

HÖRÐNUN STEYPU ÁHRIF STEYPUHITA Á STEYPUSPENNUR

Gylfi Magnússon

Mars 2012



Gylfi Magnússon

S:\2008\08299\Greinargerð\Hordnun steypu-Ahrif hita a steypuspennur.docx

Mars 2012

HÖRÐNUN STEYPU ÁHRIF HITA Á STEYPU SPENNUR

Nr. útg.	Dagsetning	Unnið	Yfirfarið	Samþykkt
1	09.03.2012	GM	SB	GM

Efnisyfirlit

1	Inngangur	3
2	Varmafræði ferskrar steypu	5
2.1	Jafngildisaldur steypu t_T	5
2.2	Steypuvarmi	7
3	Steypuhiti meðan á hörðnun stendu	8
3.1	Hitamyndun í steypu	8
3.2	Hitamælingar í Hvítárbrú	11
3.3	Núgildandi kröfur Alverks'95 og staðla til steypuhita	13
4	Efniseiginleikar steypu	14
4.1	Efniseiginleikar steypu skv. Eurocode 2	14
5	Útreikningar á spennum í harðnandi steypu	16
5.1	Grunnlíkingar fyrir spennuútreikninga	16
5.2	Útreikningar	17
6	Niðurstöður spennuútreikninga	21
7	Lokaorð	31
8	Heimildaskrá	32

1 Inngangur

Á umliðnum árum hef ég hannað steyp t mannvirki, bæði hérlendis og erlendis meðan  g starfaði   Danmörku. Auk þess hef ég sinnt eftirliti með steypuframlei slu, niðurlögn steypu og aðhlúun hennar við virkjunarframkvæmdir og br armannvirki.   verklýsingum fyrirskrifa hönnuðir kröfur til steypug  a. Fyrir þýðingarmikil mannvirki t.d. St rabeltisbr na frá Sjálandi um Sprog  að Fj ni   Danmörku, sem byggð var   árunum 1988-1998, voru gerðar margvíslegar kröfur um forrannsn knir steypunnar.   hefðbundnum mannvirkjum er oftast l ti  nægja að vísa til ákvæða steypusta la um hönnun og framleiðslu steypu. Með árunum varð m r   betur ljóst hvað steypuhitinn sem myndast við  tvermi  efnahvarf steypunnar skiptir miklu máli fyrir endingu hennar. Hann hefur   raun afgerandi áhrif   líftíma steypunnar.

  verklýsingum er algengt að setja hitamyndun   ferskri steypu skorður.   mörgum stöðlum er fyrirskrifað að max. steypuhiti skuli ekki fara yfir 60-65 C. Stundum er hitamun   steypu við yfirborð og   miðju þversniði einnig settar skorður. Algengt er að miða við að mismunur   hita   massamiðju og við m t fari ekki yfir 20 C, þ.e. $\Delta T_{\max} = 20^\circ\text{C}$. Það kom m r   óvart   s num tíma hversu algengt er að steypuhiti n i ofangreindum mörkum.   sumum tilfellum var steypuþversni i  ekki meira en 400 mm   þykkt. Til þess að halda steypuhita innan tilskilinna marka, verður   undirbúningsstigi framkvæmda að vera hægt að spá fyrir um hitamyndun   steypunni meðan   hörðnun hennar stendur.   dag er það gert með forritum sem byggja   varmafr  ilegum eiginleikum ferskrar steypu. Daninn Per Freiesleben Hansen (P.F.H.) hefur lagt mikið af mörkum   þeim efnum og sama er að segja um fr endur okkar Svía.   fræðigreinum síðastliðins  ratugs, er mikið vitnað til rannsn kna P.F.H. [1], [8], [31] og þeirra l kinga sem hann lagði fram   áttunda og níunda áratug síðustu aldar. Jöfnur n gildandi Evr pusta als [1] byggja m.a.   rannsn knarni urst  um P.F.H.

  n gildandi steypusta li, Eurocode 2 [1], eru líkingar sem lýsa því hvernig efniseiginleikar steypunnar breytast sem fall af tíma og hitastigi. M r þ tti því liggja beinast við að byggja niðurstöður útreikninga   efniseiginleikum steypu skv. Eurocode 2.

Til þess að reikna út hvernig hiti   steypuþversni i breytist sem fall af tíma, einangrunargildi móta, upphafshita steypu, lofthita, hven er m t eru fjarlægð o.s.frv. þarf að leysa „partiel“ diffurj fnur, sem þ  eru tiltölulega einfaldar.

  ru m li gengir um útreikninga   steypuspennum.   fyrsta aldurs skeiði steypunnar eru allir efniseiginleikar hennar ólínuleg f ll, sem breytast frá einum stað til annars, h   steypuhita og tíma.

Þannig er fjaðurstuðull steypunnar $E_{cm} = E_{cm}(x,y,z,T,t)$, þar sem x,y og z eru hnit viðkomandi punkts   steypumassanum, t er tíminn og T er hitastigið.

Sama   við um Poisson hlutfallið $\nu = \nu(x,y,z,T,t)$, hitaþanstu ulinn $\alpha = \alpha(x,y,z,T,t)$, skrið (creep) $\epsilon_{cc} = \epsilon_{cc}(x,y,z,T,t)$, r rnum (shrinkage) $\epsilon_{cs} = \epsilon_{cs}(x,y,z,T,t)$, togstyrk steypunnar $f_{ctm} = f_{ctm}(x,y,z,T,t)$ og þr ststyrk steypunnar $f_{cm} = f_{cm}(x,y,z,T,t)$.

Útreikningar   spennuástandi steypunnar eru því mjög fl knir þar sem leysa þarf ólínulegar „partiel“ diffurj fnur.

 g ætla m r ekki að drekkja lesandanum   jöfnum og stærðfræðilegum  tlei slum og reyni því eins og kostur er að birta niðurstöður útreikninga   skýringarmyndum. Þ  verður ekki hjá því komist að geta helstu l kinga sem st ra eiginleikum steypunnar til þess að varpa ljósi   styrkleikaþr un hennar og spennuástand meðan   hörðnun stendur.



Til þess að meta hættu á sprungumyndun í ferskri steypu, verður að reikna út hvaða spennur eiga sér stað. Tilgangur með útreikningunum er því að meta hvað veldur sprungum í steypunni og hvort eða hvernig megi koma í veg fyrir þær.

Eins og áður segir, er algengt að steypuhita séu settar eftirfarandi skorður: Max. hiti skuli vera 60-65°C og hitamunur innan við 20°C. Markmiðið með þessum útreikningum er að skoða ágæti þessara markgilda hvað sprungumyndun í steypunni varðar.

Heilmikinn lærdóm má draga af niðurstöðum útreikninga sem vonandi nýtast Vegagerðinni til að meta nauðsynlegar aðgerðir við aðhlúun steypu.

Gylfi Magnússon



2 Varmfræði ferskrar steypu

2.1 Jafngildisaldur steypu t_T

Hörðnun steypu, þ.e. efnahvarfið milli sements og vatns, gengur hraðar fyrir sig eftir því sem hitinn er meiri. Til þess að ákvarða efniseiginleika steypu á hverjum tíma við breytilegt hitastig, eru þeir bornir saman við rannsóknir á eiginleikum steypu sem harðnar við 20°C. Þetta er hin svokallaða „Maturity method“. Áhrifum steypuhitans sem myndast meðan á hörðnun steypunnar stendur er lýst með hitafallinu $H(T)$, sjá t.d. [10] og [11].

$$H(T) = \frac{\text{hitastig við } T \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{hitastig við } 20^\circ\text{C}} = \exp \left[\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \quad (1)$$

þar sem

$$E = \begin{cases} 33500 \text{ J/mol, þegar } T \geq 20^\circ\text{C} \\ 33500 - 1470 \cdot (20 - T) \text{ J/mol, þegar } T < 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

R: gaskonstantinn = 8,314 J/mol °C

T: hitastig steypu °C

Hitafallið $H(T)$ segir þannig til um efniseiginleika steypu við hitastigið T (°C), borið saman við steypu sem þroskast við hitastigið 20°C.

Í útreikningum þarf að nota jafngildisaldur steypunnar t_T :

$$t_T = \int_0^t H(T) dt, \text{ eða}$$

$$t_T = \sum_{i=1}^n H[T(\Delta t_i)] \cdot \Delta t_i \quad (3)$$

þar sem meðalhitinn $T(\Delta t_i)$ er notaður yfir tímabilið Δt_i

Líkingar P. Freiesleben Hansen samræmast hinu vel þekkta lögmámi Arrhenius um hitadrifin efnahvörf og eru mjög mikið notaðar.

Í líkingum Eurocode 2 (EC2) [1] er notuð ein líking fyrir orkuna E , þ.e. í EC2 er $E = 33500$ J/mol fyrir $0 < T \leq 80^\circ\text{C}$. Í stað líkingar (3), er því í EC2 notuð líking (4), sem er sama og líking (B.10) í Annex B við EC2, sjá [1]:

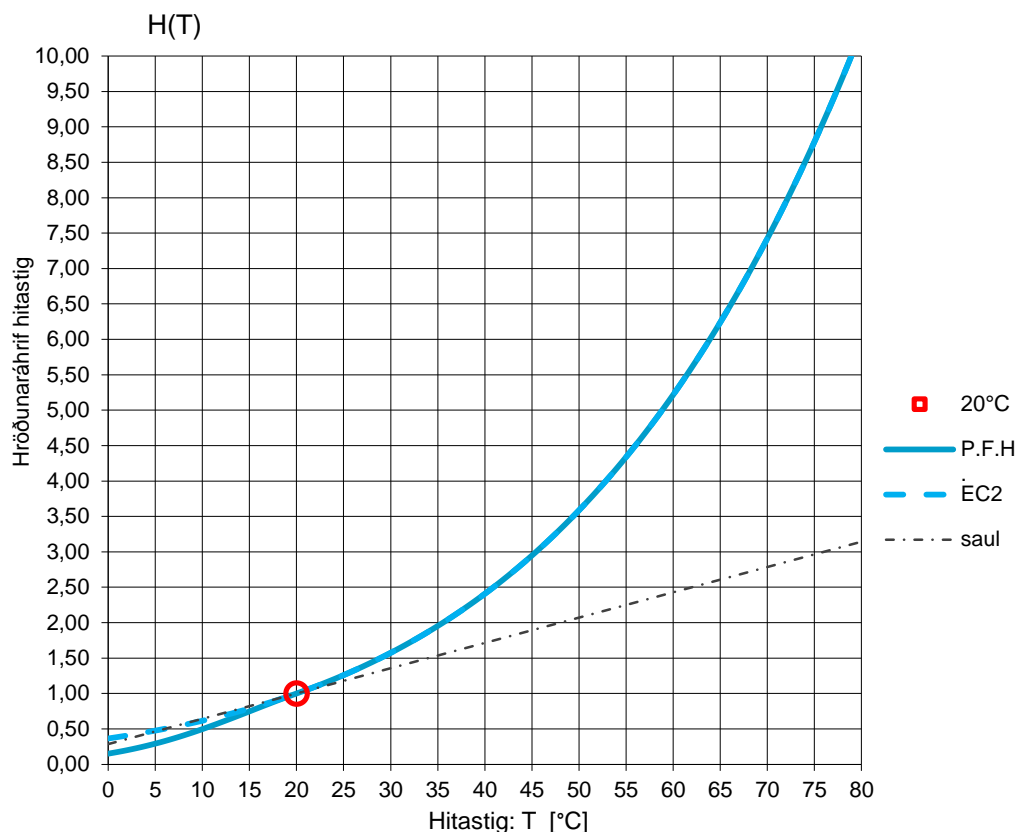
$$t_T = \sum_{i=1}^n H[T(\Delta t_i)] \cdot \Delta t_i = \sum_{i=1}^n \exp \left[\frac{33500}{8,314} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T(\Delta t_i)} \right) \right] \cdot \Delta t_i, \text{ eða}$$
$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-\left(\frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} - 13,65 \right)} \cdot \Delta t_i \quad (4)$$

⇔ EC2:(B.10)

þar sem meðalhitinn $T(\Delta t_i)$ er notaður yfir tímabilið Δt_i

Í fræðiritum er að finna mismunandi „Maturity“ líkingar, sjá t.d. [31]. Nú til dags er þó algengast að sjá vitnað til líkingar (3) [1], [8], [31], sbr. EC2 sem notar afbrigði hennar, líkingu (4). Áður fyrr var líking kennd við Saul og Nurse (1951) mikið notuð og er ennþá vísað til í Rb-blöðunum, sbr. Br. Eq.003 Vetrarsteypa. Sú líking gefur ekki góða raun þegar steypuhitinn vísar eitthvað frá 20°C eins og greinilega má sjá á mynd 2.1. Í dag er mjög fátítt að vitnað sé til líkingar Saul og Nurse.

Áhrif hitastigs á eiginleika steypu



Mynd 2.1 Myndin sýnir hvernig fallið $H(T)$ breytist með hitastigi steypunnar

Mynd 2.1 sýnir jöfnur (1) skv. rannsóknarniðurstöðum P.Freiesleben Hansen (P.F.H.) og hitaferilinn skv. Eurocode 2 (EC2), sbr. jöfnu (4). Jöfnur EC2 og P.E.H. eru samfallandi þegar $T \geq 20^\circ\text{C}$.

Til fróðleiks er einnig sýnt hvað líking Saul gæfi. Hún gerir ráð fyrir línulegu samhengi milli hraða efnahvarfs (rate of hydration) og hitastigs, sem brýtur í bága við nokkur lögmál varmafræðinnar [27], [31]. Í brúarmannvirki er, skv. Alverki '95, fyrirskrifað sementsmagn 400 kg/m^3 . Reynsla mín af mælingum á steypuhita síðastliðin 15 ár, hefur sýnt að max. steypuhiti getur hæglega orðið $55\text{-}70^\circ\text{C}$. Líking Saul gæfi því ranga mynd af þróun efniseiginleika steypunnar.

2.2 Steypuvarmi

Varminn sem losnar úr læðingi þegar sement hvarfast við vatn, er gefinn upp skv. jöfnu (5) [3], [11], [31].

