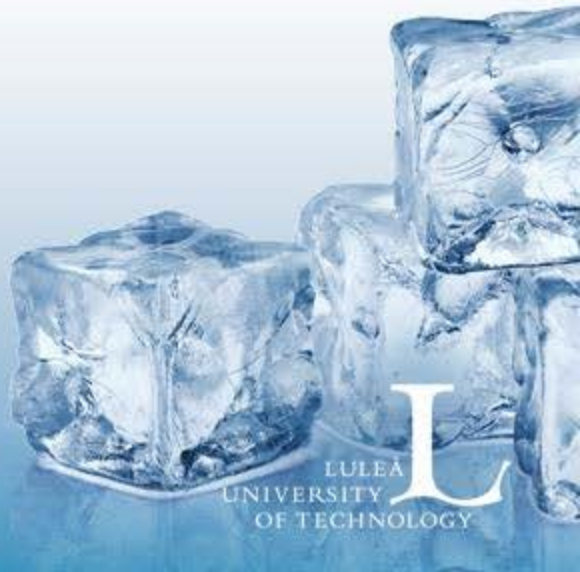
Equivalent Restraint Method –

En beräkningsmetod för temperatursprickrisker där tvånget bestäms m.h.a. elastiska spänningsberäkningar i 3D samt temperatur- och spänningsutveckling i 2D.

Anders Hösthagen

Luleå Tekniska Universitet
Betong och Stålteknik



Översikt av de kommande 15 min

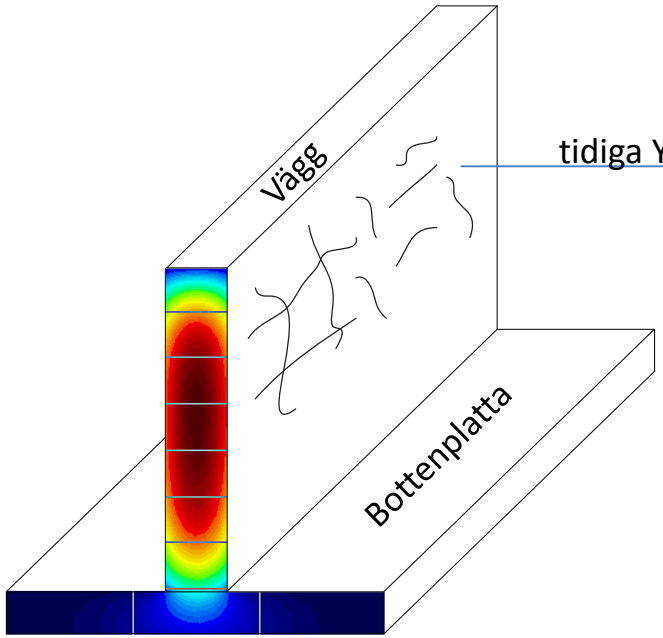
- Översiktligt om temperatursprickor
- Ytligt om förenklade temperatursprickriskanalyser
- Introduktion till Equivalent Restraint Method, ERM
- Eventuella kommentarer eller frågor

Vad är Temperaturprickor?

Det finns ingen entydig definition av temperaturprickor, men två huvudsakliga gruppindelningar kan ändå göras;

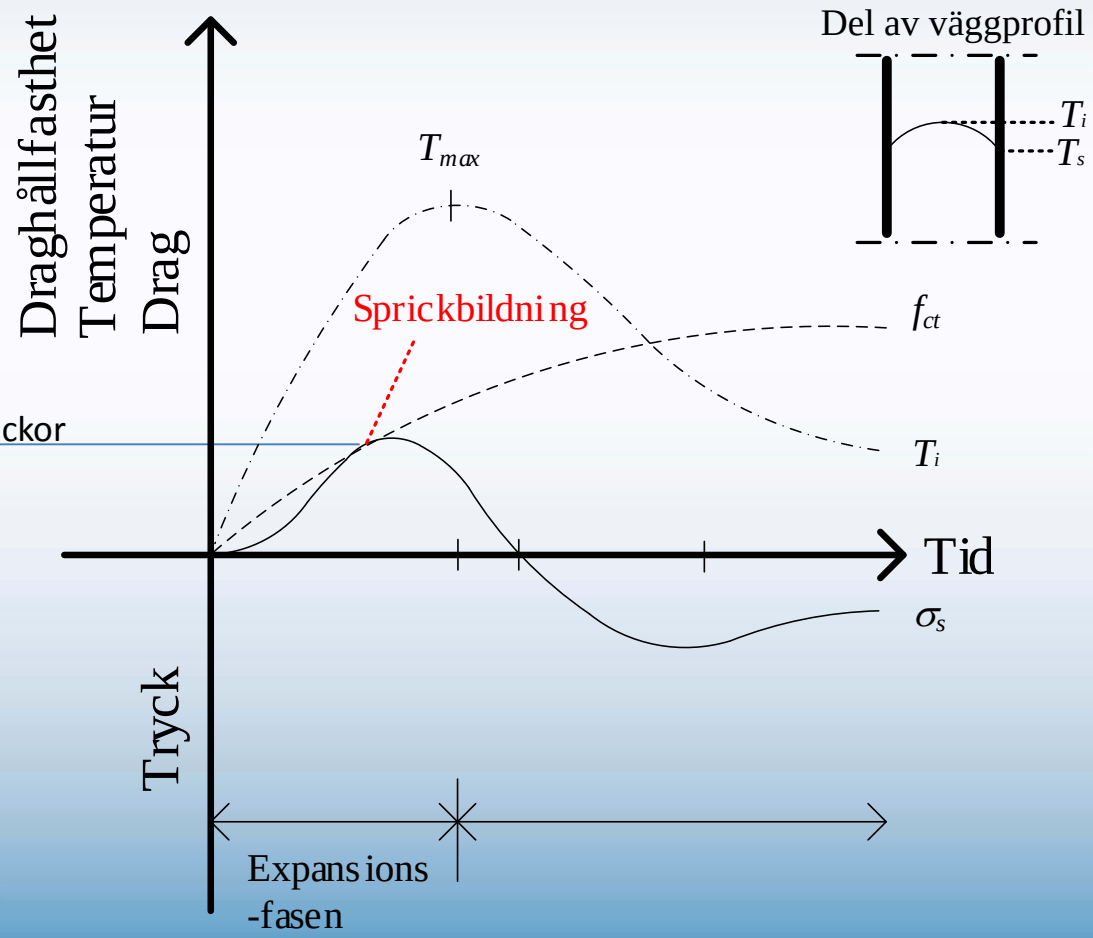
tidiga **Ytsprickor** – expansionsfasen

Under expansionsfasen blir konstruktionens centrala delar varmare än de ytliga delarna, vilket leder till att de centrala delarna expanderar mer och orsakar dragspänningar i ytan. Överskrider dragspänningarna draghållfastheten, spricker betongen.



