{2} = 0.442 \text{m}$$

Täckande betongskikt

Basmått (tolerans)

Armeringens diameter

Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd)

Väggtvårsnittets höjd

Effektiv höjd

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{t_{ekv}} = 0,40$ Sprickviddskrav $w_{max} = 0,05 \text{ mm}$

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

 $f_{ck} := 40 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_c := 1.5$ $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.5} = 26.667 \cdot \text{MPa}$ $f_{cm} := 48 \cdot \text{MPa}$ $f_{ctm} := 3.5 \cdot \text{MPa}$ $E_{cm} := 35 \cdot \text{GPa}$ $\alpha := 0.81$ $\beta := 0.416$ $\epsilon_{cu} := 3.5 \cdot 10^{-3}$ Armering

B500B

 $\phi = 0.032 \text{ m}$ $f_{yk} := 500 \cdot \text{MPa}$ $\gamma_s := 1.15$ $f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \cdot \text{MPa}$ $E_s := 200 \cdot \text{GPa}$ $\epsilon_{syd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 2.174 \times 10^{-3}$ $A_s := 100000.000 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^2$

Ändras så att sprickviddskravet uppfylls

4. Brukgränstillstånd

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 0.5 \text{ m}^2$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c \cdot 1000}{u \cdot m} = 1 \times 10^3$$

$$\beta_{f,cm} := 2.43$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm} \cdot \frac{1}{\text{MPa}}} \right)^{0.2} = 1.127$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.336$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 13.351$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.315 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 1.976 \times 10^{-4}$$

Uttorkningskrympning

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot \left(f_{ck} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} - 10 \right) \cdot 10^{-6} = 7.5 \times 10^{-5}$$

Autogen krympning

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.726 \times 10^{-4}$$

Slutligt krympmått

Tyngdpunktsekvation

$$\frac{b \cdot x^2}{2} := \alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot (d - x)$$

$$x_1 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) - \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = -2.671 \times 10^3 \text{ m}$$

$$x_2 := \left(\frac{-\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right) + \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{\alpha_{\text{ef}} \cdot A_s \cdot d}{\frac{b}{2}}} = 0.442 \text{ m}$$

$$x := x_2$$

Moment kring F_c

$$\sigma_s := \frac{M_{\text{SLS}}}{A_s \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right)} = 7.07 \times 10^{-3} \cdot \text{MPa}$$

Karakteristisk sprickvidd

$$k_1 := 0.8$$

$$k_2 := 0.5$$

$$k_3 := 7 \cdot \frac{\phi}{c} = 5.333$$

$$k_4 := 0.425$$

$$h_{\text{c.ef}} := \min \left[\frac{h}{2}, 2.5 \cdot (h - d), \frac{h - x}{3} \right] = 0.019 \text{ m}$$

$$A_{\text{ef}} := h_{\text{c.ef}} \cdot b = 0.019 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{p.ef}} := \frac{A_s}{A_{\text{ef}}} = 5.166 \times 10^3$$

$$s_{\text{r.max}} := k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{\text{p.ef}}} = 0.224 \text{ m}$$

$$k_t := 0.4$$

$$\alpha_1 := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.714$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \Delta\varepsilon := \frac{\sigma_s - (1 + \alpha_1 \cdot \rho_{p.ef}) \cdot k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{p.ef}}}{E_s} + \varepsilon_{cs,\infty} = 2.326 \times 10^{-4}$$

$$0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} = 2.121 \times 10^{-8} < \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}$$

$$W_k := s_{r,max} \cdot \Delta\varepsilon = 0.052 \cdot \text{mm}$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 1.243 \times 10^5$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{av}} := \frac{1}{n} = 8.042 \times 10^{-6}$$

Bilaga B - Beräkningar krympning

Täthetsklass 0, L = 10 m

1. Förutsättningar

| | |
|---|---|
| $c_{\min} := 25$ | Täckande betongskikt (mm) |
| $c_{\text{eff}} := c_{\min} + 10 + 20 = 55$ | Basmått (tolerans) (mm) |
| $b := 1000$ | Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd) (mm) |
| $L_{\text{eff}} := 10000$ | Väggens längd (mm) |
| $h := 350$ | Väggtvårsnittets höjd (mm) |
| $H_{\text{eff}} := 5000$ | Väggens höjd (mm) |
| $R_{\text{eff}} := 0.5$ | Graden av tvång |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{\text{ct,ekv}} = 0,60$