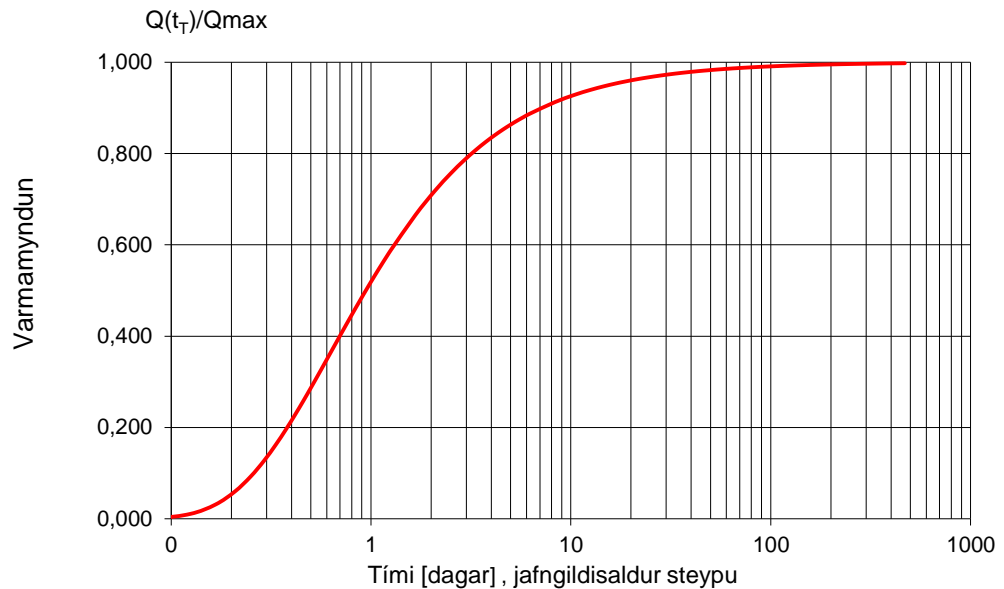
$$Q(t_T) = Q_\infty \cdot \exp \left[- \left(\frac{\tau_e}{t_T} \right)^\alpha \right] \quad (5)$$

þar sem gildin τ_e [tímaeining] og α eru háð sementsgerð

Q_∞ : er heildarvarminn sem myndast þegar $t_T \rightarrow \infty$, [kJ/kg]

t_T : er jafngildisaldur steypunnar skv. jöfnu (4)

Varmamyndun í steypu



Mynd 2.2 Myndin sýnir hvernig varminn $Q(t_T)$ breytist með tíma

Sementsframleiðendur gera reglulega mælingar á Q sem hægt er að fá upplýsingar um. Mælt er með því að ákvarða Q út frá mælingum á sjálfri steypublöndunni til að fá sem nákvæmastar upplýsingar hitamyndun í steypunni [11].



3 Steypuhiti meðan á hörðnun stendur

3.1 Hitamyndun í steypu

Um steypuhitann $T = T(x,y,z,t)$ í hvaða punkti sem er, gilda hitalíkingarnar:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial z} \right) + m \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (6)$$

Þar sem

ρ : er rúmþyngd steypu kg/m^3

c_p : er eðlisvarmi steypu $\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$

λ : er varmaleiðni steypu $\text{kJ/m/klst}/^\circ\text{C}$

Q : er varminn sem myndast í steypunni sbr. líkingu (5)

m : er sementsmagn kg/m^3

Randskilyrði:

$$\lambda \cdot \frac{\delta}{\delta s} T(s, t) = a \cdot (T(s, t) - T_r) \quad (7)$$

Þar sem

a : er kælitala [1/tímaeiningu] við steypufirborð eða mót allt eftir því hvort búið er að fjarlægja mót eða ekki

s : stendur fyrir hnit (x,y,z) á rönd þversniðsins

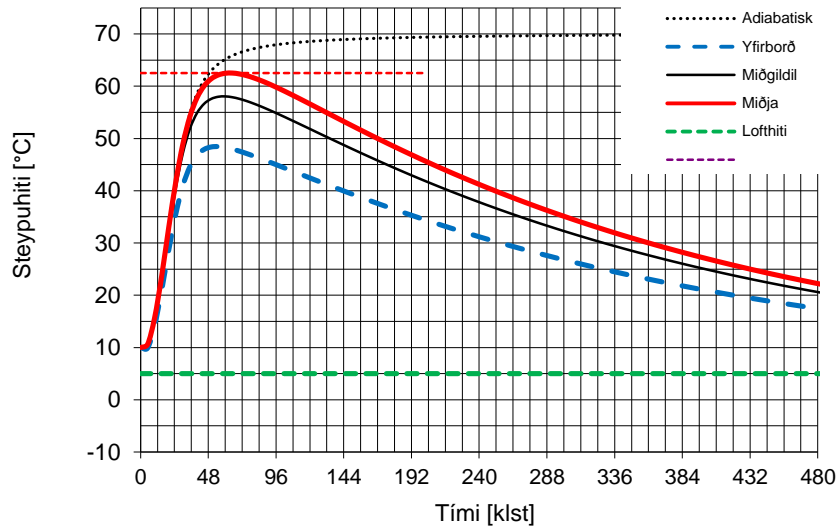
T_r : er lofthiti utan við mót eða yfirborð steypu ef mót hafa verið fjarlægð

Ytri skilyrði s.s. einangrun móta, gerð móta, lofthiti og vindhraði koma fram í líkingu (7).

Með því að leysa diffurlíkingu (6) með randskilyrðunum skv. jöfnu (7), er steypuhitinn $T = T(x,y,z,t)$ þekktur hvar sem er í steypumassanum. Í hverjum einstökum punkti er þannig hægt að fylgjast með breytingum á steypuhita meðan á hörðnun steypunnar stendur. Þegar hitastig steypunnar er þekkt með þessum hætti, er hægt að reikna spennur sem myndast í steypunni meðan á hörðnun hennar stendur. Þá er $T = T(x,y,z,t)$ sett inn í líkingar fyrir samband streitu og spennu í kafla 5.1.

Líkingar fyrir Q og jafngildisaldur steypunnar t_T , eru ólínulegar jöfnur og þess vegna er við lausn líkinganna notaðar „númerískar“ aðferðir t.d. „finite element“ aðferðin eða „finite difference“ ef randskilyrði eru einföld. Karsten Iversen bjó eitt sinn til excel-skjal til þess að reikna hitamyndun í einföldum veggskífum. Steypustöðin hefur m.a. notað það til þess að áætla steypuhita við undirbúning framkvæmda. Myndirnar hér á eftir sýna dæmi um niðurstöður útreikninga á steypuhita.

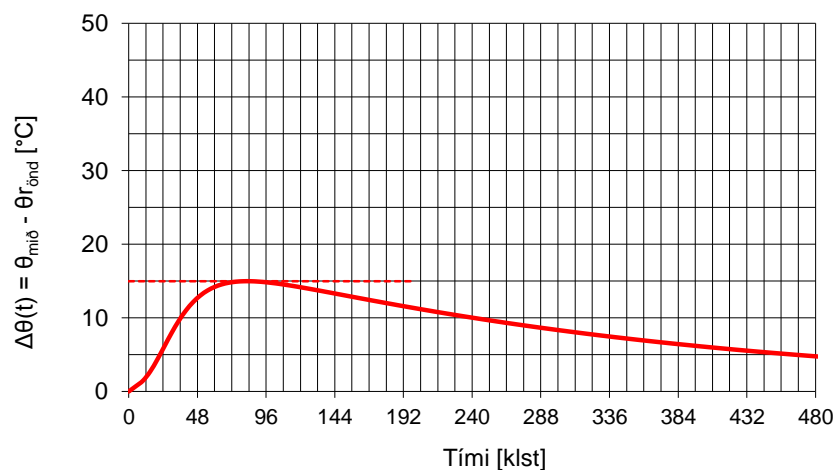
Steypuhiti við rönd og í miðju sem fall af tíma



Mynd 3.1a Myndin sýnir hitastig steypu í massamiðju og við yfirborð móta. Hiti steypu úr steypubíl við niðurlögn er 10°C. Lofthiti er 5°C (græna línan). Í massamiðju nær steypan max hita $T = 63^\circ\text{C}$, 70 klst eftir niðurlögn. Venjuleg dokamót eru notuð og fá að standa nægjanlega lengi.

Á mynd 3.1a má sjá hvernig steypuhitinn breytist með tímanum í tveimur punktum. Annars vegar í massamiðju (rauð lína) og hins við yfirborð (brotin blá lína).

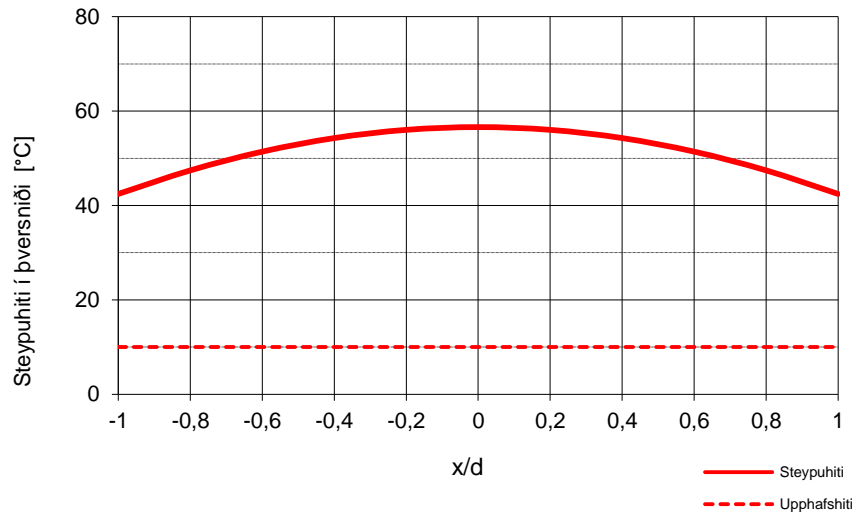
Mismunur á steypuhita í massamiðju og við yfirborð steypu



Mynd 3.1b Myndin sýnir mismun á steypuhita í massamiðju og við yfirborð. $\Delta T_{\text{max}} = 15^\circ\text{C}$, 80 klst eftir niðurlögn steypu. Venjuleg dokamót eru notuð og fá að standa nægjanlega lengi.

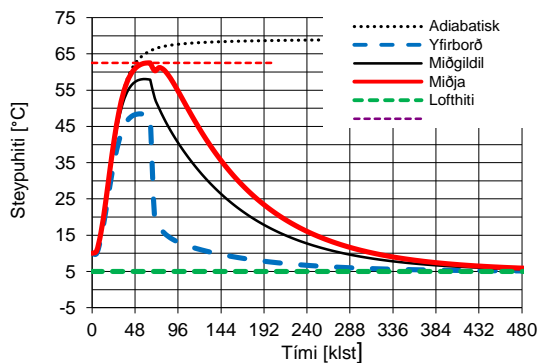
Á mynd 3.1b er búið að reikna út hitamun steypu í miðju og við yfirborð steypu, þ.e. snertiflöt steypu og móta. Myndin sýnir hvernig hitamunurinn minnkar með tímanum og stefnir lokst á núll.

Hitaferill í steypuþversniði

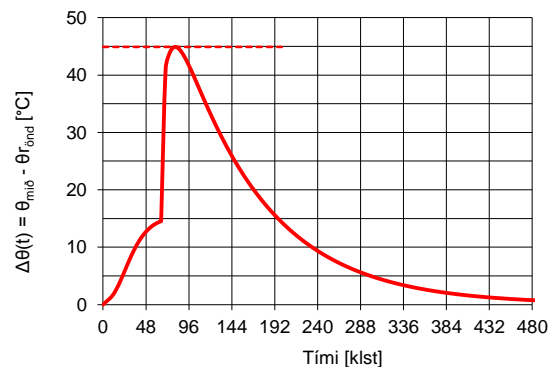


Mynd 3.1c Myndin sýnir hvernig hiti steypunnar breytist yfir þversniðið á tilteknum tímamarki, u.þ.b. sólarhring eftir niðurlögn steypu. $x/d = 0$ er í massamiðju, en $x/d = \pm 1$ eiga við sitt hvort yfirborð steypunnar. Upphafshiti steypunnar við niðurlögn var 10°C . Lofthiti er 5°C . Við röndina er steypa u.þ.b. 42°C og um 57°C í miðju steypuþversniðinu.

Áhrif þess að fjarlægja mót sjást glögglega á myndunum hér að neðan. Öll skilyrði eru þau sömu og áður, sbr. myndir 3.1a og 3.1b, en nú eru mótin fjarlægð 65 klst eftir niðurlögn steypu. Við það fellur hitinn fljótt við yfirborð steypunnar, sem þýðir að mismunarkhiti á steypu í miðju og við yfirborð rýkur úr 15°C í 45°C .



Mynd 3.1d Mót fjarlægð eftir 65 klst. Borið saman við mynd 3.1a sést að steypuhiti við yfirborð fellur hratt. Öll skilyrði eru að öðru leyti þau sömu og á mynd 3.1a.



Mynd 3.1e Rétt eins og mynd á 3.1b, sýnir myndin 3.1e mismun á steypuhita í massamiðju og við yfirborð. Hér eru mót fjarlægð eftir 65 klst og þá rýkur hitamismunurinn ΔT_{max} upp í 45°C . Öll skilyrði eru að öðru leyti þau sömu og á mynd 3.1b.

Þar sem hitinn fellur hratt við yfirborð steypunnar, má búast við háum spennum í steypunni næst yfirborði hennar. Niðurstöður útreikninga á spennuástandi í steypunni geta staðfest það, sjá kafla 6.

Út frá upplýsingum um sementsgerð, sementsmagn, varmaleiðni, gerð móta (U-gildi) og einangrunar ef hún er fyrir hendi, hvenær fyrirhugað er að slá mótum frá, hver lofthitinn er og kæling, er hægt með þessum hætti að reikna út fyrirsjáanlega þróun steypuhitans á hörðunartíma steypunnar.

