



LUND UNIVERSITY

Reglering av värmesystem med framkoppling

Jensen, Lars

2009

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, L. (2009). *Reglering av värmesystem med framkoppling*. (TVIT; Vol. TVIT-7036). Avd Installationsteknik, LTH, Lunds universitet.

Total number of authors:

1

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

Reglering av värmesystem med framkoppling

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2009
Rapport TVIT--09/7036



Lunds Universitet

Lunds Universitet, med nio fakulteter samt ett antal forskningscentra och specialhögskolor, är Skandinaviens största enhet för forskning och högre utbildning. Huvuddelen av universitetet ligger i Lund, som har 100 400 invånare. En del forsknings- och utbildningsinstitutioner är dock belägna i Malmö, Helsingborg och Ljungbyhed. Lunds Universitet grundades 1666 och har idag totalt 6 000 anställda och 41 000 studerande som deltar i ett 90-tal utbildningsprogram och ca 1000 fristående kurser erbjudna av 88 institutioner.

Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.

Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmda hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspredning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmsystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Reglering av värmesystem med framkoppling

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2009

ISRN LUTVDG/TVIT--09/7036--SE(46)

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 LUND

Innehållsförteckning

1	Inledning och problemställning	5
2	Modell för byggnad och värmesystem	7
3	Reglering med statisk framkoppling	15
4	Reglering med dynamisk framkoppling	21
5	Reglering med tidsviktad framkoppling	31
6	Slutsatser	43
	Resultat för dygnsperiodisk utetemperatur	43
	Resultat för simulering med mätdata	44
	Slutsatser	44
	Bilaga A Definition av en dynamisk modell	45
	Bestämning av modellparametrar	45
	Bestämning av framkoppling	46
	Definition av matriserna A, B och C samt starttillstånd x_s	46

1 Inledning och problemställning

Syftet är att undersöka möjligheterna att förbättra reglering av värmesystem med enbart framkoppling. Tillämpningen avser främst flerbostadshus med radiatorsystem. Olika former av framkoppling undersöks med en och samma modell och med olika utetemperaturförlopp.

Det primära är att undersöka olika reglersätt för framkoppling. Modellen kommer i andra hand. Det finns också andra reglersätt än framkoppling som återkoppling från innertemperaturen i byggnadens alla rum, vilket inte kommer att behandlas här. Återkoppling kan också ske lokalt med radiatortermostatventiler på varje radiator, vilket även inte heller kommer att behandlas här.

Följande avgränsningar eller förenklingar görs för att renodla undersökningen av framkoppling enligt nedanstående punkter:

- en enkel linjär modell för 1 m² av en byggnad med vattenburen värme
- frånluftventilation med konstant flöde
- ingen vädring
- ingen vindpåverkan
- inget värmetillskott från boende
- inget värmetillskott från hushållsapparater
- inget värmetillskott från sol
- endast värmetillförsel via värmesystemet
- endast inverkan av utetemperatur
- väderdata är från vintern 2007/2008 Järinge
- utgångsfallet är en ideal statisk framkoppling
- endast framkoppling från utemperaturen
- ingen återkoppling från innertemperaturen

En enkel modell för en del av ett rum beskrivs och redovisas i avsnitt 2. Modellen har tre byggnadsdelar, vilka är fönster, fasadvägg och inre bjälklag. Varje del beskrivs med två värmelagrande massor. Värmesystemet beskrivs också med två massor. Ändringar i utemperaturen påverkar innertemperaturen endast direkt via ventilationen och något fördröjt via fönster och fasadvägg.

Olika reglersätt kommer att testas med samma tre utetemperaturförlopp, nämligen en dygnsperiodisk utetemperatur, en begränsad rampändring i utetemperatur och mätdata för 4000 h för vintern 2007/2008 Järinge.

Fallet med ingen reglering eller konstant framledningstemperatur undersöks och redovisas i avsnitt 2.

Reglering med statisk framkoppling redovisas i avsnitt 3. Statisk framkoppling är den gängse reglerprincipen för byggnader med vattenburen värme.

Reglering med dynamisk framkoppling redovisas i avsnitt 4. Dynamisk framkoppling innebär att uttemperaturen filtreras något för att bättre passa med hur en byggnad med ett värmesystem påverkas av ändringar i uttemperaturen.

Reglering med tidsförskjuten framkoppling redovisas i avsnitt 5 och innebär att aktuell utetemperatur och en tidsförskjuten utetemperatur viktas samman till en utetemperatur som bestämmer framledningstemperaturen. En tidsförskjuten utetemperatur kan vara en tidigare eller en framtida utetemperatur.

Alla slutsatser dras och sammanfattas sist i avsnitt 6.

2 Modell för byggnad och värmesystem

En enkel modell för en del av ett rum beskrivs och redovisas i detta avsnitt. Principen för modellen redovisas i Figur 2.1 nedan. Modellen har tre byggnadsdelar, vilka är fönster, fasadvägg och inre bjälklag. Varje del beskrivs med två värmelagrande massor. Värmeväxlingen beskrivs också med två massor. Ändringar i utetemperaturer påverkar innetemperaturen endast direkt via ventilationen och något fördröjt via fönster och fasadvägg.

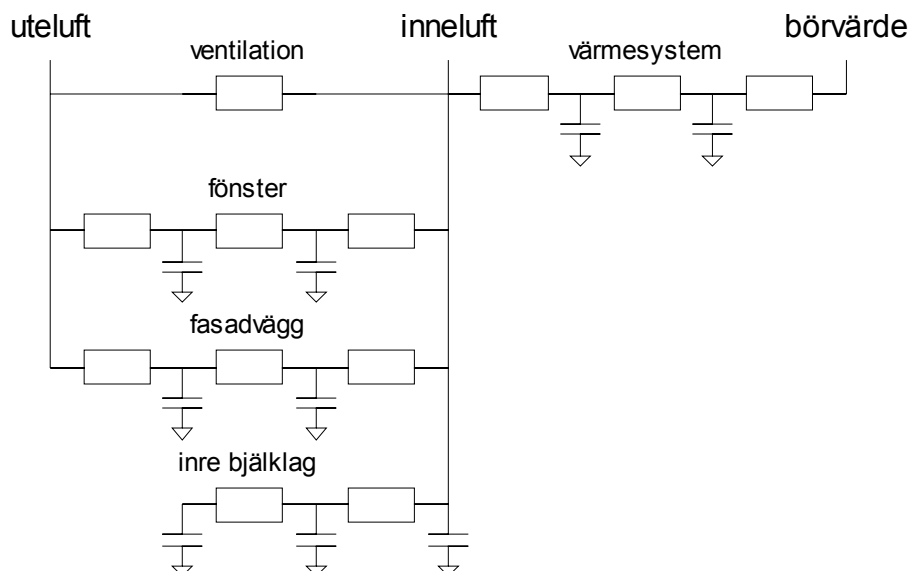
Modellen omfattar endast 1 m² golvyta och har en luftvolym med höjden 2.4 m.

Frånluftsventilationen är normenlig med 0.35 l/sm², vilket kan räknas om till ett specifikt värmebehov på 0.42 W/Km² golvyta.

Fönstrets egenskaper utgår från ett U-värde på 2 W/Km². Alla yttre och inre värmeövergångstal är 20 respektive 8 W/Km². Värmeledning i glasskivorna försummas. Fönstrets area är 0.15 m², vilket ger en specifik värmeförlust på 0.3 W/Km² golvyta.

Fasadväggen antas vara 200 mm lättbetong, vilket ger ett U-värde på 0.922 W/Km². Arealen för fasadväggen är satt till 0.6 m² och den specifika värmeförlusten blir på 0.554 W/Km² golvyta.

Det inre bjälklaget består förenklat av golv och tak med en tjocklek av 200 mm, men endast 100 mm tillgodoräknas, eftersom det antas att det finns samma rum finns över och under.



Figur 2.1 Modell för byggnad och värmesystem.

Radiatorns frontyta är 0.05 m^2 för modelldelen om 1 m^2 golvyta. Värmeövergångstalet sätts till 10 W/Km^2 , vilket ger en specifik värmeavgivningsförmåga på 1 W/Km^2 golvyta. Den termiska trögheten för radiator och rörsystem med reglering motsvarar i båda fallen en tidskonstant på 6 min.

Modellen har simulerats med ett tidsintervall om 6 min eller mindre för vissa detaljstudier. Utetemperaturen är linjär mellan givna timmätdata.

Modellens egenskaper för ett fall utan reglering redovisas med fyra testfall, vilka är en dygnsperiodisk utetemperatur med amplituden $5 \text{ }^\circ\text{C}$ i Figur 2.2, en begränsad rampändring av utetemperaturen från $0 \text{ }^\circ\text{C}$ till $10 \text{ }^\circ\text{C}$ på 1 h, en snabb nervädning från $20 \text{ }^\circ\text{C}$ till $10 \text{ }^\circ\text{C}$ och simulering med mätdata. Resultatet för de fyra testfallen redovisas i Figur 2.3, Figur 2.4-5 2.6-7 respektive Figur 2.8-9. Värmetillförseln är konstant och anpassad för innetemperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ och utetemperaturen $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

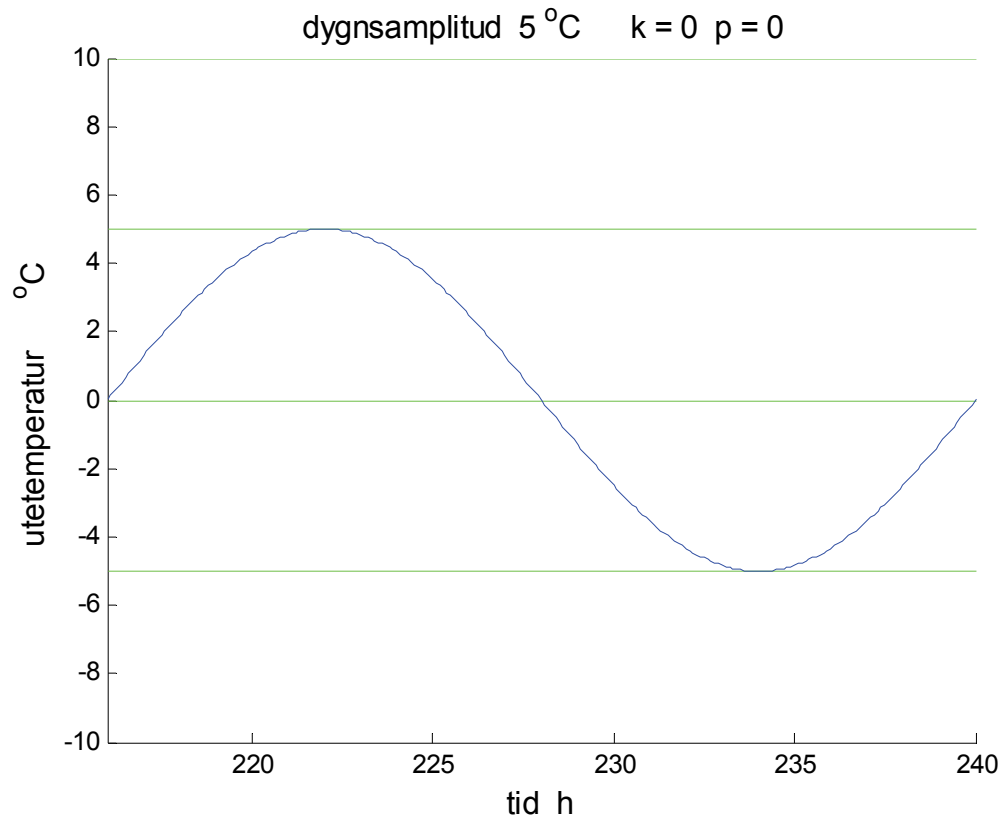
Den dygnsperiodiska utetemperaturen ned en variation på $10 \text{ }^\circ\text{C}$ dämpas ner till en variation för innetemperaturen på $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ i Figur 2.3.

Exemplet med en begränsad rampändring av utetemperaturen visar att innetemperaturen i Figur 2.4-5 utan reglering når sitt nya jämviktsläge först efter lång tid. Notera att innetemperaturen inte ökar med $10 \text{ }^\circ\text{C}$ till $30 \text{ }^\circ\text{C}$, eftersom framledningstemperaturen är konstant och inte radiatoreffekten, vilken minskar med ökande innetemperatur i detta fall.

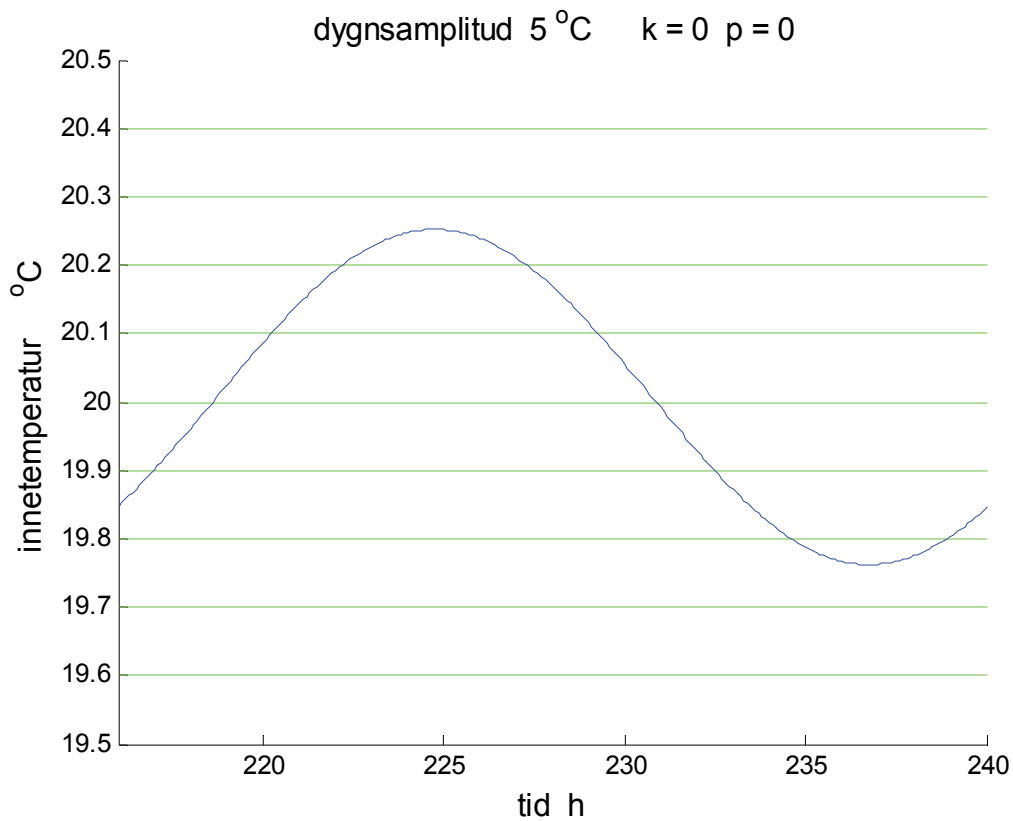
Exemplet med vädning i Figur 2.6-7 är något idealiserat, eftersom innetemperaturen ändras tvärt från $20 \text{ }^\circ\text{C}$ till $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Syftet med exemplet är att visa själva återgången till normal innetemperatur. Notera att framledningstemperaturen är konstant, men den lägre innetemperaturen resulterar i en högre tillförd värmeeffekt till dess att innetemperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ uppnåtts.

Simulering med 4000 h mätdata från Järinge 2007/2008 redovisas med innetemperatur i tidsföljd och sorterad i Figur 2.8-9 och motsvarande utetemperatur i tidsföljd och sorterad i Figur 2.10-11. Kurvorna i Figur 2.8-11 visar att utan reglering med endast konstant framlednings-temperatur $43.25 \text{ }^\circ\text{C}$ anpassad för utetemperaturen $4.42 \text{ }^\circ\text{C}$ (medelvärde för mätdata) och innetemperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ blir temperaturavvikelserna stora även om det sker en betydande dämpning i tidsskalan dygn.

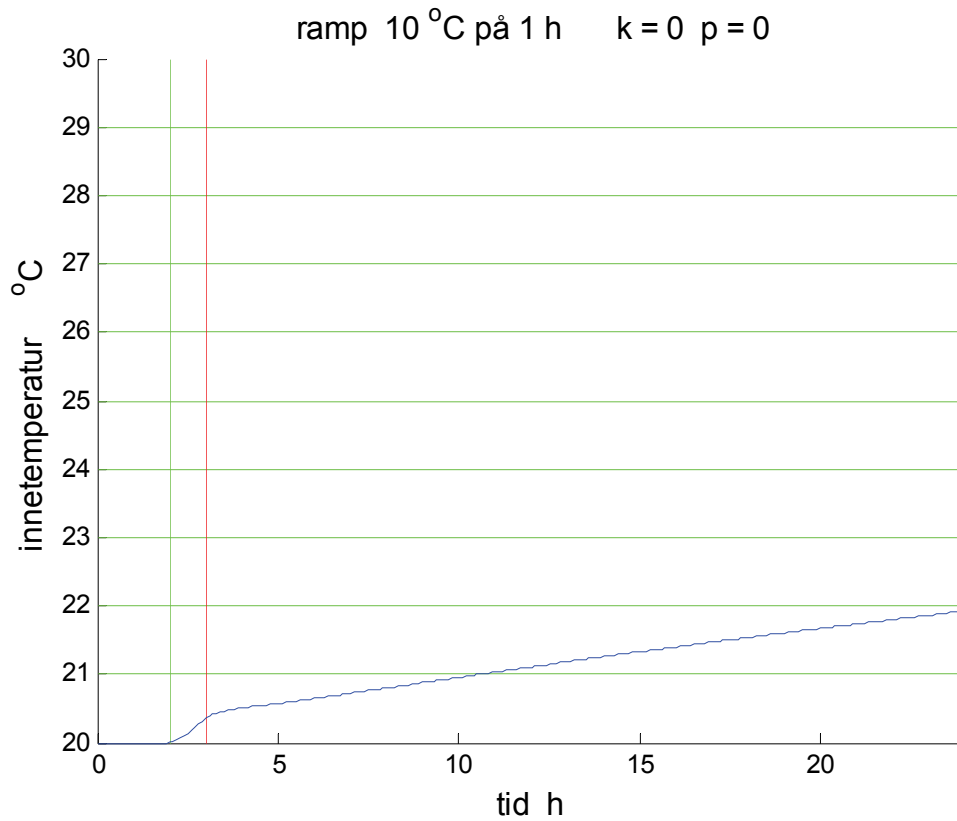
Innetemperaturens och utetemperaturens medeldygnsvariation redovisas i Figur 2.12 respektive 2.13. Dygnsvariationen för inne- och utetemperatur är $0.13 \text{ }^\circ\text{C}$ respektive $2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ och dämpningen är nästan den samma som tidigare redovisats i Figur 2.2-3 för en ren sinusvariation över dygnet.



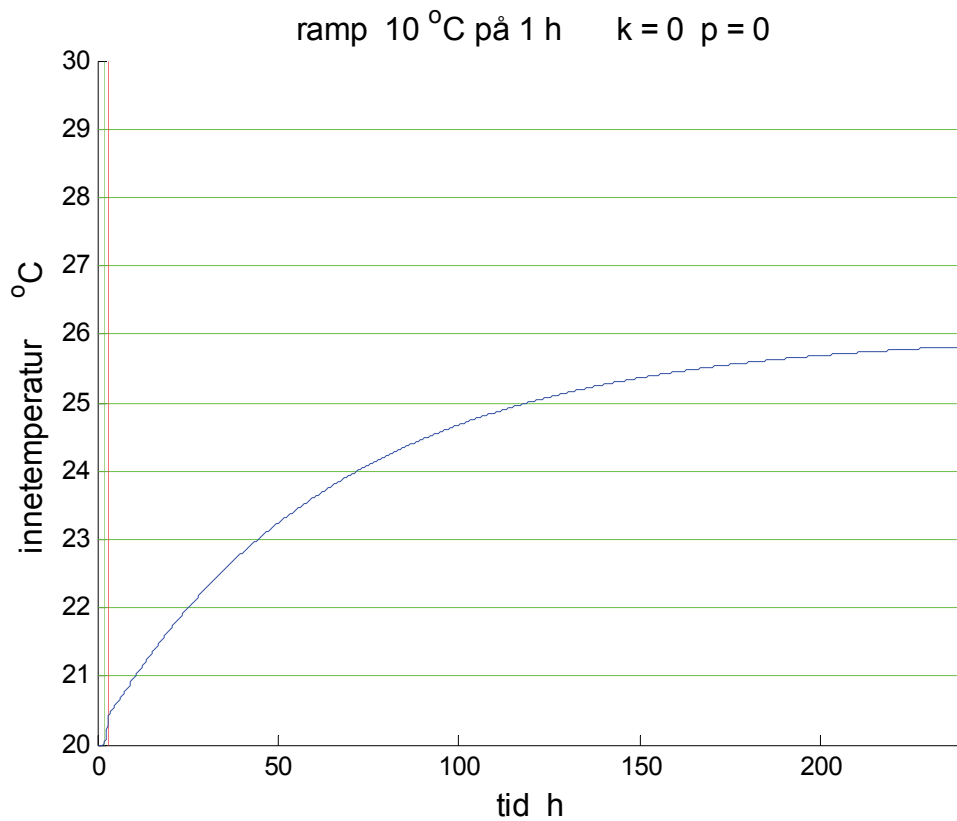
Figur 2.2 Dygnsperiodisk utetemperatur.