Sprickviddskrav $w_{\text{max}} = 0,4 \text{ mm}$

Livslängd L100

Betong

Klass C30/37

| | |
|--|--------------------|
| $f_{\text{ck}} := 30$ | MPa |
| $f_{\text{cm}} := f_{\text{ck}} + 8 = 38$ | MPa |
| $f_{\text{ctm}} := 2.9$ | MPa |
| $\alpha := 0.6$ | Långtidslast |
| $f_{\text{ctm,sus}} := \alpha \cdot f_{\text{ctm}} = 1.74$ | MPa |
| $E_{\text{cm}} := 33 \times 10^3$ | MPa |
| $f_{\text{ctk0.05}} := 2$ | MPa |
| $f_{\text{ctk0.05.1}} := 0.6 \cdot f_{\text{ctk0.05}} = 1.2$ | MPa (Långtidslast) |

Armering

B500B

| | |
|-------------------------|--|
| $\phi := 12$ | (mm) |
| $f_{\text{yk}} := 500$ | MPa |
| $E_s := 200 \cdot 10^3$ | MPa |
| $A_s := 1975$ | mm ² Ändras så att sprickviddskravet uppfylls |

2. Grundvärden för krypning och krympning

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 3.5 \times 10^5$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 700$$

$$\beta_{f,cm} := 2.73$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.2} = 1.245$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.659$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 16.114$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.356 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 2.233 \times 10^{-4} \quad \text{Uttorkningskrypning}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 5 \times 10^{-5} \quad \text{Autogen krympning}$$

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.733 \times 10^{-4} \quad \text{Slutligt krympmått}$$

Krympkraft

$$F_{cs} := \varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_s \cdot A_s = 1.08 \times 10^5$$

3. Tvärsnittskonstanter

Ekvivalent betongtvärsnitt

$$A_{I,ef} := (h \cdot b) + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_s = 3.799 \times 10^5$$

Effektiv betongarea

$$h_{c,ef} := \min \left[2.5 \left(c + \frac{\phi}{2} \right), \frac{h}{2} \right] = 152.5$$

$$A_{c,ef} := 2 \cdot h_{c,ef} \cdot b = 3.05 \times 10^5 \quad \text{Total area av dragna kantzoner i tvärsnittet}$$

4. Bedömning av sprickrisk

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} = 1.367 \times 10^{-4}$$

$$\frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) = 9.669 \times 10^{-5}$$

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} > \frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) \quad \text{Risk för spricka!}$$

5. Beräkning av karakteristisk sprickbredd

Sprickviddens medelvärde

$$\sigma_{s,ref} := 243$$

$$w_m := 1.24 \cdot 0.42 \cdot \left[\frac{\phi \cdot (\sigma_{s,ref}^2)}{0.22 \cdot f_{cm} \cdot E_s \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \frac{A_s}{A_{c,ef}} \right)} \right]^{0.826} + \frac{4 \cdot \phi \cdot \sigma_{s,ref}}{E_s} = 0.307$$

Slutlig stålspänning

Antar, $n_{cr} := 1$, antal spickor

$$E_{cm,ef} := \frac{E_{cm} \cdot 10^6}{1 + \varphi_{\infty,t0}} = 1.241 \times 10^{10}$$

$$\sigma_s := R \cdot \left(-\varepsilon_{cs,\infty} \cdot L \cdot 10^{-3} + \frac{F_{cs} \cdot L \cdot 10^{-3}}{E_{cm,ef}} \right) \dots \quad \text{solve} \rightarrow 242.6383409519510359$$

$$+ \frac{L \cdot 10^{-3} \sigma_s \cdot 10^6 \cdot A_s \cdot 10^{-6}}{E_{cm,ef} \cdot A_{I,ef} \cdot 10^{-6}} + n_{cr} \cdot w_m \cdot 10^{-3}$$

Kraft på de ospruckna partierna

$$N_{\text{ospr}} := \sigma_s \cdot A_s \cdot 10^{-3} = 479.211$$

Kraft för att initiera ny spricka

$$N_{\text{cr}} := f_{\text{ctm.sus}} \cdot A_{\text{I.ef}} \cdot 10^{-3} = 660.94$$

Karakteristisk sprickvidd

$$w_k := 1.3 \cdot w_m = 0.399$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 17.463$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{ar}} := \frac{2 \cdot b}{n} = 114.529$$