Aðhlúun steypu á hörðunartíma:

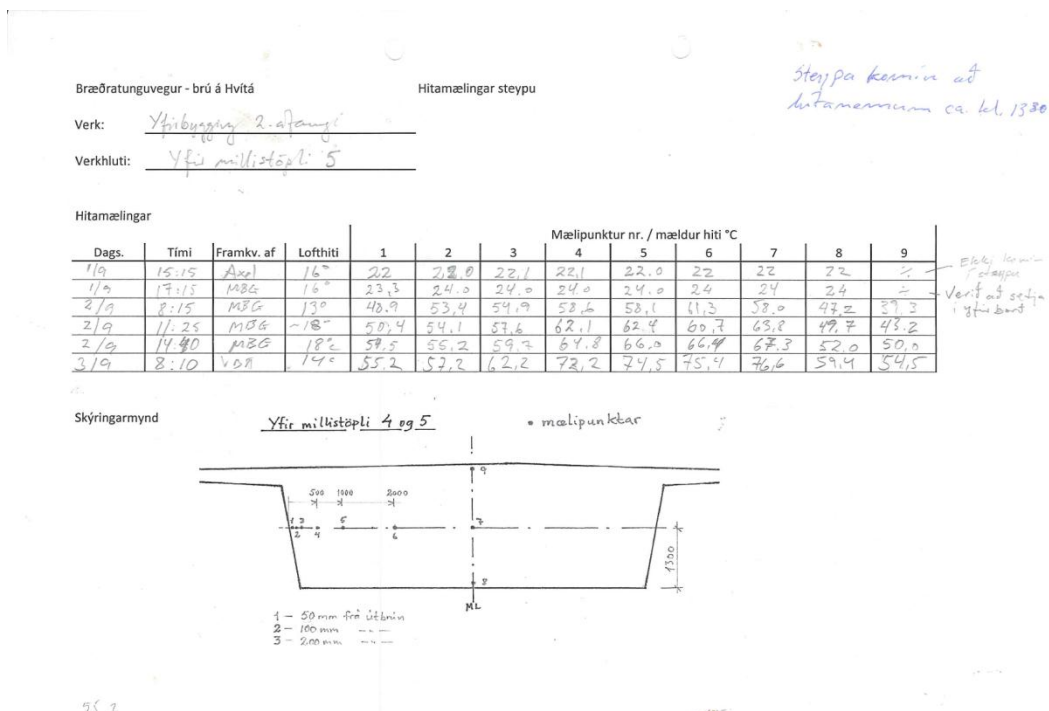
Eina leiðin til að sjá fyrir til hvaða ráðstafana þarf að grípa meðan á hörðun steypunnar stendur, er að reikna út við hverju megi búast.

Ef nauðsynlegt reynist að lækka max steypuhita í miðju þversniði og ekki er hægt að nota possolan-sement eða minnka sementmagn, er eina leiðin til að lækka steypuhitann sú að koma kælislaufum fyrir í steypunni og stýra þannig nákvæmlega hitastigi hennar.

Ef fyrirsjáanlegt er að hitamunur á steypu í miðju og við yfirborð fari yfir tilskilin mörk, er eina leiðin oftast að auka einangrun móta. Það þýðir aftur á móti að steypuhitinn eykst, svo grípa getur þurft til sérstakra aðgerða til að halda max. hita í skefjum. Mótin þurfa að vera lengur á, því lengri tíma tekur fyrir steypuna að ná jafnvæghita við umhverfið.

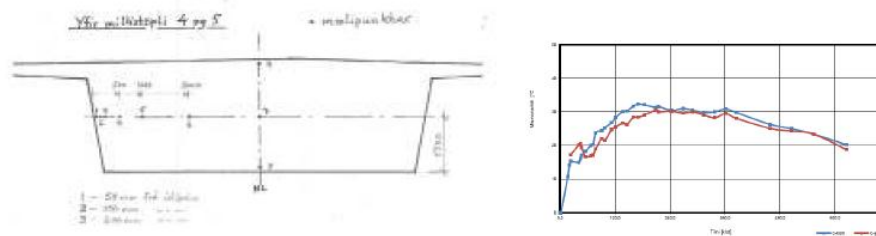
3.2 Hitamælingar í Hvítárbrú

Mjög umfangsmikla mælingar voru gerðar á hitaferlum í stoðveggjum, stöplum og brúnni sjálfri.

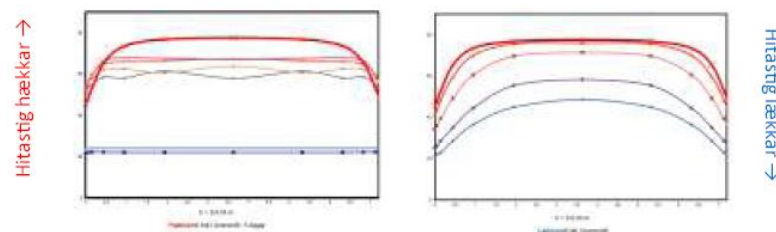


Mynd 3.2.1: Myndin sýnir staðsetningu hitanema í brúarþversniði við milliásetu. Þykkt brúardekks er 2,7 m og breidd þess er um 7 m. Myndin er ljósrit úr vinnubók, nýlátins félagi míns Matthíasar Bjarka Guðmundssonar sem annaðist eftirlit og allar mælingar á brúnni. Blessuð sé minning hans.

Mæling á hitamun



Mælingar á hitaprófil í brúnni. Seinni áfangi sept. 2010



Mynd 3.2.2: Myndin sýnir hvernig hitaferillinn breytir lögun eftir því sem tíminn líður. Myndin neðst til vinstri sýnir hvernig ferillinn breytist þegar steypa er að hitna. Fyrst er hitinn sá sami yfir þversniðið (neðsta lárétta línan), en síðan tekur hann á sig parabolulögun. Myndin neðst til hægri sýnir hvernig hitaferillinn lítur út þegar steypa kælist niður. Myndin efst til hægri sýnir mælingu á steypuhita við yfirborð brúardekks undir vetrarmottum og hins vegar hita steypu við neðri brún brúardekks, við mót. Hitinn er nánast sá sami í efri- og neðri brún brúardekksins. „Hitagræðing“ er aftur á móti umtalsverður í lárétta sniði eins og sést á neðstu tveimur myndunum.

VSÓ hefur gegnum árin, þegar færi hefur gefist, mælt þróun steypuhita í ýmsum verkum. Hér gafst kjörið tækifæri til þess að mæla hitaþróun í massasteypu. Þegar forsendur útreikninga hafa nokkurn vegin staðist, hefur skekkjan $\Delta = (\text{mælt gildi}) - (\text{útreiknað})$, að meðaltali reynst vera u.þ.b. $\pm 5^\circ\text{C}$. Reynslan er því nokkuð góð af notkun útreikninga sem byggja á aðferðum P.F.H. Upplýsingar um rannsóknir P.F.H. og mæliniðurstöður má lesa um í [11] og [12].

Til þess að spá nákvæmlega fyrir um hitamyndun í steypunni, er nauðsynlegt að þekkja nákvæmlega varmaeiginleika hennar. Ein steypublanda af C35/45 steypu getur haft allt aðra varmafræðilega eiginleika en önnur C35/45 steypa, sjá [8]. Þar er m.a. fjallað um „Maturity“ aðferðina og ágætis reynslu af notkun hennar til að spá fyrir um hitamyndun í steypu.

3.3 Núgildandi kröfur Alverks'95 og staðla til steypuhita

Kröfur Alverks '95:

Alverk '95 gerir eftirfarandi kröfur til stjórnunar steypuhita, sjá grein 84.2 Mót, bls. 83:

„Rif móta er í öllum tilfellum háð samþykki eftirlits og sé ekki mælt fyrir um annað eða sýnt fram á með útreikningum og mælingum, má ekki fjarlægja mót stöpla og yfirbyggingar fyrr en hitamunur milli yfirborðs steypu og miðju hennar er minni en 20°C“.

Um aðhlúun og verndun, sjá grein 84.4 Steypa bls. 92, segir meðal annars:

„Verndun þýðir vörn gegn útskolun vegna regns og streymandi vatns, snöggri kælingu fyrstu dagana eftir niðurlögn, háum innri hitastigsmun, lágu hitastigi eða frost“.

Max. steypuhita eru ekki settar skorður. Koma skal í veg fyrir snögga kælingu og háan innri hitastigsmun, en ekki kemur fram við hvað skal miðað.

Hitamuninum, ΔT , milli yfirborðs steypu og miðju hennar eru ekki settar efri skorður. Þegar hann er kominn niður fyrir 20°C, má fjarlægja mót. Ef mót eru fjarlægð þegar ΔT er komið rétt undir tuttugu gráðurnar, rýkur hitamunurinn upp yfir 20°C mörkin þegar lofthitinn er undir 20°C, sem er oftast reyndin hér á landi.

Kröfur steypustaðals:

Í Evrópustaðli EN 13670-1, grein 8.5 „Curing and protection“, segir m.a:

„Unless specified otherwise in provisions valid at the construction site, the peak temperature of the concrete within a component shall not exceed 65°C, unless data are provided to prove that, with the combination of materials used, higher temperatures will have no significant adverse effect on the service performance of the concrete“.

Í Annex E, í sama staðli, er þess getið að of hár steypuhiti geti haft skaðleg áhrif, m.a:

„...significant reduction of strength, significant increase in porosity, delayed ettringite formation...“.

Varnaðarorðin um max. steypuhita koma heim og saman við umfjöllum fjölda fræðigreina og bóka. Í stað þess að steypustyrkurinn vaxi stöðugt með árunum, eru dæmi þess að hann falli ef steypan hefur þroskast við of háan hita. Þess eru einnig dæmi að frost-þýðu þol steypunnar hafi dvínað með auknum aldri. Skemmdir hafa komið fram mörgum árum eftir niðurlögn steypunnar, sem m.a. er rakið til „delayed ettringite formation“.

Í fyrri útgáfu staðalsins, sem þá hét ENV 206, var krafan $T_{max} = 60^\circ\text{C}$, þó mátti einstaka mæligildi fara í 65°C. Þá var einnig tekið fram að hitamunur, ΔT , milli yfirborðs steypu og miðju hennar mætti ekki fara yfir 20°C, ef koma ætti í veg fyrir sprungur við steypuyfirborð. Í núgildandi staðli eru engar kröfur gerðar til hitamunar í steypunni.

4 Efniseiginleikar steypu

4.1 Efniseiginleikar steypu skv. Eurocode 2

Eftirfarandi jöfnur í núgildandi steypustaðli, Eurocod 2 (EC2) [1], eru notaðar. Til þess að ákvarða efniseiginleika steypunnar á hverjum tíma þarf að nota jafngildisaldur steypunnar t_T , skv. jöfnu (B.10) í Annex B í EC2, sem er háður hitastigi steypunnar.

Þrýstistyrkur

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t_T) \cdot f_{cm} \quad \text{EC2:(3.1)}$$

Fjaðurstuðull

$$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t)/f_{cm})^{0,3} \cdot E_{cm} = (\beta_{cc}(t_T))^{0,3} \cdot E_{cm} \quad \text{EC2:(3.5)}$$

Togstyrkur

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t_T))^\alpha \cdot f_{ctm} \quad \text{EC2:(3.4)}$$

þar sem

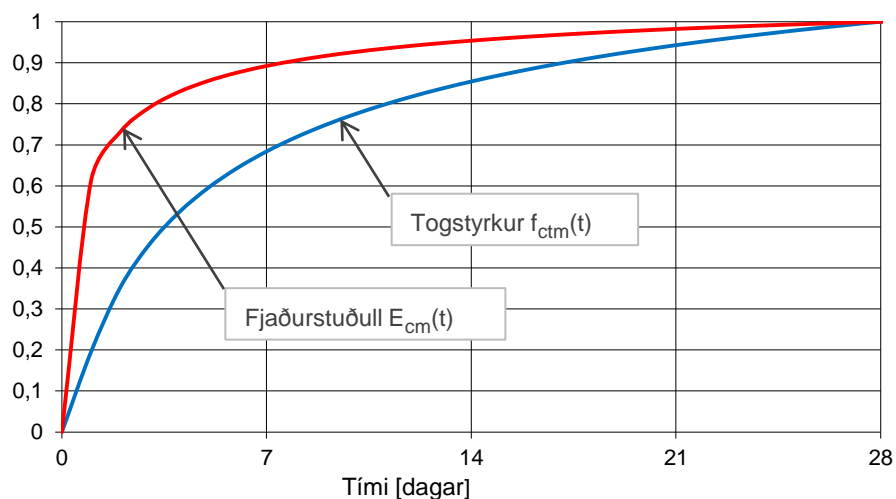
$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{þegar } t_T < 28 \text{ dagar} \\ 2/3 & \text{þegar } t_T \geq 28 \text{ dagar} \end{cases} \quad \text{EC2:(3.4)}$$

og

$$\beta_{cc}(t_T) = \exp\left\{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t_T}\right)^{1/2}\right]\right\}, \quad \text{sem notað er í jöfnum (3.1), (3.4) og (3.5)} \quad \text{EC2:(3.2)}$$

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-\left(\frac{4000}{273+T(\Delta t_i)}\right)^{-13,65}} \cdot \Delta t_i, \quad t_T \text{ er jafngildisaldur steypunnar sbr. (4)} \quad \text{EC2:(B.10)}$$

Togstyrkur og fjaðurstuðull steypu sem föll af tíma



Mynd 4.1 Myndin sýnir hvernig fjaðurstuðull steypunnar: $E_{cm}(t)/E_{cm} = (\beta_{cc}(t))^{0,3}$ og togstyrkur: $f_{ctm}(t)/f_{ctm} = \beta_{cc}(t)$ ($t < 28$ dagar) breytast sem föll af tíma fyrir steypu sem harðnar við 20°C. Ef steypa harðnar við annan hita er t_T notað fyrir tímanna t .

Fjaðurstuðull steypunnar ($E_{cm}(t)$ eða E-módúll) vex hraðar en togstyrkurinn $f_{ctm}(t)$ (og þrýstistyrkurinn). Ástæða þess er sú að fjaðurstuðullinn er að mestu leyti háður

E-módúl fyllicfnanna sem er óháður aldri steypunnar [27].