Temperaturfördelning över tvärsnittet

tidiga Ytsprickor



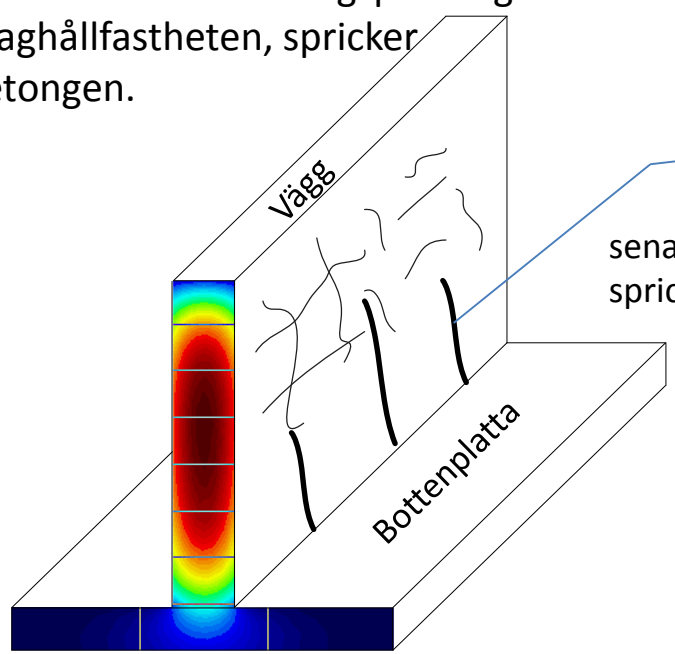
Vad är Temperatursprickor?

Det finns ingen entydig definition av temperatursprickor, men två huvudsakliga gruppindelningar kan ändå göras;

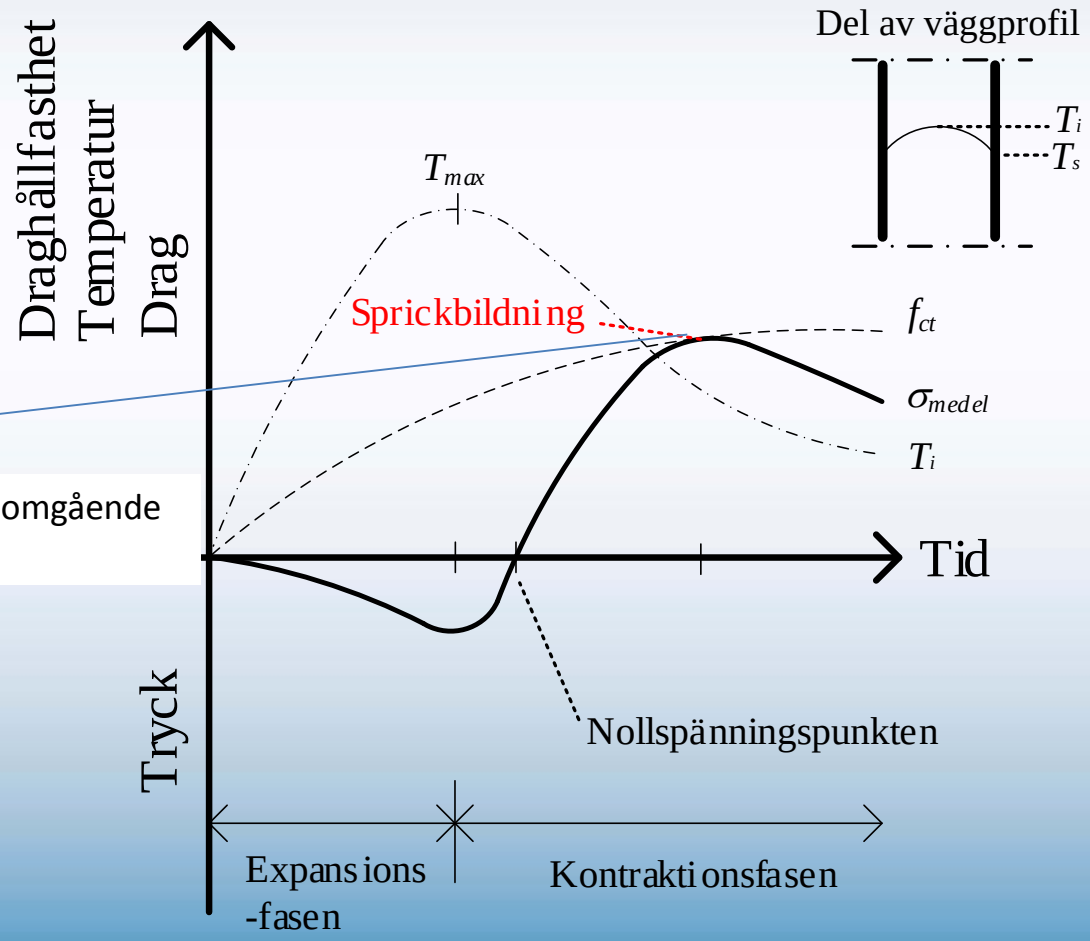
tidiga **Ytsprickor** – expansionsfasen

sena **Genomgående sprickor** – kontraktionsfasen

I kontraktionsfasen svalnar konstruktionen och drar ihop sig. Om den rörelsen hindras i någon grad uppkommer dragspänningar över konstruktionens tvärsnitt. Överskrider medeldragspänningen draghållfastheten, spricker betongen.