Täthetsklass 1, L = 10 m

1. Förutsättningar

| | |
|--|---|
| $c_{\min} := 25$ | Täckande betongskikt (mm) |
| $c_{\text{sv}} := c_{\min} + 10 + 32 = 67$ | Basmått (tolerans) (mm) |
| $b := 1000$ | Väggtvärsnittets bredd (enhetsbredd) (mm) |
| $L_{\text{sv}} := 10000$ | Väggens längd (mm) |
| $h := 350$ | Väggtvärsnittets höjd (mm) |
| $H_{\text{sv}} := 5000$ | Väggens höjd (mm) |
| $R_{\text{sv}} := 0.5$ | Graden av tvång |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{\text{ctekv}} = 0,40$

Sprickviddskrav $w_{k1} := -0.005 \cdot \frac{H}{h} + 0.225 = 0.154$ (mm)

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

$f_{\text{ck}} := 40$ MPa

$f_{\text{cm}} := f_{\text{ck}} + 8 = 48$ MPa

$f_{\text{ctm}} := 3.5$ MPa

$\alpha := 0.6$ Långtidslast

$f_{\text{ctm.sus}} := \alpha \cdot f_{\text{ctm}} = 2.1$ MPa

$E_{\text{cm}} := 35 \times 10^3$ MPa

$f_{\text{ctk0.05}} := 2.5$ MPa

$f_{\text{ctk0.05.1}} := 0.6 \cdot f_{\text{ctk0.05}} = 1.5$ MPa (Långtidslast)

Armering

B500B

$\phi := 25$ (mm)

$f_{\text{yk}} := 500$ MPa

$E_s := 200 \cdot 10^3$ MPa

$A_s := 7800$ mm² Ändras så att sprickviddskravet uppfylls

2. Grundvärden för krypning och krympning

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 3.5 \times 10^5$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 700$$

$$\beta_{f,cm} := 2.43$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.2} = 1.151$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.365$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 13.512$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.315 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 1.976 \times 10^{-4} \quad \text{Uttorkningskrympning}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 7.5 \times 10^{-5} \quad \text{Autogen krympning}$$

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.726 \times 10^{-4} \quad \text{Slutligt krympmått}$$

Krympkraft

$$F_{cs} := \varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_s \cdot A_s = 4.252 \times 10^5$$

3. Tvärsnittskonstanter

Ekvivalent betongtvärsnitt

$$A_{I,ef} := (h \cdot b) + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_s = 4.476 \times 10^5$$

Effektiv betongarea

$$h_{c,ef} := \min \left[2.5 \left(c + \frac{\phi}{2} \right), \frac{h}{2} \right] = 175$$

$$A_{c,ef} := 2 \cdot h_{c,ef} \cdot b = 3.5 \times 10^5 \quad \text{Total area av dragna kantzoner i tvärsnittet}$$

4. Bedömning av sprickrisk

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} = 1.363 \times 10^{-4}$$

$$\frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) = 1.013 \times 10^{-4}$$

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} > \frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) \quad \text{Risk för spricka!}$$

5. Beräkning av karakteristisk sprickbredd

Sprickviddens medelvärde

$$\sigma_{s,ref} := 93.5$$

$$w_m := 1.24 \cdot 0.42 \cdot \left[\frac{\phi \cdot (\sigma_{s,ref}^2)}{0.22 \cdot f_{cm} \cdot E_s \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \frac{A_s}{A_{c,ef}} \right)} \right]^{0.826} + \frac{4 \cdot \phi \cdot \sigma_{s,ref}}{E_s} = 0.119$$

Slutlig stålspänning

Antar, $n_{cr} := 1$, antal spickor

$$E_{cm,ef} := \frac{E_{cm} \cdot 10^6}{1 + \varphi_{\infty,t0}} = 1.48 \times 10^{10}$$

$$\sigma_s := R \cdot \left(-\varepsilon_{cs,\infty} \cdot L \cdot 10^{-3} + \frac{F_{cs} \cdot L \cdot 10^{-3}}{E_{cm,ef}} \right) \dots \quad \text{solve} \rightarrow 93.44366659094118753$$

$$+ \frac{L \cdot 10^{-3} \sigma_s \cdot 10^6 \cdot A_s \cdot 10^{-6}}{E_{cm,ef} \cdot A_{I,ef} \cdot 10^{-6}} + n_{cr} \cdot w_m \cdot 10^{-3}$$

