



LUND UNIVERSITY

Framtagande av temperaturlaster i broar med hjälp av allmänt tillgängliga klimatdata

Larsson Ivanov, Oskar; Gottsäter, Erik

2019

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):
Larsson Ivanov, O., & Gottsäter, E. (2019). *Framtagande av temperaturlaster i broar med hjälp av allmänt tillgängliga klimatdata*. (TVBK; Nr 3071). Lunds tekniska högskola, Avdelningen för konstruktionsteknik.

Total number of authors:
2

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Framtagande av temperaturlaster i broar med hjälp av allmänt tillgängliga klimatdata

Oskar Larsson Ivanov, Erik Gottsäter



LUNDS
UNIVERSITET

Rapport TVBK-3071
ISBN 978-91-87993-12-1
Lunds Tekniska Högskola
Konstruktionsteknik
Box 118
221 00 LUND
2019

Sammanfattning

För att undersöka och utvärdera temperaturfördelningar och efterföljande lastfall i betongkonstruktioner kan exempelvis temperatursimuleringar användas. Sådana simuleringar har gjorts i flera tidigare studier med hjälp av väderdata som mätts upp i närheten av den konstruktion som studeras. Denna metod har dock begränsningar i och med att viktiga klimatparametrar som globalstrålning och långvågig strålning endast mäts kontinuerligt på ett fåtal platser i landet. Detta innebär att om inte nya lokala mätningar ska göras, begränsas temperatursimuleringar till de fåtal områden för vilka tillräcklig klimatdata finns tillgänglig. Det innebär i sin tur att klimatet i övriga delar av landet inte kan tas i beaktning vid tex utvärdering av värden på olika temperaturlastfall.

En alternativ metod för att få indata till temperatursimuleringarna är att använda en modell för beräkning av globalstrålning, exempelvis STRÅNG, som tillhandahålls av SMHI, Naturvårdsverket och Strålsäkerhetsmyndigheten, och en modell för att beräkna långvågig strålning utifrån mer tillgängliga parametrar, som lufttemperatur och molnighet. Med en sådan metod kan temperatur simuleras på de flesta platser i Sverige utan att lokala mätningar behöver göras, dvs simuleringen kan göras med enbart allmänt tillgängliga data. Det finns emellertid en stor osäkerhet kring noggrannheten i både globalstrålningen från STRÅNG och den beräknade långvågiga strålningen.

I denna förstudie utvärderas möjligheten att använda allmänt tillgängliga data i temperatursimuleringar. I studien har temperatur simulerats med allmänt tillgängliga data för tre olika referensobjekt i vilka temperatur har uppmätts i tidigare studier, och jämförelseser görs både med uppmätta resultat och med simuleringar med lokal data som gjorts inom ramen för de tidigare studierna.

Resultaten visar att om de generella trenderna och max-och minvärden över tid är av intresse ger metoden med allmänt tillgängliga data adekvata resultat, men om temperaturen vid en specifik tidpunkt efterfrågas kan signifikanta skillnader förekomma. Undantaget är om indata tas från en plats med andra klimatförutsättningar, vilket är fallet i en av de tre jämförelserna, kan skillnader förekomma även i de generella trenderna och max-och minvärden. Resultaten öppnar för framtagning av exempelvis isothermkartor för temperaturgradienter och skillnader i temperatur mellan konstruktionsdelar, då lokala variationer i klimatet kan tas i beaktning på ett bättre sätt med metoden som använder sig av allmänt tillgänglig data.

Summary

To study and evaluate temperature distributions and subsequent load cases in concrete structures it is common to use thermal simulations. Such simulations have been performed in multiple previous studies using weather data measured in the vicinity of the studied object. However, this method has limitations, since important factors such as solar radiation and longwave heat radiation are only measured in a few places in Sweden. This means that thermal simulations can only be performed for structures located close to the measuring locations, if local measurements is to be avoided. This, in turn, limits the possibility of including all parts of the country when e.g. evaluating the load levels for various cases.

An alternative is to use models for estimating solar radiation and longwave heat radiation, such as STRÅNG, provided by SMHI, the Swedish Radiation Safety Authority (Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM) and the Swedish Environmental Protection Agency (Naturvårdsverket), for solar radiation and models based on cloud cover and air temperature. With this kind of methodology, it would be possible to simulate the temperature in most places in Sweden without having to perform local measurements, i.e. the simulation can be made with easily accessible public data only. There is however an uncertainty related to the accuracy of STRÅNG and other possible models for estimating radiation.

In this study, the possibility of using easily accessible public data in thermal simulations is evaluated. The temperature has been simulated with easily accessible public data for three reference objects where the temperature in the structures has been measured in previous studies. Comparisons are made between the new simulations and measured temperatures, as well as with simulations using local data as input.

The results show that if the general trend and maximum and minimum values over time is of interest, the simulations using easily accessible public data give adequate results. If, however, the temperature at a specific point in time is sought, the new simulations may be unreliable. If the input data are taken from a location with a different climate than the location of the object, the results may differ significantly which is the result in one of the reference cases. The results presented here creates the possibility of e.g. producing isotherm maps for thermal gradients and differences in temperature between structural parts, since local variations can be included all over Sweden with the use of easily accessible public data

Förord

Denna studie genomfördes i huvudsak mellan januari och juli 2018 och finansierades av Trafikverket/BBT. Den gjordes för att undersöka möjligheter till användning av allmänt tillgängliga data för vidare studier av temperaturlaster i broar där det inte finns möjlighet till lokala data. Vi vill tacka de examensarbetare som genomförde sitt arbete inom ramen för denna förstudie, Simon Månsson och Oscar Nilsson, för ett väl utfört arbete som kompletterar denna rapport.

De STRÅNG data som användes i studien är från SMHI och var framtagna med hjälp av Svenska Strålsäkerhetsmyndigheten och Svenska Miljöinstitutet. Övriga allmänt tillgängliga klimatdata är hämtade från SMHIs webbtjänst för öppna data.

Oskar Larsson Ivanov och Erik Gottsäter

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	4
Förord	5
Innehållsförteckning	6
1. Inledning	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte och mål	8
2. Temperaturpåverkan i broar	9
2.1 Grundmodell för temperatursimulering	10
3. Allmänt tillgängliga data	12
4. Plattrambro	14
5. Nya Svinesundsbron	20
6. Betongplatta	25
7. Diskussion, Framtida tillämpningar	28
8. Slutsatser.....	30
9. Referenser	31

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Temperaturen i en betongkonstruktion beror på förhållanden i det omgivande klimatet. Förändringar i solstrålning, lufttemperatur, vind och långvågig strålning, som påverkas av bland annat molnighet, gör att temperaturen i betongen varierar över både tid och rum, där olika delar kan få olika temperatur. Temperaturvariationer i betong ger upphov till rörelser, vilka i sin tur kan ge upphov till spänningar och efterföljande sprickor ifall de är förhindrade. Detta medför att armering behövs för att begränsa storleken på uppkomna sprickor, mängden och placeringen av armeringen påverkas av hur vi hanterar temperaturvariationerna vid dimensionering.

Idag hanteras laster och effekter på grund av temperatur vid dimensionering genom att olika lastfall analyseras. De lastfall som vanligen ska tas hänsyn till är konstruktionens effektiva medeltemperatur, vilken främst påverkar rörelser i längdriktningen hos en bro; olika temperatur i olika delar av en konstruktion; samt temperaturdifferenser där en sida är varmare än den andra (Larsson 2012).

I tidigare projekt på LTH har det visats hur temperaturen varierar i betongbroar och vilka effekter detta kan få (Larsson 2012, Gottsäter et al 2018). Där visades även möjligheten till att simulera hur temperaturfältet ser ut i en bro och att detta kan medverka till stora spänningar och sprickbildning. Eftersom temperaturen kan ge upphov till stora effekter vid dimensionering är det viktigt att de ingångsvärden som används är lämpliga och verifierade. De lastvärden som används för temperaturdifferenser i dagens Eurokod är framtagna i ett geografiskt område, Tyskland (EN 1991-1-5 2005, CEN 1996), som inte speglar alla delar av Sverige. Detta medför att det används temperaturlaster vid dimensionering av broar som inte är verifierade för det klimat som faktiskt finns där bron byggs. Lastnivån för temperaturdifferens och temperatur mellan olika konstruktionsdelar beror dessutom till stor del på brotyp och geometri, där det idag saknas studier om hur detta beroende ser ut.

För att kunna simulera temperaturen i en betongbro krävs det en stor mängd indata bestående av lufttemperatur, vindhastighet, solstrålning och långvågig värmestrålning. Simuleringen behöver även verifieras mot temperaturmätningar hos en faktisk konstruktion. Detta har tidigare gjorts för en betongplatta (Larsson 2009), för betongbågen hos nya Svinesundsbron (Larsson och Karoumi 2011) och för en plattrambro (Gottsäter et al 2018). Gemensam nämnare för dessa fall är att de klimatdata som används som indata är specifikt uppmätt i närheten av objekten och är därmed mindre lämplig att utnyttja för simulering av temperatur i broar på platser med andra förutsättningar där det inte finns mätningar.

För att kunna få en större geografisk täckning är det lämpligt att använda väderdata från en större mängd platser, vilket skulle kunna ge möjligheter att studera om temperaturlaster och effekter skiljer sig mellan olika delar av landet. Det skulle även skapa möjligheter till att kunna förbättra dimensioneringen av betongbroar genom att mer rättvisande lastnivåer används. SMHI mäter idag klimatdata i form av temperatur och vindhastighet på ca 200 platser i Sverige, medan tillgången till mätdata av strålning är mer begränsad, exempelvis mäts långvågig strålning för närvarande endast på 7 platser i landet. Att genomföra separata mätningar av strålning på fler platser för att

täcka ett ännu större område skulle dock innebära mycket stora kostnader och dessutom inte vara lämpligt då det tar lång tid att samla in stora mängder data. Det finns dock alternativ i form av en databas för beräknad solstrålning, STRÅNG (SMHI 2018), samt möjlighet till approximationer baserade på de data som finns tillgängliga i stor skala.