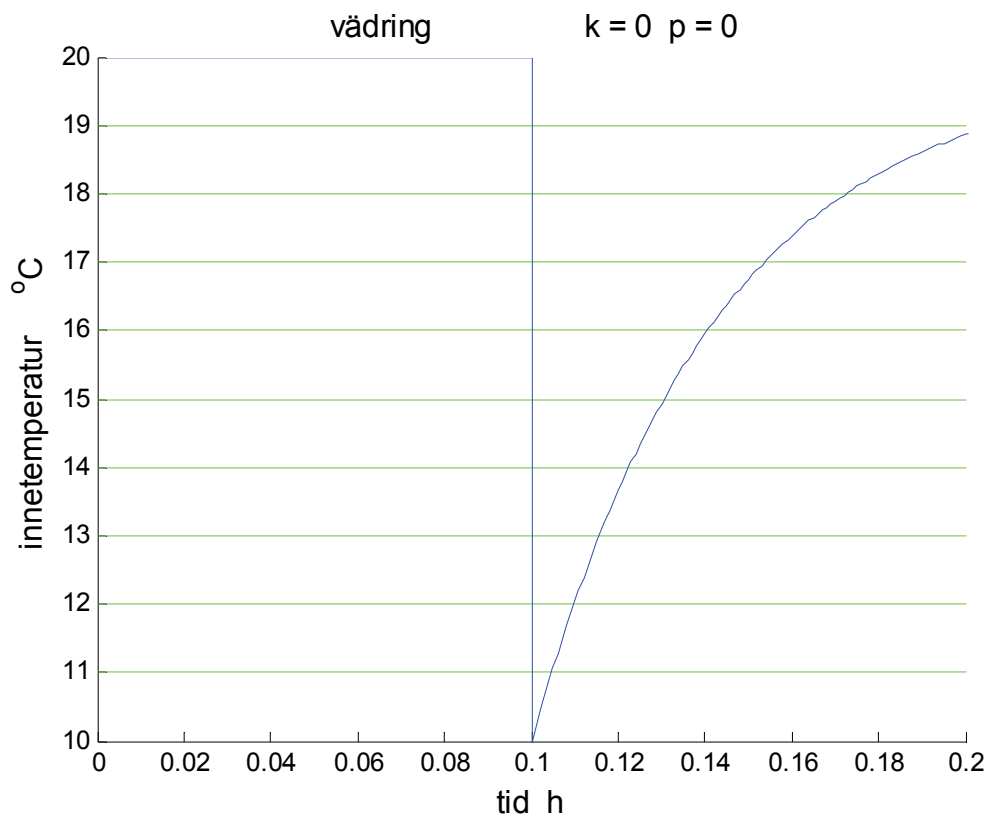
Figur 2.3 Innetemperatur vid dygnsperiodisk utetemperatur och utan reglering.



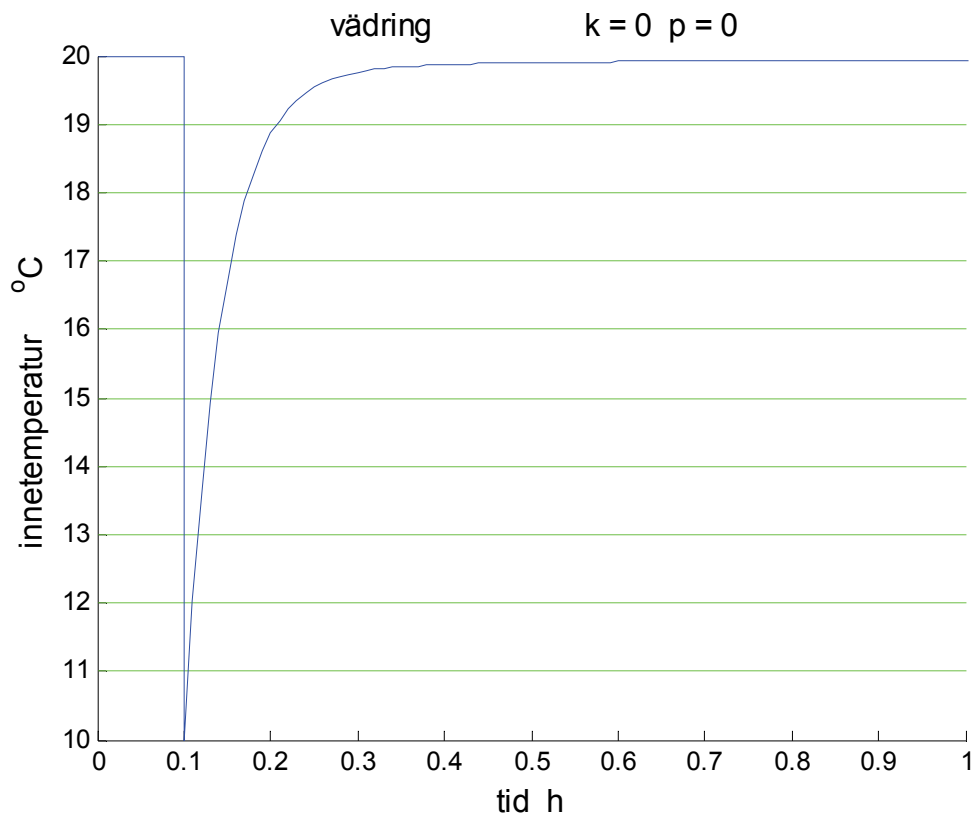
Figur 2.4 Innetemperatur vid rampändring av utetemperaturen och utan reglering.



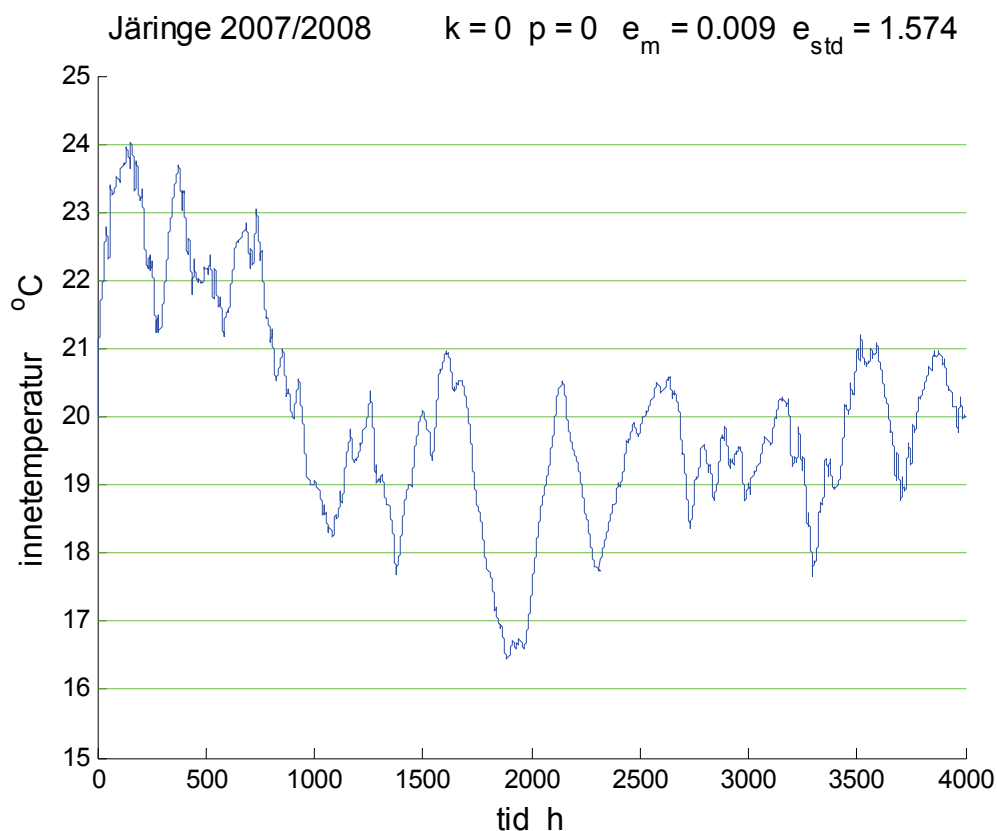
Figur 2.5 Innetemperatur vid rampändring av utetemperaturen och utan reglering.



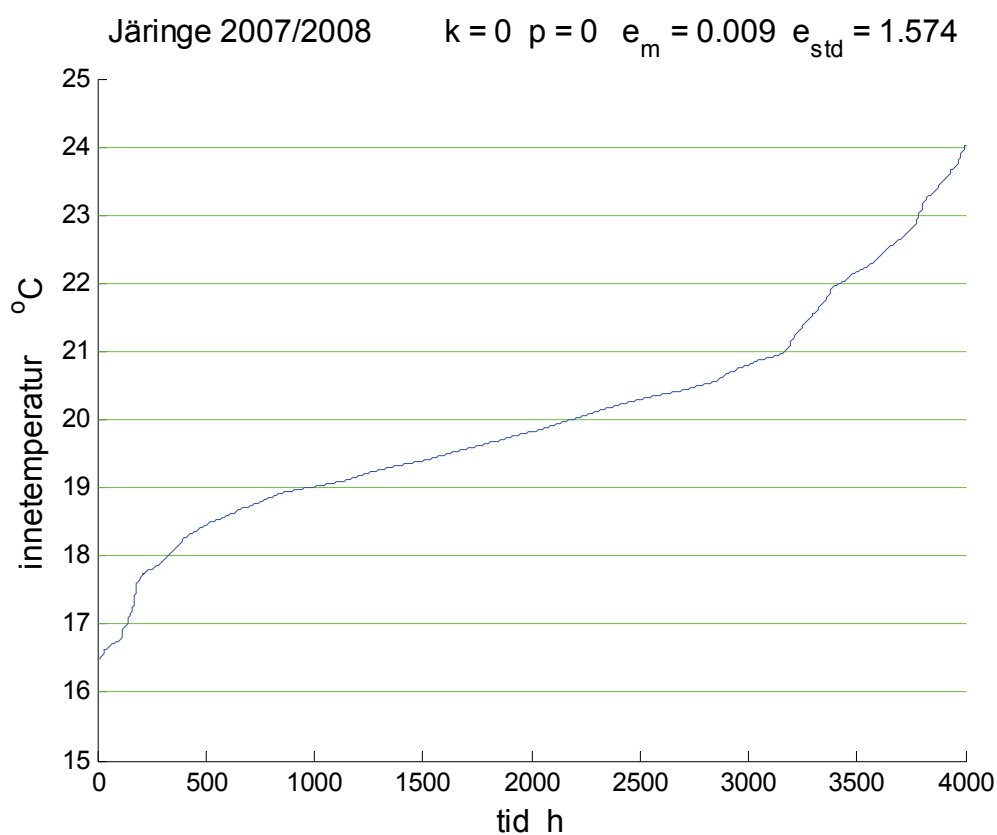
Figur 2.6 Innetemperatur vid snabb nervädning till 10 °C och utan reglering.



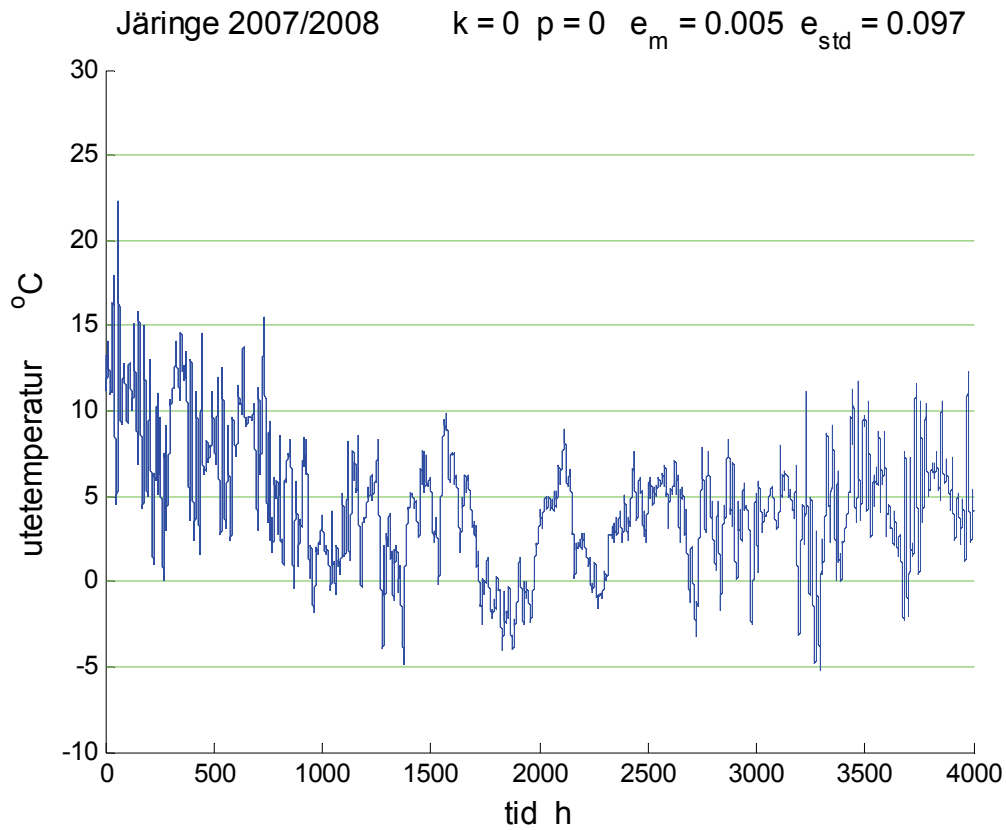
Figur 2.7 Innetemperatur vid snabb nervädning till 10 °C och utan reglering.



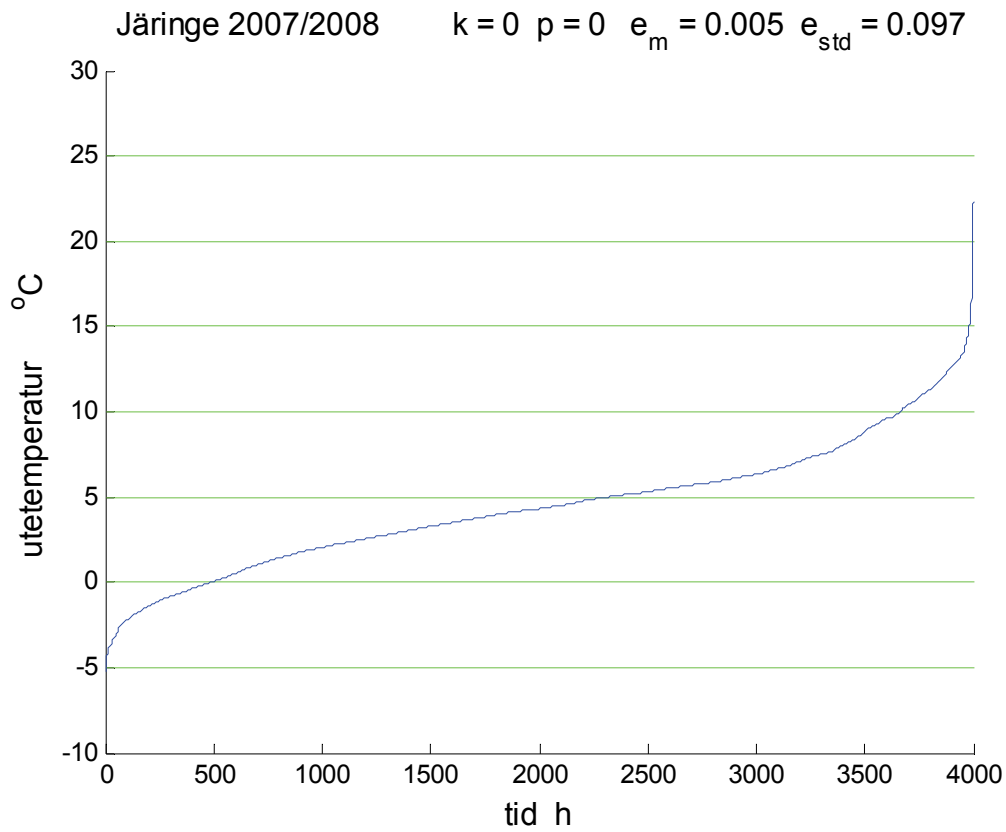
Figur 2.8 Innetemperatur för konstant värmeeffekt för utetemperatur 4.42 °C.



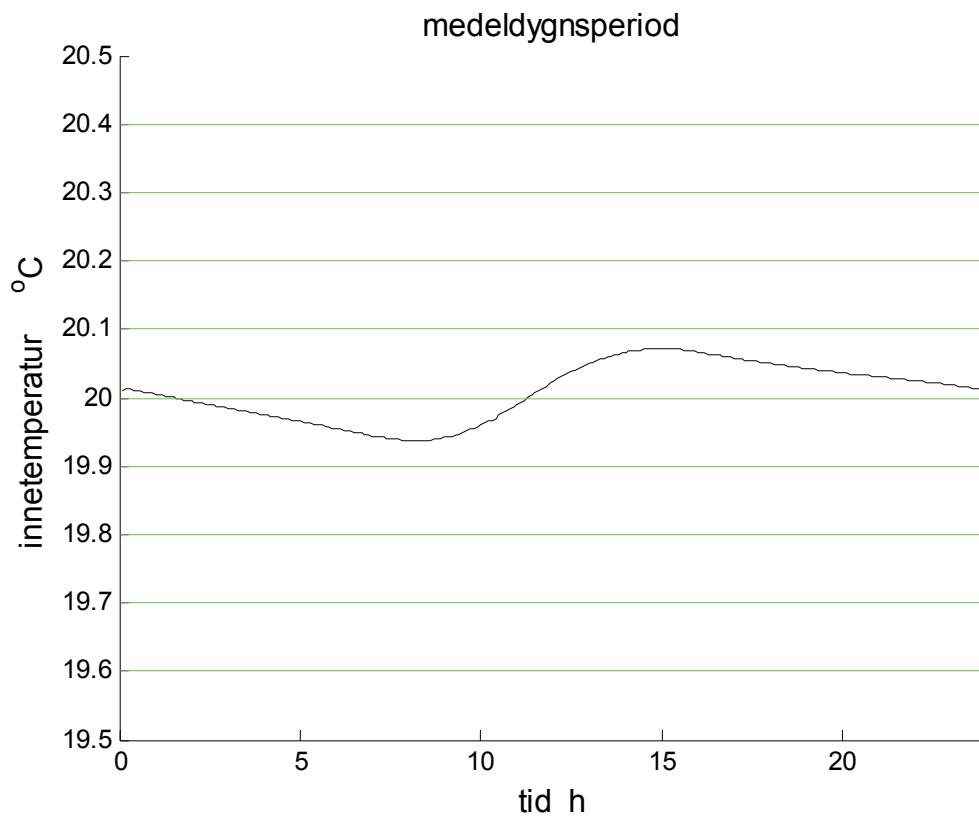
Figur 2.9 Sorterad innetemperatur för konstant värmeeffekt för utetemperatur 4.42 °C.



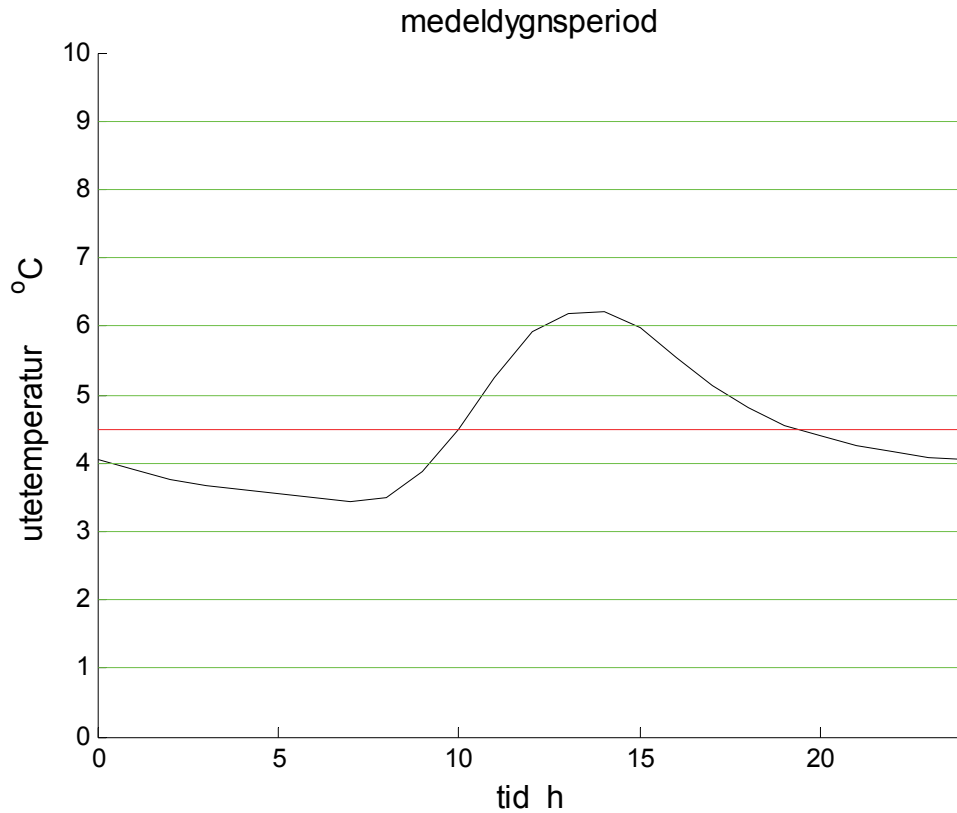
Figur 2.10 Utetemperatur.



Figur 2.11 Sorterad utetemperatur.



Figur 2.12 Utetemperatures dygnsperiod för 4000 h vintern 2007/2008 Järinge.