Kraft på de ospruckna partierna

$$N_{\text{ospr}} := \sigma_s \cdot A_s \cdot 10^{-3} = 728.861$$

Kraft för att initiera ny spricka

$$N_{\text{cr}} := f_{\text{ctm.sus}} \cdot A_{\text{I.ef}} \cdot 10^{-3} = 939.939$$

Karakteristisk sprickvidd

$$w_k := 1.3 \cdot w_m = 0.155$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 15.89$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{ospr}} := \frac{2 \cdot b}{n} = 125.865$$

Täthetsklass 2, L = 10 m

1. Förutsättningar

| | |
|---------------------------------------|--|
| $c_{\min} := 32$ | Täckande betongskikt (mm) |
| $c_{\min} := c_{\min} + 10 + 32 = 74$ | Basmått (tolerans) (mm) |
| $b := 1000$ | Väggvärsnittets bredd (enhetsbredd) (mm) |
| $L := 10000$ | Väggens längd (mm) |
| $h := 350$ | Väggvärsnittets höjd (mm) |
| $H := 5000$ | Väggens höjd (mm) |
| $R := 0.5$ | Graden av tvång |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{ct_{ekv}} = 0,40$

Sprickviddskrav $w_{\max} = 0,05$ mm

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

$f_{ck} := 40$ MPa

$f_{cm} := f_{ck} + 8 = 48$ MPa

$f_{ctm} := 3.5$ MPa

$\alpha := 0.6$ Långtidslast

$f_{ctm.sus} := \alpha \cdot f_{ctm} = 2.1$ MPa

$E_{cm} := 35 \times 10^3$ MPa

$f_{ctk0.05} := 2.5$ MPa

$f_{ctk0.05.1} := 0.6 \cdot f_{ctk0.05} = 1.5$ MPa (Långtidslast)

Armering

B500B

$\phi := 32$ (mm)

$f_{yk} := 500$ MPa

$E_s := 200 \cdot 10^3$ MPa

$A_s := 23500$ mm² Ändras så att sprickviddskravet uppfylls

2. Grundvärden för krypning och krympning

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 3.5 \times 10^5$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 700$$

$$\beta_{f,cm} := 2.43$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.2} = 1.151$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.365$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 13.512$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.315 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 1.976 \times 10^{-4} \quad \text{Uttorkningskrympning}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 7.5 \times 10^{-5} \quad \text{Autogen krympning}$$

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.726 \times 10^{-4} \quad \text{Slutligt krympmått}$$

Krympkraft

$$F_{cs} := \varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_s \cdot A_s = 1.281 \times 10^6$$

3. Tvärsnittskonstanter

Ekvivalent betongtvärsnitt

$$A_{I,ef} := (h \cdot b) + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_s = 6.44 \times 10^5$$

Effektiv betongarea

$$h_{c,ef} := \min \left[2.5 \left(c + \frac{\phi}{2} \right), \frac{h}{2} \right] = 175$$

$$A_{c,ef} := 2 \cdot h_{c,ef} \cdot b = 3.5 \times 10^5 \quad \text{Total area av dragna kantzoner i tvärsnittet}$$

4. Bedömning av sprickrisk

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} = 1.363 \times 10^{-4}$$

$$\frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) = 1.013 \times 10^{-4}$$

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} > \frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) \quad \text{Risk för spricka!}$$

5. Beräkning av karakteristisk sprickbredd

Sprickviddens medelvärde

$$\sigma_{s,ref} := 36$$

$$w_m := 1.24 \cdot 0.42 \cdot \left[\frac{\phi \cdot (\sigma_{s,ref}^2)}{0.22 \cdot f_{cm} \cdot E_s \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \frac{A_s}{A_{c,ef}} \right)} \right]^{0.826} + \frac{4 \cdot \phi \cdot \sigma_{s,ref}}{E_s} = 0.039$$