Þetta þýðir m.a. að togspennur í steypunni $\sigma_{ct}(t) = E_{cm}(t) \cdot \varepsilon_c(t)$, sem eru háðar fjaðurstuðli steypunnar, $E_c(t)$ og streitu í steypunni $\varepsilon_c(t)$, geta hugsanlega vaxið hraðar en togstyrkur steypunnar $f_{ctm}(t)$. Þegar togáraun í steypunni, á einhverjum tímapunkti, verður meiri en togstyrkur hennar, rifnar steypan.

Hitapanstuðull steypu

EC2:

$$\alpha = 10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$$

(3.1.3 (5))

Poisson hlutfallið

EC2:

$$\nu = \begin{cases} 0,2 & \text{fyrir órifna steypu} \\ 0 & \text{fyrir rifna steypu} \end{cases}$$

(3.1.3 (4))

Rétt er að benda á að mælingar á hitapanstuði og Poisson hlutfallinu sýna að þau taka breytingum meðan á hörðun steypunnar stendur og eru háð hörðunarstigi steypunnar, hitastigi steypunnar og rakainnihaldi. Mjög erfitt er að mæla α og ν í ferskri steypu. Í EC2 eru α og ν gildin fastar (constants).

Skrið og rýrnun steypunnar breytast sífellt meðan á hörðun hennar stendur. Gildin eru háð þroska steypunnar „maturiry“ og þar með hita steypunnar sem er stöðugt að breytast. Skrið og rýrnun steypunnar á hverju augnabliki eru reiknuð út skv. jöfnunum hér að neðan og eru síðan notuð við lausn diffurlíkinganna í kafla 5.1 til þess að finna steypuspennurnar.

Skrið (creep)

$$\varepsilon_{cc}(t) = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_c(t)}{1,05 \cdot E_{cm}(t)}, \text{ sjá Annex B varðandi jöfnur fyrir } \varphi(t, t_0)$$

EC2:(3.6)

EC2:(B.1)

$\sigma_c(t)$: steypuspennan á hverjum tíma

fæst sem lausn á diffurjöfnunum í kafla 5.1

Rýrnun (shrinkage)

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

EC2:(3.8)

Þar sem

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad \text{(autogenous shrinkage)}$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2 \cdot t_T^{0,5})$$

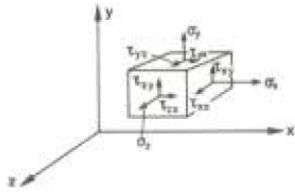
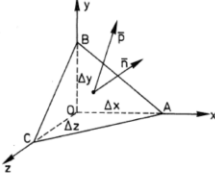
$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad \text{(dry shrinkage)}$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t_T - t_s)}{(t_T - t_s) + 0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}} \quad \text{EC2:(3.10)}$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}(t)}{10})] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad \text{EC2:(B.11)}$$

5 Útreikningar á spennum í harðnandi steypu

5.1 Grunnlíkingar fyrir spennuútreikninga

Jafnvægislíkingar	Randskilyrði
 $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x = \rho a_x$ $\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y = \rho a_y$ $\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho f_z = \rho a_z$	 $p_{rx} = \sigma_x \cdot l + \tau_{yx} \cdot m + \tau_{zx} \cdot n$ $p_{ry} = \tau_{xy} \cdot l + \sigma_y \cdot m + \tau_{zy} \cdot n$ $p_{rz} = \tau_{xz} \cdot l + \tau_{yz} \cdot m + \sigma_z \cdot n$ $\varepsilon_{rx} = \varepsilon_x \cdot l + \frac{1}{2} \varphi_{yx} \cdot m + \frac{1}{2} \varphi_{zx} \cdot n$ $\varepsilon_{ry} = \frac{1}{2} \varphi_{xy} \cdot l + \varepsilon_y \cdot m + \frac{1}{2} \varphi_{zy} \cdot n$ $\varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \varphi_{xz} \cdot l + \frac{1}{2} \varphi_{yz} \cdot m + \varepsilon_z \cdot n$
Samband færslu og streitu	„Compatibility equ.“
$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}$ $\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}$ $\varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$ $\varphi_{xy} = \varphi_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$ $\varphi_{yz} = \varphi_{zy} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}$ $\varphi_{xz} = \varphi_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}$	$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \varphi_{xy}}{\partial x \partial y}$ $\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \varphi_{yz}}{\partial y \partial z}$ $\frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \varphi_{xz}}{\partial x \partial z}$ $2 \cdot \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \varphi_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_{xy}}{\partial z} \right)$ $2 \cdot \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial \varphi_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varphi_{yz}}{\partial x} \right)$ $2 \cdot \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \varphi_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varphi_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_{xz}}{\partial y} \right)$
Samband spennu og streitu, „Constitutive equ.“ eða „Hooke’s law“ fyrir „isotropic mat.“	
$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varphi_{yx} \\ \varphi_{zx} \\ \varphi_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E(t)} & -\frac{\nu}{E(t)} & -\frac{\nu}{E(t)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{E(t)} & \frac{1}{E(t)} & -\frac{\nu}{E(t)} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E(t)} & -\frac{\nu}{E(t)} & \frac{1}{E(t)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G(t)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G(t)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G(t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} + \alpha \Delta T(t) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + [\varepsilon_{ca}(t) + \varepsilon_{cd}(t)] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \varepsilon_{cc}(t) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ $G(t) = \frac{E(t)}{2(1 + \nu)}$	

(8)

5.2 Útreikningar

Tilgangur með útreikningum á spennum í harðnandi steypu er að kanna hvort hættu er á sprungumyndun og við hvernig aðstæður þær myndast. Þá þarf að leysa diffurlíkingarnar hér að framan (8) og reikna með síbreytilegum efniseiginleikum steypunnar. Áður en tekist er á við líkingarnar, er þægilegast að umskrifa þær yfir á „matrixu“ form. Lausn verður aðeins fundin með „númerískum“ aðferðum.

Það sem gerir útreikningana flókna, er hversu ólínulegar allar líkingar fyrir efniseiginleika eru og síbreytinlegar frá einum tímapunkti til annars. Í hvaða punkti sem er, er hitastigið $T(t)$ breytilegt sem fall af tíma, sömuleiðis togþol steypunnar $f_{ctm}(t)$, E-módúll $E_{cm}(t)$, ásamt skriði $\epsilon_{cc}(t)$ og rýrnun $\epsilon_{cs}(t)$ steypunnar, sem hafa áhrif á steypuspennurnar.

Hvað veldur spennum í steypunni? Svarið er einfalt, þvingun veldur spennum í steypunni á hörðunartíma. Um eiginspennuástand er að ræða. Ef steypa gæti formbreytt óhindrað, myndast engar spennur í henni.

Ég skipti þvingun í tvennt: Ytri þvingun og innri þvingun. Ytri þvingun stafar af ýmissi ytri óreglu sem aftrar þenslu eða samdrætti steypunnar, t.d. af lögum þversniðsins og veldur því hæglega sprungum í steypunni. Nánast ógerningur er að koma í veg fyrir ytri þvingun. Notkun mannvirkisins kallar á einhverja ákveðna lögum þversniðsins.

Innri þvingun stafar af efniseiginleikum steypunnar. Til skýringar á þessu eru nefnd áhrif nokkurra einstakra þátta:

Ólínulegur hitaferill $T(x,y,z,t)$: Hitinn sem myndast í steypunni er ólínulegur, líkist parabolú. Þetta eitt og sér veldur tog- og þrýstispennum í þversniðinu, sjá [20] og [21]. Þ.e. í efni sem hefur „konstant“ fjaðurstuðul og formbreyttist óhindrað, veldur ólínuleg hitaáraun spennum.

Eins og vel þekkt er um „statískt“ ákveðin virki, veldur línuleg breyting á hita yfir þversniðið engum spennum, aðeins formbreytingum. Ólínuleg hitabreyting yfir þversniðið, veldur aftur á móti ekki aðeins formbreytingum heldur einnig spennum.

Fjaðurstuðullinn $E_{cm}(x,y,z,t)$: Í hvaða punkti þversniðsins sem er, breytist fjaðurstuðull steypunnar (E-módúll) ólínulega sem fall af tíma. Fyrir tímann er notaður jafngildisaldur steypunnar sbr. jöfnur í kafla 2.1, þ.e. tíminn er háður steypuhitanum hverju sinni. Spennur í steypunni eru reiknaðar út frá fjaðurstuðli hennar sbr. jöfnur (8) um samband streitu og spennu (Hooke's lögmál).

Steypuspennur $\sigma_{ij}(x,y,z,t)$ og streita $\epsilon_{ij}(x,y,z,t)$: Fyrst í stað eftir niðurlögn steypu, gerist ekkert, þar sem fjaðurstuðull steypunnar er núll. Spennur myndast síðan í steypunni vegna ofangreindrar þvingunar sem ólínulegur hitaferill veldur meðan á hörðun hennar stendur og E-módúll steypunnar vex. Tilvist steypuspenna veldur skriði (creep) í steypunni. Við það breytist streitan í steypunni. Skrið-streitan $\epsilon_{cc}(t)$ bætist við streitu af völdum hitaþenslu eða samdráttar $\epsilon_T(t) = \alpha \cdot \Delta T$, sem aftur hefur áhrif á spennur í steypunni. Á fyrsta aldurskeiði steypunnar getur skrið haft gagnleg áhrif og dregið úr spennum í steypunni.

Rýrnun (shrinkage) steypunnar er óháð spennuástandi steypunnar. „Dray shrinkage“ kemur ekki inn í myndina fyrstu dagana eftir niðurlögn steypunnar, en það gerir „autogenous shrinkage“ [1]. Mjög röng mynd fæst af spennuástandi steypunnar ef áhrifum skriðs og rýrnunar er sleppt.

Steypustyrtafjárn: Járbending í steypunni veldur þvingun og þar af leiðandi spennum í steypunni. Hugsum okkur fyrst ójárnþenta steypu sem getur formbreytt óhindrað. Þegar slík steypa rýrnar, dregst hún einfaldlega saman án þess að nokkrar spennur myndist, þar sem formbreytingin getur gerst óhindrað. Tilvist járna í þversniði steypunnar aftrar

samdrætti steypunnar. Við það myndast þrýstispenntur í járnþendingunni og togspennur í steypunni. Járnþending aftrar einnig streitu af völdum skriðs í steypunni, sem aftur breytir spennuástandi steypunnar. Hvað hitaþenslu eða samdrátt í steypunni varðar, hafa járnin aðeins áhrif á spennur í steypunni sem nemur mismun á hitaþanstuðli járna og steypu, þ.e. $\alpha_{\text{járn}} - \alpha_{\text{steypa}}$. Skv.[1] er hitaþanstuðull járnþendingar sá sami og steypunnar. Þetta þýðir að steypa + járnþending hegða sér eins og „homogent“ efni hvað hitaþenslu varðar. Engar spennur eiga sér stað í „statískt“ ákveðnu virki, aðeins formbreytingar. Harðnandi steypa er aftur á móti svo sannarlega ekki „statískt“ ákveðið virki. Margvíslegar þvingaðar formbreytingar eiga sér stað og valda þar með spennum í steypunni.

Þetta skýrir vonandi hvað átt er við með innri þvingun. Hún stafar eingöngu af efniseiginleikum, ekki ytri áraun.

Hvenær rifnar steypan?

Til þess að meta hvort steypa springur á einhverjum tímapunkti, er max höfuðspennan $\sigma_{c1(x,y,z,t)}$ borin saman við togstyrk steypunnar $f_{ctm}(x,y,z,t)$:

$$\sigma_{c1(x,y,z,t)} \leq f_{ctm}(x,y,z,t) \quad (9)$$

Þetta er sjálfsagt einfaldasta brotlíkan sem hægt er að hugsa sér. Stærð togstreitunnar $\varepsilon_{ct}(t)$, hefur einnig áhrif á hvort steypa springur, en út í þá sálma, flókna brot- og flotfleti fer ég ekki í þessari samantekt.

Í hverjum punkti má finna höfuðspennurnar þrjár skv. eftirfarandi jöfnu [20], [23], [24], [25].

$$\begin{aligned} S^3 + (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \cdot S^2 \\ + (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_x \cdot \sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2) \cdot S \\ - (\sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + 2 \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{xz} \cdot \tau_{xy} - \sigma_x \cdot \tau_{yz}^2 - \sigma_y \cdot \tau_{xz}^2 - \sigma_z \cdot \tau_{xy}^2) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Rætur þessarar líkingar: S1, S2 og S3 eru höfuðspennurnar σ_{c1} , σ_{c2} og σ_{c3} , þar sem σ_{c1} er max (stærsta) höfuðspennan og er borin saman við togstyrk steypunnar sbr. jöfnu (9) hér að ofan.

ATH: Hvað formerki á spennum varðar, eru togspennur „pósítifar“ og þrýstispenntur neikvæðar í þessari ritgerð.

Eins og áður segir, verður lausn aðeins fundin með „númerískum“ aðferðum, „finite element“ eða „finite difference“ þegar um einfalda lögun þversniðs er að ræða. Við útreikninga á tímaröðum notaði ég m.a. reikniaðferðir sem ég vann að í DTU að verkfræðinámi loknu [13].

Til einföldunar, líki ég eftir þrívíðu spennuástandi með því að reikna með „plane strain“ ástandi í dæmunum hér á eftir. Hooke's lögmál verður þá 3x3 matrixa.

Niðurstöður útreikninga eru settar fram í myndum í kafla 6. Með þessum móti leitast ég við á einfaldan og skýran hátt að gera grein fyrir áhrifum hita á spennuástand í steypu meðan á hörðun hennar stendur.

Eitt vil ég benda á. Í niðurstöðum útreikninga í kafla 6, eru spennur sem gefnar eru upp á myndunum alltaf max. höfuðspenna í steypunni.

Hægt er að nota aðrar normalspennur, en það gefur ekki rétta mynd þegar maður vill sjá hvenær steypa rifnar. Þá verður að miða við max. höfuðspennu í steypunni.

Tökum dæmi af þrívíðu spennuástandi við yfirborð steypu og veljum x-ásinn sem hornréttan á yfirborðsflötinn. Við yfirborðið í steypunni eru við þá t.d. með normalspennurnar σ_y og σ_z .