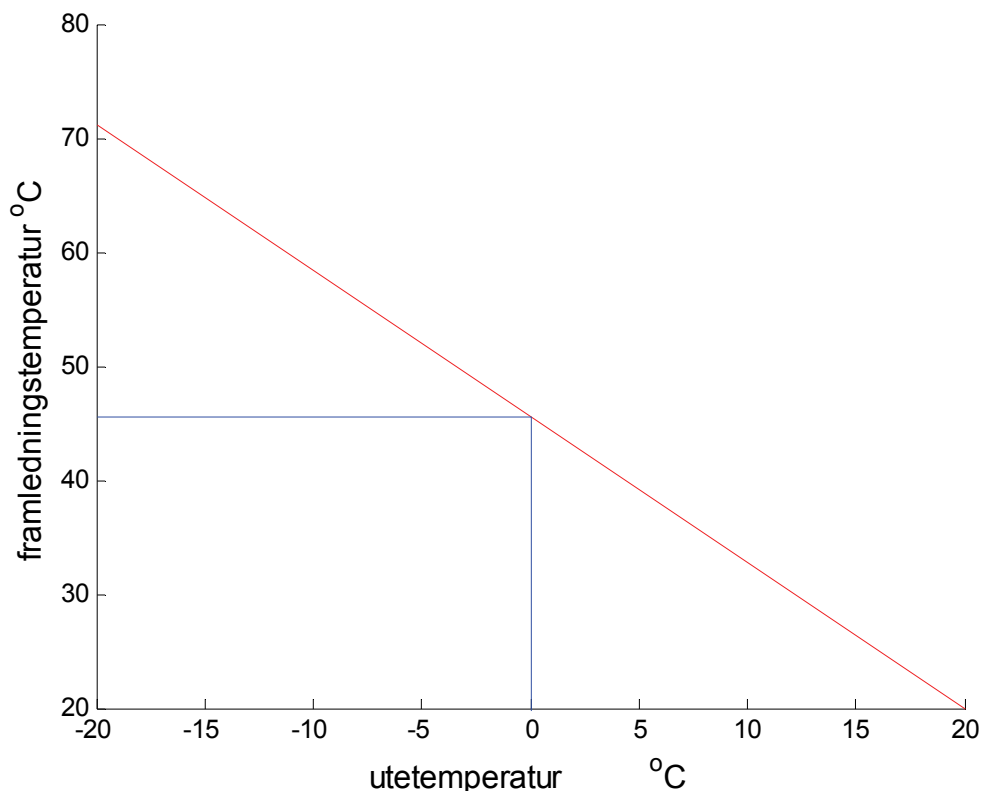
Figur 2.13 Utetemperatures dygnsperiod för 4000 h vintern 2007/2008 Järinge.

3 Reglering med statisk framkoppling

Regleringen för utgångsfallet bygger en statisk framkoppling, vilket innebär att framledningstemperaturen beräknas för en given utetemperatur utan hänsyn till byggnadens och värmesystemets termiska tröghet för att ge en önskad konstant innetemperatur. Detta är det normala regelsätt för byggnader med vattenburen värme med framkoppling från utetemperaturen till framledningstemperaturen. Om värmesystemets tröghet är identisk med byggnadens tröghet med avseende på utetemperaturen, blir regleringen helt utan fel.

Framkopplingen kan beskrivas enligt nedan med temperaturer för framledning T_f , önskad innetemperatur T_i och utetemperatur T_u samt värmeöverföringsförmåga för radiatorsystem $Q_r = 1 \text{ W/Km}^2$ och transmission och ventilation $Q = 1.274 \text{ W/Km}^2$. Framledningstemperaturen för innetemperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ redovisas i Figur 3.1 och kan beräknas till $45.48 \text{ }^\circ\text{C}$ för utetemperaturen $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$T_f = (Q/Q_r + 1)T_i - QT_u/Q_r \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.1)$$



Figur 3.1 Framledningskurva för aktuell modell och börvärde $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Modellens egenskaper tillsammans med den statiska framkopplingen redovisas med ett antal typfall såsom dygnsperiodisk utetemperatur med amplituden $5 \text{ }^\circ\text{C}$ i Figur 3.2, rampändring av utetemperaturen från $0 \text{ }^\circ\text{C}$ till $10 \text{ }^\circ\text{C}$ på 1 h i Figur 3.3-4 och börvärdesändring från $20 \text{ }^\circ\text{C}$ till $21 \text{ }^\circ\text{C}$ i Figur 3.5-6.

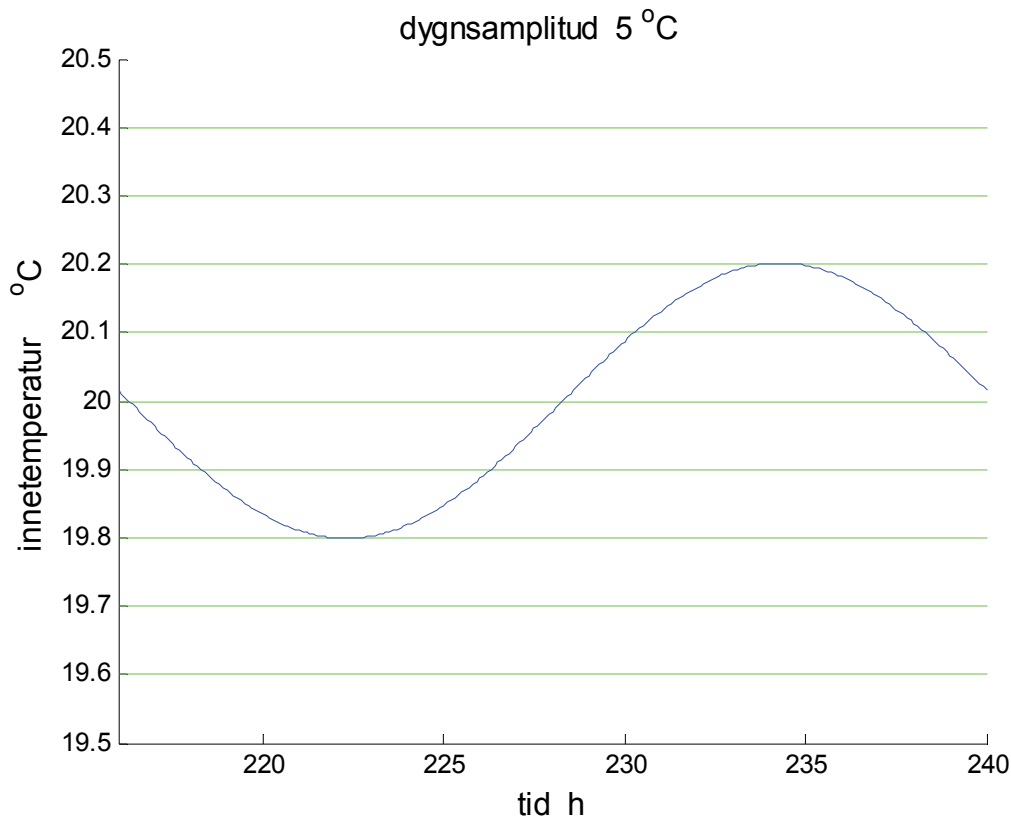
Exemplen med dygnsperiodisk utetemperatur i Figur 3.2 och utetemperatur med rampändring i Figur 3.3-4 visar att framkoppling inte ger konstant innetemperatur, eftersom det finns en viss termisk tröghet mellan utetemperaturen och innetemperaturen, vilket den statiska framkopplingen inte tar hänsyn till. Endast modellens frånluftsventilation har ingen termisk tröghet. Modellens fönster har en mindre termisk tröghet och fasadväggen en större tröghet.

Den dygnsperiodiska utetemperaturen med en amplitud på 5 °C dämpas ner till en amplitud för innetemperaturen på 0.2 °C.

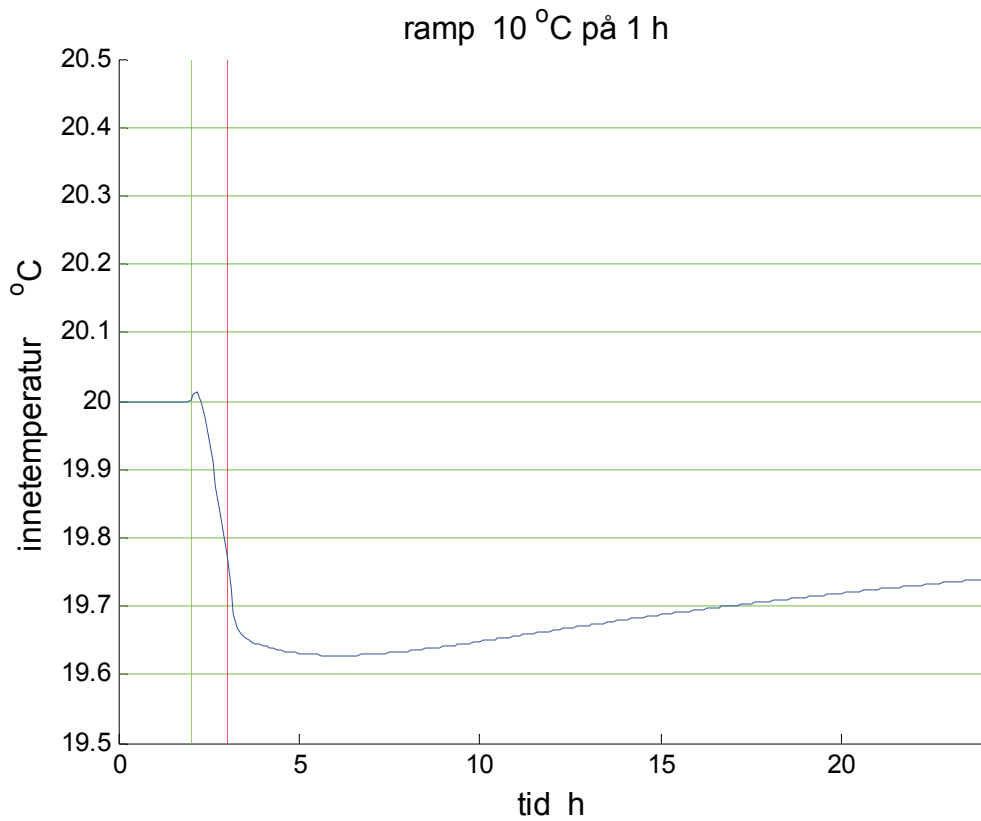
Innetemperaturen i Figur 3.2 ligger i motfas mot utetemperaturen i Figur 2.2. Innetemperaturen minskar när utetemperaturen ökar. Den statiska framkopplingen borde delas upp i en statisk del och en dynamisk del för att innetemperaturen skall kunna bli konstant.

Exemplet med börvärdesändring i Figur 3.5-6 visar att det finns en betydande inre termisk tröghet som den statiska framkopplingen inte kompenserar för. Den termiska trögheten kan beskrivas med en tidskonstant, vilken kan uppskattas till omkring 100 h. Det framgår också tydligt att det omedelbart efter börvärdesändringen finns en snabb ändring av innetemperaturen, vilket beror på att värmesystemets temperatur har ändrats. Det som bromsar uppvärmningen är främst uppvärmningen av modellens bjälklag.

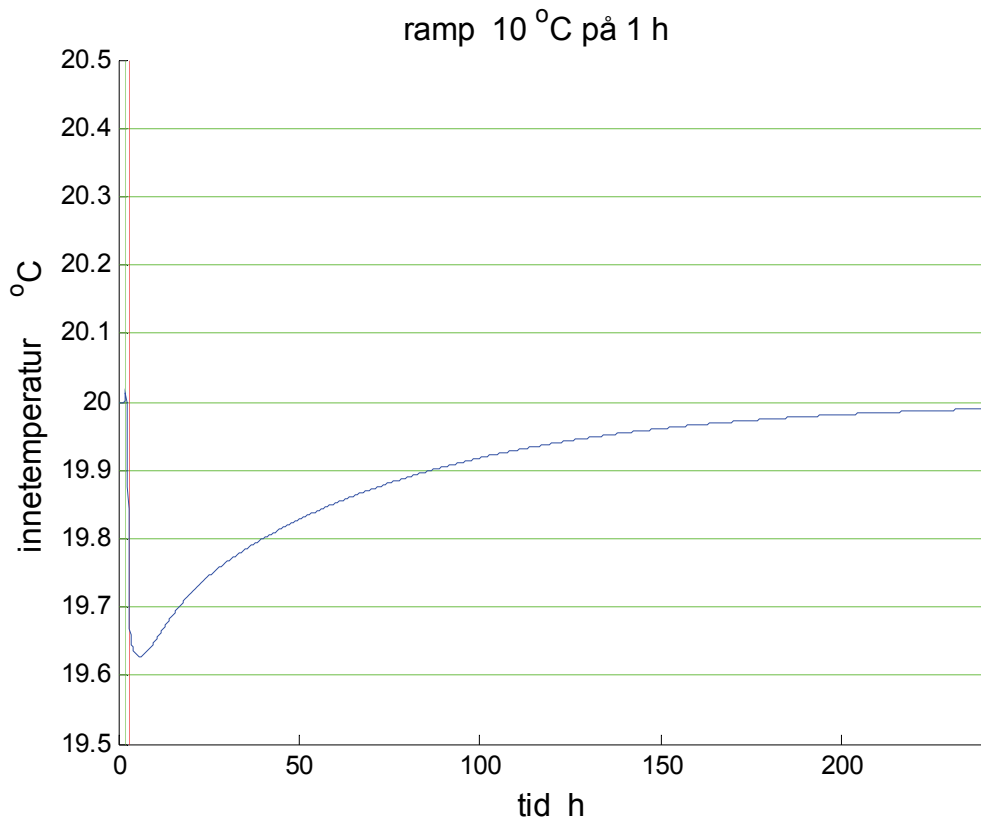
Simulering med 4000 h mätdata från Järinge 2007/2008 redovisas med innetemperatur i tidsföljd och sorterad i Figur 3.7-8. Avvikelse från den önskade innetemperaturen 20 °C är små. Standardavvikelsen är endast 0.097 °C alltså mindre än 0.1 °C.



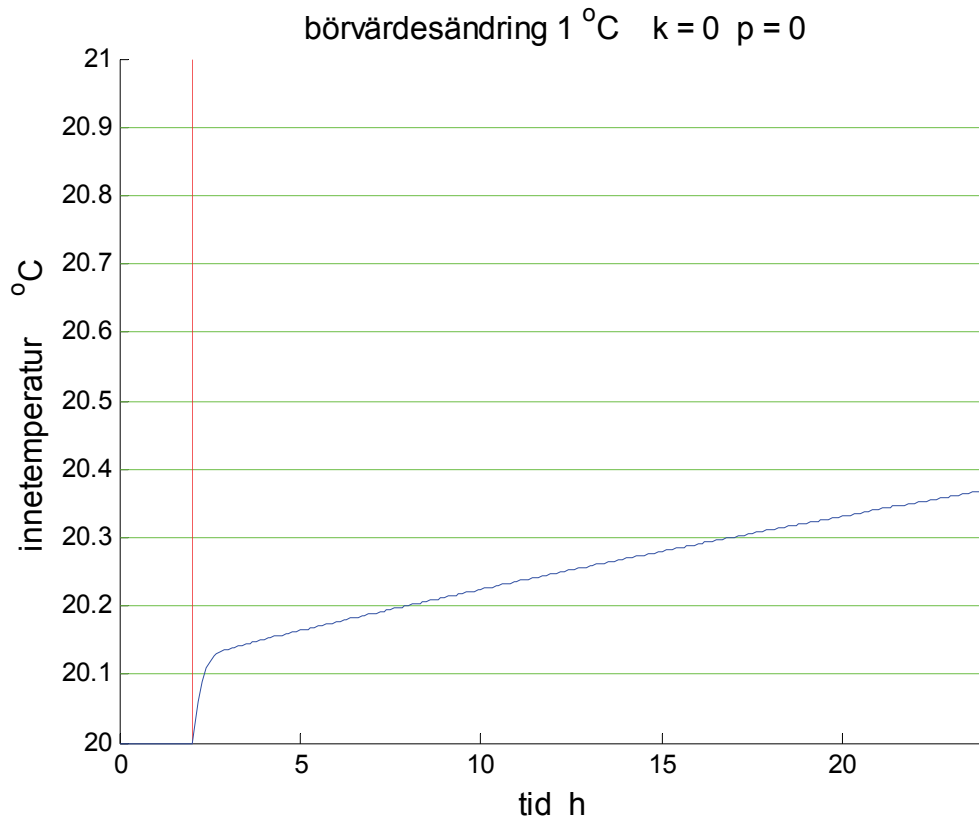
Figur 3.2 Innetemperatur vid dygnsperiodisk utetemperatur och statisk framkoppling.



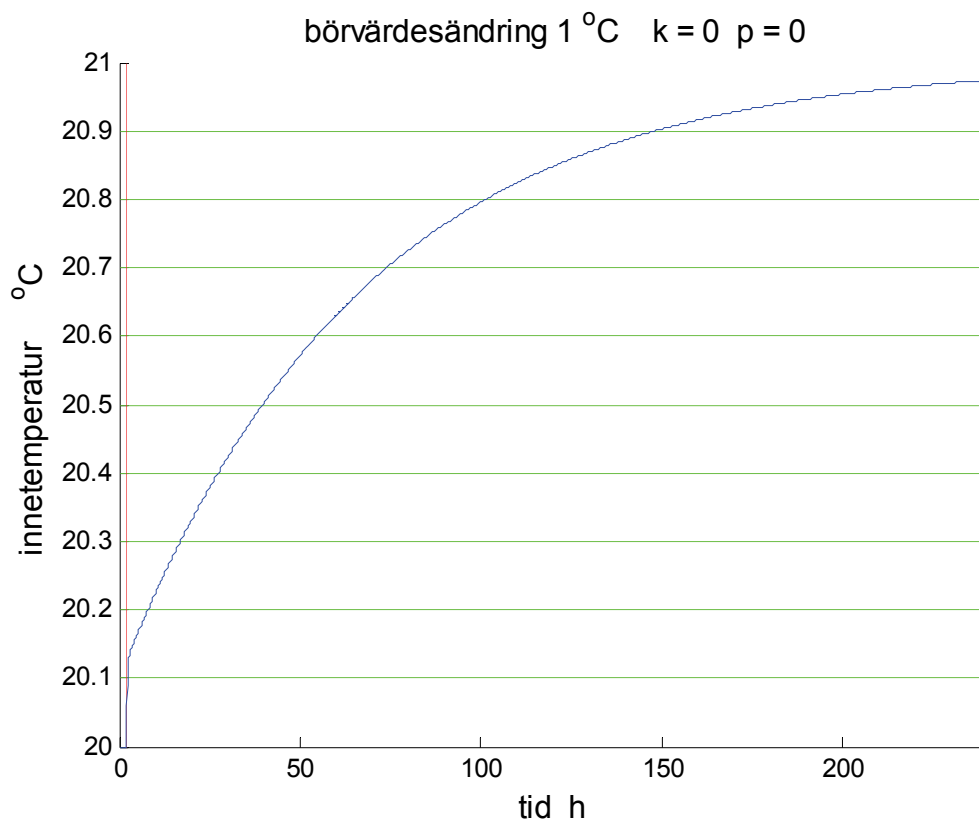
Figur 3.3 Innetemperatur vid rampändring av utetemperaturen och statisk framkoppling.



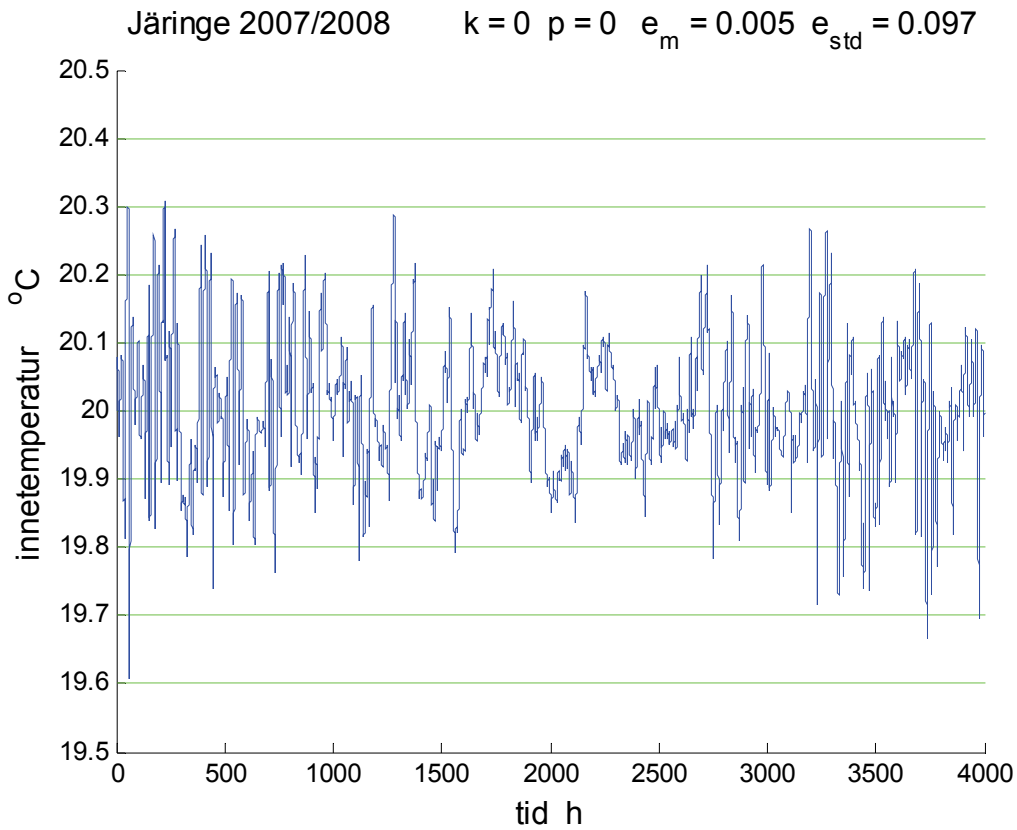
Figur 3.4 Innetemperatur vid rampändring av utetemperaturen och statisk framkoppling.