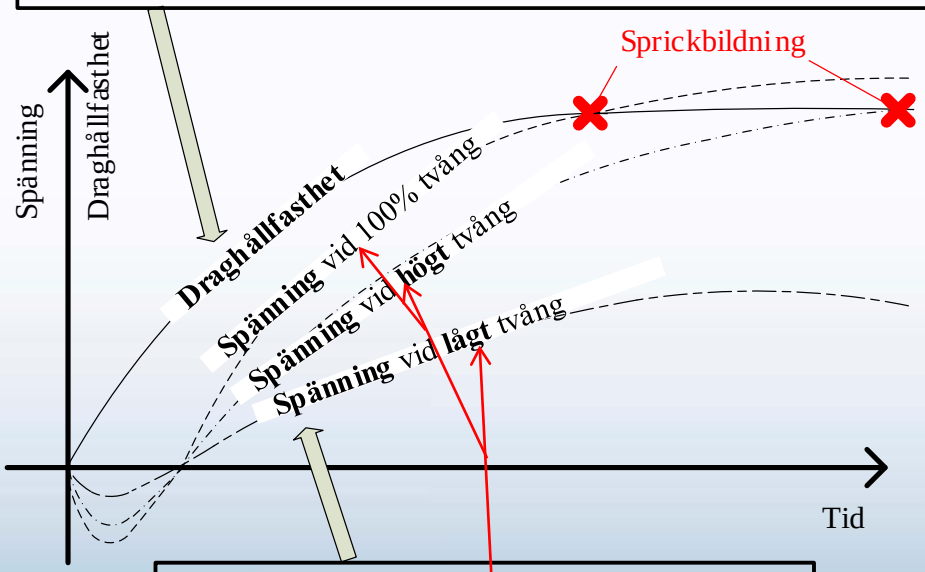
sena Genomgående sprickor



Bildandet av genomgående sprickor i ung betong

Balans mellan draghållfasthet och spänningar orsakad av återhållen deformation i betongen.

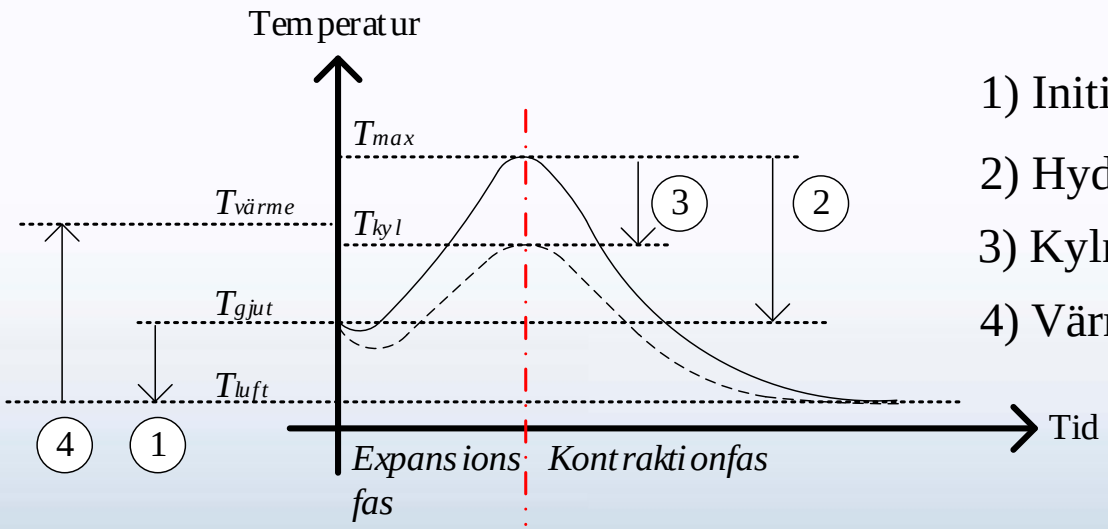
Faktorer som påverkar **draghållfasthetsutvecklingen**;
* Betongsammansättningen (vct, typ av bindemedel, tillsatsmedel, ballast, mognad)
* Härdningsförhållande (omgivande temperatur, fuktighet, kylning/värmning, isolering)
* Geometri
* Temperatur vid gjutning (betong och omgivande temperatur)



Faktorer som påverkar **spänningsutvecklingen**;
* Betongsammansättning
* Tvångsgraden
* Geometri
* Temperatur- och fuktutvecklingen.

Temperaturförhållanden som påverkar risken för genomgående sprickor

Allt som påverkar temperaturen i en betongkonstruktion, eller nygjuten betong, leder till temperaturrelaterade deformationer.
När betongen blandas startar en hydratation, vilket leder till värmeutveckling.
I nedanstående figur är värmeutvecklingen (2) och initial temperaturdifferens mellan gjutstartstemperatur och omgivande temperatur (1) visualiserad.



1) Initial temperaturskillnad $T_{gjut} - T_{luft}$

2) Hydratationseffekt $T_{max} - T_{gjut}$

3) Kylning $T_{max} - T_{kyl}$

4) Värmning av motgjuten struktur $T_{värme} - T_{luft}$

Temperaturskillnaden mellan T_{max} och T_{luft} (1 + 2) kan betecknas som den "naturliga" temperaturskillnad som ger upphov till dragspänningar.
Denna skillnad kan minskas genom att kyla den nygjutna betongen (1 + 2 - 3) eller förvärma motgjuten tvångsgivande struktur (1 + 2 - 4).

Volymsdeformation i ung betong

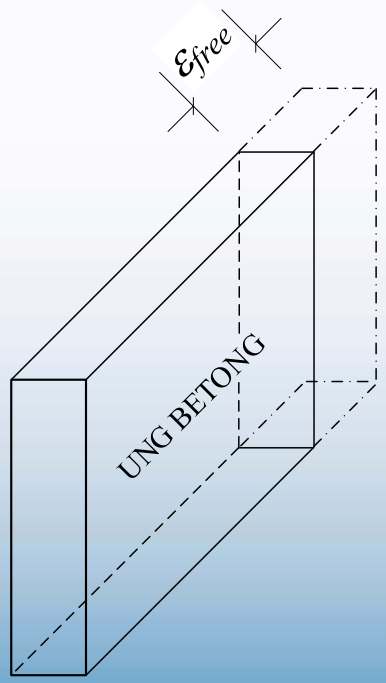
Det finns två faktorer som kan orsaka en volymändring i en obelastad betongstruktur, variabel **temperatur** och variabelt **fukttillstånd**.

Deformationen kan beskrivas som töjning.
Töjningen (ε) är definierad som ett mått på en förändring av en kropps längd relativt en referenslängd, dvs relativ deformationsändring.