1.2 Syfte och mål

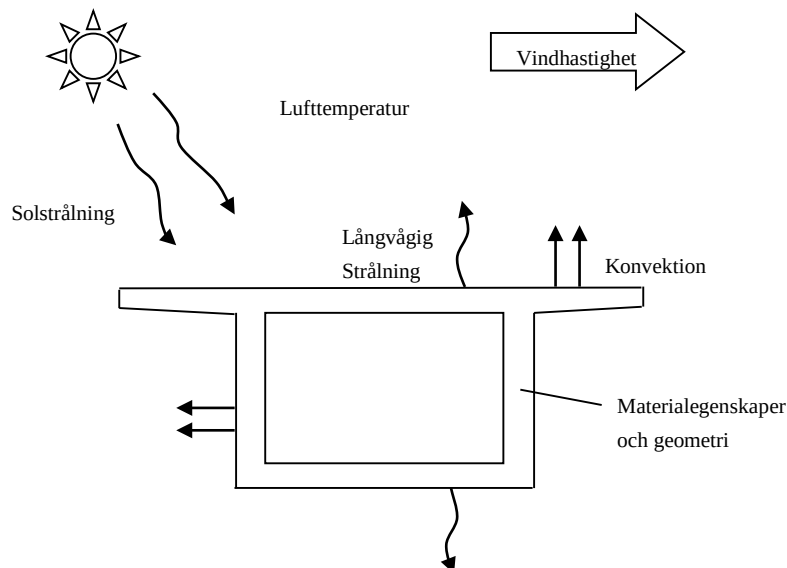
Syftet med arbetet som presenteras i denna rapport är att undersöka möjligheterna till att använda indata från databaser och approximationer för att beräkna temperaturlaster i betongbroar. Specifika mål med förstudien är att:

- jämföra mätningar och lokalt validerade simuleringar av temperatur i betongkonstruktioner med simuleringar där allmänt tillgängliga data och approximationer utnyttjas.
- studera hur dessa nya simuleringar kan utnyttjas för att bättre kunna uppskatta temperaturlaster för områden där lokalt uppmätta klimatdata saknas.

Allmänt tillgängliga klimatdata från SMHI, databas för beräknad solstrålning, STRÅNG (SMHI 2018), och approximativa metoder för hantering av långvågig värmestrålning (effekter av molnighet och omgivande temperatur) kommer att utnyttjas i studien. Objekten som kommer att studeras är en plattrambro och en betongplatta i Lund samt betongbågen på nya Svinesundsbron, där tidigare temperaturmätningar har genomförts. De befintliga mätningar som genomförs av SMHI och som ligger i anslutning till objekten kommer också att utnyttjas. Inom ramen för denna förstudie har även ett examensarbete genomförts, se Månsson & Nilsson (2018), en del resultat som presenteras i denna rapport härrör från detta examensarbete.

2. Temperaturpåverkan i broar

Broar påverkas av förändringar i omgivningen, där temperaturen i bron ändras på grund av variationer i lufttemperatur, solinstrålning, molnighet, vindhastighet och vindriktning, se Figur 2.1 för en illustration. Temperaturen i bron påverkas även av materialegenskaper såsom densitet, värmeledningsförmåga, specifik värmekapacitet, emissivitet och solabsorptivitet. Materialegenskaperna kan till viss del förändras över tiden, t.ex. så kan en betongyta ändra färg och få lägre solabsorptivitet, men de största ändringarna i temperatur sker dock pga. ändringar i väderlek och mellan årstider.



Figur 2.1. Faktorer som påverkar temperaturen i en bro.

En ändring av temperaturen i en bro leder till rörelser eftersom alla material vill expandera eller dra ihop sig beroende på utgångsläge. Rörelser medför i sig inte nödvändigtvis några problem, men om de är förhindrade kan de ge upphov till spänningar som i sin tur kan ge följdproblem, såsom sprickbildning. Denna typ av spänningar kallas för tvångsspänningar och kan vara problematiska att hantera vid dimensionering och utvärdering av broar, speciellt vid användande av finita element modellering (Gottsäter et al 2017a).

En ändring av brons medeltemperatur ger upphov till rörelser i längsled som kan ge förskjutningar av stöd eller stora krafter i landfästen. Det vanligaste sättet att hantera dessa rörelser är genom lager och rörelsefogar, men det finns även broar utan lager där rörelserna tas upp genom samverkan mellan brobana, stöd och omgivande jord (Quinn 2016). Ändringar i medeltemperatur i en bro sker emellertid oftast över en längre tidsperiod genom årstidsväxlingar i den omgivande miljön. Det är främst variationer i lufttemperatur som styr medeltemperaturen i broar, men även ackumulerad värme från solstrålning kan bidra. I Eurokoden (EN 1991-1-5 2005) finns ett lastfall för ändrad medeltemperatur, där dimensionerade värde anges beroende på brons geografiska

position. Det geografiska beroendet kan beskrivas med så kallade isothermkartor, som kan användas för att välja lastvärde. För Sverige finns dock istället en lista med maximal och minimal lufttemperatur för alla kommuner. Dessa relateras sedan till en uppskattad initial brotemperatur, vilket ger den temperaturändring som behöver beaktas.

En skillnad i temperatur mellan olika sidor av tvärsnittet, exempelvis att övre delen är varmare än undre delen, ger upphov till att bron vill kröka sig. Detta går inte att motverka genom lager, utan kommer att påverka konstruktionen och måste hanteras vid dimensionering. I EN 1991-1-5 (2005) finns det två olika metoder angivna för att hantera denna typ av temperaturskillnad. Den ena metoden som traditionellt sett använts i Sverige är att räkna med en linjär temperaturdifferens över tvärsnittet. Lastvärdet beror då på konstruktionstyp och hur mycket beläggning som finns på bron. Det andra alternativet är att räkna med en så kallad "multiple straight line", dvs att anta en mer icke-linjär fördelning som mer liknar en verklig temperaturfördelning. Den icke-linjära delen av temperaturfördelningen antas annars vara självutjämnande.

En brist i båda dessa metoder är att de lastvärden som anges är framtagna med en mycket begränsad mängd data. De linjära differenser som anges är tex framtagna med data ifrån centrala Tyskland under en period av 10 år (CEN 1996), vilket gör att varken geografisk variation eller ett större tidsintervall tas hänsyn till. Detta kan leda till att felaktiga värden används i andra delar av Europa, för Sverige finns det t.ex. klimatsituationer som kan uppträda i norra delarna som inte tagits hänsyn till i utvecklandet av Eurokoden (Larsson 2012).

Temperaturen kan också vara olika i olika delar av en bro. Detta kan förklaras av att ex brobaneplattan blir mer solbelyst än övriga delar, eller att vissa delar är placerade i anslutning till mark, som kan kyla eller värma konstruktionsdelen beroende på årstid och väderförutsättningar. Denna situation ska också beaktas vid dimensionering enligt Eurokod, då en skillnad i den jämt fördelade temperaturkomponenten ska beaktas om detta leder till ogynnsamma lasteffekter. Lastvärdet, som rekommenderas vara 15°C, kan leda till stora spänningar i exempelvis plattrambroar, om lasteffekter i brons tvärriktning beaktas samtidigt som styvhetsminskningen vid uppsprickning inte beaktas (Gottsäter et al 2017b). I det pågående BBT-projektet "Utvärdering, hantering och modellering av tvångslaster i betongbroar" tas emellertid för närvarande en mer noggrann beskrivning av lastfallet fram, med hjälp av temperatursimuleringar, se Gottsäter et al (2017a) och Gottsäter et al (2018).

2.1 Grundmodell för temperatursimulering

Den simuleringsmodell som använts i tidigare simuleringar och i denna rapport är utvecklad på avd. för Konstruktionsteknik och presenteras i Larsson (2009). Modellen använder data om lufttemperatur, vindhastighet, kortvågig strålning och långvågig strålning för att beräkna temperaturförändringen i modellen, med villkor för värmeledning, konvektion och strålning implementerade. Modellen har validerats för en betongplatta i Larsson (2009), lådtvärsnitt i Larsson och Karoumi (2011) plattrambro i Gottsäter et al (2018).

Grunden till modellen presenteras i Larsson (2009) och är en finita element modell där randvillkoren anpassas till de olika klimatparametrarna. I modellen krävs en balans mellan temperaturen i konstruktionen och omgivningen, vilket ska efterlikna den verkliga värmebalansen. För att åstadkomma denna balans uttrycks det värmeflöde som sker mellan omgivningen och konstruktionen som

$$q = q_s + q_r + q_c \quad \text{W/m}^2 \quad (1)$$

där q_s är värme från solstrålning, q_r är värme från utbyte av långvågig värmestrålning och q_c är värme från konvektion. Som exempel beskrivs värmeflödet utifrån en horisontell yta. Värme från solstrålning är endast inkommande och beror på mängden strålning som når ytan, G , och dess absorptionskoefficient, a , enligt ekvation 2

$$q_s = a \cdot G \quad \text{W/m}^2 \quad (2)$$

Total solstrålning på en horisontell yta kallas ofta för global strålning och kan delas in i direkt och diffus strålning. Direkt strålning är den strålning som kommer direkt från solen, medan diffus är den som fås genom brytning i atmosfären. Under dagar med moln är all global strålning i princip diffus, medan det under soliga dagar är en stor andel direkt strålning.