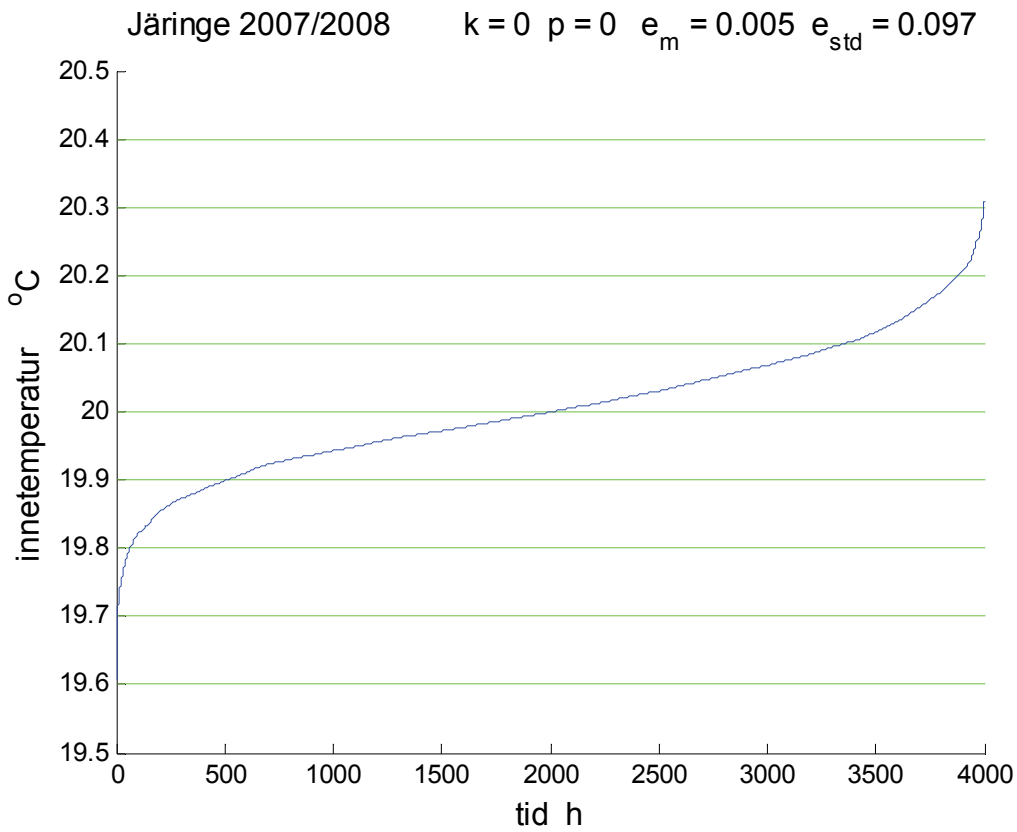
Figur 3.5 Innetemperatur vid börvärdesändring från 20 °C till 21 °C och statisk framkoppling.



Figur 3.6 Innetemperatur vid börvärdesändring från 20 °C till 21 °C och statisk framkoppling.



Figur 3.7 Innetemperatur vid statisk framkoppling



Figur 3.8 Sorterad innetemperatur vid statisk framkoppling

4 Reglering med dynamisk framkoppling

Regleringen för utgångsfallet i avsnitt 3 bygger en statisk framkoppling, vilket innebär att framledningstemperaturen beräknas för en given utetemperatur utan hänsyn till byggnadens och värmesystemets termiska tröghet för att ge en önskad konstant innetemperatur.

Det framgår ganska väl från detaljstudierna av framkopplingen i Figur 3.2-6 att den statiska framkopplingen resulterar i en ojämn innetemperatur. Orsaken är att statisk framkoppling bygger på att utetemperaturen påverkar innetemperaturen direkt. Detta gäller endast för ventilationen, medan den finns en mindre tröghet hos fönstret och en betydligt större tröghet för fasadväggen. De tre delarnas specifika värmebehov eller UA-värden är 0.42, 0.3 och 0.5535 W/Km^2 . Om fönstrets tröghet försummas, kan den andelen för direkt påverkan anges som 0.5654 och den indirekta delen via fasadväggen som 0.4346.

Ett grovt mått på dynamiken för fönstret och fasadväggen är att beräkna en tidskonstant för en modellhalva till omgivningen på båda sidor, vilket beräknas som halva värmelagringsförmågan dividerad med dubbla värmeöverföringsförmågan. Detta ger tidskonstanten 0.56 h för fönstret och 11.56 h för fasadväggen.

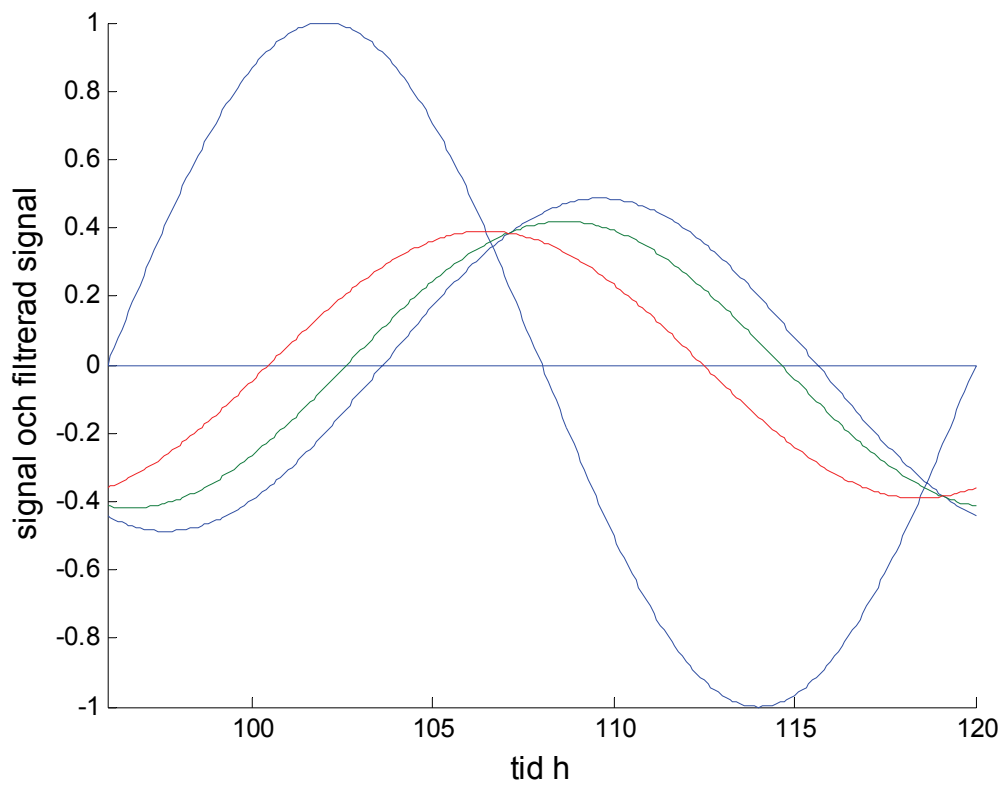
Test av framkoppling efter en delvis filtrerad utetemperatur har genomförts med tre filter med olika ordningstal och tidskonstanter, vilka är 9, 4.5 och 3 h för första, andra och tredje ordningens filter. Notera att den direkta delen är 0.5654 och den filtrerade delen är 0.4346 av utetemperaturen. Hur den dynamiska framkopplingen filtrerar en dygnsperiodisk signal och en begränsad ramp eller redovisas i Figur 4.1-2. Hur signalens amplitud och fas ändras redovisas i Figur 4.3-4 som funktion av filtertidskonstant och filterviktning för ett första ordningens filter.

Hur den dynamiska framkopplingen klarar en utetemperaturändring i form av en dygnsperiodisk utetemperatur eller en begränsad ramp redovisas i Figur 4.5-6 för ett filter av första ordningen, i Figur 4.7-8 för ett filter av andra ordningen och i Figur 4.9-10 för ett filter av tredje ordningen. Kurvorna visar att avvikelserna är ytterst små jämför med statisk framkoppling och den dynamiska framkopplingen förmår att kompensera för den termiska trögheten i fönster och fasadvägg.

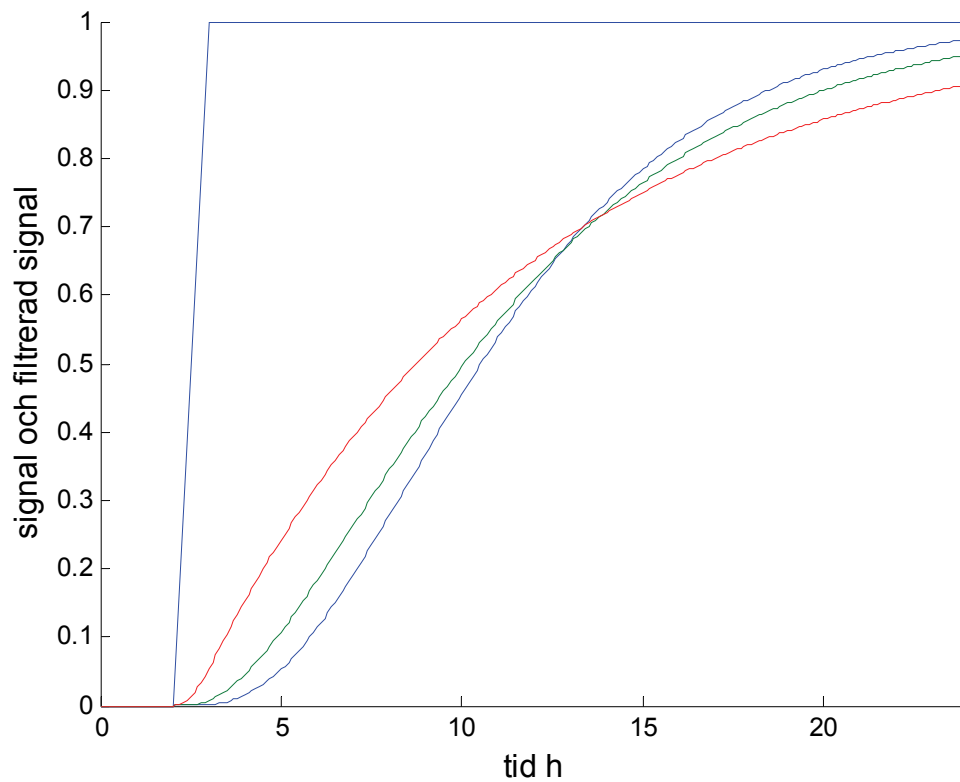
Resultatet för innetemperaturen redovisas i Figur 4.11-12 med ett första ordningens filter med tidskonstanten 9 h. Resultatet är betydligt bättre än för enbart statisk framkoppling som i Figur 3.7-8. Reglerfelets standardavvikelse är endast $0.012 \text{ }^\circ\text{C}$.

Resultatet för innetemperaturen redovisas i Figur 4.13-14 med ett andra ordningens filter med tidskonstanten 4.5 h för varje filterdel. Tidskonstanten halveras, vilket gör att dynamiken blir delvis lik den för ett första ordningens filter. Resultatet är något bättre än för en första ordningens filter som i Figur 4.11-12. Reglerfelets standardavvikelse är endast $0.004 \text{ }^\circ\text{C}$.

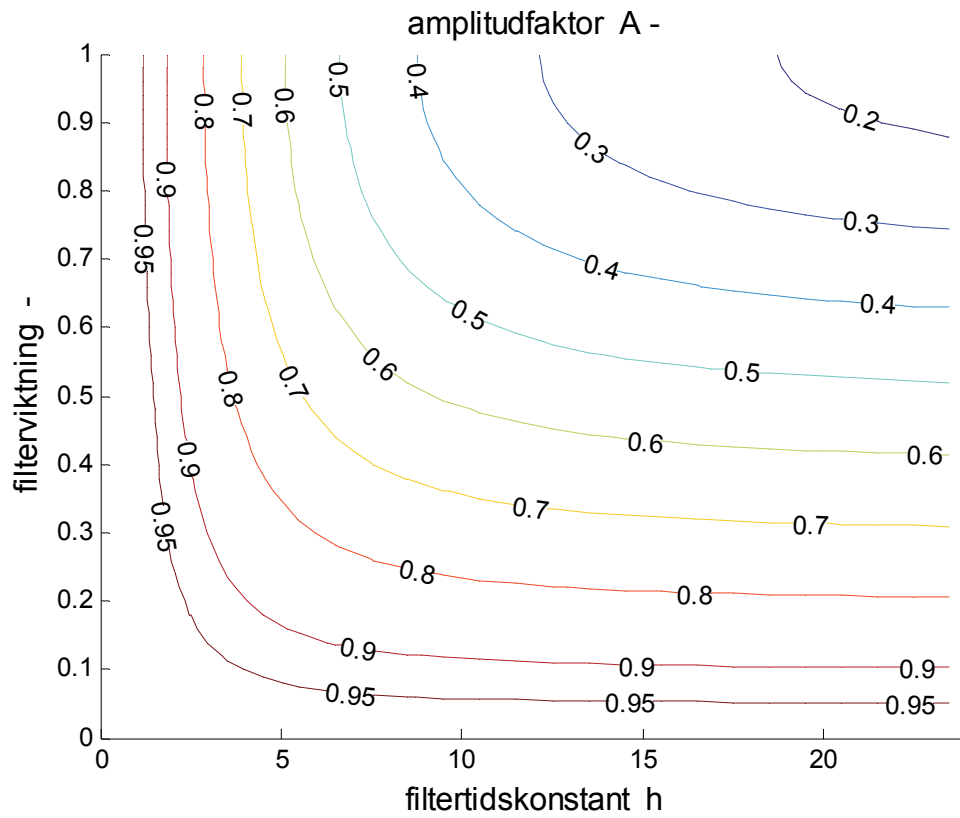
Resultatet för innetemperaturen redovisas i Figur 4.15-16 med ett tredje ordningens filter med tidskonstanten 3 h för varje filterdel. Resultatet är inte bättre för ett andra ordningens filter som i Figur 4.13-14. Reglerfelets standardavvikelse är endast $0.011 \text{ }^\circ\text{C}$.



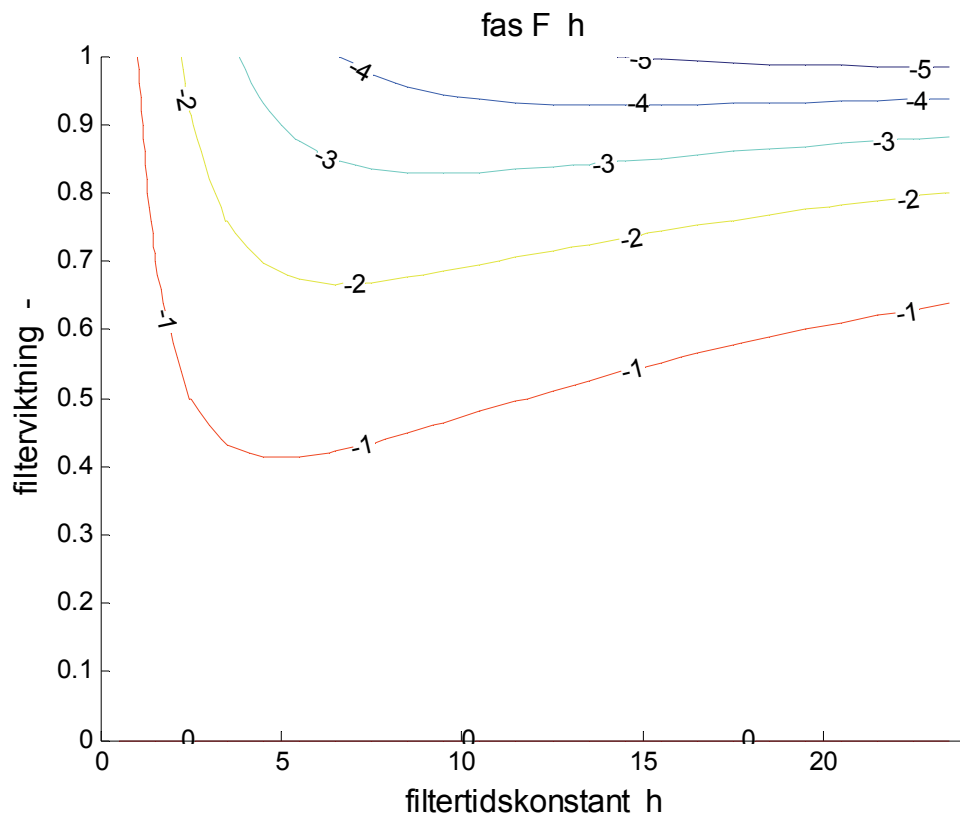
Figur 4.1 Filtrering av dygnsperiodisk signal med första, andra och tredje ordningens filter.



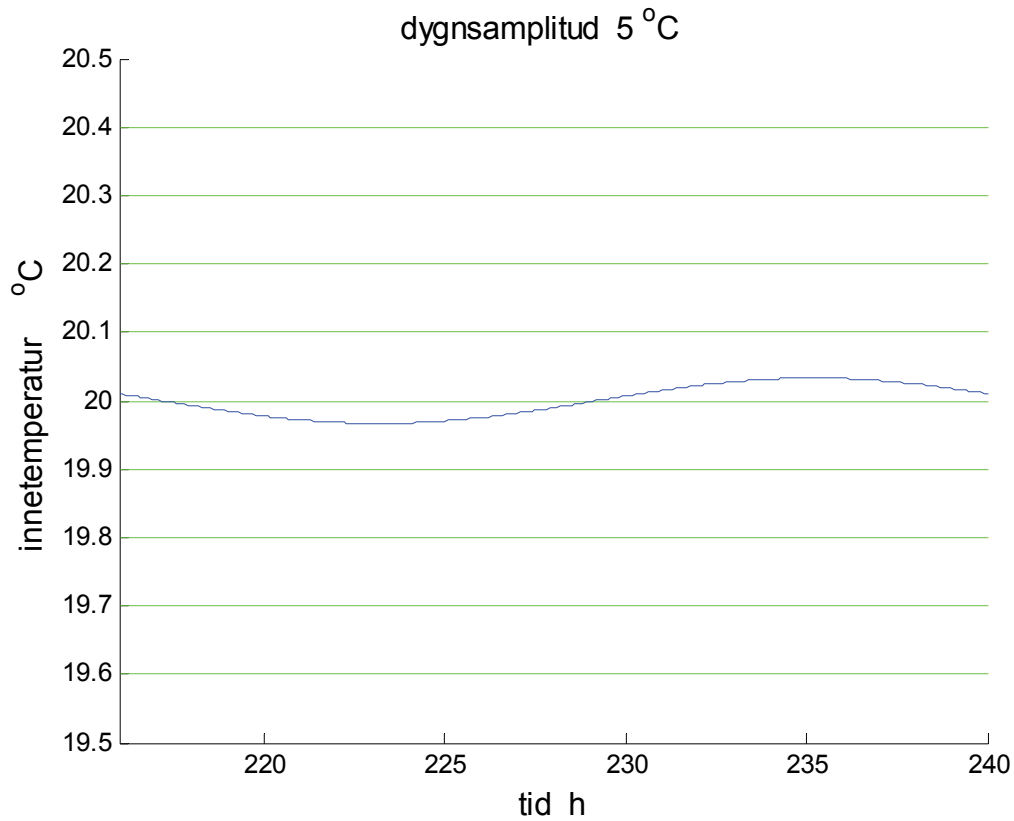
Figur 4.2 Filtrering av rampsignal med första, andra och tredje ordningens filter.



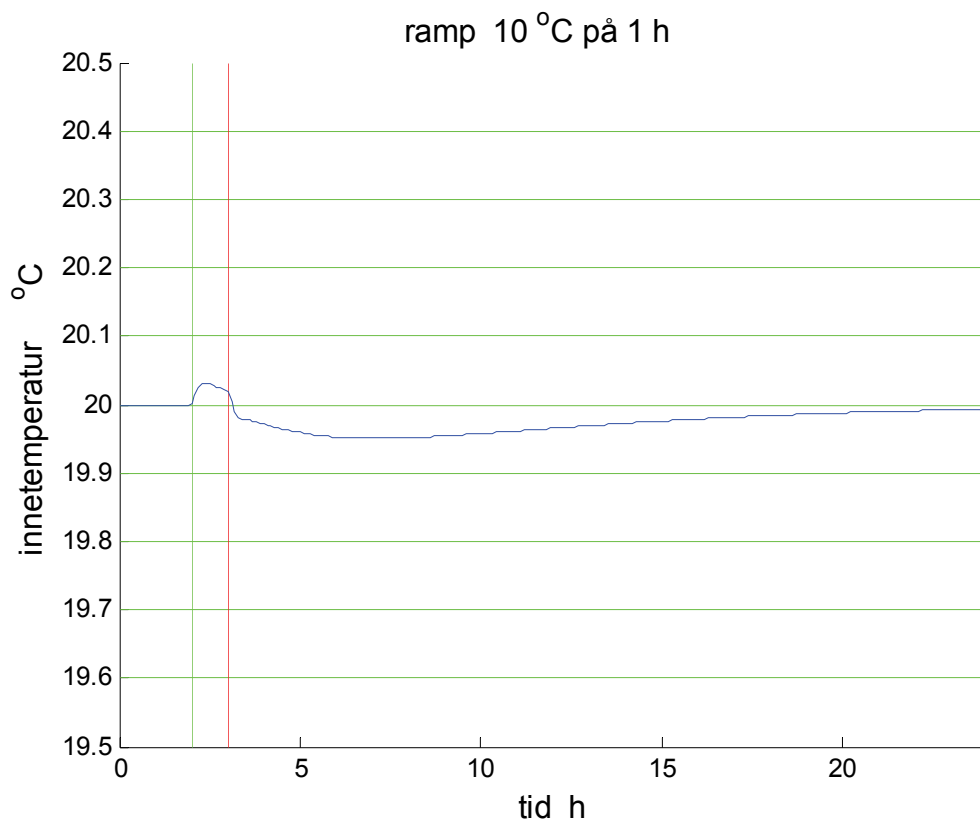
Figur 4.3 Amplitudgång för dygnsperiodisk signal för ett första ordningens viktat filter.