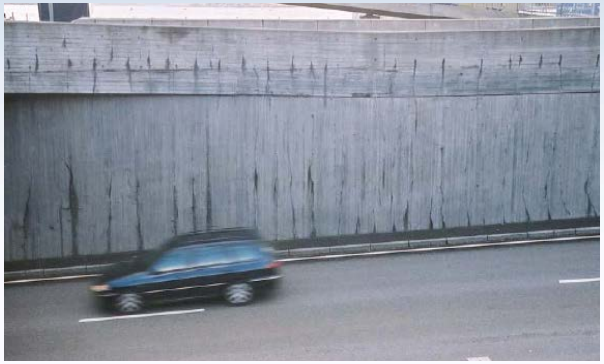
Obehindrad deformation hos en obelastad betongkropp orsakad av ändrade temperatur och/eller fukttillstånd kallas *frirörelse* och kan beskrivas med uttrycket;

$$\varepsilon_{free} = \varepsilon_T + \varepsilon_{RH}$$

ε_T = töjning p.g.a. ändrad **temperatur**
ε_{RH} = töjning p.g.a. ändrat **fukttillstånd** (Relative Humidity)



Volymsdeformation i ung betong

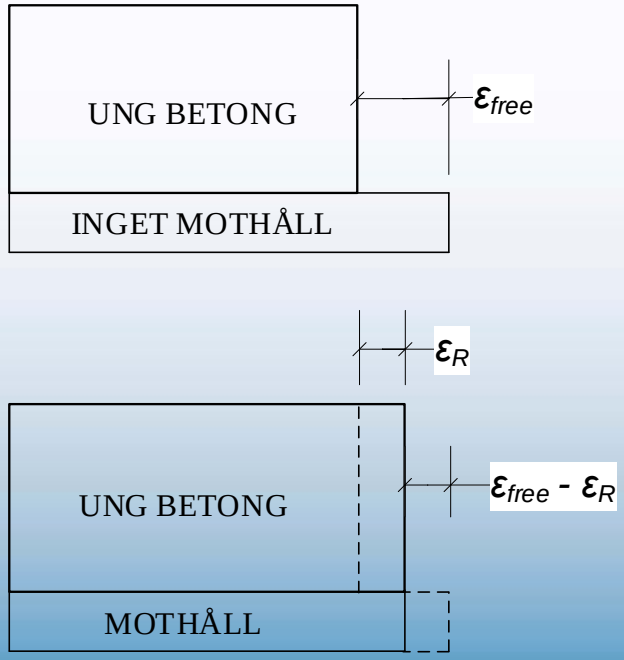


Om frirörelsen hålls emot uppkommer spänningar i betongkroppen och risk för sprickbildning föreligger.

Anläggningskonstruktioner:

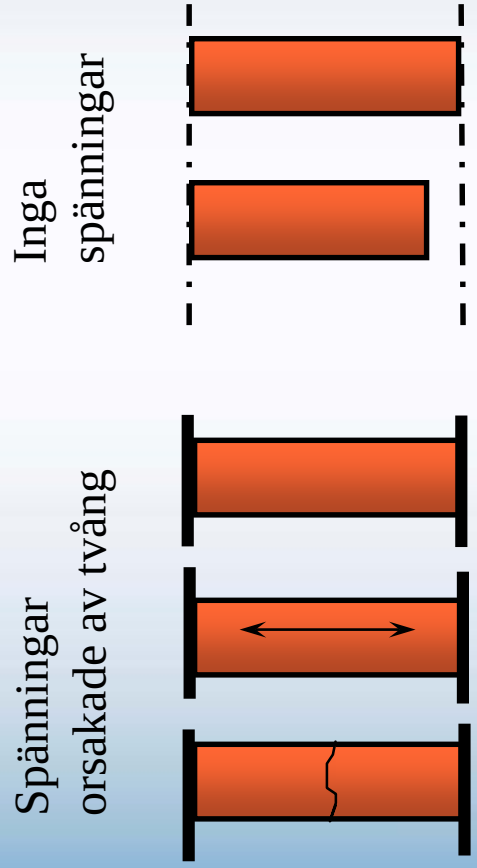
- krav på fukthärdning
- ingående konstruktionsdelar ofta har grova dimensioner (>800 mm)

vilket sammantaget gör att töjningar p.g.a. temperaturändringar och baskrympning (autogen krympning) är överordnade töjningar orsakade av uttorkning.



Därav är det i svenska föreskrifter (BRO94 → AMA Anläggning 17) reglerat att temperatursprickrisken skall analyseras innan gjutning, i syfte att dimensionera eventuella åtgärder

Mothåll (tvång) av frirörelsen behövs för att spänningar ska uppkomma



Fri betongkropp/sektion

Fri deformation

Temperaturrörelser
Förändrat fukttillstånd

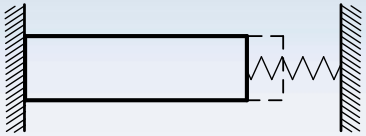
Tvång

Mothållen deformation → Spänningar

Ev. sprickbildning

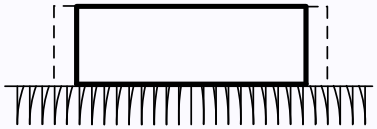
Grundläggande tvångssituationer

För att beskriva tvångssituationen för en betongkropp kan en eller flera typsituationer användas

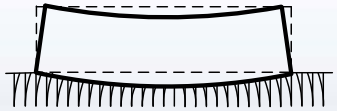


Enaxiellt ändtvång

Oeftergivlig rand

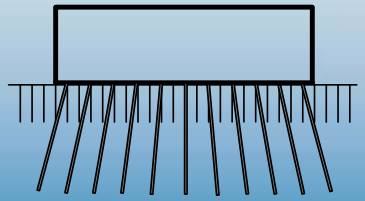


Delvis eftergivlig rand
m.a.p. *translation*



Delvis eftergivlig rand
m.a.p. *rotation*

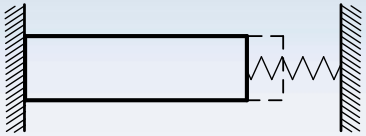
Glidning / Uppsprickning i gjutfog



Pålar

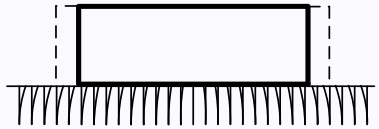
Grundläggande tvångssituationer

För att beskriva tvångssituationen för en betongkropp kan en eller flera typsituationer användas

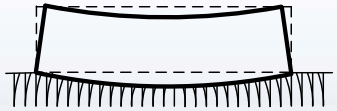


Enaxiellt ändtvång

Oeftergivlig rand

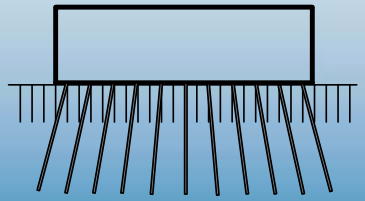


Delvis eftergivlig rand m.a.p. *translation*



Delvis eftergivlig rand m.a.p. *rotation*

Glidning / Uppsprickning i gjutfog



Pålar

PROBLEM:
VID FÖRENKLADE BERÄKNINGAR KAN TVÅNGET VARA SVÅRT ATT KVANTIFIERA!