För långvågig värmestrålning sker ett utbyte av värmeenergi där en varmare yta strålar mot en kallare yta. Alla material emitterar strålning, och värmebalansen för strålning uttryckas med Stefan-Bolzmanns lag, ekvation 3, där σ är Stefan-Bolzmanns konstant, T_s är ytans temperatur och T_{sky} är motstrålande ytas temperatur och ϵ , emissionstalet som vanligen kan sättas till 0,9. För mer information om värmestrålning, se t.ex. Incropera et al (2007).

$$q_r = q_s - q_{sky} = \sigma \epsilon_c (T_s^4 - T_{sky}^4) \quad \text{W/m}^2 \quad (3)$$

För en kropp som strålar ut mot himlen, vilket är fallet för en horisontell uppåtvänd yta, kommer den motstrålande ytas temperatur att motsvaras av den sammanvägda temperaturen på hela himlavalvet. En sådan temperatur är inte möjlig att mäta, det sätt som istället använts här är att mäta inkommande långvågig strålning som räknas om till en fiktiv temperatur för himlen. Det gör tillämpningen i finita element modellen enklare och ger möjligheter till att mäta lokalt.

Konvektion beror på ett luftbyte nära ytan och styrs av temperaturskillnaden mellan ytan och den omgivande luften, men förstärks av vind. Värmeutbytet kan uttryckas med ekvation 4, där vindens inverkan ingår i konvektionskoefficienten h_c .

$$q_c = h_c (T_s - T_{luft}) \quad \text{W/m}^2 \quad (4)$$

För att ta hänsyn till vindens effekt och det naturliga luftflöde som bildas även när det inte blåser har ekvation 5 använts enligt Nevander & Elmarsson (2001), där konvektionskoefficienten beror av vindhastigheten V .

$$h_c = 6 + 4V \quad \text{W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad \text{om } V \leq 5 \text{ m/s} \quad (5a)$$

$$h_c = 7.4V^{0.78} \quad \text{W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad \text{om } V > 5 \text{ m/s} \quad (5b)$$

Det innebär sammanfattningsvis att finita elementmodellen kräver indata i form av solstrålning, långvågig värmestrålning, lufttemperatur och vindhastighet för att kunna användas.

3. Allmänt tillgängliga data

SMHI har sedan ett antal år tillbaka kostnadsfritt tillhandahållit stora delar av deras data för användning av andra aktörer. De data som finns tillgängliga är de som produceras för skattemedel och som används i deras verksamhet. Det är idag möjligt att via SMHI få tag i värden för de parametrar som behövs för att simulera temperatur i en konstruktion enligt föregående avsnitt, nämligen lufttemperatur, solinstrålning, vindhastighet och långvågig värmestrålning.

Tillgång till mätdata för lufttemperatur och vindhastighet är mycket god, det finns mätstationer som täcker hela Sveriges geografi, sammanlagt ca 200 stationer, med långa mätserier upp till 60 år. Det är därför möjligt att utnyttja dessa i stor utsträckning för temperatursimulering istället för lokala mätningar.

Solstrålning och långvågig strålning mäts på betydligt färre platser, det finns i dagsläget 18 stationer som mäter solstrålning och endast 7 stationer som mäter långvågig strålning. För att kunna få en stor geografisk täckning krävs det därför att dessa parametrar kan fås fram på ett alternativt sätt.

För solstrålning kan tjänsten STRÅNG utnyttjas (STRÅNG 2018), som är en modell för solstrålning som bygger på information om aktuellt väderläge och satellitbilder. Modellen är validerad mot de mätningar av strålning som görs, och är utvecklad av SMHI tillsammans med Naturvårdsverket och Strålsäkerhetsmyndigheten. Ur denna tjänst är det möjligt att för en valfri geografisk position i Norden hämta data för global och direkt solstrålning, UV-strålning och solskenstid. Denna tjänst gör det därmed möjligt att kombinera mätningar av lufttemperatur och vindhastighet med solstrålning och därmed kunna simulera temperaturen i en konstruktion på fler platser. En begränsande faktor med STRÅNG är de osäkerheter som finns relaterade till modellen. För globalstrålning är variationen $\pm 30\%$ och för direkt strålning är variationen $\pm 60\%$ (STRÅNG 2018), vilket riskerar att försämra precisionen i resultaten.

För långvågig strålning är det inte möjligt att varken använda mätdata eller STRÅNG som källa, eftersom det inte finns tillräckliga mängder mätdata för denna parameter och för att den överhuvudtaget inte approximeras i STRÅNG likt solstrålning. Som alternativ kan någon form av approximation användas, vilket har gjorts i en del tidigare studier av temperatursimuleringar i betongkonstruktioner, se t.ex. Elbadry & Ghali (1986) och Westgate et al (2015). Det finns olika modeller för att approximera den inkommande långvågiga strålningen, från mycket enkla där endast en relation till lufttemperaturen utnyttjas (Idso & Jacksson, 1969) till mer avancerade där relativ luftfuktighet tas med (Swinbank, 1963). Dessa två modeller förutsätter dock att himlen är molnfri. Goforth (2002) utvecklade en modell som baseras på Swinbank (1963) men som också tar hänsyn till molnighet och molnens höjd över markytan, där moln antas vara kallare och därmed ge mindre inkommande långvågig strålning ju längre ifrån markytan de befinner sig. Flera studier har också gjorts för att utvärdera de olika empiriska sambanden i olika platser och miljöer (Lind & Katsaros 1982, Gorbarenko 2013, Saunders & Bailey 2013).

Den metod som används i denna studie baseras på modellen som presenterades av Idso & Jacksson (1969), men kompletteras av ett förenklat hänsynstagande till molnigheten. De indata som krävs i modellen är därmed endast lufttemperatur och molnighet. Molnighet mäts av SMHI på 138 platser i Sverige och anses därför vara allmänt tillgängligt i tillräcklig utsträckning. Dock

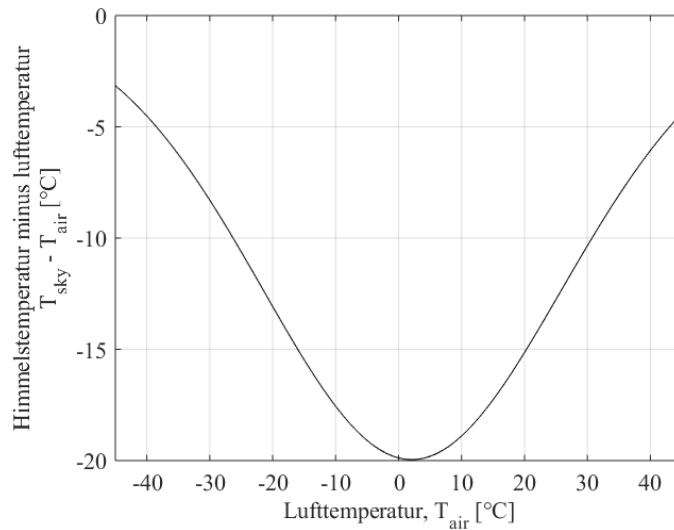
medför avstånd från mätstation till objektets plats och avsaknaden av hänsyn till ytterligare parametrar, som molnens höjd över marken och relativ fuktighet, osäkerheter som bidrar till behovet att validera metodiken.

I modellen för strålning från himlen, som presenterades av Idso & Jacksson (1969) och som används i denna studie, uppskattas den inkommande strålningen, q_{sky} , utifrån lufttemperaturen T_{air} i Kelvin enligt ekvation 6, där σ är Stefan- Boltzmanns konstant.

$$q_{sky} = \sigma T_{air}^4 (1 - 0,261e^{-7.77 \cdot 10^{-4} (273 - T_{air})^2}) \quad (6)$$

Denna strålning räknas sedan om till en motsvarande temperatur på himlen yta, enligt ekvation 7. Sambanden ger en relation mellan himlens temperatur vid klart väder som funktion av lufttemperaturen, vilket visas i Figur 3.1 för temperaturspannet -45°C till 45°C , för vilket sambandet är framtaget (Idso & Jacksson, 1969). I figuren framgår det att den långvågiga strålningen från himlen motsvarar en lägre temperatur än lufttemperaturen, och att skillnaden är som störst då lufttemperaturen är ca 0°C .

$$T_{sky} = \sqrt[4]{q_{sky}/(\sigma \epsilon_c)} \quad (7)$$



Figur 3.1. Förhållande mellan himlens temperatur och lufttemperaturen enligt Idso & Jacksson (1969).

I denna studie används T_{sky} beräknat enligt ekvation 6 och 7 för att beskriva himlens temperatur vid 0% molnighet, och luftens temperatur T_{air} för att beskriva himlens temperatur vid 100% molnighet. För molnigheter mellan 0% och 100% har värdet på himlens temperatur interpolerats fram utifrån värdena på T_{sky} och T_{air} .