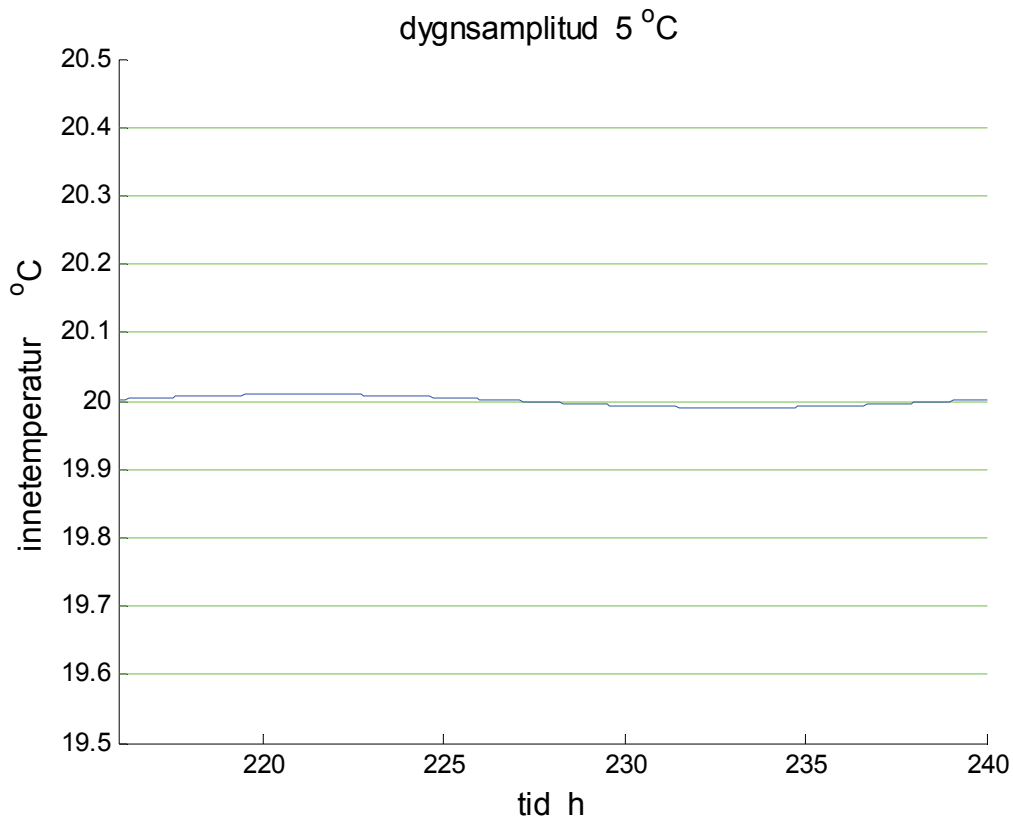
Figur 4.4 Fäsförskjutning för dygnsperiodisk signal för ett första ordningens viktat filter.



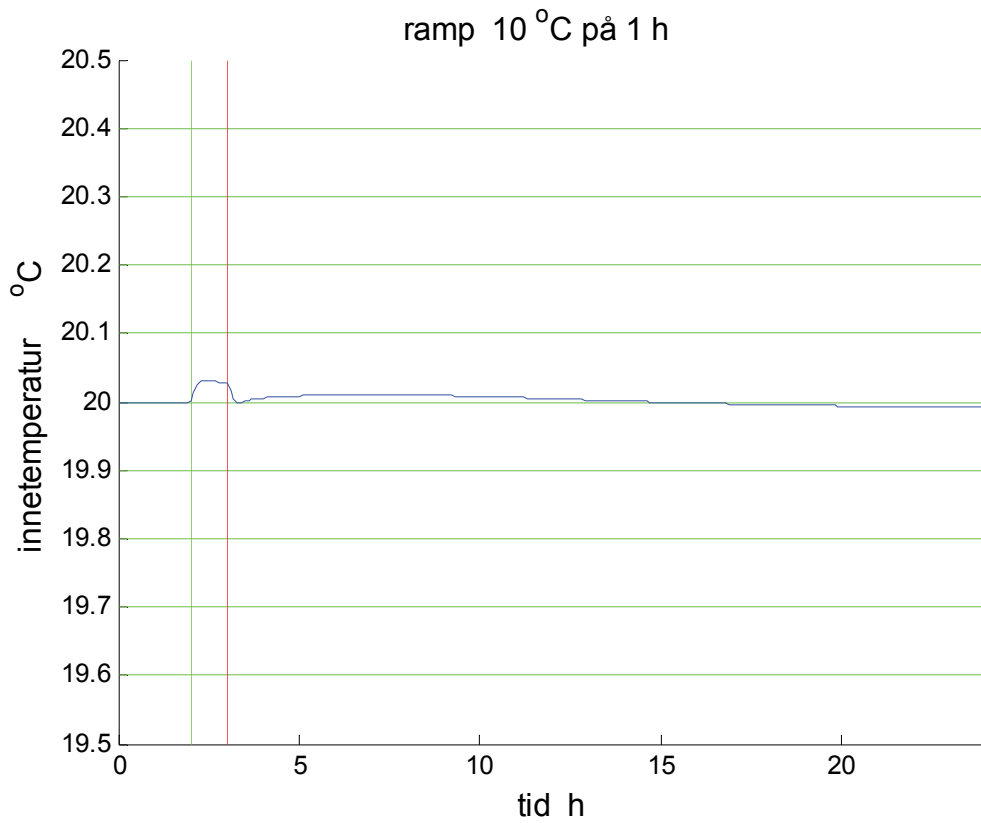
Figur 4.5 Innetemperatur vid dynamisk framkoppling med enkelfilter.



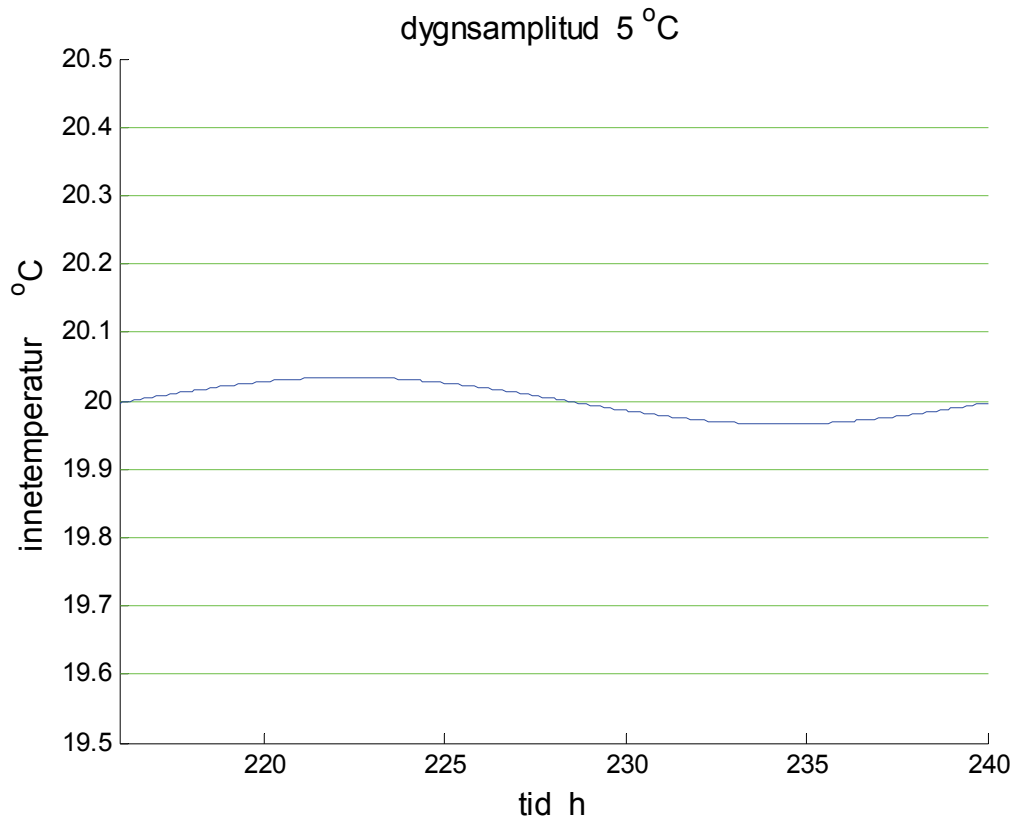
Figur 4.6 Innetemperatur vid dynamisk framkoppling med enkelfilter.



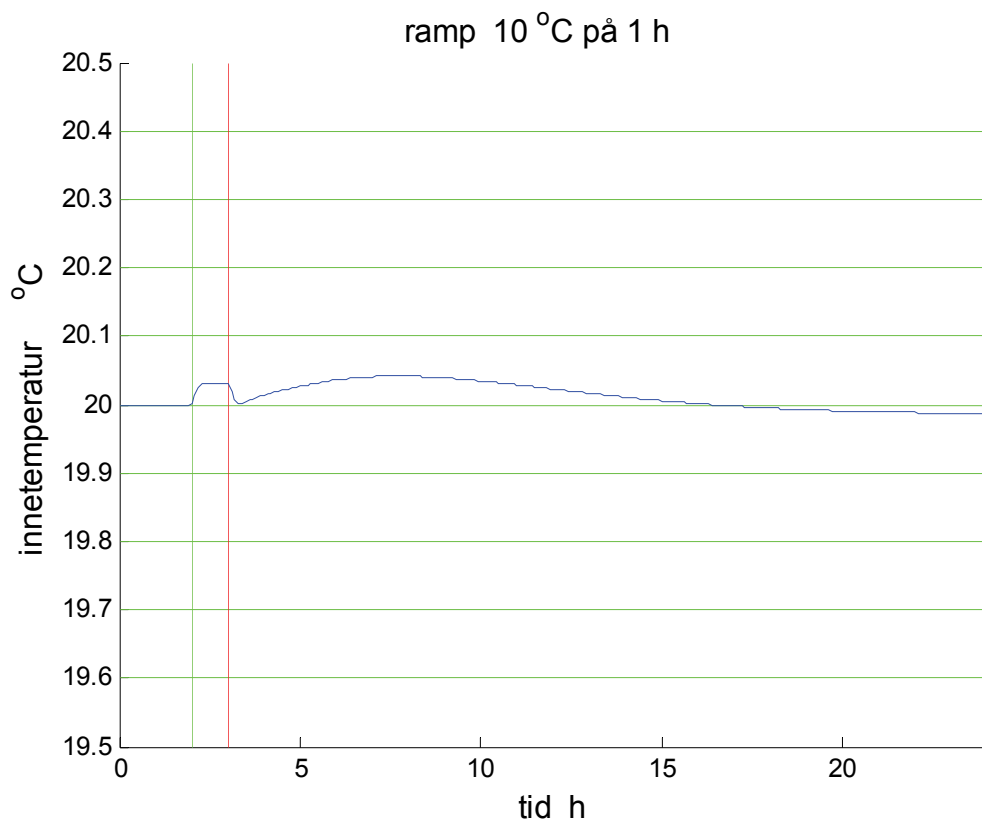
Figur 4.7 Innetemperatur vid dynamisk framkoppling med dubbelfilter.



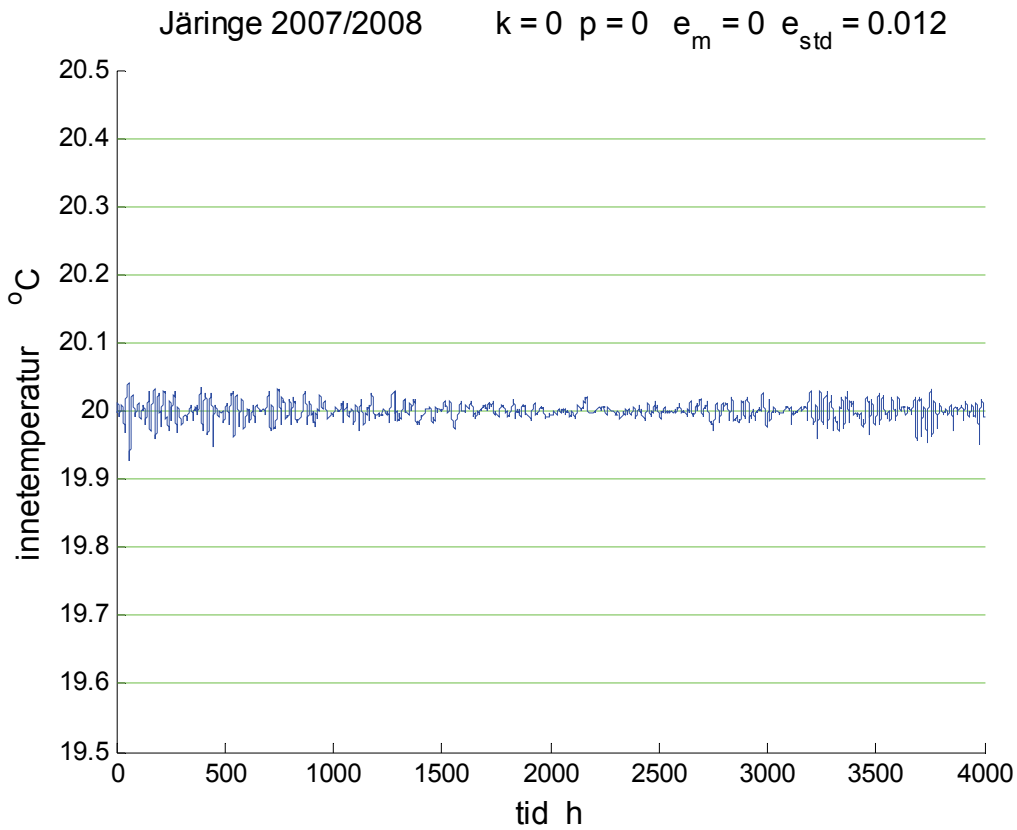
Figur 4.8 Innetemperatur vid dynamisk framkoppling med dubbelfilter.



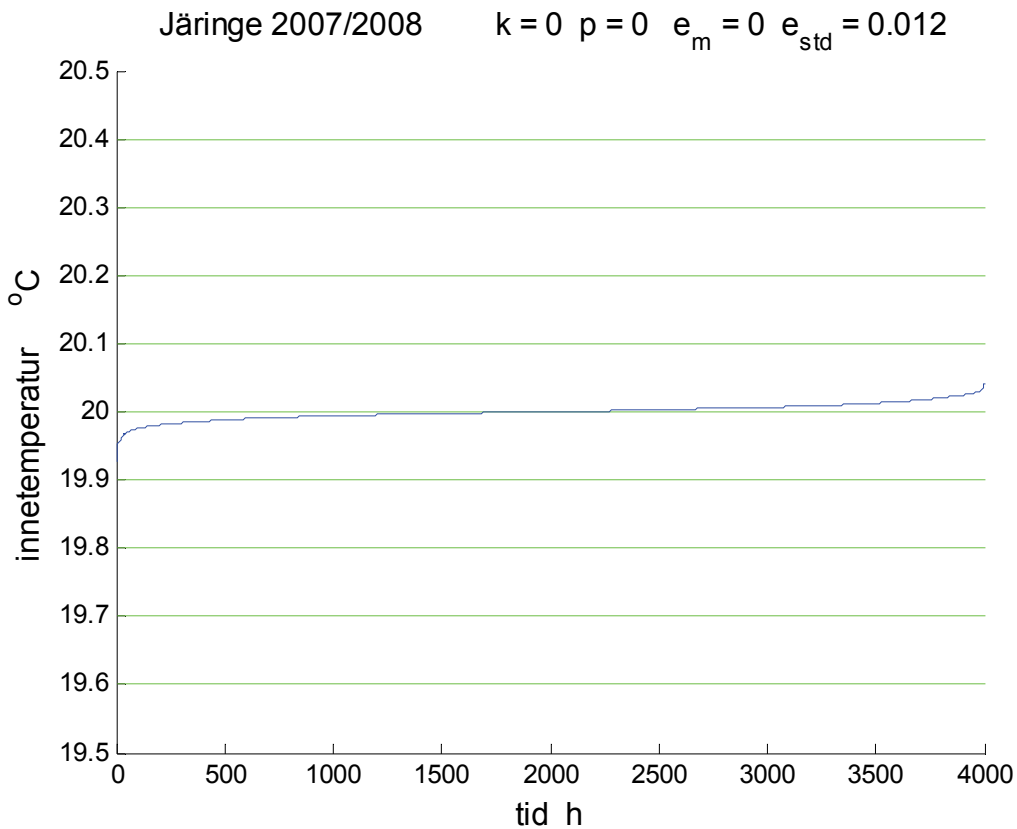
Figur 4.9 Innetemperatur vid dynamisk framkoppling med trippelfilter.



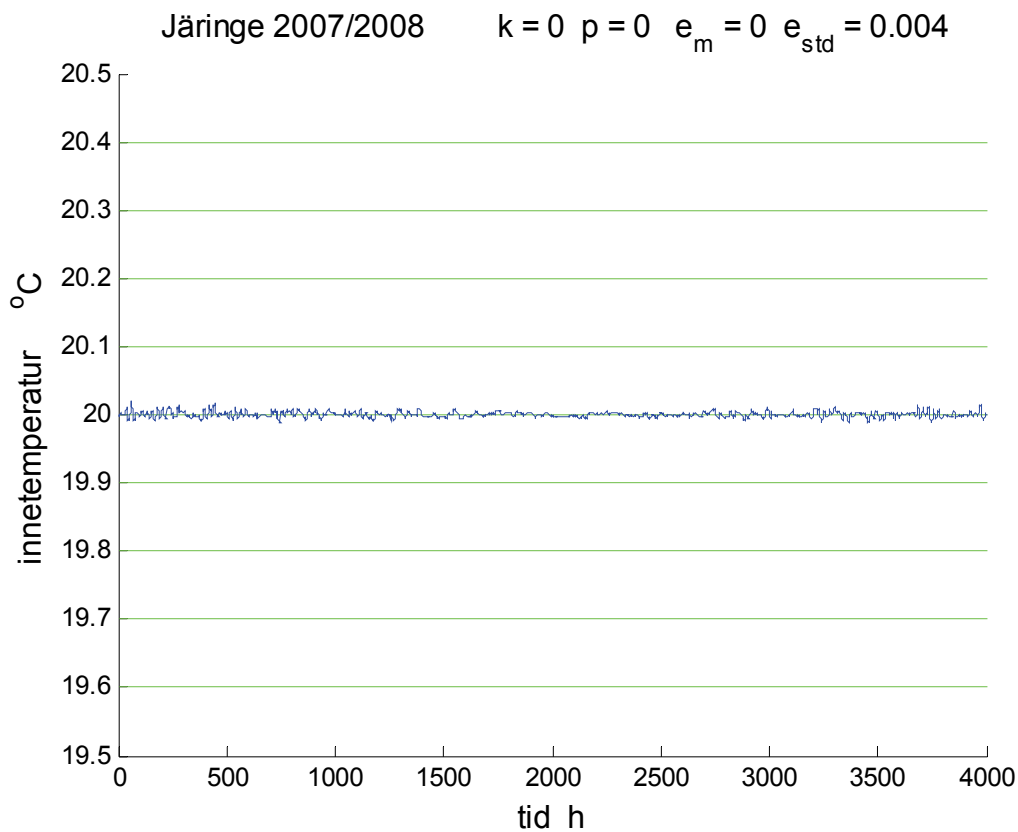
Figur 4.10 Innetemperatur vid dynamisk framkoppling med trippelfilter.