Slutlig stålspänning

Antar, $n_{cr} := 1$, antal spickor

$$E_{cm,ef} := \frac{E_{cm} \cdot 10^6}{1 + \varphi_{\infty,t0}} = 1.48 \times 10^{10}$$

$$\sigma_s := R \cdot \left(-\varepsilon_{cs,\infty} \cdot L \cdot 10^{-3} + \frac{F_{cs} \cdot L \cdot 10^{-3}}{E_{cm,ef}} \right) \dots \quad \text{solve} \rightarrow 36.17000540327619907$$

$$+ \frac{L \cdot 10^{-3} \sigma_s \cdot 10^6 \cdot A_s \cdot 10^{-6}}{E_{cm,ef} \cdot A_{I,ef} \cdot 10^{-6}} + n_{cr} \cdot w_m \cdot 10^{-3}$$

Kraft på de ospruckna partierna

$$N_{\text{ww}} := \sigma_s \cdot A_s \cdot 10^{-3} = 849.995$$

Kraft för att initiera ny spricka

$$N_{\text{cr}} := f_{\text{ctm.sus}} \cdot A_{\text{I.ef}} \cdot 10^{-3} = 1.352 \times 10^3$$

Karakteristisk sprickvidd

$$w_k := 1.3 \cdot w_m = 0.05$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 29.22$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{ww}} := \frac{2 \cdot b}{n} = 68.447$$

Täthetsklass 0, L = 5 m

1. Förutsättningar

| | |
|--|--|
| $c_{\min} := 25$ | Täckande betongskikt (mm) |
| $c_{\min} := c_{\min} + 10 + 20 = 55$ | Basmått (tolerans) (mm) |
| $b := 1000$ | Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd) (mm) |
| $L := 5000$ | Väggens längd (mm) |
| $h := 350$ | Väggtvårsnittets höjd (mm) |
| $H := 5000$ | Väggens höjd (mm) |
| $R := 0.5$ | Graden av tvång |
| <u>Exponeringsklass</u> | |
| XC2 | |
| Max $v_{ct_{ekv}} = 0,60$ | |
| Sprickviddskrav | $w_{\max} = 0,4$ mm |
| Livslängd | L100 |
| <u>Betong</u> | |
| Klass C30/37 | |
| $f_{ck} := 30$ | MPa |
| $f_{cm} := f_{ck} + 8 = 38$ | MPa |
| $f_{ctm} := 2.9$ | MPa |
| $\alpha := 0.6$ | Långtidslast |
| $f_{ctm.sus} := \alpha \cdot f_{ctm} = 1.74$ | MPa |
| $E_{cm} := 33 \times 10^3$ | MPa |
| $f_{ctk0.05} := 2.0$ | MPa |
| $f_{ctk0.05.1} := 0.6 \cdot f_{ctk0.05} = 1.2$ | MPa (Långtidslast) |
| <u>Armering</u> | |
| B500B | |
| $\phi := 10$ | (mm) |
| $f_{yk} := 500$ | MPa |
| $E_s := 200 \cdot 10^3$ | MPa |
| $A_s := 1250$ | mm ² Ändras så att sprickviddskravet uppfylls |

2. Grundvärden för krypning och krympning

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 3.5 \times 10^5$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 700$$

$$\beta_{f,cm} := 2.73$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.2} = 1.245$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.659$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 16.114$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.356 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 2.233 \times 10^{-4} \quad \text{Uttorkningskrympning}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 5 \times 10^{-5} \quad \text{Autogen krympning}$$

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.733 \times 10^{-4} \quad \text{Slutligt krympmått}$$

Krympkraft

$$F_{cs} := \varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_s \cdot A_s = 6.833 \times 10^4$$

3. Tvärsnittskonstanter

Ekvivalent betongtvärsnitt

$$A_{I,ef} := (h \cdot b) + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_s = 3.689 \times 10^5$$

Effektiv betongarea

$$h_{c,ef} := \min \left[2.5 \left(c + \frac{\phi}{2} \right), \frac{h}{2} \right] = 150$$

$$A_{c,ef} := 2 \cdot h_{c,ef} \cdot b = 3 \times 10^5 \quad \text{Total area av dragna kantzoner i tvärsnittet}$$

4. Bedömning av sprickrisk

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} = 1.367 \times 10^{-4}$$

$$\frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) = 9.669 \times 10^{-5}$$

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} > \frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) \quad \text{Risk för spricka!}$$

5. Beräkning av karakteristisk sprickbredd

Sprickviddens medelvärde

$$\sigma_{s,ref} := 266.8$$

$$w_m := 1.24 \cdot 0.42 \cdot \left[\frac{\phi \cdot (\sigma_{s,ref})^2}{0.22 \cdot f_{cm} \cdot E_s \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \frac{A_s}{A_{c,ef}} \right)} \right]^{0.826} + \frac{4 \cdot \phi \cdot \sigma_{s,ref}}{E_s} = 0.305$$