4. Plattrambro

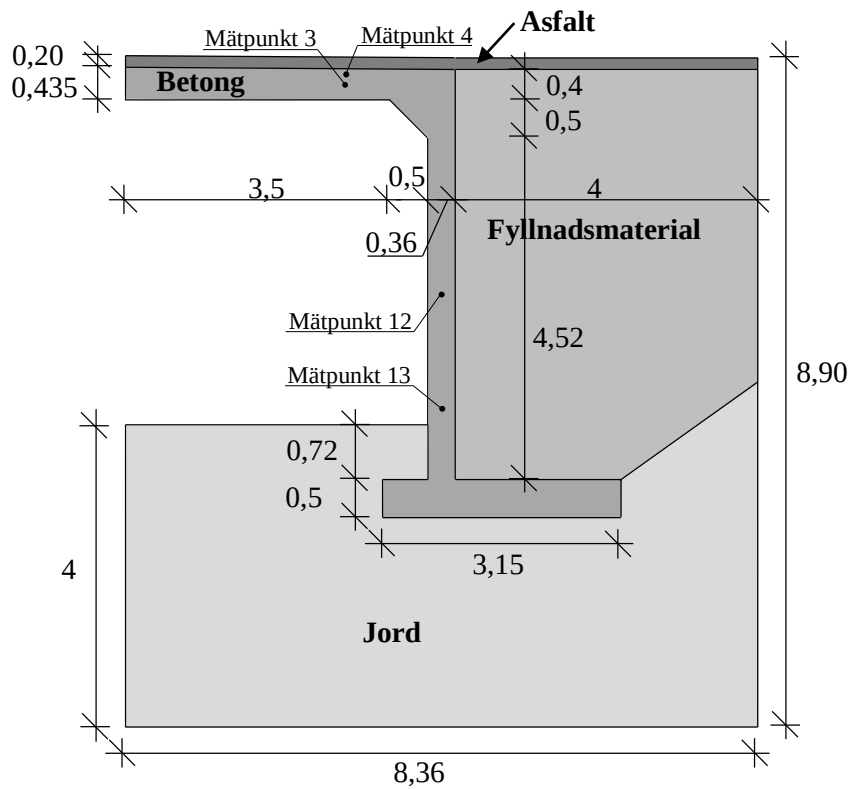
I Gottsäter et al (2018) användes temperaturmätningar i en plattrambro för att verifiera användningen av simuleringsmodellen för brotypen. Temperatur mättes i 13 punkter i konstruktionen under perioden 161206-171206 och jämfördes med simulerad temperatur. För att utvärdera användningen av allmänt tillgänglig data har i denna förstudie simuleringen gjorts om med denna typ av data och jämförts med de tidigare simuleringarna och uppmätta temperaturer. De väderdata som använts i simuleringen är lufttemperatur och vindhastighet från SMHIs station "Malmö A", kortvågig strålning hämtad från STRÅNG, och molnighet hämtad från SMHIs stationer i Hörby och Falsterbo. Data från Hörby användes i första hand, men då värden saknades för en tvåmånadersperiod användes data från Falsterbo som komplement.

Bron, som visas i Figur 4.1, är belägen syd-sydväst om Lund, 55°41'58" N, 13°8'12" Ö. Brotvärsnittets geometri och den strukturmodell som använts vid simuleringar visas i Figur 4.2. Simuleringarna genomfördes i finita element-programmet Diana, version 10.2 (Diana, 2018), och varje beräkningssteg motsvarade en timmes tid, då väderdata gavs för varje timme. Materialparametrar och randvillkor var identiska med de som användes i Gottsäter et al (2018), för att underlätta jämförelse av resultaten.

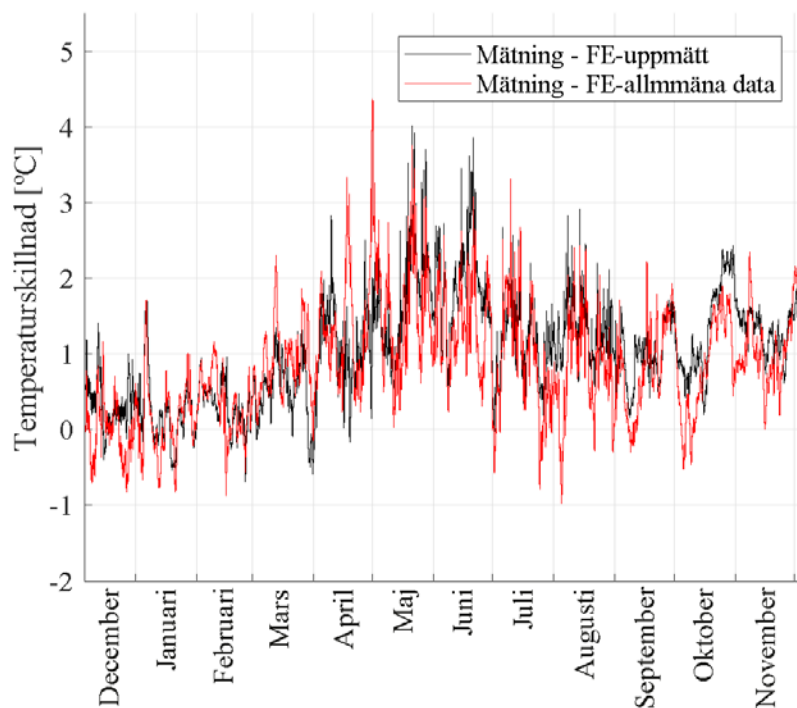


Figur 4.1. Bild på plattrambro som använts vid validering av användning av STRÅNG-data för temperatursimulering. Bild tagen 2017-07-31.

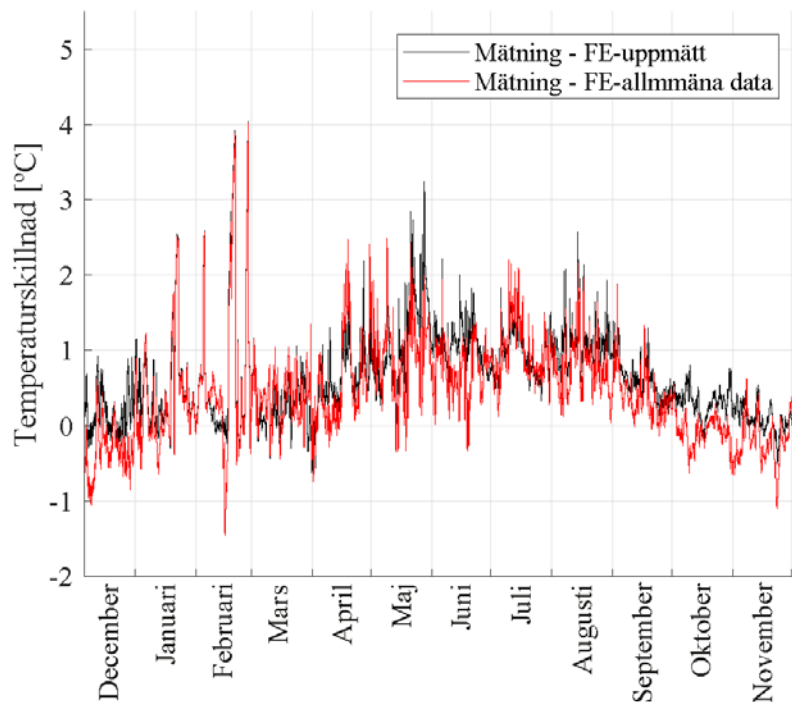
Figur 4.3 visar skillnad mellan uppmätt temperatur och simulering med lokala data samt mellan uppmätt temperatur och simulering med allmänt tillgänglig data för punkt 3, belägen i brobaneplattan (se Figur 4.2). I Figur 4.4 visas motsvarande jämförelse för punkt 12, belägen i rambenet (se Figur 4.2). Resultaten visar att skillnaderna fluktuerar mycket under året, och att de kortvarigt kan vara i storleksordningen 4°C, men att de oftast är mindre än så. Dessutom visar figurerna att det inte finns någon tydlig skillnad i överensstämmelse med mätdata för de två olika simuleringarna, och att avvikelserna är ungefär lika stora i rambenet som i brobaneplattan.



Figur 4.2. Strukturmodell över brotsvärsnitt och intilliggande jord och fyllnadsmaterial, som använts i simuleringar.

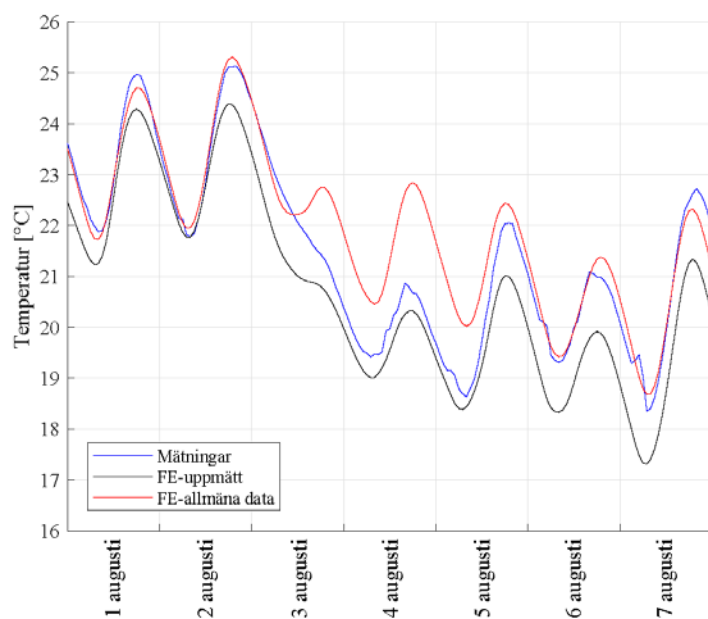


Figur 4.3. Skillnad mellan uppmätt temperatur i mätpunkt 3 och temperatur simulerad med lokal data respektive allmänt tillgänglig data.