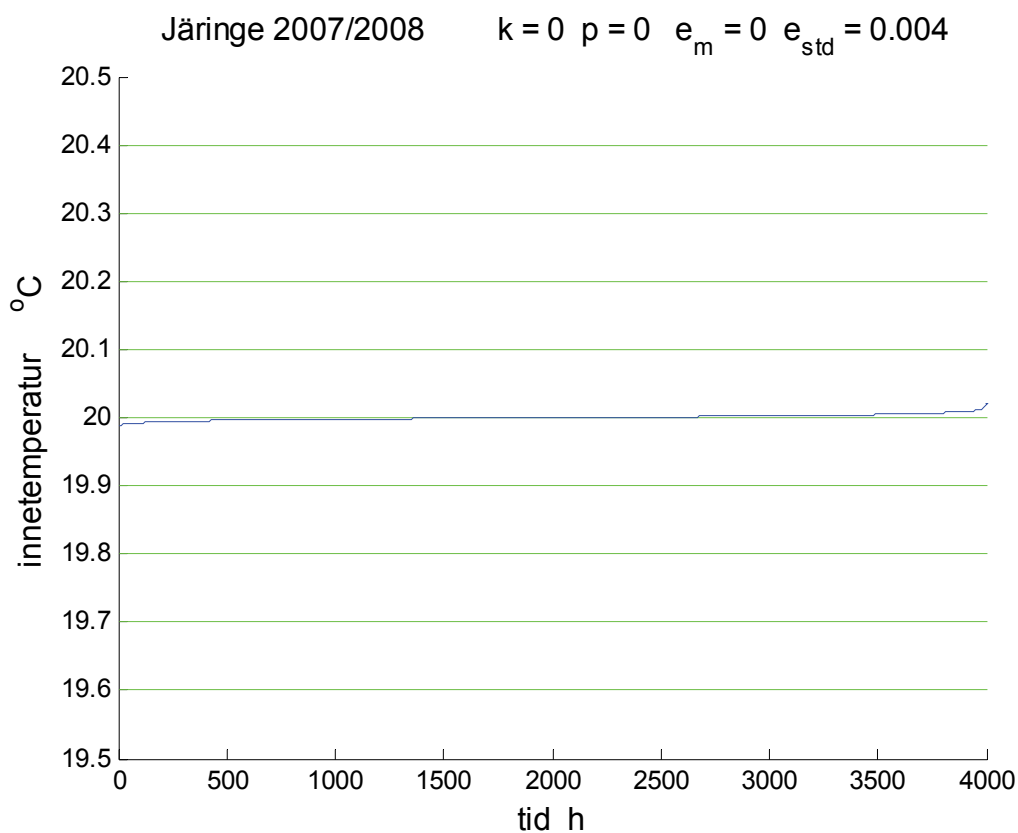
Figur 4.11 Innetemperatur vid dynamisk framkoppling med enkelfilter.



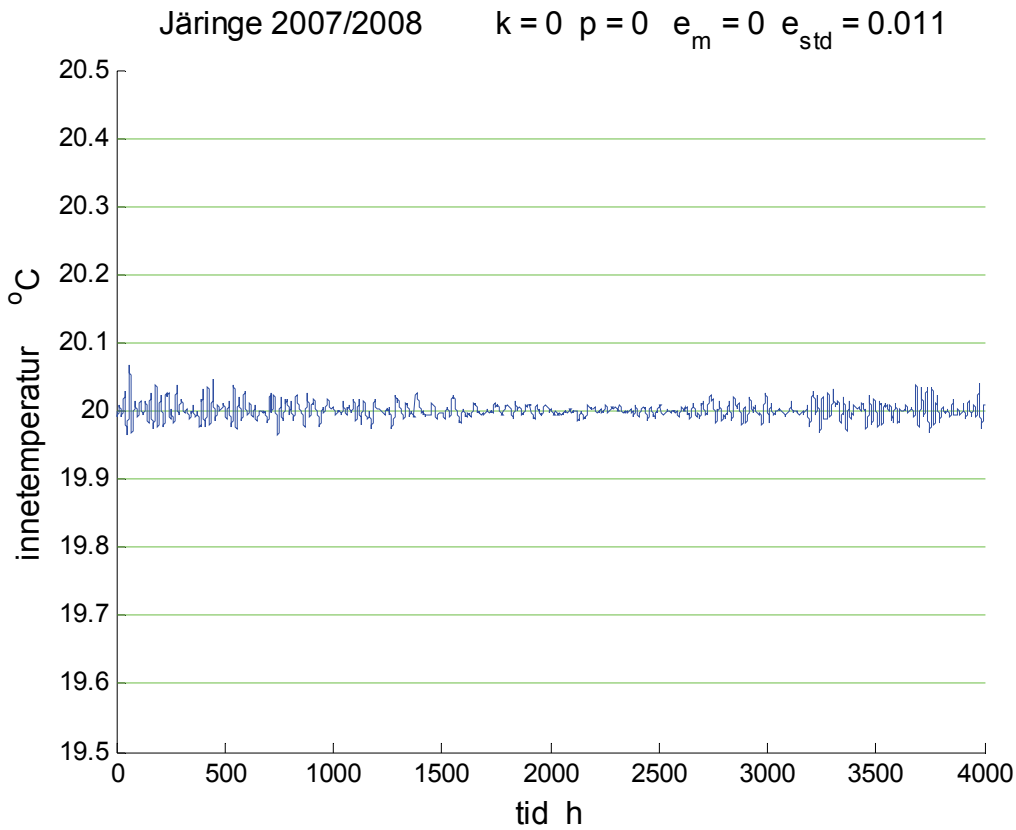
Figur 4.12 Sorterad innetemperatur vid dynamisk framkoppling med enkelfilter.



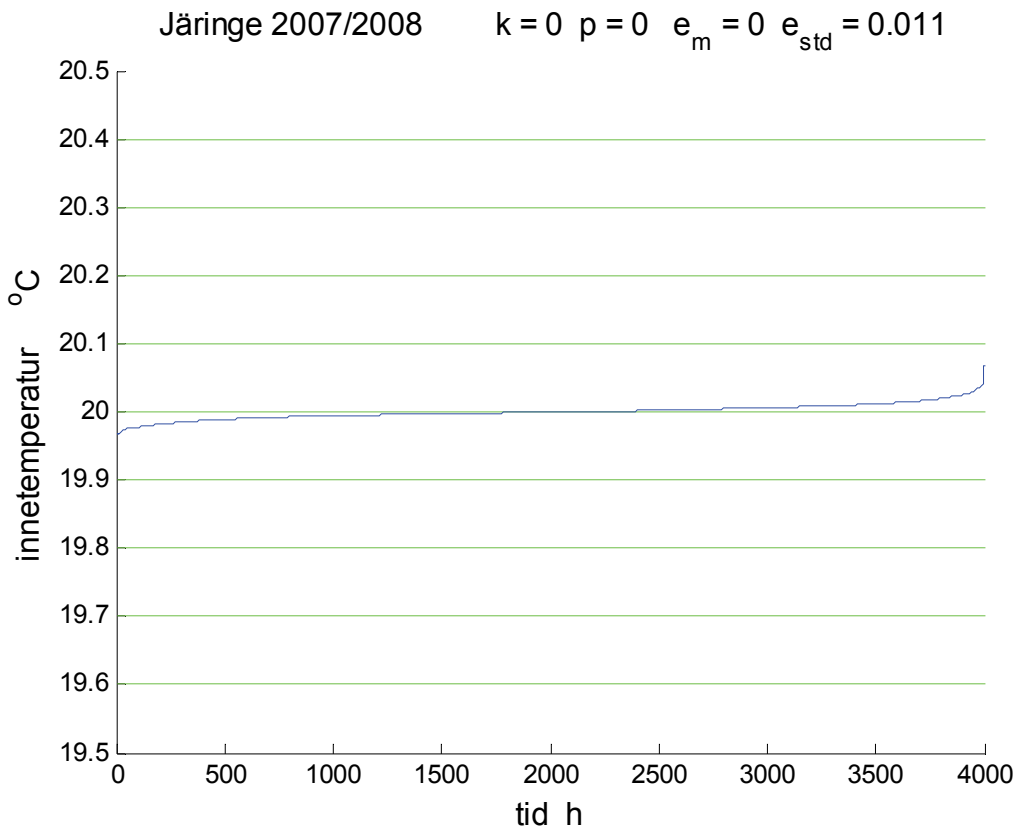
Figur 4.13 Innetemperatur vid dynamisk framkoppling med dubbelfilter.



Figur 4.14 Sorterad innetemperatur vid dynamisk framkoppling med dubbelfilter.



Figur 4.15 Innetemperatur vid dynamisk framkoppling med trippelfilter.



Figur 4.16 Sorterad innetemperatur vid dynamisk framkoppling med trippelfilter.

5 Reglering med tidsviktad framkoppling

Framledningens börvärde $T_f(t)$ för tidpunkten t beräknas enligt (3.1) med en tidsviktad utetemperatur $T_u(t)$ med prognosviktning k och prognoshorisont p enligt nedan.

$$T_f(t) = (Q/Q_r + 1)T_i - Q [(1-k)T_u(t) + kT_u(t+p)]/Q_r \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.1)$$

Hur den tidsviktade utetemperaturen förändrar utetemperaturen för dygnsperiodiska förlopp kan beskrivas genom att i Figur 5.1-2 redovisa amplitudgången och fasen för den tidsviktade signalen relativt den ursprungliga signalen. Notera att för $k = 1$ blir fasen lika med prognoshorisonten. Särffallet med prognosviktningen $k = 0.5$ och prognoshorisonten 12 h eller -12 h resulterar i total dämpning med amplitudgången lika med noll.

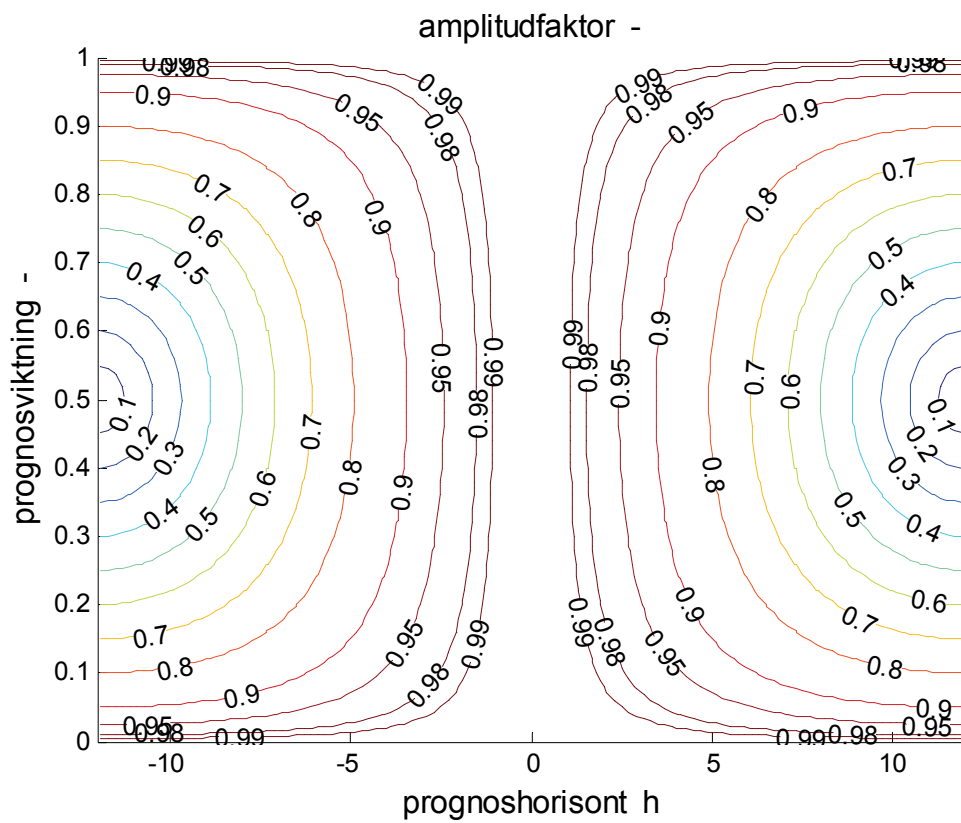
Hur den tidsviktade framkopplingen fungerar för en dygnsperiodisk utetemperatur redovisas med dämpningen för innetemperaturen variation relativt utetemperaturen i Figur 5.3 för positiva prognoshorisonter och i Figur 5.4 för negativa prognoshorisonter. Resultatet är att minst variation i innetemperatur fås för $k = 0.25$ och $p = 15$ h eller $k = 0.25$ och $p = -9$ h. Notera att det är 24 h mellan de två prognoshorisonterna.

Den tidsviktade framkopplingen har också simulerats för att antal olika prognoshorisonter från -12 h till 12 h i steg om 1 h. Prognosviktning har varierats från 0 till 1 i steg om 0.05. Exakt uppmätta utemperaturer har använts och någon egentlig prognos av utetemperaturen har inte gjorts. Prognosfelet är noll. Resultaten redovisas i Figur 5.5-8 för innetemperaturens medelvärde, standardavvikelse, minimivärde och maximivärde. Bäst resultat med minst avvikelse från den önskade innetemperaturen 20 °C fås för negativa prognoshorisonter och liten prognosviktning. Innetemperaturen i tidsföljd och sorterad redovisas för fem fall enligt Tabell 5.1. Fall 1 är identiskt med statisk framkoppling tidigare redovisat i Figur 3.7-8. Fall 2 och 3 har valts ut med ledning av bästa resultat i Figur 5.4-8. Fall 4 och 5 visar reglering efter framtida utetemperatur till hälften eller helt ger ett sämre resultat än statisk framkoppling.

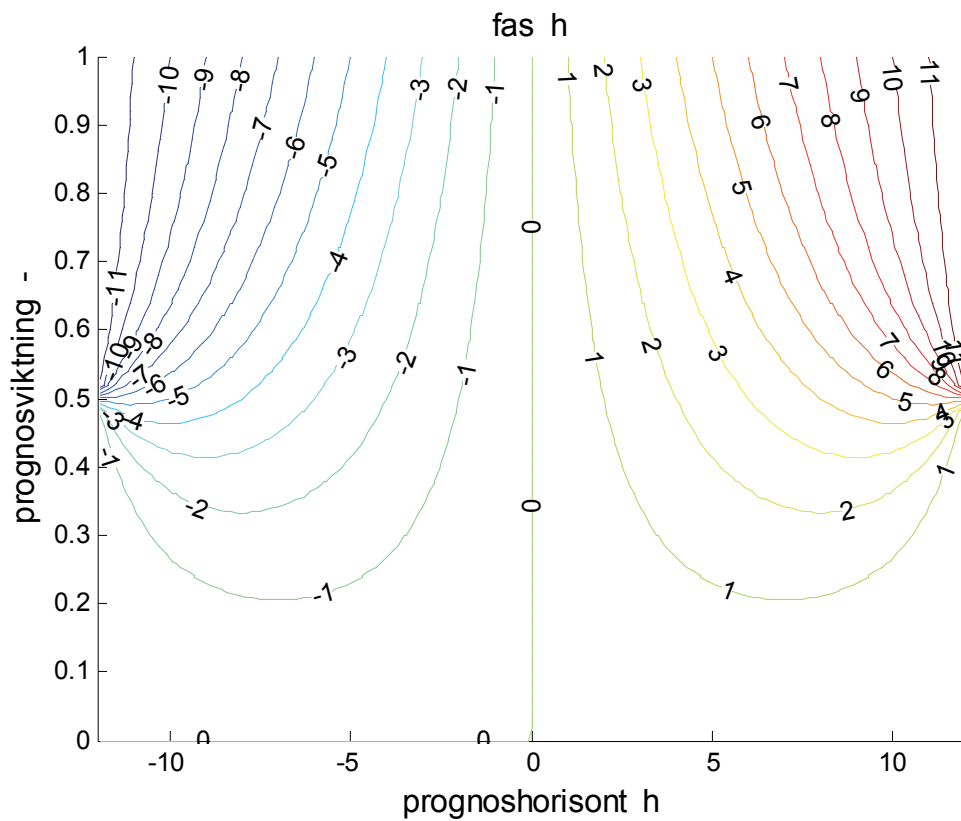
Fall 6 och 7 är två extremfall med framkoppling ett dygn före och ett dygn efter och redovisas i Figur 5.19-22 med fördubblad temperaturaxel. Resultatet blir klart sämre än fall 1. Standardavvikelsen ökar med en faktor 5 och 4 för fall 6 respektive 7.

Tabell 5.1 Medelfel och standardfel för olika prognosviktning k och prognoshorisont p

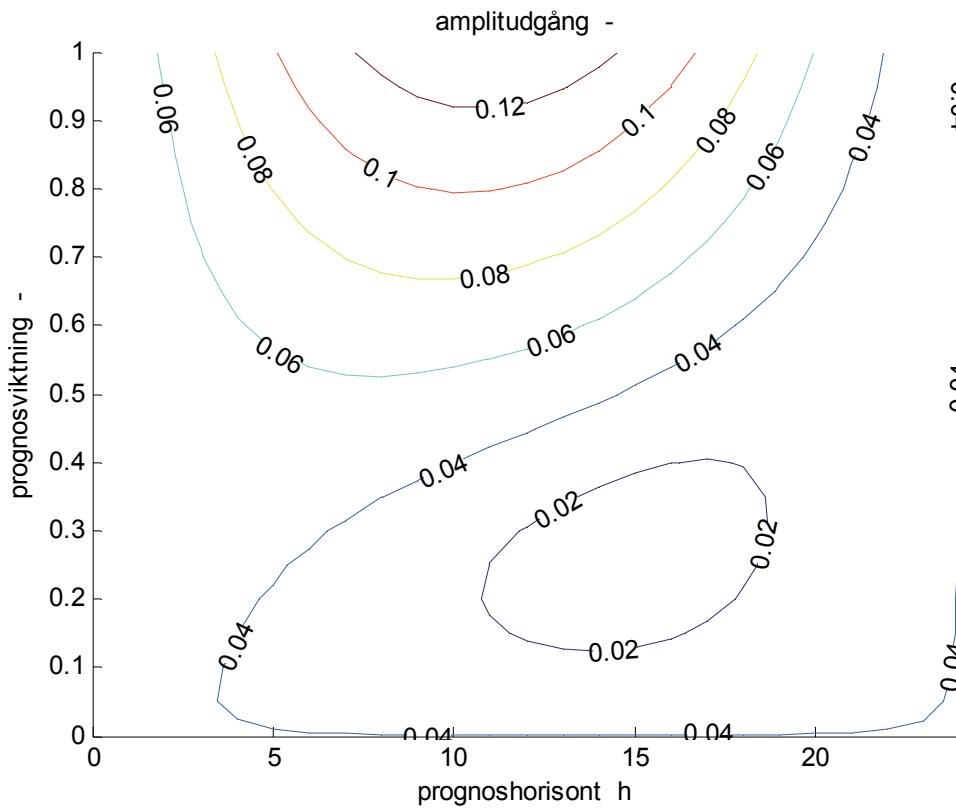
fall	prognosviktning k	prognoshorisont p h	medelfel °C	standardfel °C	Figur
1	0	0	0.006	0.097	5.9-10
2	0.4	-6	0.002	0.045	5.11-12
3	0.3	-12	0.000	0.035	5.13-14
4	0.5	6	0.009	0.155	5.15-16
5	1.0	6	0.013	0.253	5.17-18
6	1.0	24	0.038	0.501	5.19-20
7	1.0	-24	-0.030	0.397	5.21-22



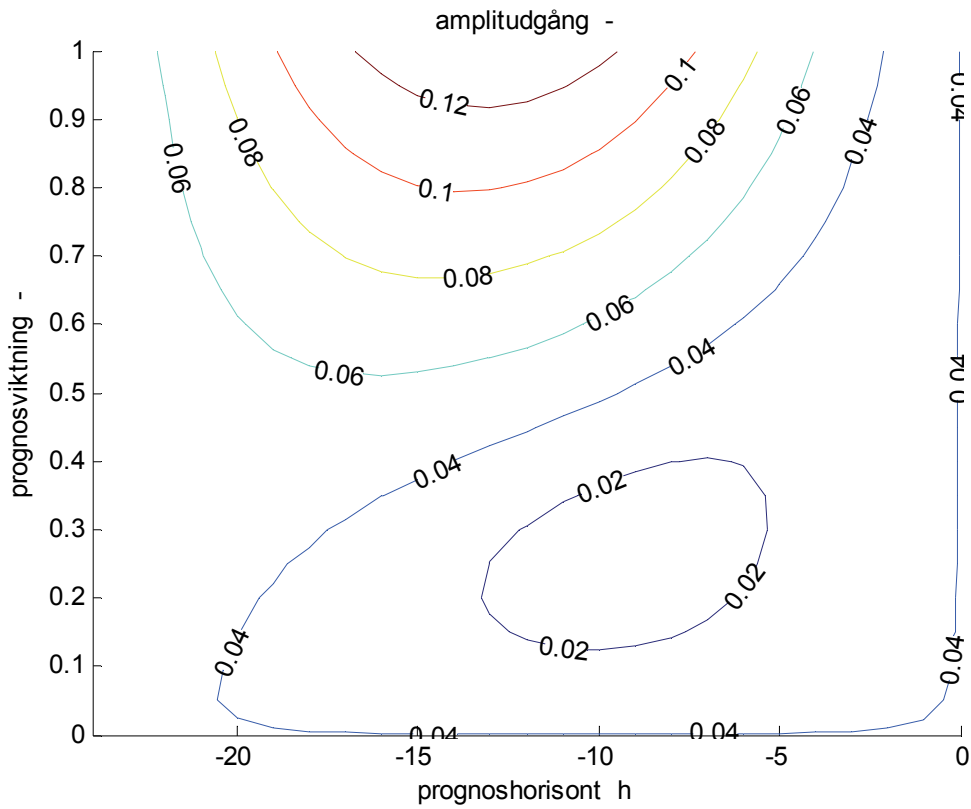
Figur 5.1 Amplitudfaktor för tidsviktad utetemperatur.