Þegar hitamunur er í þversniðinu, t.d. hitinn meiri í miðju en við yfirborð, er við steypuyfirborðið önnur spennan σ_y eða σ_z gjarnan togspenna strax frá byrjun hörðunar, en hin þrýstispenna. Í miðju steypuþversniðs eru báðar spennurnar σ_y og σ_z þrýstispennur til að byrja með. Þegar fram líða stundir og steypa hefur kælst nægjanlega mikið niður og tekur að dragast saman, skipa spennur við yfirborð og í miðju um formerki. Togspennur myndast í miðju steypunnar. Við yfirborð steypunnar verður spennan sem áður var togspenna að þrýstispennu, en hin sem áður var þrýstispenna verður að togspennu.

Ef einblínt er á spennu í eina stefnu, segjum þá stefnu sem gaf togspennu við yfirborð til að byrja, breytist sú spennu í þrýstispennu með tímanum. Að halda því fram, að sprungur sem hugsanlega myndast við steypuyfirborð lokist, þar sem togspennurnar breytist síðar á ferlinu í þrýstispennur, er ekki rétt að mínu mati. Óvarlegt er að mínu mati að tala um að þetta sýni fram á gagnleg áhrif hitamunar. Þó svo að einstaka normalspenna sé þrýstispenna, getur max. höfuðspenna vel verið togspenna, sjá jöfnu (10).

Þess vegna miða ég alltaf við max. höfuðspennu í steypunni á myndunum í niðurstöðum útreikninga, sjá kalfa 6.

Í hvaða punkti sem er, breytir max. höfuðspenna σ_{c1} sífellt um stærð og stefnu meðan á hörðnun steypunnar stendur. Á meðan σ_{c1} er lægri en togþol steypunnar, f_{ctm} , myndast engar sprungur. Þegar $\sigma_{c1} = f_{ctm}$, rifnar steypa. Endurdreifing á spennum á sér næst stað, þar sem spennur geta ekki orðið hærrí en f_{ctm} . Sprungur breyta um stefnu og jafnvægisástand kemst á með endurdreifðum spennum.

Ég fylgi þessu ferli ekki frekar eftir, heldur nem staðar þegar togþoli steypunnar er náð, þ.e. þegar fyrsta sprungan myndast. Það gerist í hverjum punkti fyrir sig þegar kúrfan fyrir σ_{c1} sker kúrfuna fyrir f_{ctm} , sjá myndir í kafla 6. Við frekari útreikninga þarf að bæta „fracture mechanics“ við „elastísku“ útreikningana og endurdreifa spennum í öllu þversniðinu.

Eins og áður er rakið, er nauðsynlegt að taka tillit til rýrnunar og skriðs í steypunni meðan á hörðnun hennar stendur. Þessi streita, ϵ , tvinnast saman við streitu af völdum hitaþenslu og samdráttar $\epsilon_T = \alpha \cdot \Delta T$. Áhrifin á spennuútreikninga eru samofin og ólínuleg svo erfitt er að rekja einstaka þætti sérstaklega út hörðnunartímann.

Til þess að reikna út spennur í steypunni, þarf að þekkja hitaþanstuðul steypunnar α og Poisson hlutfallið ν , sem í reynd eru ekki „konstant“ heldur breytilegar stærðir, fjaðurstuðullinn $E_{cm}(t)$, skrið $\epsilon_{cc}(t)$ og rýrnun $\epsilon_{cs}(t)$. Það er erfitt að mæla þessa efniseiginleika í harðnandi steypu, sjá [9], þar sem m.a. voru notaðir streitumælur „strain gages“ við ákvörðun á streitu. Taka þarf tillit til þess hversu hitanæmir streitumælarnir eru við úrvinnslu niðurstaðna. Fræðmenn eru heldur ekki á eitt sáttir hvernig eigi t.d. að mæla



α og ν í harðnandi steypu. Fjaðurstuðul íslenskrar steypu verður síðar, skv. Þjóðarviðaukum við evrópska hönnunarstaðla, að reikna lægri en gildin í EC2. Til þess að meta hættu á sprungumyndun, þarf togstyrkur steypunnar, $f_{ctm}(t)$, einnig að vera þekktur sem fall af tíma. Líkingar Eurocode 2 (EC2), sbr. kafla 4.1, byggja á niðurstöðum rannsókna þar sem fylgnistuðull (coefficient of correlation) er 20-30% [1].

Síðast en ekki síst, er nauðsynlegt að þekkja mjög nákvæmlega varmaeigileika steypunnar, sbr. kafla 2 - 3 og einangrunargildi móta sem eru grunnforsendur útreikninganna.

Spádómsgildi útreikninga ræðst af því hversu vel maður þekkir ofangreinda eiginleika steypunnar og önnur randskilyrði s.s. ytri þvingun sem taka þarf tillit til. Jafnframt af því hvort þær líkingar sem notaðar eru: „elastisítets teóran“ og brotlíkingin (9) lýsa eiginleikum steypunnar nægjanlega vel.

Þrátt fyrir ýmsa annmarka, skort á nægjanlega nákvæmun upplýsingum, skekkjur og frávik hvað randskilyrði varðar, gefa niðurstöður útreikninga vísbendingar um það hvers má vænta fyrstu dagana eftir niðurlögn steypunnar.

Án útreikninga er engin leið að spá fyrir um nauðsynlegar aðgerðir við undirbúning og aðhlúun steypunnar. Hvort breyta ætti um sementsgerð, lækka byrjunarhitastig steypu, einangra mót, kæla steypuna með innsteyptum kælislaufum, hvenær slá megi mótum frá og hvort hlúa þurfi þá áfram að yfirborði steypunnar meðan hún kælist niður og nær jafnvægi við umhverfishita.



6 Niðurstöður spennuútreikninga

Niðurstöður útreikninga eru birtar í myndum hér á eftir. Hitamyndun og spennur eru reiknaðar út fyrir nokkrar gerðir stoðveggja, stöpla og tvö brúardekk, 0,8 m að þykkt og 1,6 m að þykkt.

Miðað er við að framkvæmdir eigi sér stað á tímabilinu maí – september. Skv. mælingum Veðurstofu Ísland síðastliðna áratugi er meðalhiti í Reykjavík á þessum árstíma 9°C. Dægursveifla hitans er að meðaltali 5°C.

Við spennuútreikninga var reiknað með járnagrind K16c/c200 næst steypuyfirborði.

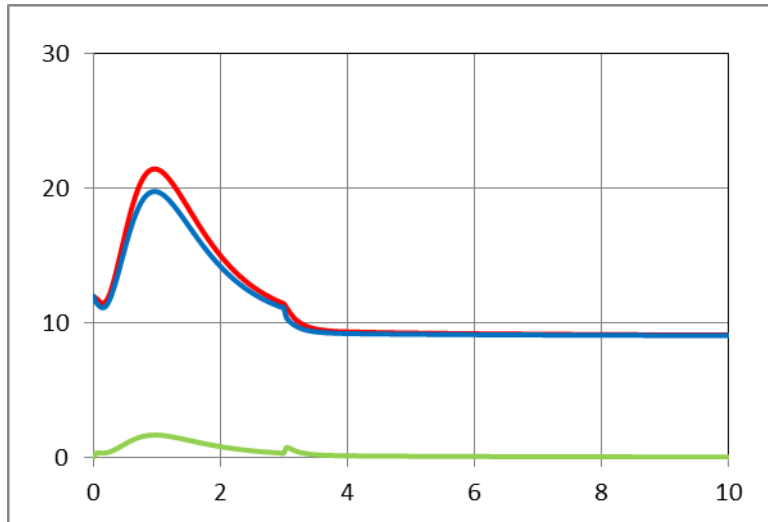
Miðað er við mót úr timbri, venjuleg Doka-mót. Oftast er miðað við að mót stoðveggja og stöpla séu fjarlægð þremur dögum eftir niðurlögn. Sú tímasetning er ekki heppileg fyrir þykkari þversniðin. Ákveðið var að nota alltaf sömu tímasetningu á frásætti móta til þess að auðveldara væri að bera niðurstöður saman.

Sama steypa er notuð í öllum tilfellum. Lágmarkssementsmagn skv. Alverk '95 er 400 kg/m³. Algengt markgildi í steypublöndum hefur í undanförunum verkum verið 415 kg/m³, sem var notað í útreikningum og $v/s = 0,45$. Einnig er í útreikningum miðað við hraðsement sem færst hefur í vöxt að nota. Steypa er í öllum tilfellum 12°C þegar hún er lögð niður.

Aðhlúun brúardekks er með hefðbundnum hætti. Að niðurlögn lokinni og frágangi yfirborðs, er reiknað með að plastdúkur og vetrarmottur verði komnar á yfirborð steypunnar 8 klst eftir niðurlögn hennar.

Þegar fjallað er um spennur í þessum kafla, er alltaf átt við max. höfuðspennu í steypunni.

Fylgst er með steypuhita og spennum (max. höfuðspennu) í tveimur punktum. Annars vegar við yfirboð steypu og hins vegar í miðju steypuþversniðs. Lóðréttur ás á myndunum er hiti (°C) eða spenna (MPa) eftir atvikum. Láréttur ás er tíminn frá niðurlögn steypunnar mældur í dögum.



Skýringar:

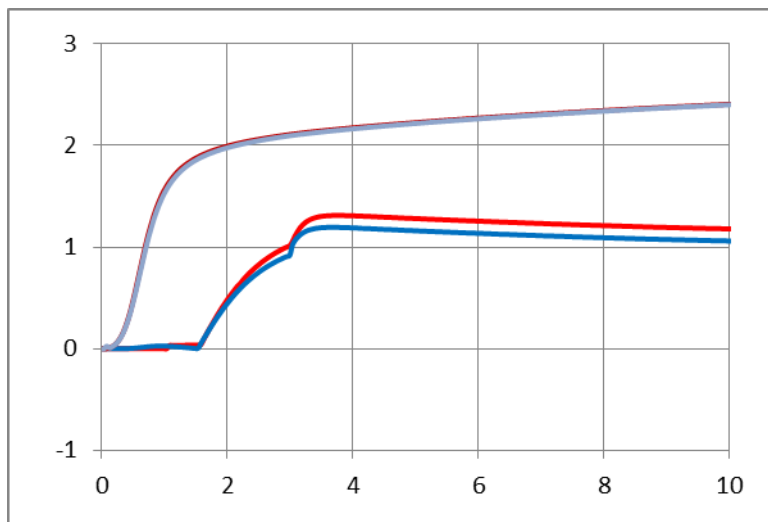
- T_c : hiti í miðju
- T_r : hiti við yfirborð
- $\Delta T = T_c - T_r$ hitamunur

Lóðr: hiti í °C

Lár.ás: tími í dögum

Mynd V20-a: Stoðveggur, 0,2 m á þykkt.

Myndin sýnir hitamyndun í 0,2 m þykkum stoðvegg, annars vegar í miðju og hins vegar við yfirborð. Steypa er lögð niður 12°C. Mót voru fjarlægð 3 sólarhringum eftir niðurlögn. Hitamunur er nánast enginn, $\Delta T_{\max} \sim 1,7^\circ\text{C}$. Max steypuhiti $T_c = 21^\circ\text{C}$. Útihiti er 9°C.



Skýringar:

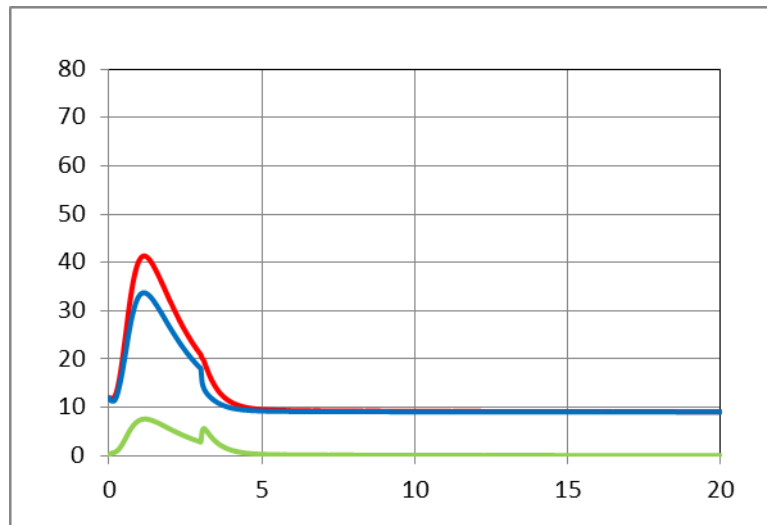
- σ_{c1} : max. höfuðspenna í miðju
- f_{ctm} : togstyrkur í miðju
- σ_{r1} : max. höfuðspenna við yfirborð
- f_{ctm} : togstyrkur við yfirborð

Lóðr: spenna í MPa

Lár.ás: tími í dögum

Mynd V20-b: Stoðveggur, 0,2 m á þykkt.

Myndin sýnir spennur og togstyrk í steypu við yfirborð og í miðju steypuþversniðs. Hitaferill steypunnar er sýndur á mynd V20-a. Max höfuðspenna (togspenna) við yfirborð er nánast núll í 1,5 sólarhring, þegar plastískar formbreytingar ráða ríkjum. Í miðju er smávægileg þrýstispenna þennan tíma. Þegar steypa hefur kælst nægjanlega mikið og dregst saman, byrja togspennur að myndast í þversniðinu öllu. Hitamunur er það lítill í þversniðinu að togspennur við yfirborð og miðju fylgjast að. Togstyrkur vex jafn hratt við yfirborð og í miðju (kúrfurnar falla saman). Max. höfuðspennur (togspennur) eru alltaf minni en togstyrkur steypunnar, þ.e. steypa rifnar ekki meðan á hörðnun stendur.