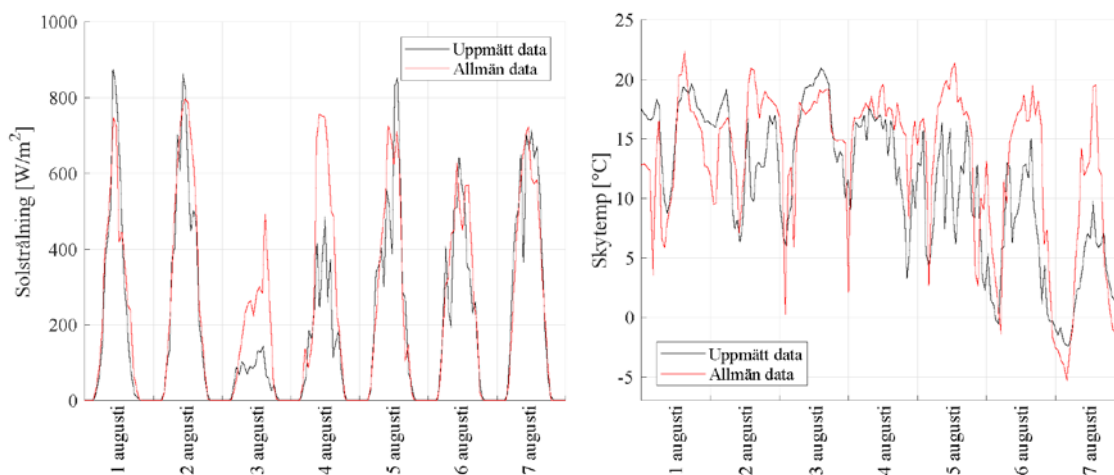


Figur 4.4. Skillnad mellan uppmätt temperatur i mätpunkt 12 och temperatur simulerad med lokal data respektive allmänt tillgänglig data.

I Figur 4.5 visas temperaturen enligt mätningar, simulering med lokal data och med allmänt tillgänglig data för en 7-dagarsperiod under sommaren i den mätpunkt som är närmast brons ovensida, punkt 4. I figuren framgår det att dygnsvariationerna är lika i de tre olika resultaten, och att de följer samma trend i temperaturutvecklingen. Simuleringen med allmänt tillgängliga data ger generellt sett en god överensstämmelse med simuleringen med uppmätta värden under perioden, men överskattar temperaturen signifikant i mätpunkten under dag 3 och 4 i perioden. I Figur 4.6, som jämför solstrålning och långvågig strålning under perioden, framgår det att solstrålningsdata från STRÅNG gav betydligt högre värden på strålningen under dessa två dagar, vilket sannolikt kan förklara avvikelsen. Sett över hela simuleringsperioden förekommer både överskattningar och underskattningar av strålningen i STRÅNG, vilket därmed kan ge både överskattningar och underskattningar av temperaturen vid användning av STRÅNG-data. Jämförelsen av långvågig strålning visar att den använda modellen för uppskattning av den långvågiga strålningens storlek ger en relativt god överensstämmelse med uppmätta värden.

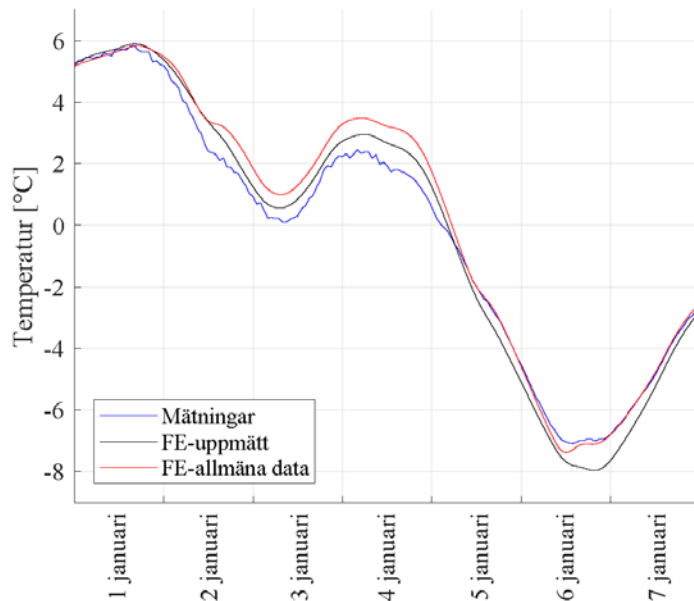


Figur 4.5. Temperatur i mätpunkt 4 enligt mätning, simulering med lokala data och simulering med allmänt tillgänglig data under en 7-dagarsperiod i början av augusti 2017.

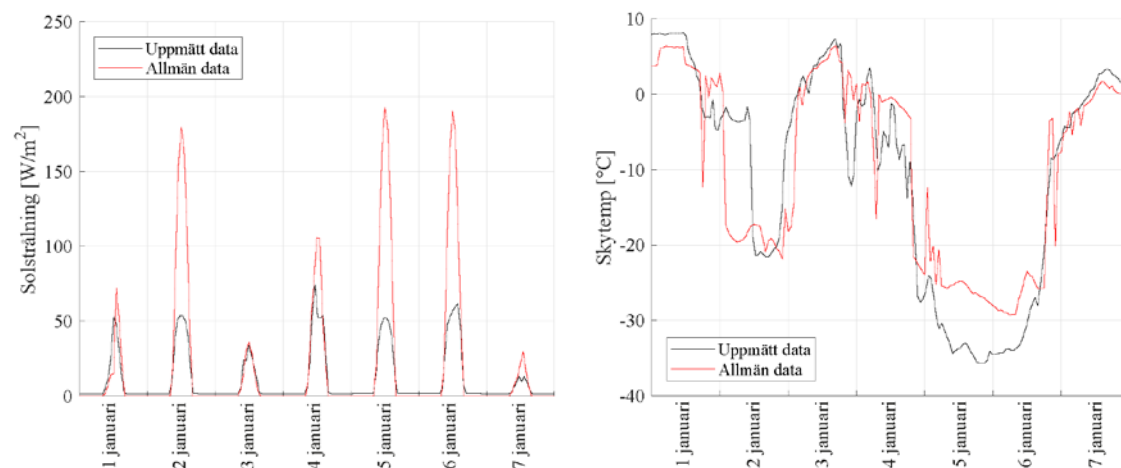


Figur 4.6. Jämförelse av allmänt tillgänglig och lokalt uppmätt solstrålning (t.v.) och långvågig strålning (t.h.) under perioden som visades i Figur 4.5.

En liknande jämförelse görs i Figur 4.7 och 4.8 för vinterförhållanden. I Figur 4.7 visas temperaturen enligt mätning, simulering med lokal data och simulering med allmänt tillgänglig data för perioden 1 januari till 7 januari 2017, vilken innefattar den kallaste perioden under mätningen. Även i detta fall är överensstämmelsen mellan uppmätt och simulerad temperatur god, även om temperaturvariationen ser annorlunda ut. Figur 4.8 visar att solstrålningen är betydligt starkare enligt STRÅNG än enligt uppmätta data, vilket gäller klara dagar under hela vinterperioden. Värdena är emellertid tillräckligt små för att inverkan på brons temperatur ska vara liten. Figur 4.8 visar också att överensstämmelsen i långvågig strålning är god även under denna tidsperiod.



Figur 4.7. Temperatur i mätpunkt 4 enligt mätning, simulering med lokala data och simulering med allmänt tillgänglig data under en 7-dagarsperiod i början av januari 2017.



Figur 4.8. Jämförelse av allmänt tillgänglig och lokalt uppmätt solstrålning (t.v.) och långvågig strålning (t.h.) under perioden som visades i Figur 4.7.

I Månsson & Nilsson (2018) gjordes också en jämförelse av de maximala temperaturskillnaderna mellan brobaneplatta och ramben som uppkom under simuleringarna, genom att jämföra

temperaturen i två punkter, mitt i respektive konstruktionsdel. Resultatet återges i tabell 1, och visar att extremvärdena är likvärdiga enligt de olika dataserierna. Därmed är det rimligt att anta att allmänt tillgänglig data kan användas för att ta fram exempelvis extremvärden för temperaturskillnader mellan konstruktionsdelar.

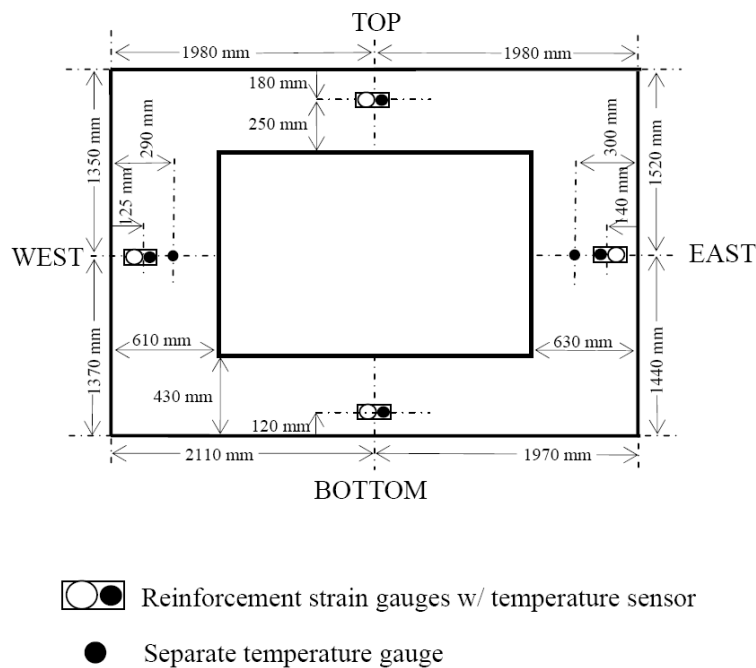
Tabell 1. Temperaturskillnad mellan en punkt mitt i brobanaplattan och mitt i rambenet, beräknad med lokalt uppmätt data respektive allmänt tillgänglig data.