Förenklade temperatursprickriskanalyser

- Handberäkningsmetoder
- Datorberäkningar i 1D eller 2D

Förenklade spänningsanalyser över ett tvärsnitt i en konstruktion är vanligen modifierade balk- eller platt-teorier, inklusive effekten av translation och böjning.
Analyserna förutsätter vidare antingen, att plana tvärsnitt förblir plana alternativt att icke-linjär böjning beaktas via s.k. resilienser (bestämda med 3D-beräkningar för det enkla typfallet vägg-på-platta).

Equivalent Restrain Method, ERM, (metoden med ekvivalent tvång) är en metod att beakta tvånget från en godtycklig anslutande konstruktion, och att den unga betongen är i huvudsak jämntjock (typ vägg, tak, gol eller liknande).
Den anslutande konstruktionen görs om till en ekvivalent konstruktionsdel som kan behandlas med existerande förenklade metoder, där tvånget inom den unga betongen blir med rimlig noggrannhet korrekt modellerad.

Förenklade temperatursprickriskanalyser m.h.a. Equivalent Restraint Method

För att genomföra spänningsanalyser m.h.a. ERM kan man antingen använda;

1. *Kompensations**linje**metoden*
2. *Kompensations**plan**smetoden*

(”Tvång för sprickanalyser”, M Nilsson, H Hedlund, M Emborg, J-E Jonasson, S Bernander. SBUF ID:11618)

Det totala tvånget (g_R) i en analyserad punkt kan för Kompensationsplans-metoden beskrivas som

$$\gamma_R(y,z,x=\text{constant}) = \delta_{slip}\cdot\delta_{res}(y) - (1-\gamma_{RT})\cdot\gamma_R^t - (1-\gamma_{RR,y})\cdot\gamma_R^{ry}(z) - (1-\gamma_{RR,z})\cdot\gamma_R^{rz}(y)$$

Reduktion av tvång p.g.a. gjutfogsglidning

Förenklade temperaturspricksriskanalyser m.h.a. Equivalent Restraint Method

För att genomföra spänningsanalyser m.h.a. ERM kan man antingen använda;

1. *Kompensations**linje**metoden*
2. *Kompensations**plan**smetoden*

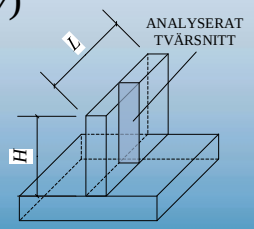
(”Tvång för sprickanalyser”, M Nilsson, H Hedlund, M Emborg, J-E Jonasson, S Bernander. SBUF ID:11618)

Det totala tvånget (g_R) i en analyserad punkt kan för Kompensationsplans-metoden beskrivas som

$$\gamma_R(y,z,x=\text{constant}) = \delta_{slip}\cdot\delta_{res}(y) - (1-\gamma_{RT})\cdot\gamma_R^{t} - (1-\gamma_{RR,y})\cdot\gamma_R^{ry}(z) - (1-\gamma_{RR,z})\cdot\gamma_R^{rz}(y)$$

Reduktion av tvång p.g.a. gjutfogsglidning

Reduktion av tvång p.g.a. längd/höjd-förhållande

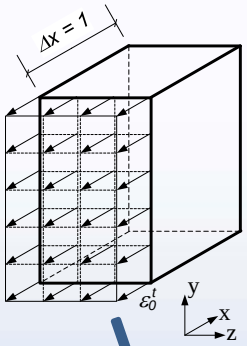


Förenklade temperaturspricksriskanalyser m.h.a. Equivalent Restraint Method

För att genomföra spänningsanalyser m.h.a. ERM kan man antingen använda;

1. *Kompensations**linje**metoden*
2. *Kompensations**plan**smetoden*

Translationstvång

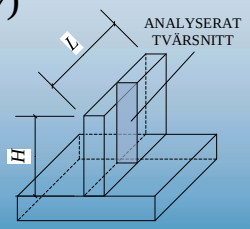


Det totala tvånget (g_R) i en analyserad punkt kan för Kompensationsplans-metoden beskrivas som

$$\gamma_R(y,z,x=\text{constant}) = \delta_{slip}\cdot\delta_{res}(y) - (1-\gamma_{RT})\cdot\gamma_R^t - (1-\gamma_{RR,y})\cdot\gamma_R^{ry}(z) - (1-\gamma_{RR,z})\cdot\gamma_R^{rz}(y)$$

Reduktion av tvång p.g.a. gjutfogsglidning

Reduktion av tvång p.g.a. längd/höjd-förhållande



Förenklade temperaturspricksriskanalyser m.h.a. Equivalent Restraint Method

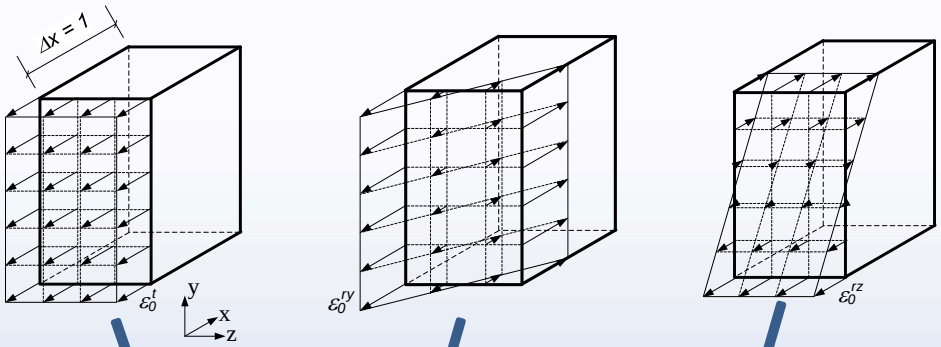
För att genomföra spänningsanalyser m.h.a. ERM kan man antingen använda;

1. *Kompensations**linje**metoden*
2. *Kompensations**plan**smetoden*

Translationstvång

Rotationstvång kring y-axeln

Rotationstvång kring z-axeln

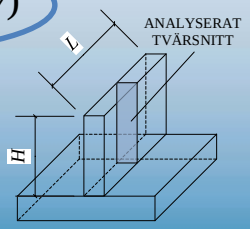


Det totala tvånget (g_R) i en analyserad punkt kan för Kompensationsplans-metoden beskrivas som

$$\gamma_R(y,z,x=\text{constant}) = \delta_{slip}\cdot\delta_{res}(y) - (1-\gamma_{RT})\cdot\gamma_R^t - (1-\gamma_{RR,y})\cdot\gamma_R^{ry}(z) - (1-\gamma_{RR,z})\cdot\gamma_R^{rz}(y)$$