Skýringar:

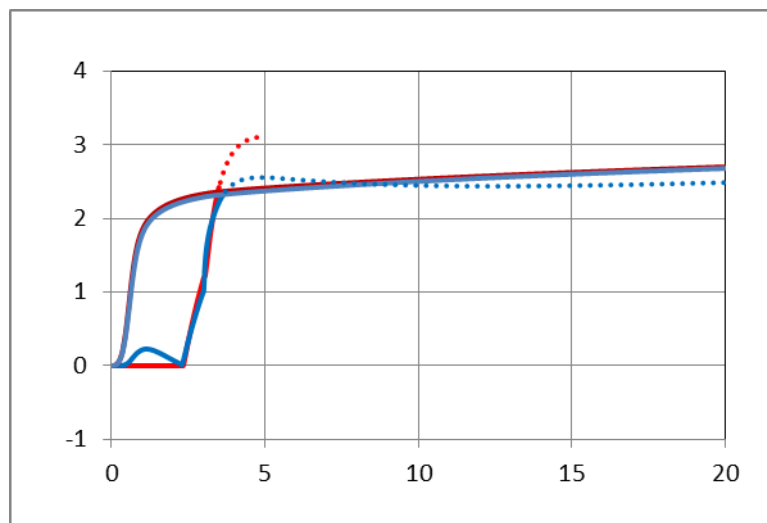
- T_c : hiti í miðju
- T_r : hiti við yfirborð
- $\Delta T = T_c - T_r$ hitamunur

Lóðr: hiti í °C

Lár.ás: tími í dögum

Mynd V40-a: Stoðveggur, 0,4 m á þykkt.

Myndin sýnir hitamyndun í 0,8 m þykkum stoðvegg, annars vegar í miðju og hins vegar við yfirborð. Steypuhiti við niðurlögn var 12°C. Mót voru fjarlægð 3 sólarhringum eftir niðurlögn. Max hitamunur $\Delta T = 7,5^\circ\text{C}$. Max steypuhiti $T_c = 40^\circ\text{C}$. Útihiti er 9°C. Steypan hefur náð jafnvægi við lofthita um það bil 4 dögum eftir niðurlögn.



Skýringar:

- σ_{c1} : max. höfuðspenna í miðju
- f_{ctm} : togstyrkur í miðju
- σ_{r1} : max. höfuðspenna við yfirborð
- f_{ctm} : togstyrkur við yfirborð

Lóðr: spenna í MPa

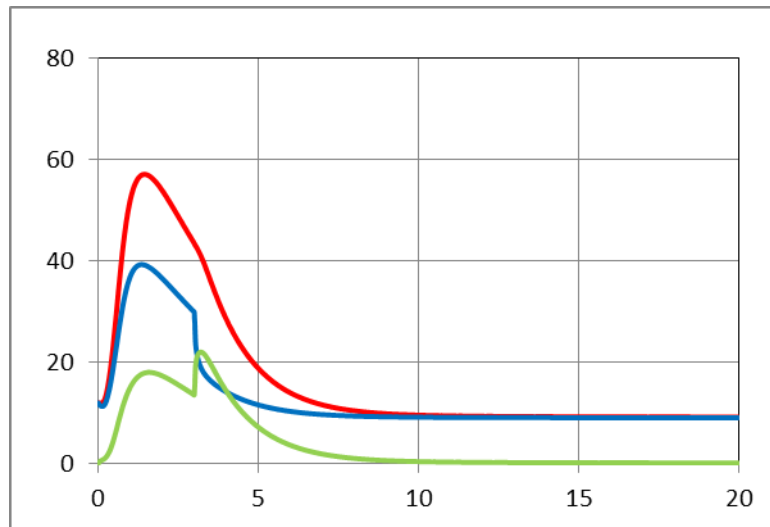
Lár.ás: tími í dögum

Mynd V40-b: Stoðveggur, 0,4 m á þykkt.

Myndin sýnir spennur og togstyrk í steypu við yfirborð og í miðju steypuþversniðs.

Hitaferill steypunnar er sýndur á mynd V40-a. Fyrst í stað, á meðan steypan er að hitna eru togspennur lágar næst yfirborði steypu og þrýstispenntur í miðju. Togspennur fara lækkanði (áhrif skriðs) þar til steypan fer að dragast saman þegar hitinn hefur lækkað nægjanlega mikið.

Eftir 2,5 daga vaxa togspennur samtímis við yfirborð og í miðju (hitamunur í þversniði er það lítil, að spennuferlar fyrir σ_{r1} og σ_{c1} eru samfallandi). Togstyrkur við yfirborð vex jafn hratt og í miðju (lítill hitamunur í þversniði). Togspennur hafa náð togstyrk 3,5 degi eftir niðurlögn, við yfirborð sem og í miðju. Næstu daga á eftir fylgja togspennur ferlinum fyrir togstyrk steypunnar.



Skýringar:

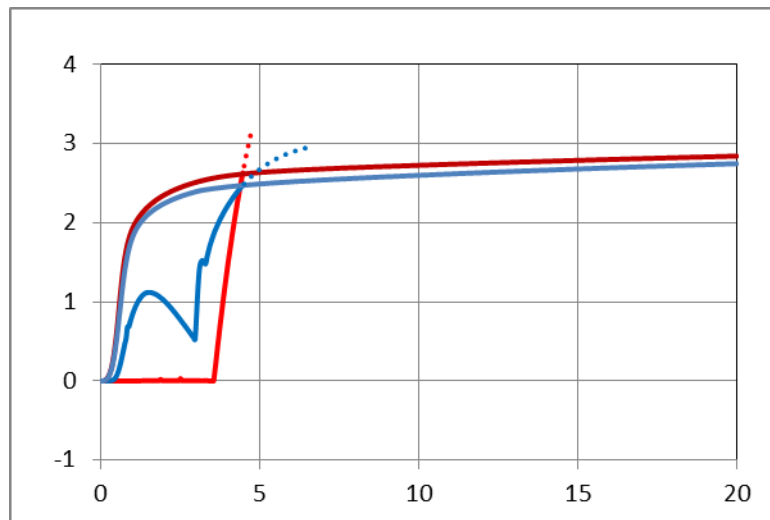
- T_c : hiti í miðju
- T_r : hiti við yfirborð
- $\Delta T = T_c - T_r$ hitamunur

Lóðr: hiti í °C

Lár.ás: tími í dögum

Mynd V80-a: Stöpull, 0,8 m á þykkt.

Myndin sýnir hitamyndun í 0,8 m þykkum brúarstöpli, annars vegar í miðju og hins vegar við yfirborð. Steypuhiti við niðurlögn var 12°C. Mót voru fjarlægð 3 sólarhringum eftir niðurlögn, sbr. brot í hitaferli fyrir ΔT . Max hitamunur $\Delta T = 21^\circ\text{C}$. Útihiti er 9°C. Steypan hefur náð jafnvægi við lofthita um það bil 10 dögum eftir niðurlögn.



Skýringar:

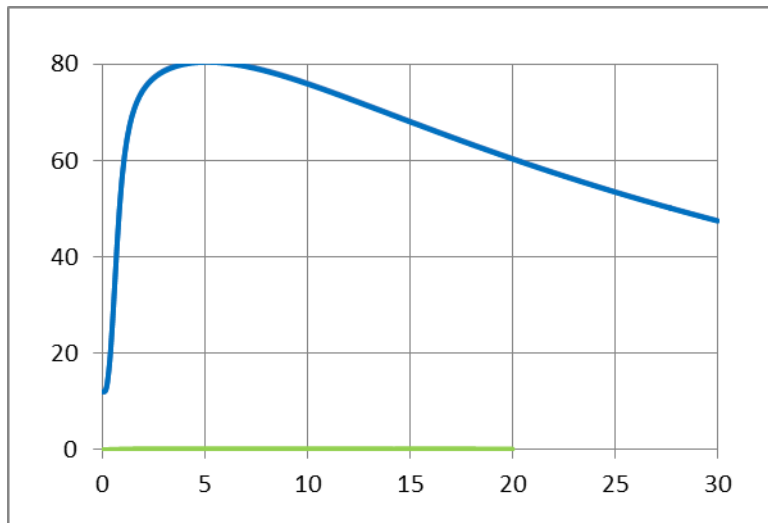
- σ_{c1} : max. höfuðspenna í miðju
- f_{ctm} : togstyrkur í miðju
- σ_{r1} : max. höfuðspenna við yfirborð
- f_{ctm} : togstyrkur við yfirborð

Lóðr: spenna í MPa

Lár.ás: tími í dögum

Mynd V80-b: Stöpull, 0,8 m á þykkt.

Myndin sýnir spennur og togstyrk í steypu við yfirborð og í miðju steypuþversniðs. Hitaferill steypunnar er sýndur á mynd V80-a. Fyrstu þrjú dagana er plastískt ástand ráðandi. Togspenna myndast fljótlega við yfirborð, nær 1 MPa, en fer síðan dvínandi (áhrif skriðs). Á þriðja degi, þegar hitinn hefur lækkað nægjanlega mikið og steypan dregst saman, eru elastísk áhrif ríkjandi og togspenna við yfirborð vex hratt þegar mót eru fjarlægð. Hún nær togstyrk 4,5 dögum eftir niðurlögn steypu. Fyrst í stað er þrýstingur í miðju þversniði, en á fjórða degi vaxa togspennur hratt (elastísk áhrif ráðandi) og ná togstyrk 4,5 dögum eftir niðurlögn. Svo vill til að steypan rifnar samtímis við yfirborð og í miðju. Næstu daga á eftir fylgja togspennur ferlinum fyrir togstyrk steypunnar.



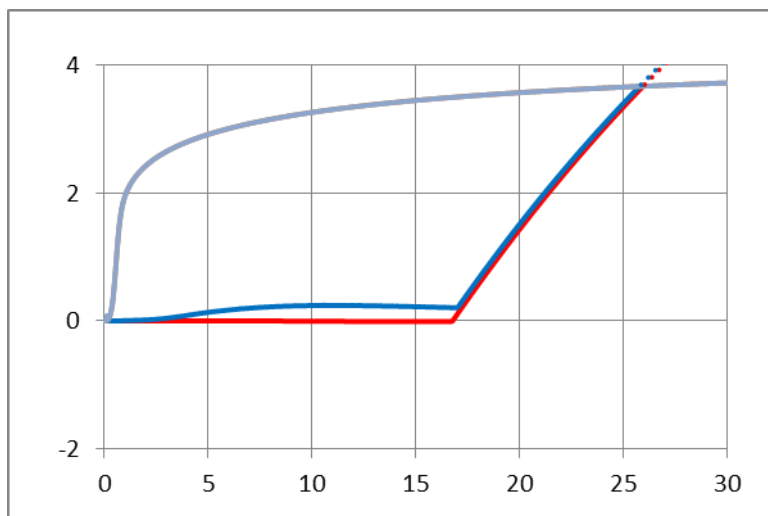
Skýringar:

- T_c : hiti í miðju
- T_r : hiti við yfirborð
- $\Delta T = T_c - T_r$ hitamunur

Lóðr: hiti í °C
Lár.ás: tími í dögum

Mynd V80-c: Stöpull, 0,8 m á þykkt.

Til samanburðar við mynd V80-a. Aðstæður allar þær sömu, mena hvað að mót eru ekki fjarlægð, heldur einangruð svo enginn hitamunur er milli miðju og yfirborðs steypu, þ.e. $\Delta T = 0$. Samanborið við mynd V80-a, er steypan miklu lengur að kólna niður. Max. steypuhiti við yfirborð T_r og í miðju T_c fer í 80°C (rétt eins og adíabatískt efnahvarf).



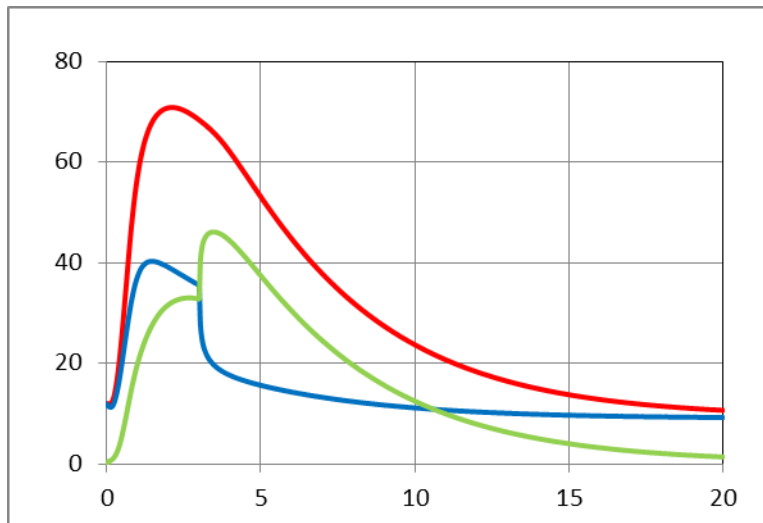
Skýringar:

- σ_{c1} : max. höfuðspenna í miðju
- f_{ctm} : togstyrkur í miðju
- σ_{r1} : max. höfuðspenna við yfirborð
- f_{ctm} : togstyrkur við yfirborð

Lóðr: spenna í MPa
Lár.ás: tími í dögum

Mynd V80-d: Stöpull, 0,8 m á þykkt.

Til samanburðar við mynd V80-a. Togspennur eru nánast engar þar til steypan hefur kælst nægjanlega mikið og tekur að dragast saman. Togspenna nær togstyrk steypunnar 26 dögum eftir niðurlögn steypunnar og steypan rifnar. NB: $\Delta T = 0$ og nánst allan tímann er sama spennuástand í þversniðinu. Engu að síður myndast togspennur í steypunni, mörgum vikum eftir niðurlögn, þegar hitinn hefur lækkað nægjanlega mikið og steypan rifnar samtímis við yfirborð og í miðju. Ef mót væru fjarlægð á 27 degi eftir niðurlögn, hefði það engin áhrif til aukningar á togspennum í steypunni, þær hafa þegar náð togstyrk steypunnar.