	Lokal uppmätt data		Allmänna data	
Störst positiv temperaturskillnad	10,9	2017-05-28	10,9	2017-05-28
Näst störst positiv temperaturskillnad	10,6	2017-05-23	10,5	2017-05-20
Tredje störst positiv temperaturskillnad	7,9	2017-06-14	9,0	2017-06-20
Störst negativ temperaturskillnad	-7,7	2017-01-06	-7,7	2017-01-06
Näst störst negativ temperaturskillnad	-5,2	2016-11-07	-5,3	2016-11-08
Tredje störst negativ temperaturskillnad	-4,4	2017-10-29	-4,6	2016-11-29

5. Nya Svinesundsbron

För att ytterligare kontrollera möjligheterna till att använda allmänna data har betongbågen på nya Svinesundsbron använts som en andra fallstudie. Skillnaden mot plattrambron är dels geografiska, men även att närmsta klimatstation finns i en något skild klimattyp från placeringen av bron. Det gör att likheter och skillnader kan studeras för en något annorlunda situation.

Den översta delen av betongbågen i Nya Svinesundsbron användes i Larsson & Karoumi (2011) för att validera den tidigare beskrivna FE-modellen och utnyttjas nu med allmänna data och approximationer. Det översta tvärsnittet är instrumenterat med temperatursensorer enligt Figur 5.1, dessa kompletterades med strålningsmätare enligt Figur 5.2. I de mätningar som görs på platsen finns även lufttemperatur och vindhastighet som kunde utnyttjas i modellen.



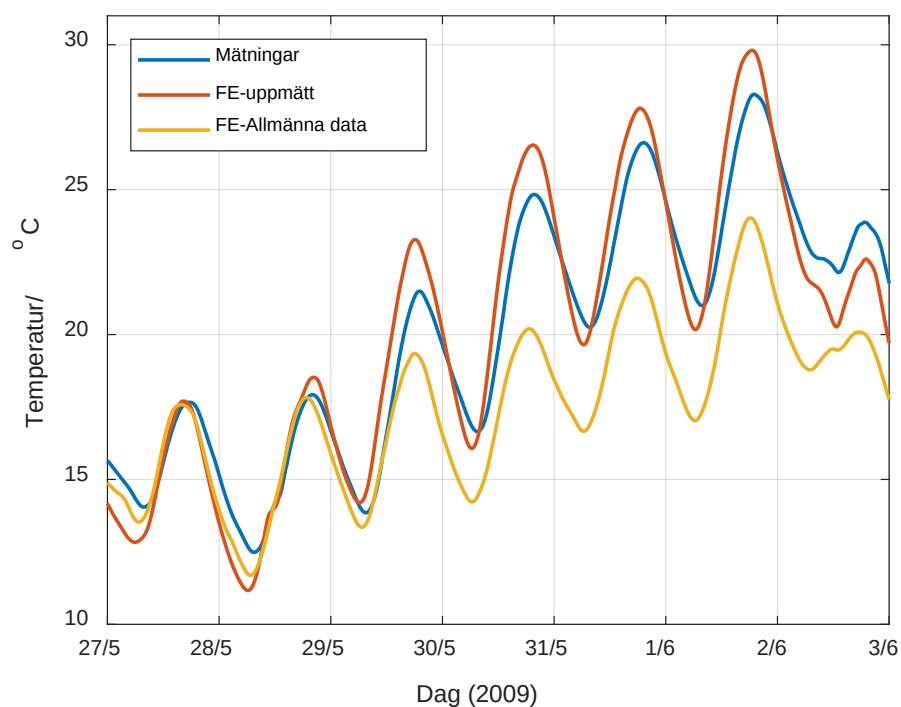
Figur 5.1. Placering av temperaturgivare i översta tvärsnittet i betong bågen i Nya Svinesundsbron (Larsson & Karoumi 2011)



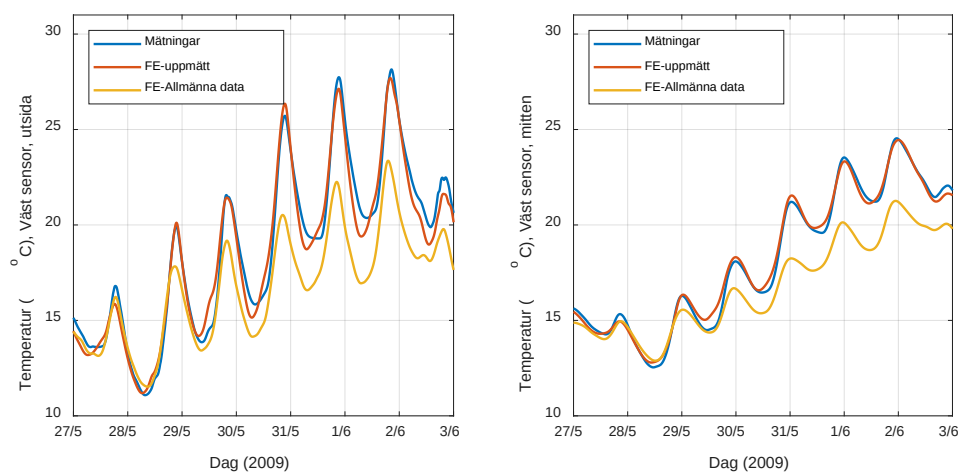
Figur 5.2. Stålningsmätare på toppen av betongbågen

För Svinesund finns den närmsta väderstationen hos SMHI på Kosteröarna, 27 km syd-sydväst från bron. Från denna station har lufttemperatur, vindhastighet och molnighet hämtats, vilket har kompletterats med STRÅNG-data för solstrålning. Den period som främst redovisas här är en varm vecka i slutet på maj 2009 då det var stora temperaturväxlingar och lite moln, vilket gör att de olika data och approximationer som används kan testas fullt ut.

Figur 5.3 visar temperaturen i den sensor som sitter i övre flänsen för mätningar, FE-simulering med lokala data och FE-simulering med allmänna data. Här kan det tydligt ses att det skiljer mycket i temperatur mellan simuleringarna med allmänna data och de övriga två. Detta samband syns även för de två sensorer som finns i västra väggen, se Figur 5.4.



Figur 5.3. Temperatur i sensorn i övre fläsen

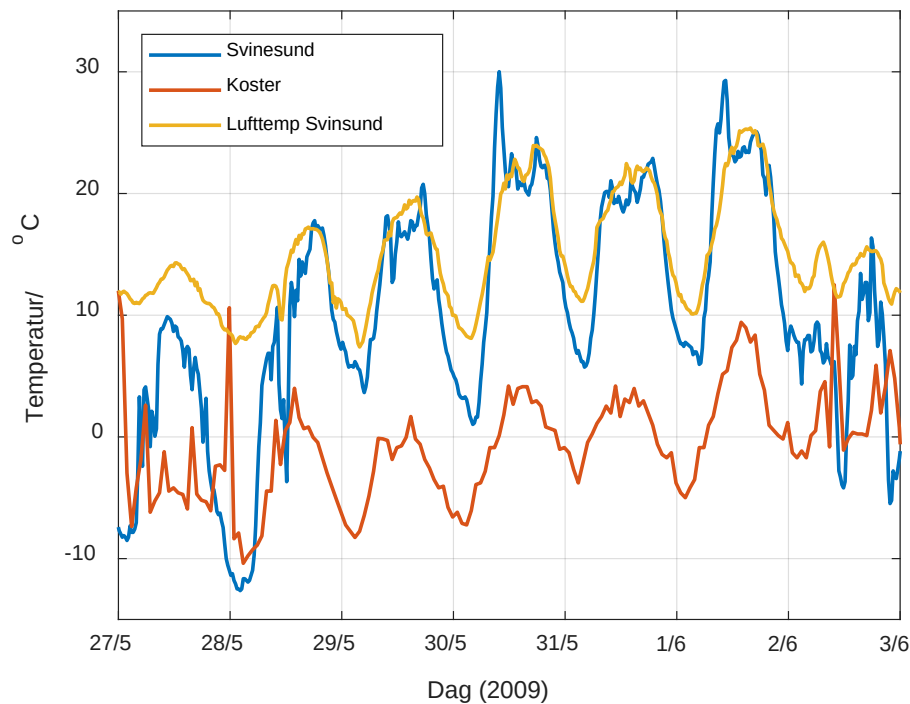


Figur 5.4. Temperatur i sensorer i västra väggen

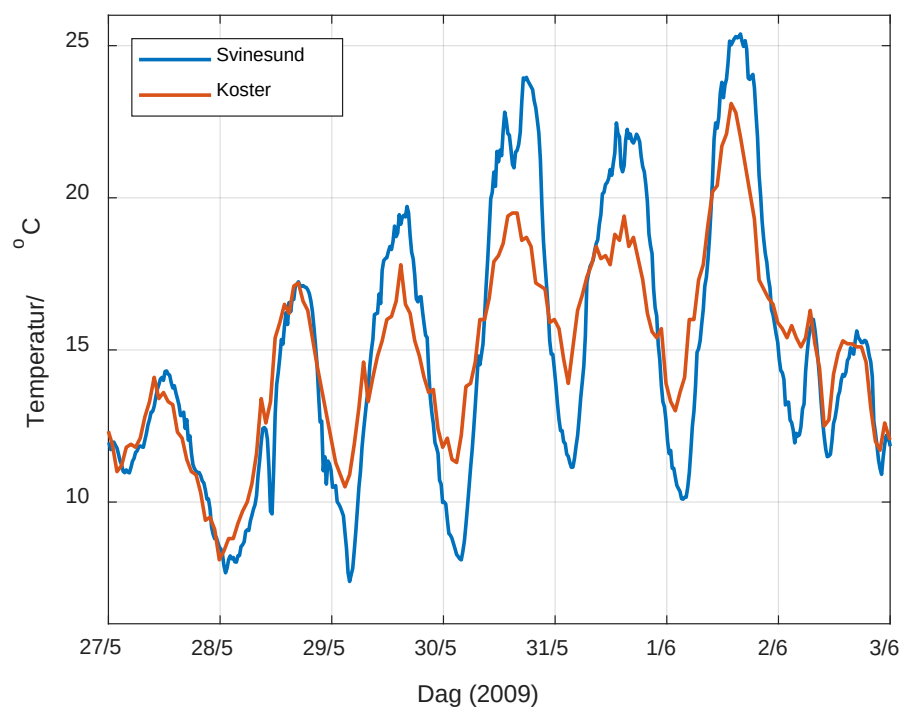
Skillnaden i temperatur beror på skillnader i alla parametrar som tillsammans bidrar till förskjutningen. Exempelvis hur mycket långvågig värmestrålning som modellerna antar strålar ut under natten, dvs den temperatur som himlen antas ha, där det är tydligt att den approximation som används här ger en lägre temperatur, se Figur 5.5. Även lufttemperaturen är lägre på Kosteröarna än temperaturen vid Svinesundsbron, vilket kan ses i Figur 5.6. Det är också tydligt att ett fel har hittats i de förutsättningar som användes i Larsson & Karoumi (2011), nämligen att himlens temperatur är för hög dagtid då det är mycket solinstrålning. Vid klart väder bör himlen ha en mycket lägre temperatur än uteluften, men i detta fall är den ofta lika hög eller t.o.m. högre. Det tyder på att det varit något fel på den strålningsmätare som användes för att mäta långvågig