Reduktion av tvång p.g.a. gjutfogsglidning

Reduktion av tvång p.g.a. längd/höjd-förhållande



Fördelar med förenklade temperaturspricksriskanalyser

De huvudsakliga anledningarna till att använda förenklade beräkningsmetoder vid spänningsanalyser för ung betong framför full 3D-analys är;

Fördelar med förenklade temperatursprickriskanalyser

De huvudsakliga anledningarna till att använda förenklade beräkningsmetoder vid spänningsanalyser för ung betong framför full 3D-analys är;

BERÄKNINGS- och MODELLERINGSTID

Beräkningstiden blir särskilt viktig vid åtgärdsdimensionering (formrivningstid, kylrör, värmekablar, värmemattor etc) för att begränsa temperatursprickrisken i den unga betongen.
Oftast görs flera beräkningsuppställningar för att möta variationer i gjutförhållandet.

Nackdelar med förenklade temperatursprickriskanalyser

Den huvudsakliga nackdelen med att använda förenklade beräkningsmetoder vid spänningsanalyser för ung betong jämfört med full 3D-analys är;

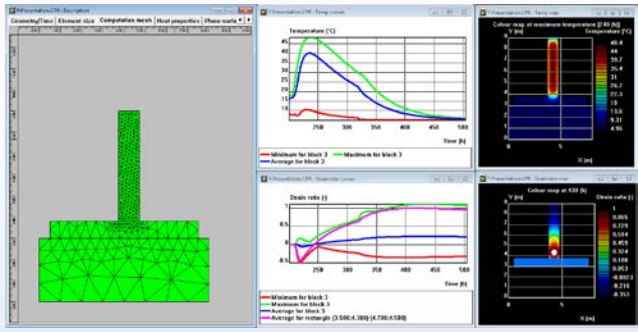
BESTÄMNING AV TVÅNGSSITUATIONEN

ERM är framtagen för att underlätta bestämmandet av tvångssituationen!

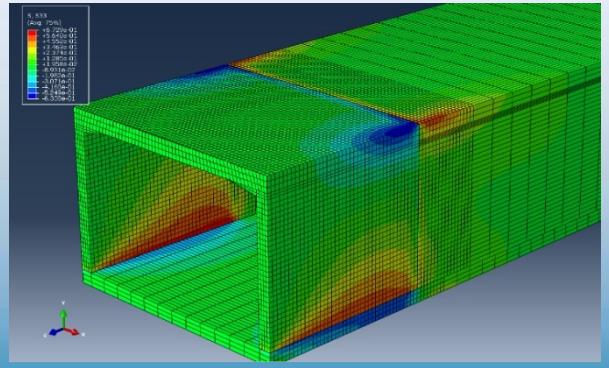
Equivalent Restraint Method ERM

ERM är en metod avsedd för att analysera temperatursprickrisker i ung betong.

Metoden använder 2D beräkningar för att uppskatta temperatur- och spänningsutveckling.



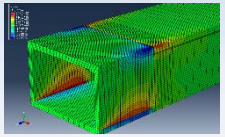
Tvånget bestämts m.h.a. elastiska beräkningar i 3D.



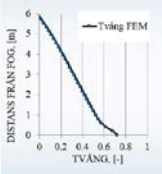
Equivalent restraint method, ERM

En ERM-modell byggs i tre steg;

1. **Tvånget** bestäms genom att modellera den unga betongkroppen och tvångsgivande intilliggande kroppar i 3D. En temperatursänkning appliceras på det analyserade blocket, varvid spänningar uppkommer.
   I det tvärsnitt där högst spänningar förväntas, görs en tvångskurva.



Enaxiell tvångsanalys

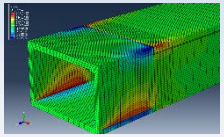


Tvångskurva

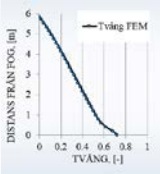
Equivalent restraint method, ERM

En ERM-modell byggs i tre steg;

1. **Tvånget** bestäms genom att modellera den unga betongkroppen och tvångsgivande intilliggande kroppar i 3D. En temperatursänkning appliceras på det analyserade blocket, varvid spänningar uppkommer.
   I det tvärsnitt där högst spänningar förväntas, görs en tvångskurva.

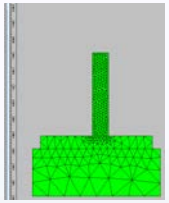


Enaxiell tvångsanalys



Tvångskurva

2. Temperatur- och spänningsutvecklingen beräknas för att antal positioner längs tvångskurvan i 2D**,** där endast ett yttre tvång är applicerad i modellen.
   Metoden kallas Local Restraint Method, **LRM**
   Töjningar kan beräknas som alternativ för spänningar i detta steg.

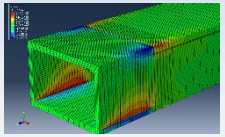


Exempel på modellerad LRM geometri

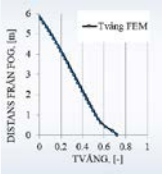
Equivalent restraint method, ERM

En ERM-modell byggs i tre steg;

1. **Tvånget** bestäms genom att modellera den unga betongkroppen och tvångsgivande intilliggande kroppar i 3D. En temperatursänkning appliceras på det analyserade blocket, varvid spänningar uppkommer.
   I det tvärsnitt där högst spänningar förväntas, görs en tvångskurva.

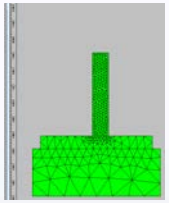


Enaxiell tvångsanalys



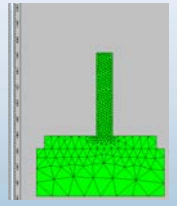
Tvångskurva

2. Temperatur- och spänningsutvecklingen beräknas för att antal positioner längs tvångskurvan i 2D**,** där endast ett yttre tvång är applicerad i modellen.
   Metoden kallas Local Restraint Method, **LRM**
   Töjningar kan beräknas som alternativ för spänningar i detta steg.



Exempel på modellerad LRM geometri

3. **Kalibrering av ERM-modell (2D)**. Storleken på den (eller de) tvånggivande kroppen i ERM-modellen anpassas så att spännings/töjnings-profilen efterliknar den för LRM-modellerna.