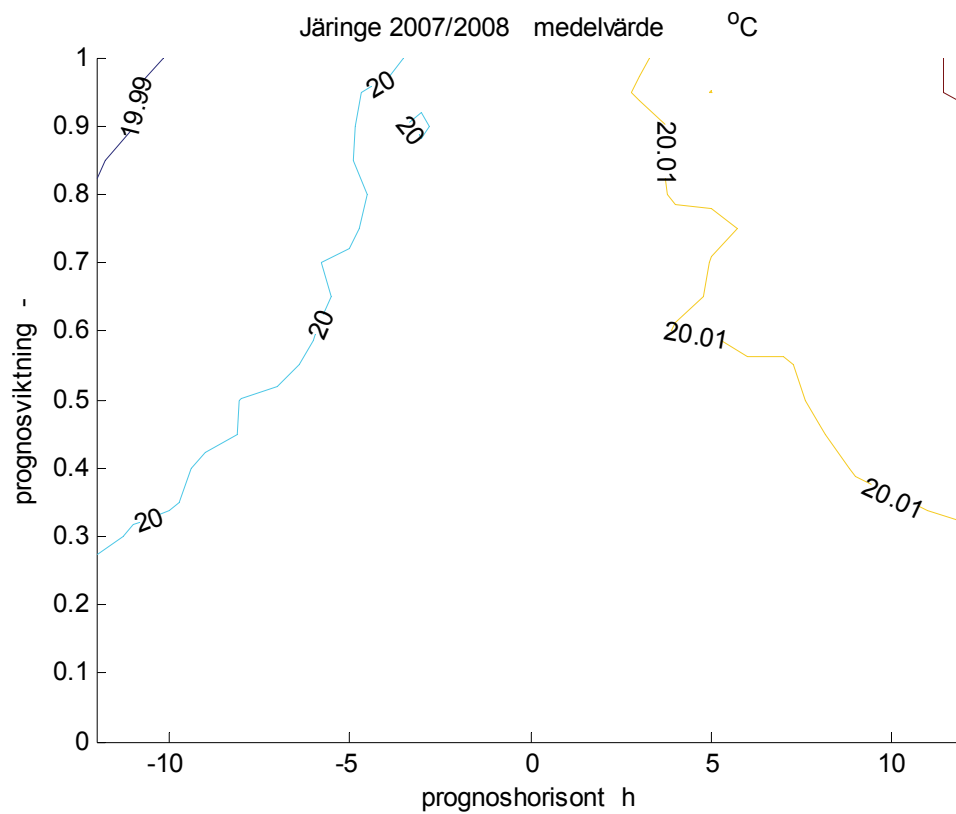
Figur 5.2 Fasen för tidsviktad utetemperatur.



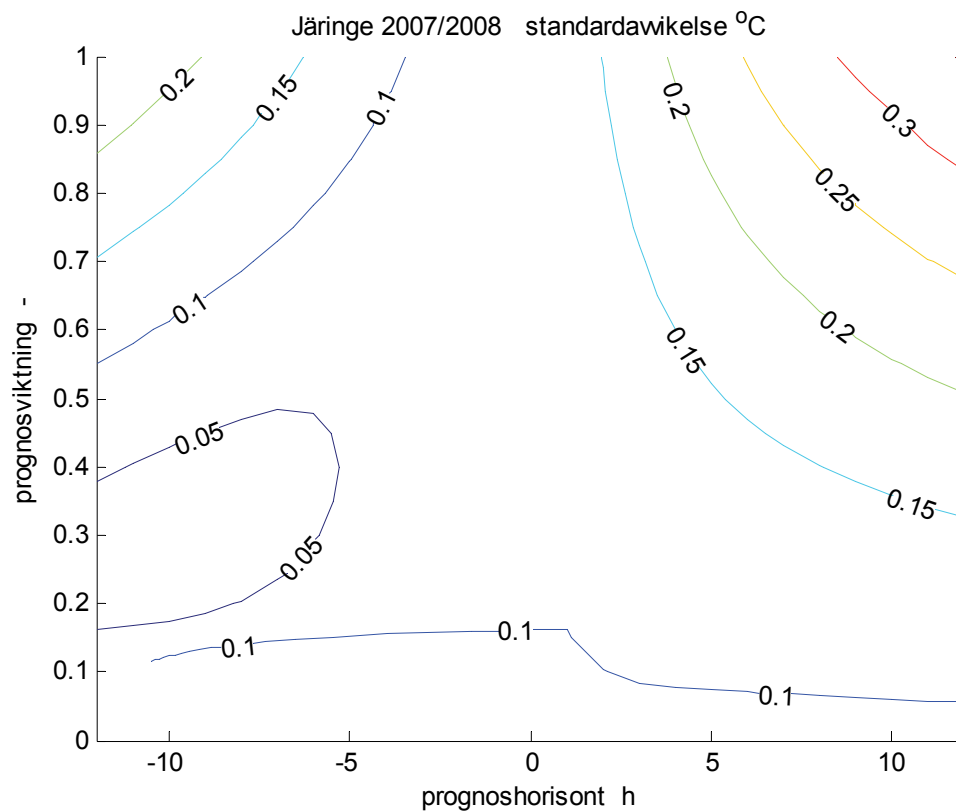
Figur 5.3 Innetemperaturens amplitud vid tidsviktad framkoppling.



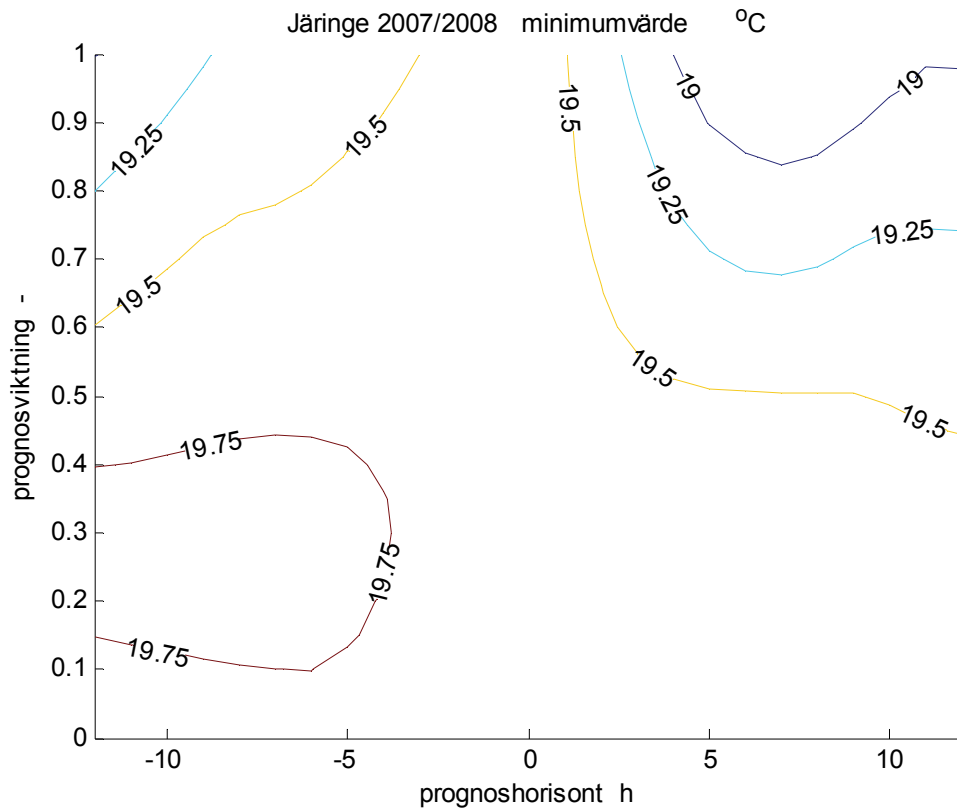
Figur 5.4 Innetemperaturens amplitud vid tidsviktad framkoppling.



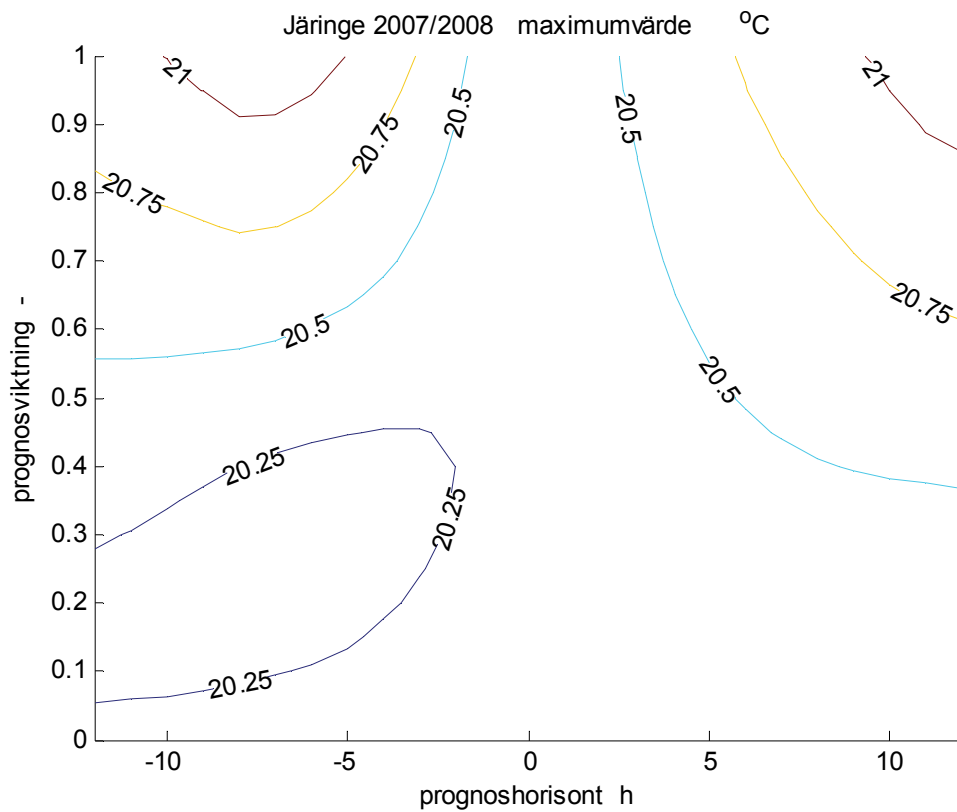
Figur 5.5 Innetemperaturens medelvärde vid tidsviktad framkoppling.



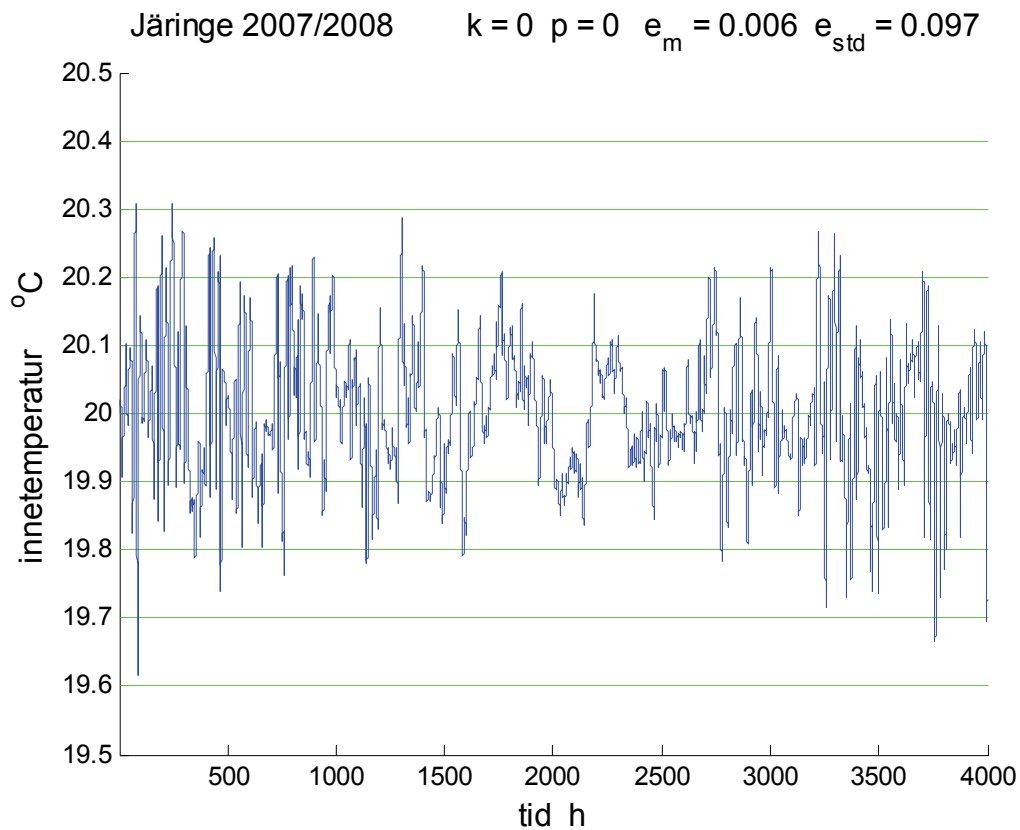
Figur 5.6 Innetemperaturens standardavvikelse vid tidsviktad framkoppling.



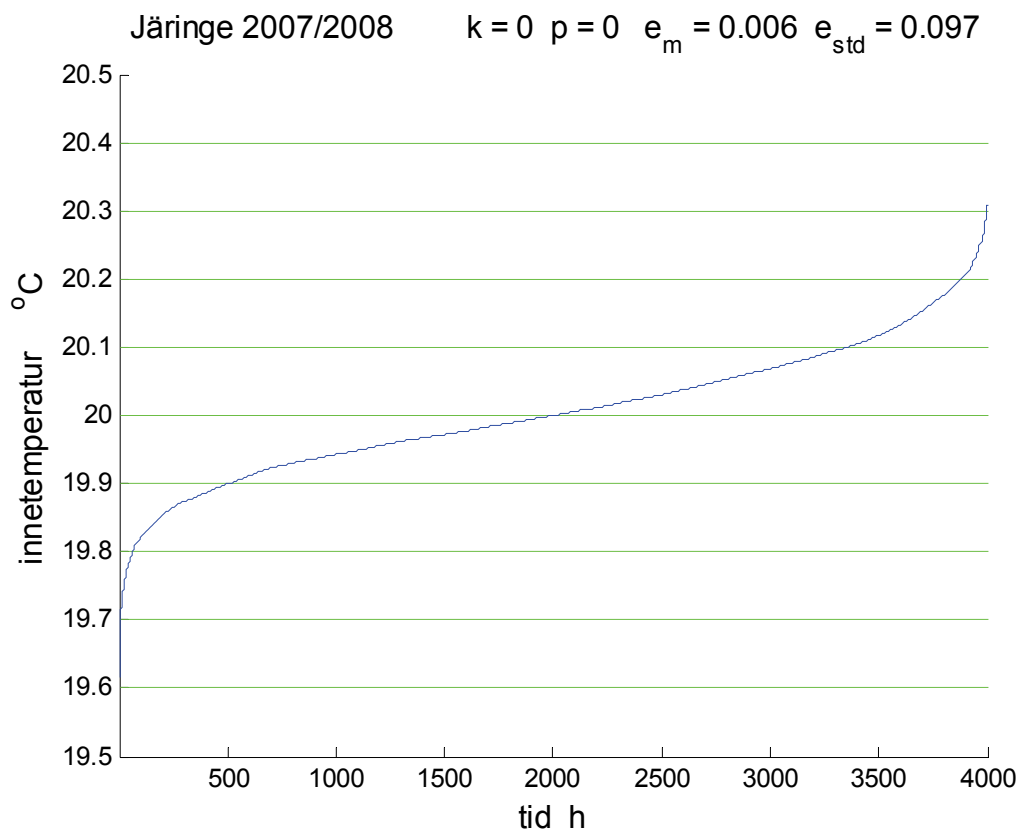
Figur 5.7 Innetemperaturens minimivärde vid tidsviktad framkoppling.



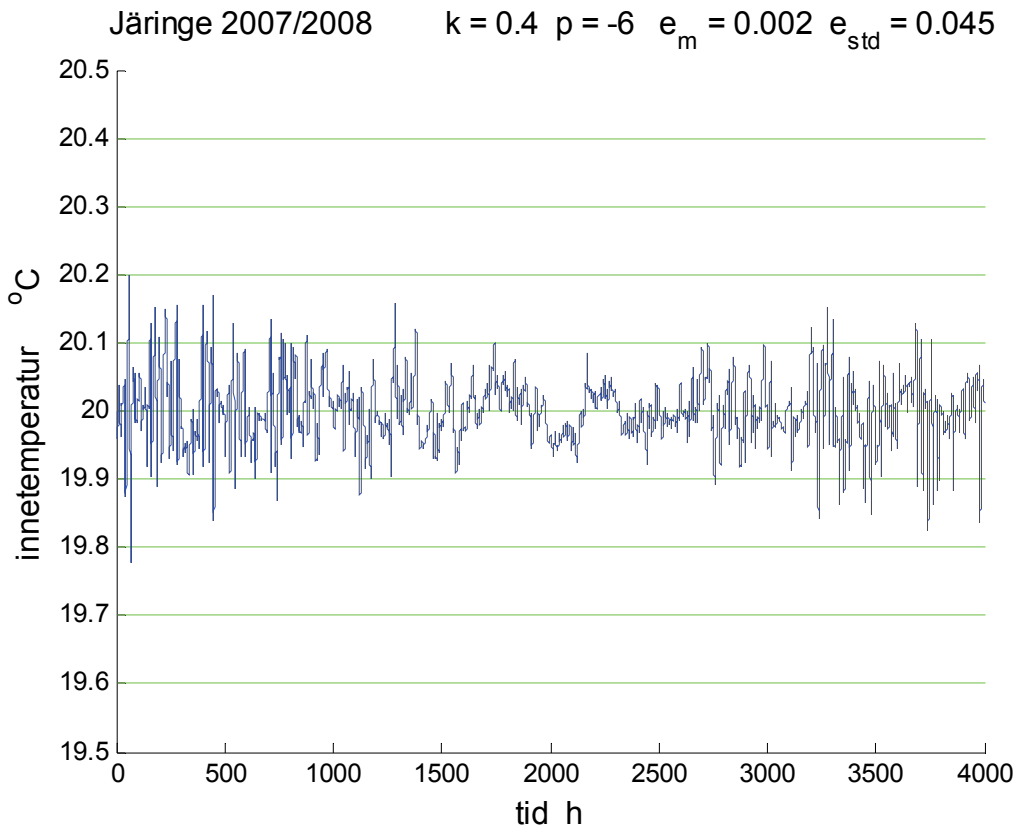
Figur 5.8 Innetemperaturens maximivärde vid tidsviktad framkoppling.



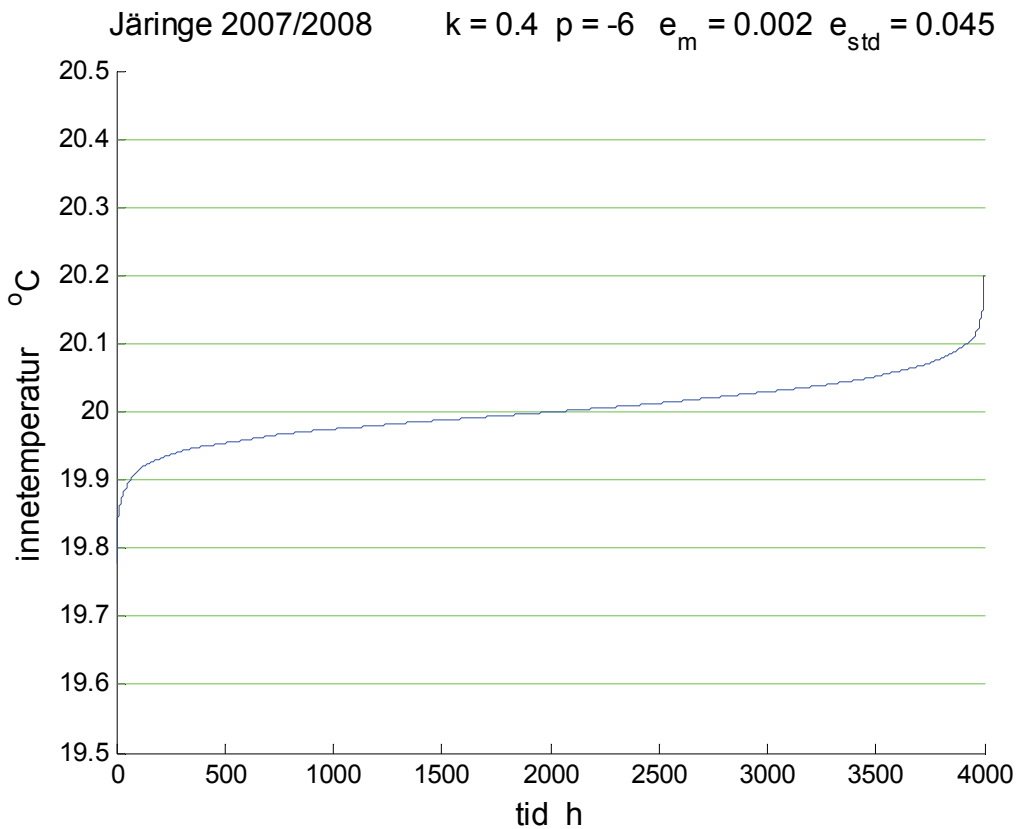
Figur 5.9 Innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=0$ och $p=0$.