strålning. Resultaten i Larsson & Karoumi (2011) är dock fortfarande rimliga och användbara eftersom värmeutstrålning har en begränsad påverkan på slutresultatet. Det kan även förklara varför temperaturen överskattades i simuleringarna för övre sensorn av Larsson & Karoumi, där en lägre temperatur på himlen hade reducerat temperaturen något.

Vidare studier av Nya Svinesundsbron gjordes i examensarbetet av Månsson & Nilsson (2018), där studerades även hur sambanden ser ut för en kallare period. Det som främst kan utläsas ur den rapporten är att modellen som använder allmänna data kan simulera temperaturen väl, men nivån är förskjuten i förhållande till FE-simuleringen med lokala data. Det beror främst på skillnader i lufttemperatur, det är kallare vintertid vid Svinesundsbron är på Kosteröarna vilket gör att även de simulerade temperaturerna är lägre.



Figur 5.5. Temperatur på himlen på Kosteröarna och vid Svinesundsbron



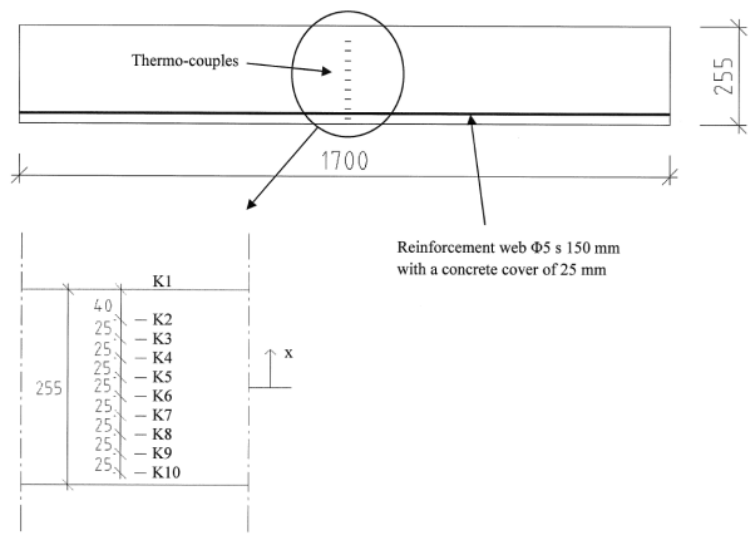
Figur 5.6. Lufttemperatur på Kosteröarna och vid Svinesundsbron

6. Betongplatta

Inom ramen för examensarbetet av Månsson & Nilsson (2018) studerades även tillämpningen av allmänna data på den betongplatta som användes i Larsson (2009). Plattan, som visas i Figur 6.1, gjöts för att få ett endimensionellt värmefflöde i de centrala delarna och var instrumenterad med temperaturgivare enligt Figur 6.2. Den var placerad i Lund, nära LTH.

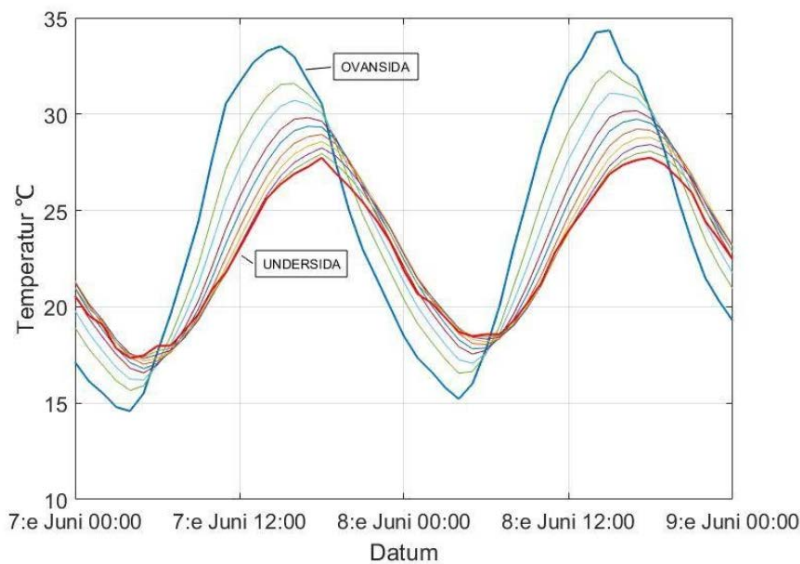


Figur 6.1. Betongplattan.

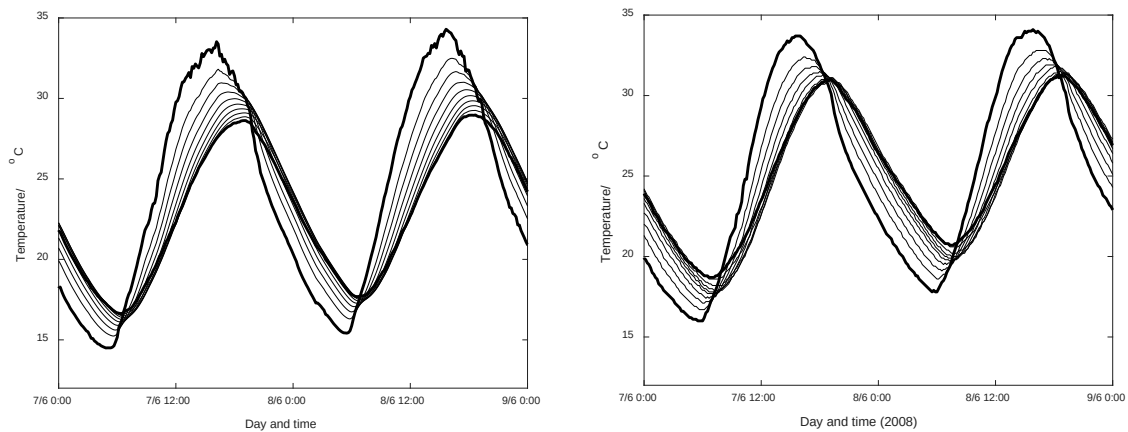


Figur 6.2. Placering av givare i betongplattan (Larsson 2009)

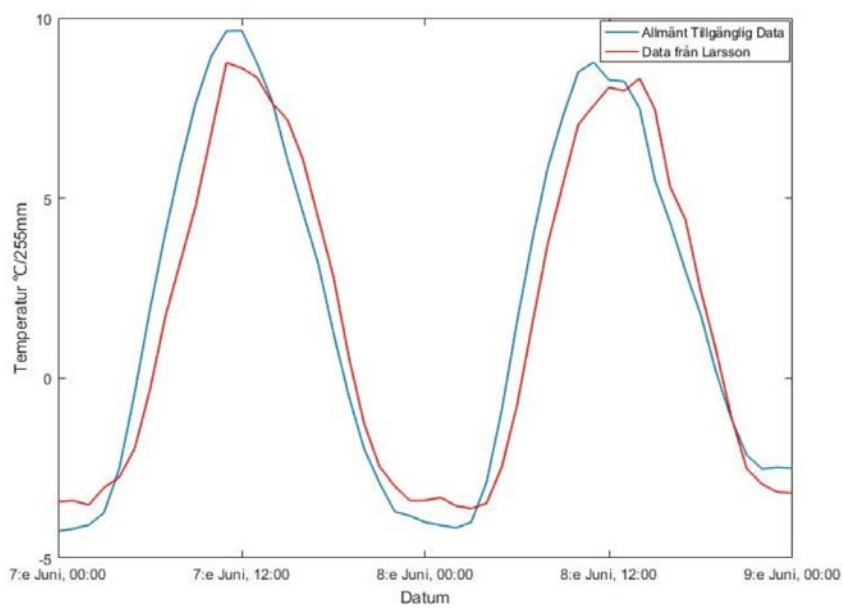
Resultaten visade en god överensstämmelse mellan simuleringarna med allmänna data och simuleringarna med lokalt uppmätta data, se Figur 6.3-6.4. Det var i detta fall väntat då SMHI:s mätstation i Lund är placerad ca 50 m från den plats där de lokala mätningarna gjordes. Huvudsyftet med studien i Larsson (2009) var att undersöka om FE-modellen kunde användas för att uppskatta en linjär temperaturgradient. I Figur 6.5 visas jämförelsen av gradient från simuleringar med lokala data respektive allmänna data, här kan det tydligt ses att det är en mycket liten skillnad mellan de båda simuleringarna.