Skýringar:

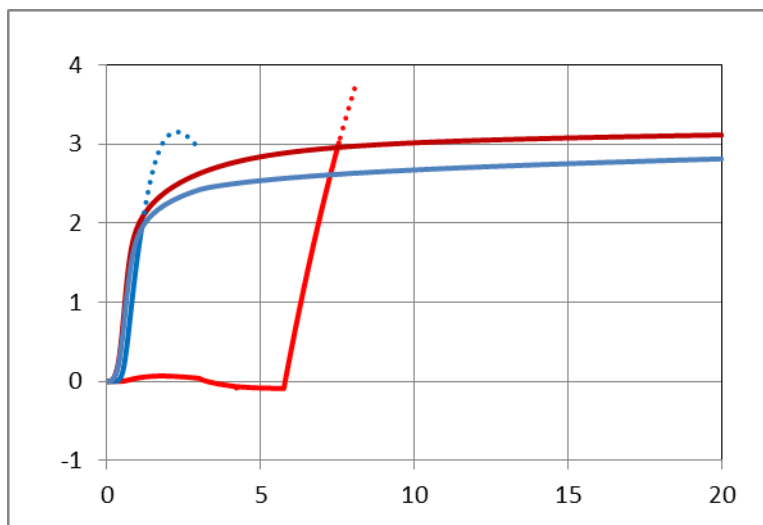
- T_c : hiti í miðju
- T_r : hiti við yfirborð
- $\Delta T = T_c - T_r$ hitamunur

Lóðr: hiti í °C

Lár.ás: tími í dögum

Mynd V160-a: Stöpull 1,6 m á þykkt.

Myndin sýnir hitamyndun í 1,6 m þykkum brúarstöpli, annars vegar í miðju og hins vegar við yfirborð. Steypa var lögð niður 12°C. Mót voru fjarlægð 3 sólarhringum eftir niðurlögn, sbr. brot í ΔT ferlinum. (Óskynsamlegt er að fjarlægja mót svo snemma í þessu tilfelli, en var gert til samanburðar við önnur dæmi). Max hitamunur $\Delta T = 46^\circ\text{C}$. Útihiti er 9°C.



Skýringar:

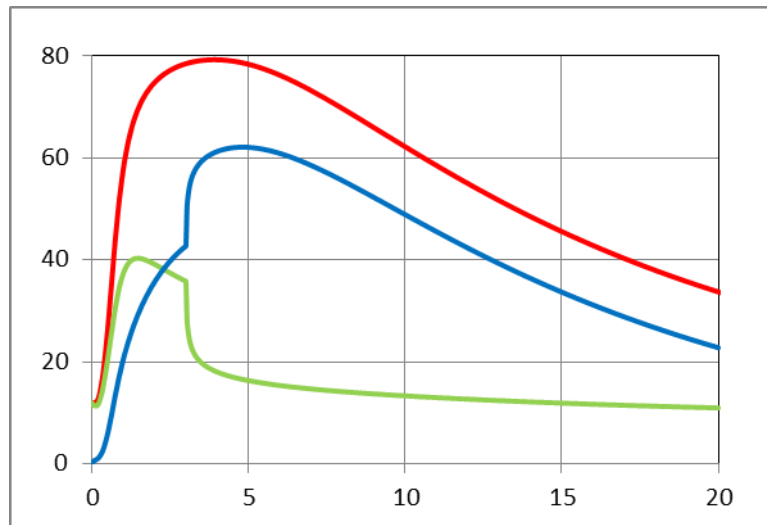
- σ_{c1} : max. höfuðspenna í miðju
- f_{ctm} : togstyrkur í miðju
- σ_{r1} : max. höfuðspenna við yfirborð
- f_{ctm} : togstyrkur við yfirborð

Lóðr: spenna í MPa

Lár.ás: tími í dögum

Mynd V160-b: Stöpull 1,6 m á þykkt.

Myndin sýnir spennur og togstyrk í steypu við yfirborð og í miðju steypuþversniðs. Hitaferill steypunnar er sýndur á mynd V160-a. Meðan steypa er að hitna, þenst hún hraðar út í miðjunni en við yfirborð móta. Þrýstispennur myndast í miðjunni en togspennur við yfirborð. Togspennur við yfirborðið eru á þessum tíma af sömu stærðargráðu og togstyrkur steypunnar (fyrsta sólarhringinn). Togspennurnar fylgja því steypustyrknum strax frá byrjun. Hætta á sprungumyndun og vaxandi sprunguvíddum er því fyrir hendi. Fyrst í stað er þrýstingur í miðju þversniðs. Þegar steypuhitinn hefur lækkað nægjanlega mikið og steypa vill dragast saman, snýst dæmið við og togspennur taka að vaxa, í þessu tilfelli 6 dögum eftir niðurlögn. Þær vaxa hratt og ná togstyrk steypunnar í miðju 7,5 dögum eftir niðurlögn.



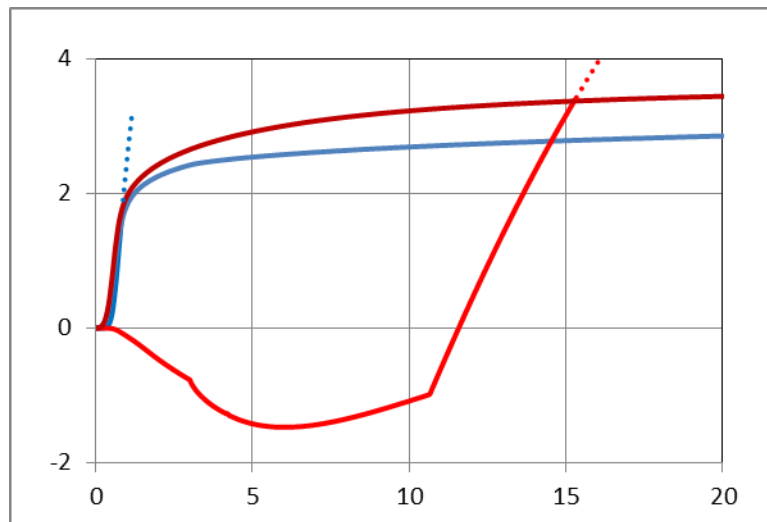
Skýringar:

- T_c : hiti í miðju
- T_r : hiti við yfirborð
- $\Delta T = T_c - T_r$ hitamunur

Lóðr: hiti í °C
Lár.ás: tími í dögum

Mynd V320-a: Stöpull, 3,2 m á þykkt.

Myndin sýnir hitamyndun í 3,2 m þykkum brúarstöpli, annars vegar í miðju og hins vegar við yfirborð. Steypa var lögð niður 12°C. Mót voru fjarlægð 3 sólarhringum eftir niðurlögn (að sjálfsgöðu „absúrd“), sbr. brot í ΔT ferlinum. Max hitamunur $\Delta T = 40^\circ\text{C}$. Max steypuhiti, T_c , nær 80°C . Útihiti er 9°C .



Skýringar:

- σ_{c1} : max. höfuðspenna í miðju
- f_{ctm} : togstyrkur í miðju
- σ_{r1} : max. höfuðspenna við yfirborð
- f_{ctm} : togstyrkur við yfirborð

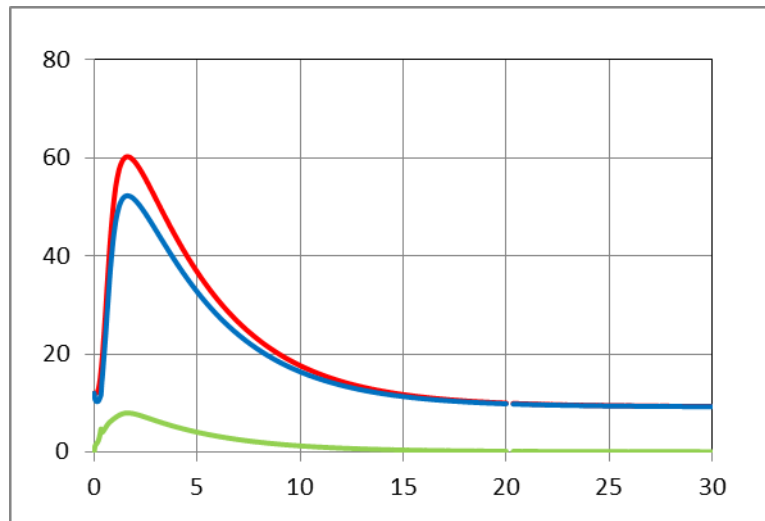
Lóðr: spenna í MPa
Lár.ás: tími í dögum

Mynd V320-b: Stöpull, 3,2 m á þykkt.

Myndin sýnir spennur og togstyrk í steypu við yfirborð og í miðju steypuþversniðs.

Hitaferill steypunnar er sýndur á mynd V320-a. Atburðarrásin er sú sama og á mynd V160-b, en öllu ýktari. Við yfirborð myndast strax togspenna af sömu stærð og togstyrkurinn og fylgir togspennan síðan togstyrksferlinum.

Í miðju þversniðs er max. höfuðspenna fyrst í stað „negatíf“, þ.e. um þrýstispenntu er að ræða. Brotin í σ_{c1} ferlinum stafa af því að höfuðspennan skiptir um stefnu (σ_x , σ_y , σ_z og skerspennurnar eru misstórar á hörðunartímanum). 12 dögum eftir niðurlögn er max höfuðspenna í miðju, σ_{c1} , orðin póstítf og vex hratt. Hún nær togstyrk steypunnar í miðju 15 dögum eftir niðurlögn.



Skýringar:

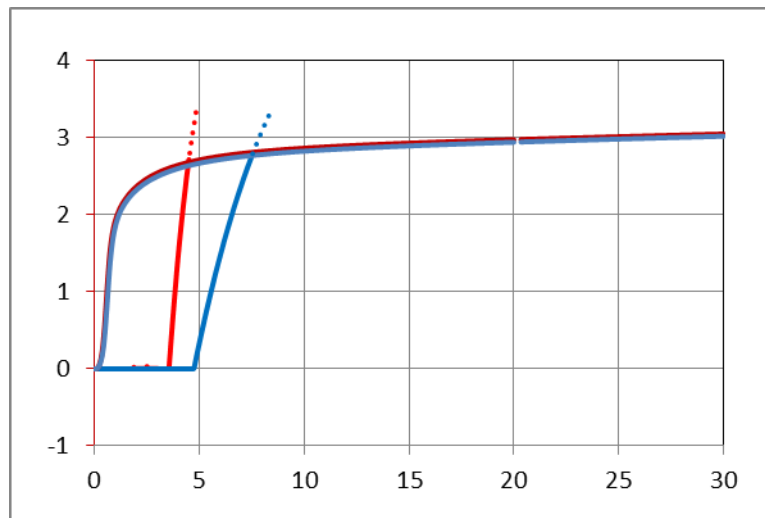
- T_c : hiti í miðju
- T_r : hiti við yfirborð
- $\Delta T = T_c - T_r$ hitamunur

Lóðr: hiti í °C

Lár.ás: tími í dögum

Mynd P80-a: Brúardekk 0,8 m á þykkt.

Myndin sýnir hitamyndun í 0,8 m þykku brúardekki, annars vegar í miðju og hins vegar við yfirborð (efri brún). Steypa var lögð niður 12°C. Max hitamunur $\Delta T = 8^\circ\text{C}$. Útihiti er 9°C. Aðhlúun: Breitt yfir brúardekk með plastdúk og vetrarmottum, sem er reiknað með að sé lokið 8 klst eftir niðurlögn.



Skýringar:

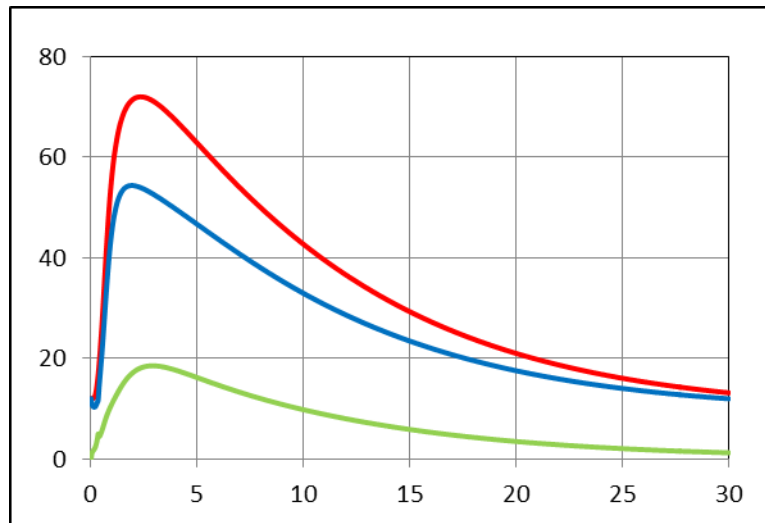
- σ_{c1} : max. höfuðspenna í miðju
- f_{ctm} : togstyrkur í miðju
- σ_{r1} : max. höfuðspenna við yfirborð
- f_{ctm} : togstyrkur við yfirborð

Lóðr: spenna í MPa

Lár.ás: tími í dögum

Mynd P80-b: Brúardekk 0,8 m á þykkt.

Myndin sýnir spennur og togstyrk í steypu við yfirborð og í miðju steypuþversniðs. Hitaferill steypunnar er sýndur á mynd P80-a. Hitamunur í þversniðinu er lítill. Togstyrkur þróast við yfirborð steypu á sama tíma og í miðju hennar, kúrfurnar fyrir f_{ctm} fylgjast að og eru nánast samfallandi. Meðan plastískt ástand er ríkjandi, eru max. höfuðspennur nánast núll við yfirborð og í miðju. Þegar steypuhitinn hefur lækkað nægjanlega mikið og steypan vill dragast saman, vaxa togsþennur hratt (elastískt ástand er ríkjandi). Í miðju gerist þetta 3,5 dögum eftir niðurlögn steypu og nær steypa togstyrk einum degi síðar. Við yfirborð gerist þetta aðeins síðar. Þar er togstyrk náð 7,5 dögum eftir niðurlögn steypu.