Slutlig stålspänning

Antar, $n_{cr} := 1$, antal spickor

$$E_{cm,ef} := \frac{E_{cm} \cdot 10^6}{1 + \varphi_{\infty,t0}} = 1.241 \times 10^{10}$$

$$\sigma_s := R \cdot \left(-\varepsilon_{cs,\infty} \cdot L \cdot 10^{-3} + \frac{F_{cs} \cdot L \cdot 10^{-3}}{E_{cm,ef}} \right) \dots \quad \text{solve} \rightarrow 266.7589956909561383$$

$$+ \frac{L \cdot 10^{-3} \sigma_s \cdot 10^6 \cdot A_s \cdot 10^{-6}}{E_{cm,ef} \cdot A_{I,ef} \cdot 10^{-6}} + n_{cr} \cdot w_m \cdot 10^{-3}$$

Kraft på de ospruckna partierna

$$N_{\text{ospr}} := \sigma_s \cdot A_s \cdot 10^{-3} = 333.449$$

Kraft för att initiera ny spricka

$$N_{\text{cr}} := f_{\text{ctm.sus}} \cdot A_{\text{I.ef}} \cdot 10^{-3} = 641.874$$

Karakteristisk sprickvidd

$$w_k := 1.3 \cdot w_m = 0.397$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 15.915$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{ospr}} := \frac{2 \cdot b}{n} = 125.664$$

Täthetsklass 1, L = 5 m

1. Förutsättningar

| | |
|---------------------------------------|---|
| $c_{\min} := 20$ | Täckande betongskikt (mm) |
| $c_{\min} := c_{\min} + 10 + 32 = 62$ | Basmått (tolerans) (mm) |
| $b := 1000$ | Väggtvårsnittets bredd (enhetsbredd) (mm) |
| $L_{\min} := 5000$ | Väggens längd (mm) |
| $h := 350$ | Väggtvårsnittets höjd (mm) |
| $H_{\min} := 5000$ | Väggens höjd (mm) |
| $R_{\min} := 0.5$ | Graden av tvång |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{ct_{ekv}} = 0,40$

Sprickviddskrav $w_{k1} := -0.005 \cdot \frac{H}{h} + 0.225 = 0.154$ (mm)

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

| | |
|--|--------------------|
| $f_{ck} := 40$ | MPa |
| $f_{cm} := f_{ck} + 8 = 48$ | MPa |
| $f_{ctm} := 3.5$ | MPa |
| $\alpha := 0.6$ | Långtidslast |
| $f_{ctm.sus} := \alpha \cdot f_{ctm} = 2.1$ | MPa |
| $E_{cm} := 35 \times 10^3$ | MPa |
| $f_{ctk0.05} := 2.5$ | MPa |
| $f_{ctk0.05.1} := 0.6 \cdot f_{ctk0.05} = 1.5$ | MPa (Långtidslast) |

Armering

B500B

| | |
|-------------------------|--|
| $\phi := 20$ | (mm) |
| $f_{yk} := 500$ | MPa |
| $E_s := 200 \cdot 10^3$ | MPa |
| $A_s := 6000$ | mm ² Ändras så att sprickviddskravet uppfylls |

2. Grundvärden för krypning och krympning

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 3.5 \times 10^5$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 700$$

$$\beta_{f,cm} := 2.43$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.2} = 1.151$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.365$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 13.512$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.315 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 1.976 \times 10^{-4} \quad \text{Uttorkningskrympning}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 7.5 \times 10^{-5} \quad \text{Autogen krympning}$$

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.726 \times 10^{-4} \quad \text{Slutligt krympmått}$$

Krympkraft

$$F_{cs} := \varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_s \cdot A_s = 3.271 \times 10^5$$

3. Tvärsnittskonstanter

Ekvivalent betongtvärsnitt

$$A_{I,ef} := (h \cdot b) + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_s = 4.251 \times 10^5$$

Effektiv betongarea

$$h_{c,ef} := \min \left[2.5 \left(c + \frac{\phi}{2} \right), \frac{h}{2} \right] = 175$$

$$A_{c,ef} := 2 \cdot h_{c,ef} \cdot 1000 = 3.5 \times 10^5 \quad \text{Total area av dragna kantzoner i tvärsnittet}$$