Figur 6.3. Simulering av temperatur i plattan med allmänna data (Månsson & Nilsson 2018)



Figur 6.4. Simulering av temperatur i plattan med lokala data (vänster) och mätningar av temperatur i plattan (höger) (Larsson 2009)



Figur 6.5. Linjär temperaturdifferens, från simuleringar med allmänna data och med lokala data enligt Larsson (2009) (Månsson & Nilsson 2018)

7. Diskussion, Framtida tillämpningar

Som kan ses i de tre fallstudierna är det möjligt att använda allmänt tillgängliga data för att simulera temperaturen i betongbroar. Precisionen för ett specifikt objekt är dock beroende av att de allmänna data som ligger till grund för en beräkning hämtas från en plats med liknande klimat och geografiska förutsättningar som vid platsen för bron. Om det skiljer i klimatförutsättningar kan det bli stora skillnader vilket syns i exemplet med Svinesundsbron, där det är väsentligt annorlunda klimat på Kosteröarna än inne i Svinesund där bron är placerad. Det gör att lufttemperatur och vind kan skilja sig åt, även om strålningen är likartad.

Det som också kan ha stor inverkan på resultaten är de stora osäkerheter som finns i indata för solstrålning från STRÅNG och approximationen för långvågig strålning. Osäkerheterna gör att viss variation kan antas mellan resultaten, det är därför snarare så att resultaten i jämförelsen har en bättre precision än vad som kunde förväntas baserat på dessa osäkerheter, framförallt för plattrambron och plattan. Det visar att det finns goda möjligheter till fortsatt användning av allmänna data vid temperatursimulering.

De geografiska skillnaderna kan vara en viss begränsning av användandet av allmänna data för att uppskatta temperatur för en specifik bro på en specifik geografisk plats. Det är dock möjligt att använda denna typ av data för mer generella studier där fokus inte är en specifik bro. En möjlig framtida tillämpning är, baserat på resultaten här och ovanstående resonemang, att använda allmänt tillgängliga data för att skapa isothermkartor för fler typer av temperaturlaster än vad som tidigare har varit möjligt. Det finns redan kartor för årsmax och årsmin av medeltemperatur i bron, nya kartor kan täcka både temperaturgradienter över tvärsnitt och temperaturdifferenser mellan olika konstruktionsdelar. Det är då möjligt att koppla dessa typer av temperaturlaster till geografisk position, något som tidigare varit svårt att göra i stor skala. Det är även möjligt att den geografiska skillnaden inte är så stor för dessa laster, detta har heller aldrig utretts tidigare.

En annan möjlig framtida tillämpning kan vara att bedöma andra parametrar som är kopplade till temperaturen i en bro. Eftersom temperaturen har stor påverkan på rörelser, se t.ex. Karoumi & Andersson (2007), kan det ge utslag även på mätningar av töjningar och spänningar p.g.a. t.ex. trafiklast. Att kunna göra en bedömning av temperaturfördelningen i bron utan att göra varken mätningar i bron eller mätningar av lokala indata kan spara stora mängder resurser och göra att en bedömning av temperatureffekter kan göras snabbt men ändå med tillräckligt god precision.

Det finns även studier som visar effekt av temperatur på möjligheten till att detektera skador i broar med hjälp av modalanalys och att studera egenfrekvenser, se t.ex. Xu & Wu (2007). De fann att egenfrekvenser för en snedkabelbro ändrades mer av variationer i temperatur än av skador och sprickor i bron. En möjlighet att kunna bedöma effekten av temperatur är därmed avgörande för att kunna bedöma skador med denna typ av metodik. Sohn et al (1999) fann liknande resultat och föreslog en metodik för att kunna bedöma effekten av temperatur på modalparametrar hos en bro. Modellen är dock beroende av att temperaturfördelningen i bron är känd, denna kan i sin tur uppskattas m.h.a. allmänt tillgängliga klimatdata på det sätt som visats i denna rapport.

Ett aktuellt problem som kan komma att bli betydelsefullt för Svenska förhållanden är risken för deformation i broar för höghastighetståg. Deformation p.g.a. temperaturvariation kan för sådana broar få rälsen att flytta sig ur position och kraftigt försämra passagerarnas komfort (Dai et al

2018). I studien av Dai et al (2018) visades möjligheten att kunna skapa en modell baserat på mätningar av temperaturen i en bro i kinas höghastighetjärnvägsnät. Denna modell skulle sedan användas för att bedöma extremvärden för temperaturändringarna över tid. Problemet kvarstår dock med geografisk verifiering av resultaten om denna metodik tillämpas, eftersom det är kostsamt och opraktiskt att mäta temperatur på många olika platser längs en järnväg. Att kunna göra bedömningar av denna typ av problem utan att behöva genomföra dyra mätningar skulle därmed kunna vara till nytta för den svenska utbyggnaden av höghastighetsjärnväg, särskilt på de platser där det förekommer en stor andel broar.

8. Slutsatser

De huvudsakliga slutsatserna från förstudien som presenteras i denna rapport är:

- Det är möjligt att använda allmänt tillgängliga data för att uppskatta temperaturfördelningen i en bro med tillräckligt god precision för att använda för större tillämpningar, ex framtagning av isotermkartor för temperaturgradient över brobaneplattor och temperaturskillnader mellan konstruktionsdelar.
- Det är svårt att uppskatta en temperaturfördelning för en specifik bro på en specifik plats som är helt korrekt, det är däremot möjligt att få en representativ bild av temperaturfördelningen.
- Den geografiska skillnaden mellan mätplats och bron kan vara stor, men det är viktigt att de har samma typ av klimat.
- Fler tillämpningsområden finns utöver isotermkartor, t.ex. effekter på komfort vid höghastighetståg eller modalanalys för detektering av skador, dessa behöver dock utredas ytterligare om rena tillämpningar ska kunna göras.

9. Referenser

- CEN (1996), Background document of ENV 1991-2-5 Thermal Actions, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium
- DIANA. <https://dianafea.com/content/DIANA> (2018-06-26)
- Elbadry M.M. and Ghali A. (1986), Thermal Stresses and Cracking of Concrete Bridges, ACI Journal, Title No. 83-90, pp. 1001-1009
- EN 1991-1-5 (2005) Eurokod 1: Laster på bärverk – Del 1-5: Allmänna laster – Temperaturpåverkan, SIS Förlag, Stockholm
- Goforth M. A., Gilchrist G. W., Sirianni J. D. (2002), Cloud Effects on Thermal Downwelling Sky Radiance, Proceedings of SPIE conference AeroSense, Orlando
- Gorbarenko E. V. (2013), Long-term Variations of Long-Wave Radiation in Moscow, Russian Metrology and hydrology, Vol. 38, No. 10, pp. 669-676
- Gottsäter E., Larsson Ivanov O., Nilenius P., Plos M., Molnár M., Crocetti R., (2017) Simulation of Thermal Load Distribution in Portal Frame Bridges, Engineering Structures, Vol. 125, pp. 219-231
- Gottsäter E, Larsson Ivanov O, Molnár M, Plos M, (2018), Validation of Temperature Simulations in a Portal Frame Bridge, Structures, Vol. 15, pp. 341-348
- Idso S. B. och Jacksson R. D. (1969), Thermal Radiation from the Atmosphere, Journal of Geophysical Research, Vol. 74, No. 23, pp 5397-5403
- Incropera F. P., Dewitt D.P., Bergman T.L. and Lavine A.S. (2007), Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th edition), Wiley, Hoboken
- Karoumi R. & Andersson A. (2007) Load testing of the new Svinesund Bridge, TRITA-BKN Rapport 96, KTH, Brobyggnad
- Larsson O. (2009), Modelling of Temperature Profiles in a Concrete Slab under Climatic Exposure, Structural Concrete, Vol. 10, No. 4, pp. 193-201
- Larsson O. (2012), Climate related thermal actions for reliable design of concrete structures, TVBK-1042, doktorsavhandling, Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola
- Larsson O. och Karoumi R. (2011), Modelling of Climatic Thermal Actions in Hollow Concrete Box Cross-Sections, Structural Engineering International, Vol. 21, No. 1, pp. 74-79
- Lind R. J. och Katsaros K. B. (1982), A Model of Longwave Irradiance for Use with Surface Observations, Journal of Applied Meteorology, Vol. 21, pp 1015-1023
- Månsson S & Nilsson M, (2018), Temperatursimulering i broar med allmänt tillgänglig data, TVBK-5264, Avd. för Konstruktionsteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund
- Nevander L.E. & Elmarsson B. (2001), Fukthandbok, Svensk Byggtjänst, Stockholm
- Quinn B.H., (2016), Detailed Study of Integral Abutment Bridges and Performance of Bridge Joints in Traditional Bridges, Doctoral dissertation, University of Massachusetts Amherst
- Saunders I. R. & Bailey W. G. (2013), Longwave Radiation Modeling in Mountainous Environments, Physical Geography, Vol. 18, No. 1, pp 37-52
- SMHI (2018), STRÅNG - a mesoscale model for solar radiation, <http://strang.smhi.se/extraction/index.php>
- Sohn H, Dzwonczyk M, Straser E.G., Kiremidjian A.S., Law K.H., & Meng T. (1999), An experimental study of temperature effect on modal parameters of the Alamosa canyon bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 28, pp 879-897

- SS-EN 1991-1-5 (2003), Eurokod 1: Laster på bärande konstruktioner - Del 1-5: Allmänna laster – Temperaturpåverkan, SIS-CEN
- Swinbank W. C. (1963), Long-wave radiation from clear skies, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society of London, Vol 89, pp. 339-348.
- Westgate, R., Koo, K. Y. and Brownjohn, J. M. W. (2015) Effect of Solar Radiation on Suspension Bridge Performance J. Bridge Eng., 20.
- Xu Z-D. & Wu Z. (2007), Simulation of the Effect of Temperature Variation on Damage Detection in a Long-span Cable-stayed Bridge, Structural Health Monitoring, Vol 6, No 3, pp 177-189