Exempel på modellerad ERM geometri
(samma som LRM geometrin)

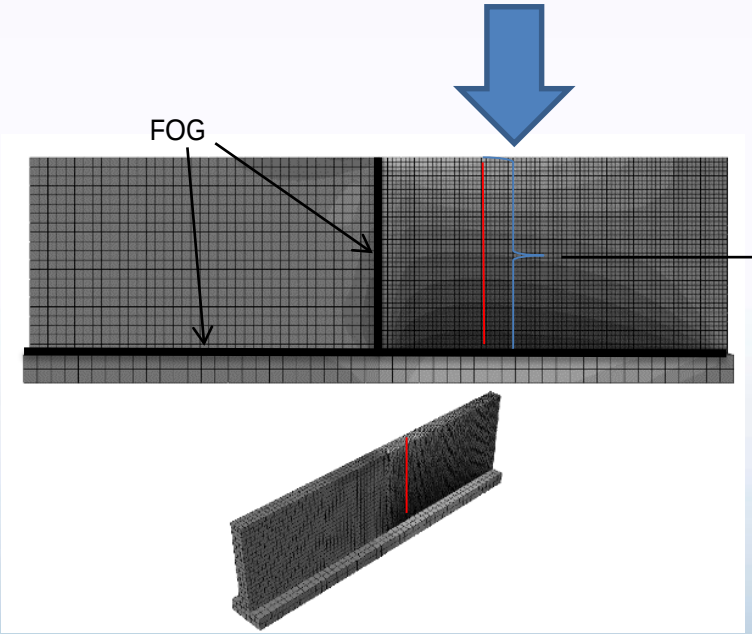
Equivalent restraint method, ERM

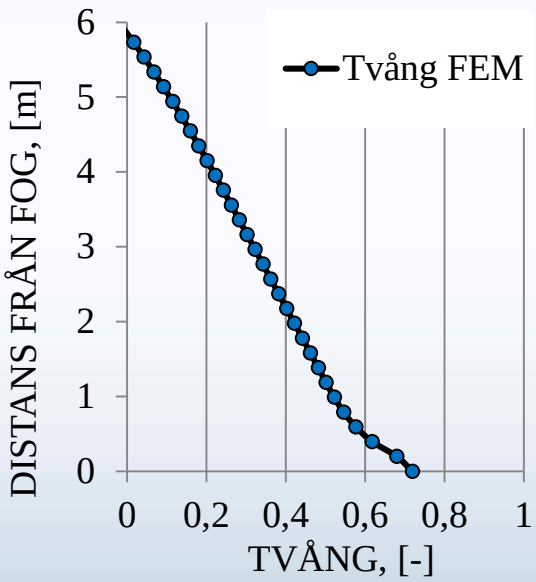
Förtydligande av;

Steg I) Elastisk spänningsberäkning i 3D → Tvångskurva

I steg 1 görs en elastisk spänningsberäkning där ΔT appliceras på det analyserade blocket…

vilket ger en tvångskurva över det analyserade tvärsnittet (röd linje)





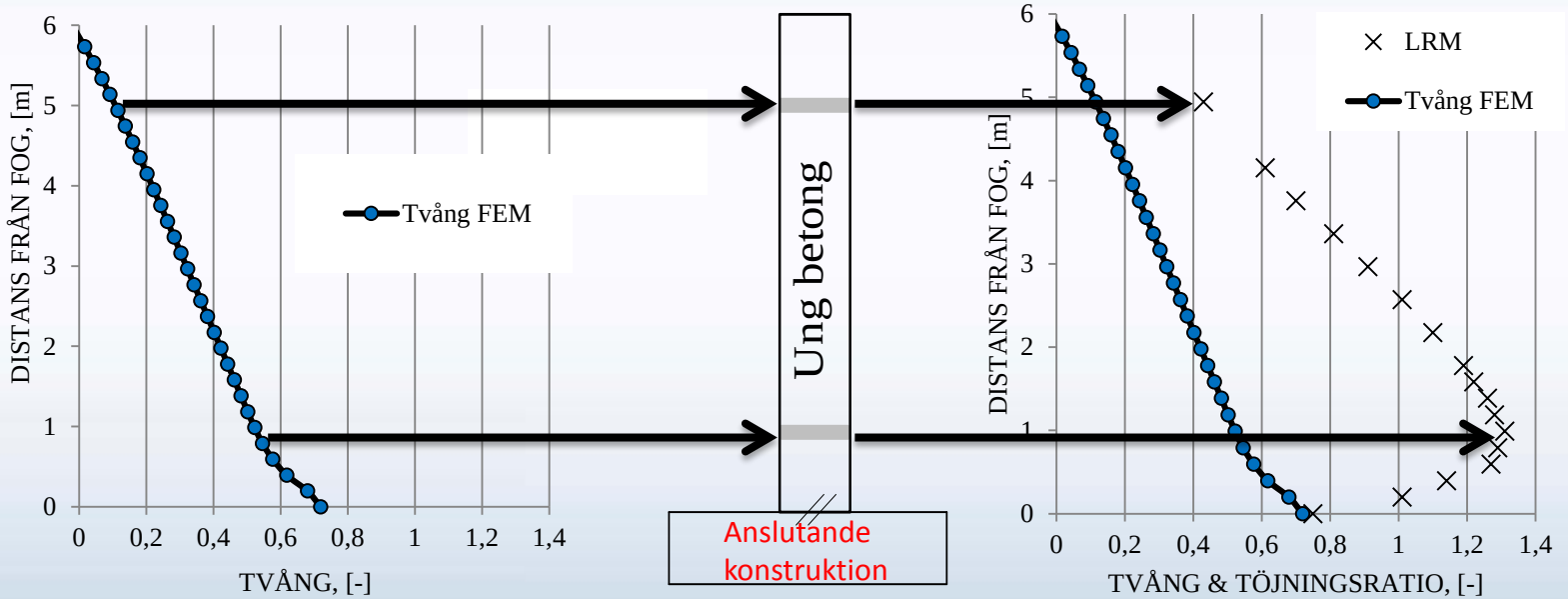
Equivalent restraint method, ERM

Förtydligande av;
Steg II) Local Restraint Method , LRM

I steg 2 exporteras det lokala tvånget till LRM-modeller (2D)

En LRM-modell skapas per analyserad position

Töjningsration beräknas mha LRM-modellerna och en töjningsprofil över analyserat tvärsnitt erhålls