4. Bedömning av sprickrisk

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} = 1.363 \times 10^{-4}$$

$$\frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) = 1.013 \times 10^{-4}$$

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} > \frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) \quad \text{Risk för spricka!}$$

5. Beräkning av karakteristisk sprickbredd

Sprickviddens medelvärde

$$\sigma_{s,ref} := 106.6$$

$$w_m := 1.24 \cdot 0.42 \cdot \left[\frac{\phi \cdot (\sigma_{s,ref}^2)}{0.22 \cdot f_{cm} \cdot E_s \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \frac{A_s}{A_{c,ef}} \right)} \right]^{0.826} + \frac{4 \cdot \phi \cdot \sigma_{s,ref}}{E_s} = 0.119$$

Slutlig stålspänning

Antar, $n_{cr} := 1$, antal spickor

$$E_{cm,ef} := \frac{E_{cm} \cdot 10^6}{1 + \varphi_{\infty,t0}} = 1.48 \times 10^{10}$$

$$\sigma_s := R \cdot \left(-\varepsilon_{cs,\infty} \cdot L \cdot 10^{-3} + \frac{F_{cs} \cdot L \cdot 10^{-3}}{E_{cm,ef}} \right) \dots \quad \text{solve} \rightarrow 106.3593750514459075$$

$$+ \frac{L \cdot 10^{-3} \sigma_s \cdot 10^6 \cdot A_s \cdot 10^{-6}}{E_{cm,ef} \cdot A_{I,ef} \cdot 10^{-6}} + n_{cr} \cdot w_m \cdot 10^{-3}$$

Kraft på de ospruckna partierna

$$N_{\text{ospr}} := \sigma_s \cdot A_s \cdot 10^{-3} = 638.156$$

Kraft för att initiera ny spricka

$$N_{\text{cr}} := f_{\text{ctm.sus}} \cdot A_{\text{I.ef}} \cdot 10^{-3} = 892.645$$

Karakteristisk sprickvidd

$$w_k := 1.3 \cdot w_m = 0.155$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 19.099$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{ospr}} := \frac{2 \cdot b}{n} = 104.72$$

Täthetsklass 2, L = 5 m

1. Förutsättningar

| | |
|---|---|
| $c_{\min} := 32$ | Täckande betongskikt (mm) |
| $c_{\text{tot}} := c_{\min} + 10 + 32 = 74$ | Basmått (tolerans) (mm) |
| $b := 1000$ | Väggtvärsnittets bredd (enhetsbredd) (mm) |
| $L_{\text{tot}} := 5000$ | Väggens längd (mm) |
| $h := 350$ | Väggtvärsnittets höjd (mm) |
| $H_{\text{tot}} := 5000$ | Väggens höjd (mm) |
| $R_{\text{tot}} := 0.5$ | Graden av tvång |

Exponeringsklass

XC2

Max $v_{\text{ct}_{\text{ekv}}} = 0,40$

Sprickviddskrav $w_{\text{max}} = 0,05$ mm

Livslängd L100

Betong

Klass C40/50

$f_{\text{ck}} := 40$ MPa

$f_{\text{cm}} := f_{\text{ck}} + 8 = 48$ MPa

$f_{\text{ctm}} := 3.5$ MPa

$\alpha := 0.6$ Långtidslast

$f_{\text{ctm.sus}} := \alpha \cdot f_{\text{ctm}} = 2.1$ MPa

$E_{\text{cm}} := 35 \times 10^3$ MPa

$f_{\text{ctk}0.05} := 2.5$ MPa

$f_{\text{ctk}0.05.1} := 0.6 \cdot f_{\text{ctk}0.05} = 1.5$ MPa (Långtidslast)

Armering

B500B

$\phi := 32$ (mm)

$f_{\text{yk}} := 500$ MPa

$E_s := 200 \cdot 10^3$ MPa

$A_s := 22500$ mm² Ändras så att sprickviddskravet uppfylls

2. Grundvärden för krypning och krympning

Krypning

$$RH_{\text{insida}} := 100$$

$$RH_{\text{utsida}} := 50$$

$$RH_{\text{medel}} := \frac{RH_{\text{insida}} + RH_{\text{utsida}}}{2} = 75$$

$$A_c := h \cdot b = 3.5 \times 10^5$$

$$u := b$$

$$h_0 := \frac{2 \cdot A_c}{u} = 700$$

$$\beta_{f,cm} := 2.43$$

$$\beta_{t0} := 0.488 \quad \text{28 dagar vid pålastning}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{RH_{\text{medel}}}{100}}{0.1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \right) \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.7} \right] \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.2} = 1.151$$

$$\varphi_{\infty,t0} := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f,cm} \cdot \beta_{t0} = 1.365$$

$$\alpha_{ef} := \frac{E_s \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0})}{E_{cm}} = 13.512$$