Skýringar:

- T_c : hiti í miðju
- T_r : hiti við yfirborð
- $\Delta T = T_c - T_r$ hitamunur

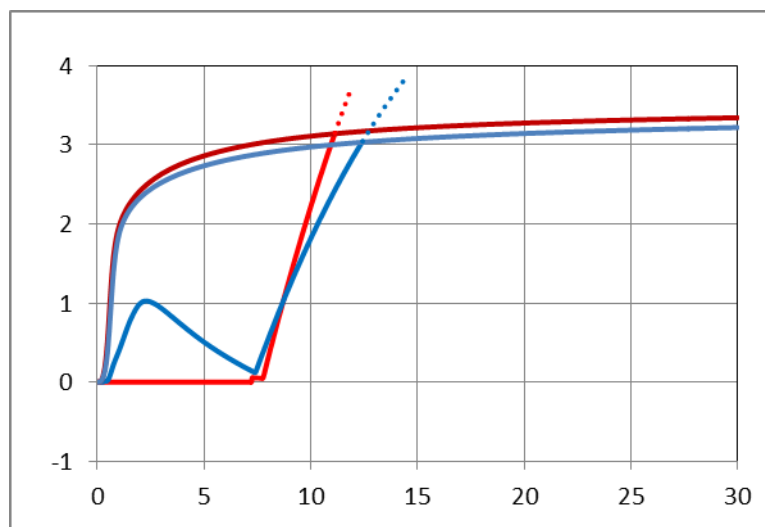
Lóðr: hiti í °C

Lár.ás: tími í dögum

Mynd P160-a: Brúardekk, 1,6 m á þykkt.

Myndin sýnir hitamyndun í 1,6 m þykku brúardekki, annars vegar í miðju og hins vegar við yfirborð brúardekks. Steypuhiti við niðurlögn var 12°C. Max hitamunur $\Delta T = 19^\circ\text{C}$ á þriðja degi frá niðurlögn. Útihiti er 9°C.

Aðhlúun: Breitt yfir brúardekk með plastdúk og vetrarmottum, sem er reiknað með að sé lokið 8 klst eftir niðurlögn.



Skýringar:

- σ_{c1} : max. höfuðspenna í miðju
- σ_{r1} : max. höfuðspenna við yfirborð
- f_{ctm} : togstyrkur í miðju
- f_{ctm} : togstyrkur við yfirborð

Lóðr: spenna í MPa

Lár.ás: tími í dögum

Mynd P160-b: Brúardekk, 1,6 m á þykkt.

Myndin sýnir spennur og togstyrk í steypu við yfirborð (bá lína) og í miðju steypuþversniðs (rauð lína). Hitaferill er sýndur á mynd P160-a. Togstyrkur við yfirborð vex með sama hætti og nánast sama hraða og togstyrkur í miðju. Hitamunur er nægjanlegur til þess að togspenna verður strax vart við yfirborð, á meðan þrýstingur ríkir í miðju þversniðs. Togspennur við yfirborð ná hámarki 1 MPa á öðrum degi, en dala síða aftur. Skrið í steypunni hefur gagnleg áhrif á þessu aldurs skeiði steypunnar til að draga úr togspennum. Eftir 7,5 daga hefur hitinn lækkað nægjanlega mikið og steypan dregst við það saman. Þá vaxa togspennur hratt í miðju og við yfirborð. Í miðju nær togspennan í steypunni togstyrk hennar 11 dögum eftir niðurlögn. En við yfirborð gerist þetta einum degi síðar.

Hitaaukning vegna efnahvarfsins (hydration) hefur rúmmálsaukningu í för með sér, sem orsakar þrýstispennur í steypunni, ef rúmmálsaukningin er á einhvern hátt hindruð [27], [8]. En vegna þess hvað skrið er mikið í ungri steypu, eru þrýstispennur sem geta myndast mjög lágar.

Miklu meiri áhrif hefur rúmmálsminnkun steypunnar, sem á sér stað þegar hitnn lækkar eftir nokkra daga, háð sementsmagni og þykkt þversniðs. Rúmmálsminnkun steypunnar er hlutfallslega háð hitalækkun hennar og hitaþanstuðli [27]. Ef hitadreifing í steypunni er ólínuleg og ef rúmmálsminnkun er hindruð, á sér stað þvingun og innri spennur magnast upp sem leitt getur til sprungumyndunar [7], [27].

Niðurstöður útreikninga – samantekt:

- Nokkru eftir að steypuhitinn hefur náð hámarki og steypuhitinn hefur lækkað nægjanlega mikið, vaxa togspennur hratt og geta hæglega náð togstyrk steypunnar.
- Þegar hitamunur er lítill í þversniðinu, fylgjast spennur við yfirboð og í miðju að, þ.e. vaxa jafn hratt og hafa sama formerki (t.d. báðar togspennur). Til að byrja með eru þrýstispennur í þversniðinu öllu. Þegar svo steypuhitinn hefur lækkað nægjanlega mikið, vaxa togspennur hratt og geta hæglega náð togstyrk steypunnar.
- Þó svo hitamunur í þversniði sé alltaf lægri en 20°C, geta togspennur í steypunni náð togstyrk og steypa rifnað. Þetta gerðist í öllum tilfellum þegar þverniðsþykkt var meiri en 200 mm.
- Þegar hitamunur var um og yfir 20°C, mynduðust togspennur strax við yfirborð steypunnar. Á sama tíma er togstyrkur steypunnar lítill. Allar líkur eru á því að steypa rifni við yfirborðið.

Í [7] er m.a. fjallað um útreikninga og mælingar á 0,6 m þykkum veggjum, þar sem sprungur við yfirborð og í miðju þversniðs koma fram, rétt eins og niðurstöður þessara útreikninga benda til að geti gerst. Að baki þeim útreikningum eru aðrar „maturity“ líkingar og líkingar fyrir tímaháða efniseiginleika steypunnar, en niðurstöður útreikninga á svipuðum nótum.

Niðurstöður útreikninga benda ekki til þess að $\Delta T < 20^\circ\text{C}$ sé áreiðanlegur mælikvarði á það hvort steypa rifnar. Í öllum dæmunum náði togspenna við yfirborð og í miðju þversniðs togþoli steypunnar fyrr eða síðar. Ef hitamunur fór snemma um eða yfir 20°C, rifnaði steypa strax við yfirborðið, annars gerðist það dögum eða vikum síðar. Ef til vill er stór munur á sprunguvíddum, hvort sprungur myndast jafn harðan og steypa er að proskast eða hvort þær myndast síðar þegar steypa hefur náð meiri styrk. Skýrir það hvers vegna svo útbreitt er að takmarka skuli hitamun í steypu við 20°C?

Ég hef leitað að fræðigreinum um þessa sprungumyndun, þ.e. hvort og hvenær sprungur sem myndast á þessu aldursskeiði steypunnar séu hættulegar, en engar fundið ennþá. Ég hef heldur ekki fundið skýringar á því hvers vegna kröfur sem áður voru í forstaðli ENV 206 voru felldar út.

Í [11] er lögð áhersla á að hitamunur í steypunni fari aldrei yfir 20°C, hvort sem mót eru á eða þegar þau hafa verið fjarlægð. Reynslan sýni að yfirborðssprungur geti myndast þegar ΔT fari yfir 20-25°C. Þar er einnig fjalla um athuganir á steiptum byggingarhlutum, sem virðast fyrst og fremst hafa byggst á sjónmati, hvort sýnilegar sprungur mynduðust.



Útreikningar eru nauðsynlegir við undirbúning steypuframkvæmda. Á verkstað þarf síðan að fylgja kröfum eftir með mælingum. Hvað á að mæla á verkstað?

Á verkstað er óraunhæft að ætlast til annars en einfaldra mælinga. Auðvelt er að mæla steypuhita. Þess vegna er mjög hentugt að miða kröfur um aðhlúun steypu við steypuhita, í stað þess að fyrirskrifa kröfur um steypuspennur sem erfitt er að mæla með beinum hætti. Hugsanlega með því að steypa inn kraftsellur, en hvernig á að bregðast við niðurstöðum slíkra mælinga þegar skaðinn er skeður?

Það sem hefur hvað mest að segja um varmamyndun í steypunni er sementsmagnið. Ef fyrirsjáanlegt er að steypuhitinn fari yfir fyrirskrifuð mörk, t.d. 65°C sbr. EN 13670-1, og ekki er hægt að draga úr sementsmagni, er aðeins hægt að stýra hitamyndun í steypunni (lækka max. hitann) með innsteyptum kælislaufum. Varmatapi við yfirborð steypu má svo stýra með yfirbreiðslum eða einangrun utan á mót ef því er að skipta.

Eins og áður segir, hefur VSÓ mælt steypuhita í fjölmörg ár við verklegar framkvæmdir. Vegna þess hve skaðleg áhrif of hár hiti getur haft á líftíma steyptra mannvirka, er óþægilegt til þess að vita hversu of hiti í reynd mælist hár, þ.e. um 55-70°C.

7 Lokaorð

Aðhlúun steypu á hörðunartíma skiptir sköpum fyrir endingu steyptra mannvirkja. „Delayed ettringite formation“ sem veldur niðurbroti steypunnar mörgum árum, jafnvel áratugum eftir niðurlögn steypunnar, er rakið til of hás steypuhita við hörðun steypunnar.

Í verklýsingum Vegagerðarinnar er því eðlilegt að max. hita í steypu séu settar efri skorður, t.d. 65°C.

Forsendur greinar 84.2 í Alverki '95, hvað hitamun í steypu varðar þegar fjarlægja má mót, þekki ég ekki. Lýsingin kemur ekki heim og saman við algeng viðmið að hitamunur skuli aldrei fara yfir 20°C.

Þegar kröfur til aðhlúunar steypu eru settar fram í verklýsingum, þarf að vera hægt að staðfesta árangur með mælingum og eðlilegt að ætlast til þess að svo verði gert.

8 Heimildaskrá

- [1] ÍST EN 1992-1-1:2004, **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1; General rules and rules for buildings**, Staðlaráð Íslands 2005
- [2] Freiesleben Hansen, P., and Pedersen, E. J., **Curing of Concrete Structure**, Draft DEB-Guide to Durable Concrete Structures, Appendix 1, Comité Euro-International du Béton, Switzerland 1985
- [3] Apel, T., Flaig, T.G., **Simulation and Mathematical Optimization of the Hydration of Concrete for avoiding thermal cracks**, 18th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering, Weimar Germany 2009
- [4] Cusson, D., Repette, W.L., **Early-Age Cracking in Reconstructed Concrete Bridge barrier Walls**, ACI Material Journal, 97(4), 2000, pp. 438-446
- [5] Schutter, G.D., **Finite element simulation of the thermal cracking in massive hardening concrete element using degree of hydration based material laws**, Computer and Structures 80, 2002, pp. 2035-2042
- [6] Yuan, Y., Wan, Z.L., **Prediction of cracking within early-age concrete due o thermal, drying and creep behavior**, Cement and Concrete Research 32, 2002, pp. 1053-1059
- [7] Xiang, Y., Zhang, Z., He, S., Dong, G., **Thermal-mechanical analysis of a newly cast concrete wall of a subway structure**, Tunneling and Underground Space Technology 20, 2002, pp. 442-451
- [8] Waller, V., d'Aloia, L., Cussigh, F., Lecrux, S., **Using the maturity method in concrete cracking control at early ages**, Cement & Concrete Composites 26, 2004, pp. 589-599
- [9] Azenha, M., Faria, R., Ferreira, D., **Identification of early-age concrete temperatures and strain. Monitoring and numerical simulation**, Cement and Concrete Composites 31, 2009, pp. 369-378
- [10] Freiesleben, P.H, Pedersen, E.J., **Måleinstrument til kontrol af betons hærkning**, Nordisk Beton 1, 1977, p. 21-25
- [11] Freiesleben Hansen, P., Pedersen, E.J. **Vinterstøbning af beton**, SBI-Anvisning 125, 1982
- [12] Freiesleben Hansen, P., **Hærdeteknologi 2**, dekrementmetoden, Aalborg Portland og BKF-centralen 1979
- [13] Magnússon, Gylfi **Simulation Algorithms**, Serie R, No 216, Department of Structural Engineering, Technical University of Denmark 1987
- [14] Abramowitz, Milton and Stegun, Irene A., **Handbook of Mathematical Functions**, Dover Publications, Inc. NY 1972
- [15] Hansen, Erik **Sædvanlige Differentialligninger fra Fysikken**, 2. Udgave, Polyteknisk Forlag, Lyngby 1976

- [16] Spiegel, M.R.,
Advanced Mathematics, McGraw-Hill 1980
- [17] Thomas, Georg B.,
Calculus and Analytical Geometry, 4th edition, Addison-Westey Publications Company 1977
- [18] Kreyszig, Erwin,
Advanced Engineering Mathematics, Third Edition, John Wilet & Sons, Inc. 1972
- [19] Carrier, G.F. and Pearson, C.E.,
Partial Differential Equations, Academic Press 1976
- [20] Timoshenko, Stephan P. And Goodier, James Norman,
Theory of Elasticity, Third Edition, International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha 1970
- [21] Jaeger, J.C.,
Elasticity, Fracture and Flow, John Wiley & Sons, Inc. 1978
- [22] Spiegel, M.R.,
Theoretical Mechanics, McGraw-Hill 1980
- [23] Nielsen, M.P.,
Mekanik 0.3 Kontinuummekanik, 2. Oplag, Afdeling for Bærende Konstruktioner, Damarks tekniske Højskole, Lyngby 1976
- [24] Nielsen, M.P.,
Mekanik 2.2 – Del 1 Rumlige spændings- og deformationstilstande, 2. Udgave, Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitetscenter 1977
- [25] Nielsen, M.P.,
Mekanik 2.2 – Del 2 Rumlige spændings- og deformationstilstande, Afdeling for Bærende Konstruktioner, Damarks tekniske Højskole, Lyngby 1977
- [26] Nielsen, M.P.,
Beton 1, del 1 – 3, Den private Ingeniørfond ved Danmarks tekniske Højskole 1974
- [27] **Concrete Structures Euro-Design Handbook**, Erns & Sohn 1994/96
- [28] Börtemark, I., Möller, G., Petersons, N.,
Betonghandbok, Svensk Byggtjänst 1980
- [29] Herholdt, A.D., Justensen, Chr F.P., Christensen, P.N., Nielsen, A.,
Beton-Bogen, 2. Udgave, Aalborg Portland, Cementfabrikkernes tekniske oplysningskontor 1985
- [30] Neville, A.M.,
Properties of Concrete, Third Edition, Pitman 1981
- [31] Carino, N.J., Lew, H.S.,
The Maturity Method from Theory to Application, American Society of Civil Engineering, 2001, pp. 19