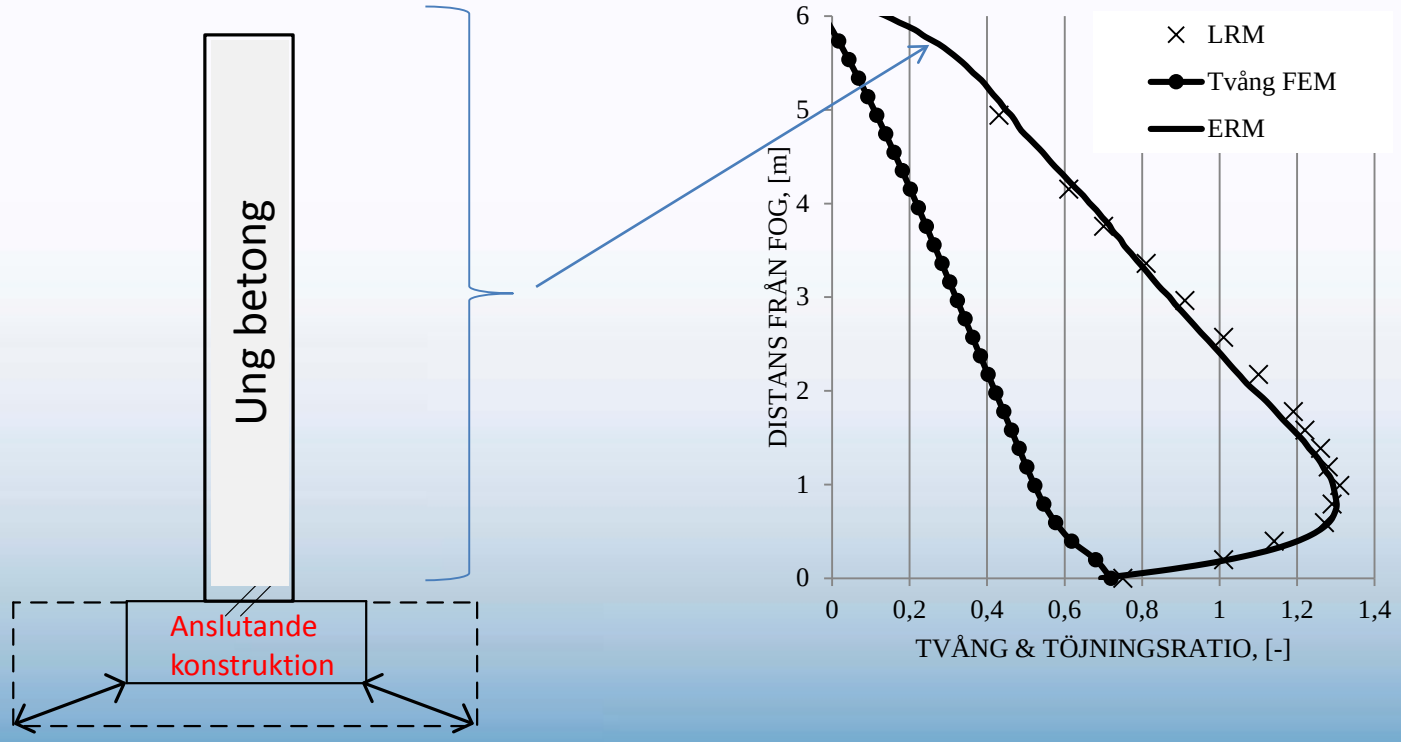
Töjningsratio = beräknad töjning / maximal töjning innan brott

Equivalent restraint method, ERM

Förtydligande av;
Steg III) Kalibrering av ERM-modell

I steg 3 skapas en ERM-modell där tvånget (huvudsakligen) kommer från den anslutande konstruktionen.

Töjningskvoten för ERM-modellen anpassas så att den efterliknar töjningskurva för LRM-modellerna, genom att (huvudsakligen) ändra storleken på det tvångsgivande blocket.

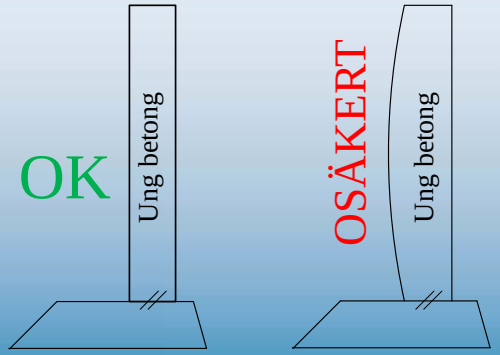


Fördelar och begränsningar med metoden

- Fördelar:
  - Beräkningstiden är betydligt kortare än kompletta 3D-analyser
  - Alla temperaturpåverkande åtgärder kan modelleras

    (t.ex. kylning med kylrör, förvärmning av intilliggande tvångsgivande material)

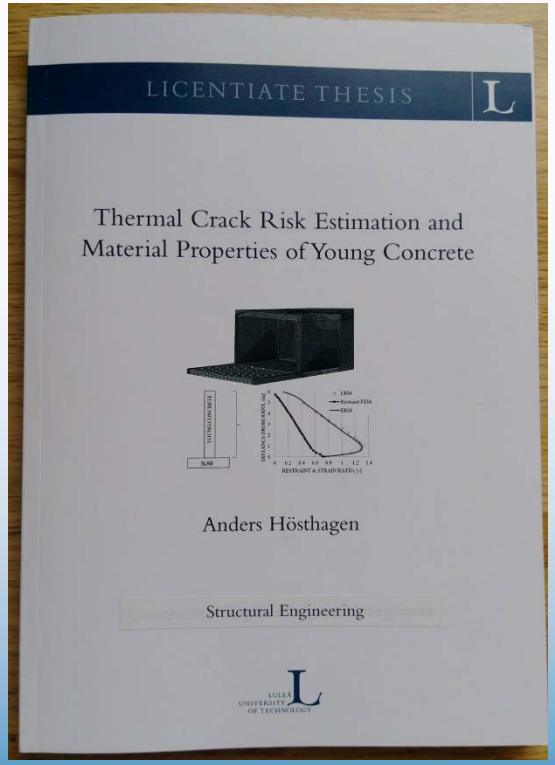
- Begränsningar:
  - Metoden är endast utredd för tvärsnitt med jämn tjocklek hos den unga betongen



Fördjupning

Läs mer om ERM och material utvärdering i min Licentiatavhandling;

”Thermal Crack Risk Estimation and
Material Properties of Young Concrete”



TACK FÖR VISAT INTRESSE