Krympning

$$k_h := 0.7$$

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH_{\text{medel}}}{100} \right)^3 \right] = 0.896$$

$$\varepsilon_{cdi} := 0.315 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{cd,\infty} := k_h \cdot \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cdi} = 1.976 \times 10^{-4} \quad \text{Uttorkningskrympning}$$

$$\varepsilon_{ca,\infty} := 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 7.5 \times 10^{-5} \quad \text{Autogen krympning}$$

$$\varepsilon_{cs,\infty} := \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca,\infty} = 2.726 \times 10^{-4} \quad \text{Slutligt krympmått}$$

Krympkraft

$$F_{cs} := \varepsilon_{cs,\infty} \cdot E_s \cdot A_s = 1.227 \times 10^6$$

3. Tvärsnittskonstanter

Ekvivalent betongtvärsnitt

$$A_{I,ef} := (h \cdot b) + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_s = 6.315 \times 10^5$$

Effektiv betongarea

$$h_{c,ef} := \min \left[2.5 \left(c + \frac{\phi}{2} \right), \frac{h}{2} \right] = 175$$

$$A_{c,ef} := 2 \cdot h_{c,ef} \cdot 1000 = 3.5 \times 10^5 \quad \text{Total area av dragna kantzoner i tvärsnittet}$$

4. Bedömning av sprickrisk

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} = 1.363 \times 10^{-4}$$

$$\frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) = 1.013 \times 10^{-4}$$

$$R \cdot \varepsilon_{cs,\infty} > \frac{f_{ctk0.05.1}}{E_{cm}} \cdot (1 + \varphi_{\infty,t0}) \quad \text{Risk för spricka!}$$

5. Beräkning av karakteristisk sprickbredd

Sprickviddens medelvärde

$$\sigma_{s,ref} := 36$$

$$w_m := 1.24 \cdot 0.42 \cdot \left[\frac{\phi \cdot (\sigma_{s,ref}^2)}{0.22 \cdot f_{cm} \cdot E_s \cdot \left(1 + \frac{E_s}{E_{cm}} \cdot \frac{A_s}{A_{c,ef}} \right)} \right]^{0.826} + \frac{4 \cdot \phi \cdot \sigma_{s,ref}}{E_s} = 0.039$$

Slutlig stålspänning

Antar, $n_{cr} := 1$, antal spickor

$$E_{cm,ef} := \frac{E_{cm} \cdot 10^6}{1 + \varphi_{\infty,t0}} = 1.48 \times 10^{10}$$

$$\sigma_s := R \cdot \left(-\varepsilon_{cs,\infty} \cdot L \cdot 10^{-3} + \frac{F_{cs} \cdot L \cdot 10^{-3}}{E_{cm,ef}} \right) \dots \quad \text{solve} \rightarrow 36.19500780489780108$$

$$+ \frac{L \cdot 10^{-3} \sigma_s \cdot 10^6 \cdot A_s \cdot 10^{-6}}{E_{cm,ef} \cdot A_{I,ef} \cdot 10^{-6}} + n_{cr} \cdot w_m \cdot 10^{-3}$$

Kraft på de ospruckna partierna

$$N_{\text{ww}} := \sigma_s \cdot A_s \cdot 10^{-3} = 814.388$$

Kraft för att initiera ny spricka

$$N_{\text{cr}} := f_{\text{ctm.sus}} \cdot A_{\text{I.ef}} \cdot 10^{-3} = 1.326 \times 10^3$$

Karakteristisk sprickvidd

$$w_k := 1.3 \cdot w_m = 0.05$$

Antal armeringsstänger

$$n := \frac{A_s}{\pi \cdot \frac{\phi^2}{4}} = 27.976$$

Avstånd mellan armeringsstänger

$$s_{\text{ww}} := \frac{2 \cdot b}{n} = 71.489$$