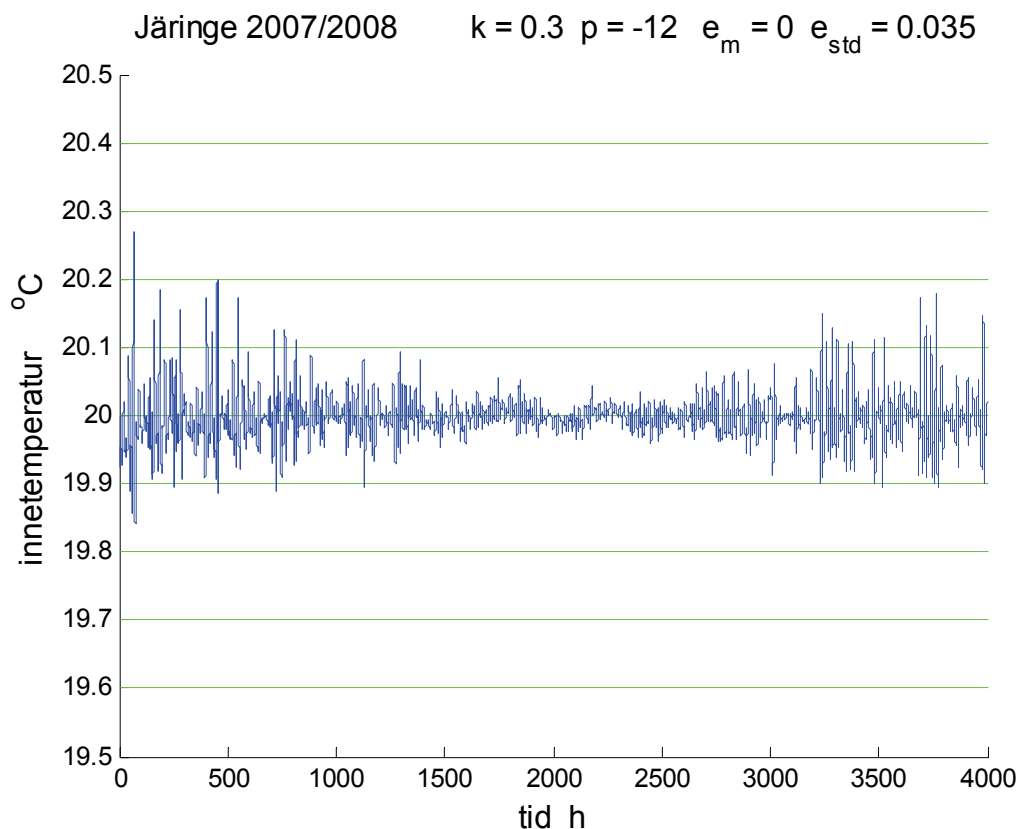
Figur 5.10 Sorterad innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=0$ och $p=0$.



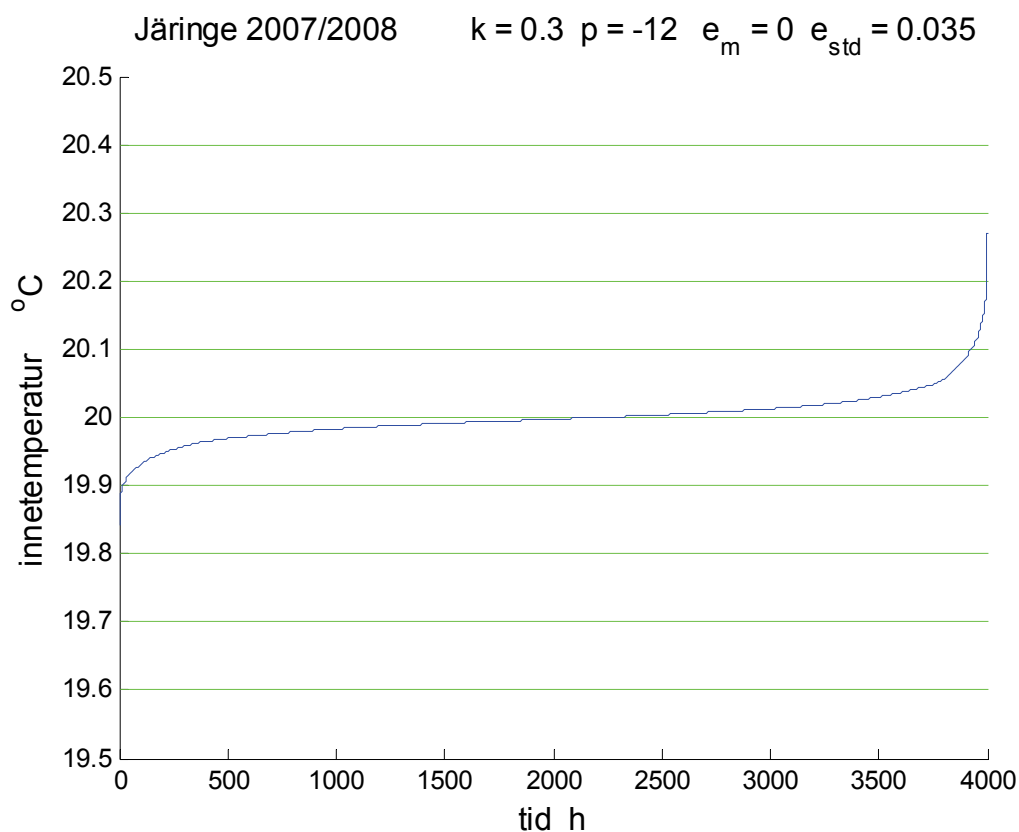
Figur 5.11 Innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=0.4$ och $p=-6$.



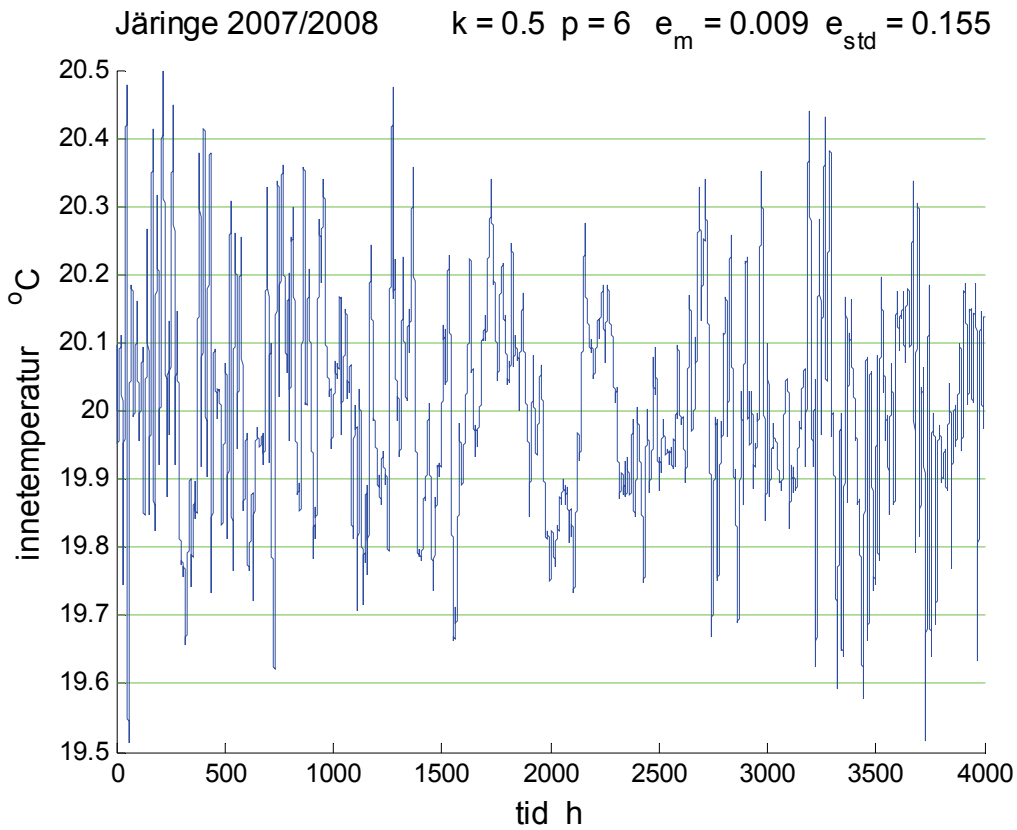
Figur 5.12 Innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=0.4$ och $p=-6$.



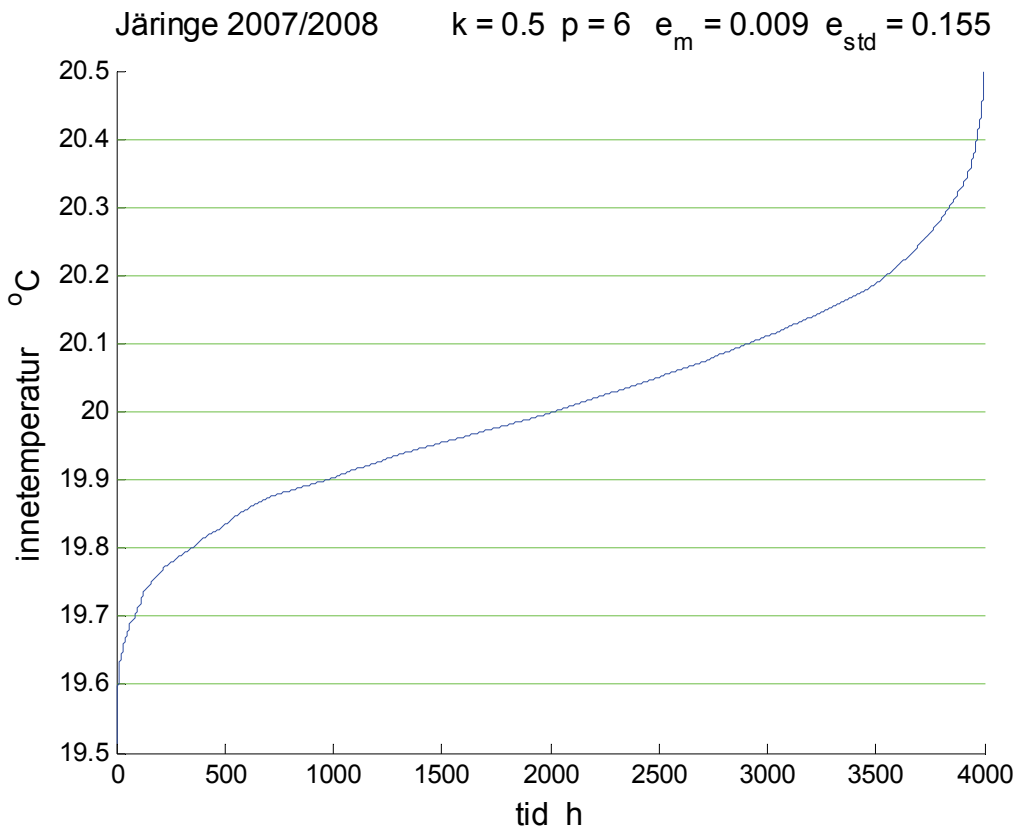
Figur 5.13 Innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=0.3$ och $p=-12$.



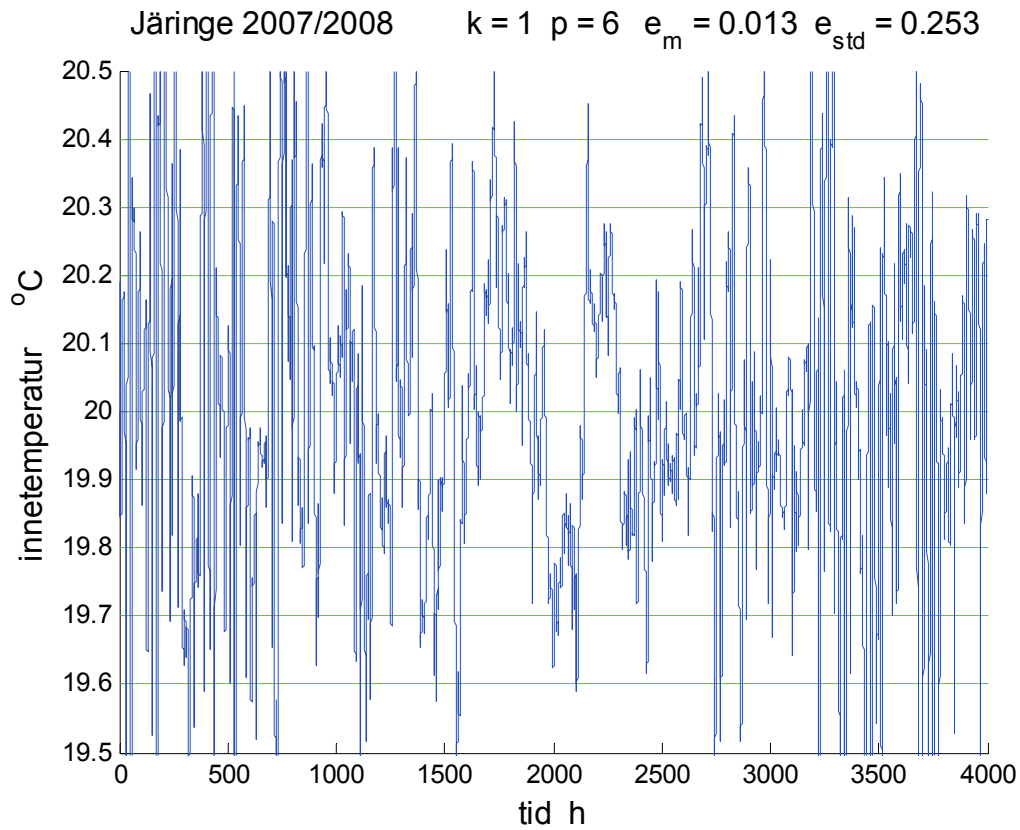
Figur 5.14 Sorterad innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=0.3$ och $p=-12$.



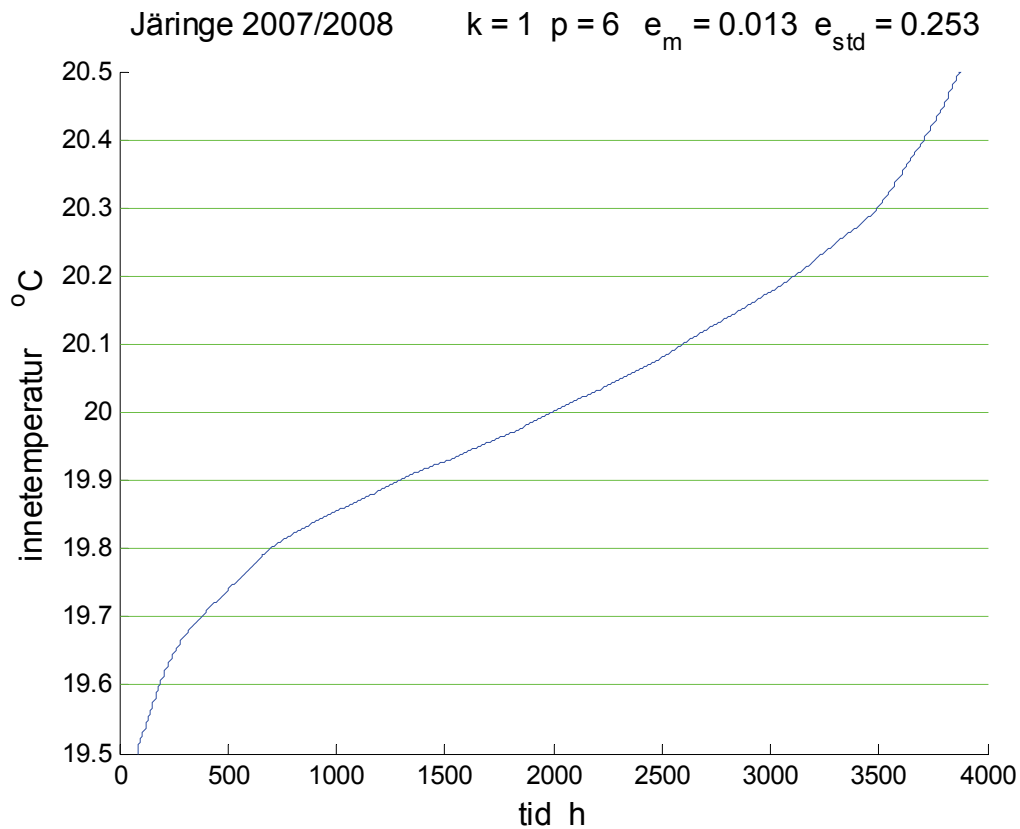
Figur 5.15 Innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=0.5$ och $p=6$.



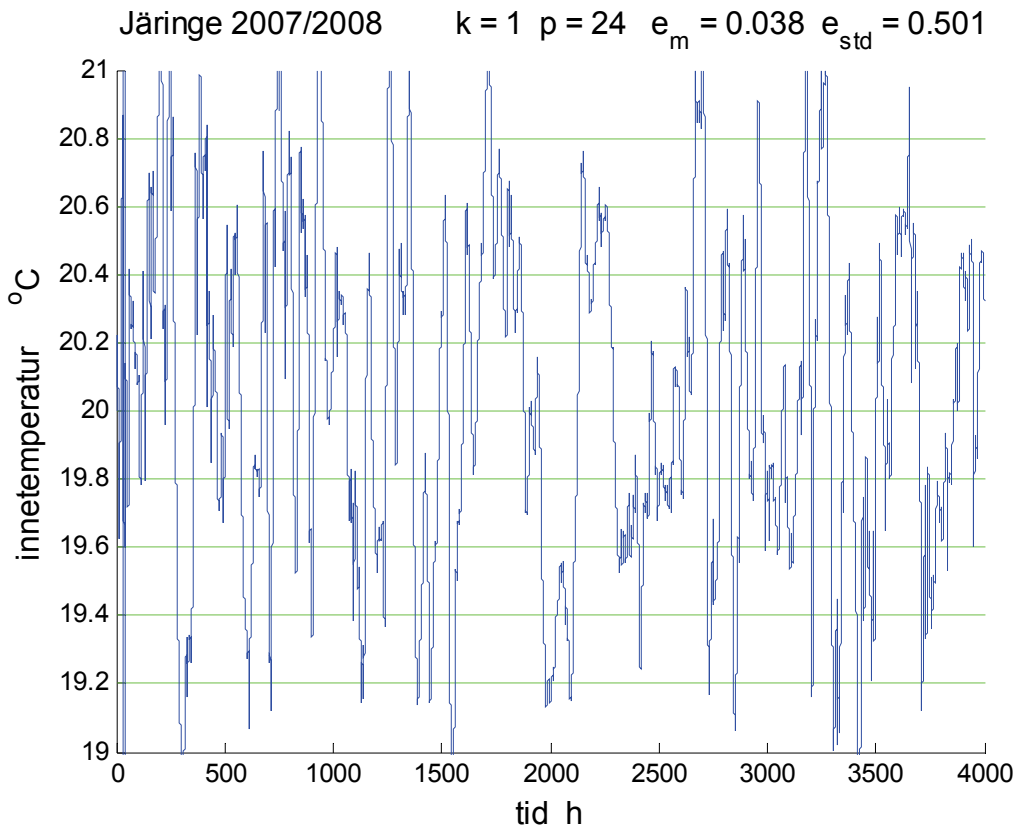
Figur 5.16 Sorterad innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=0.5$ och $p=6$.



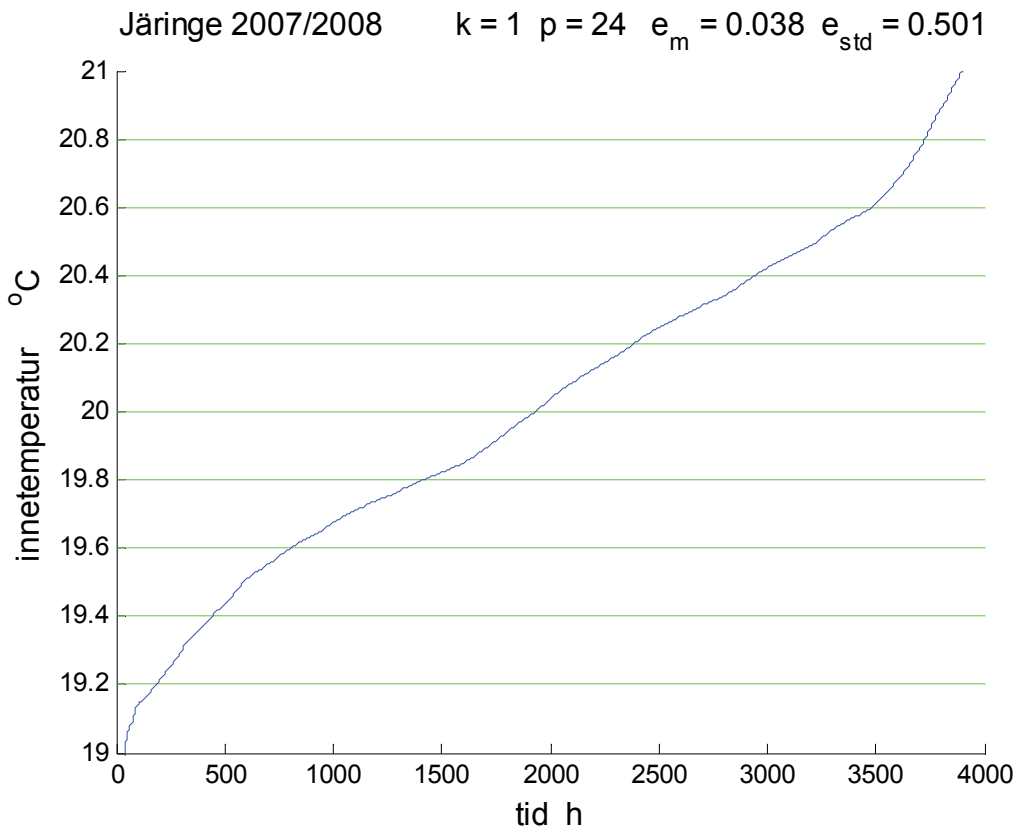
Figur 5.17 Innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=1$ och $p=6$.



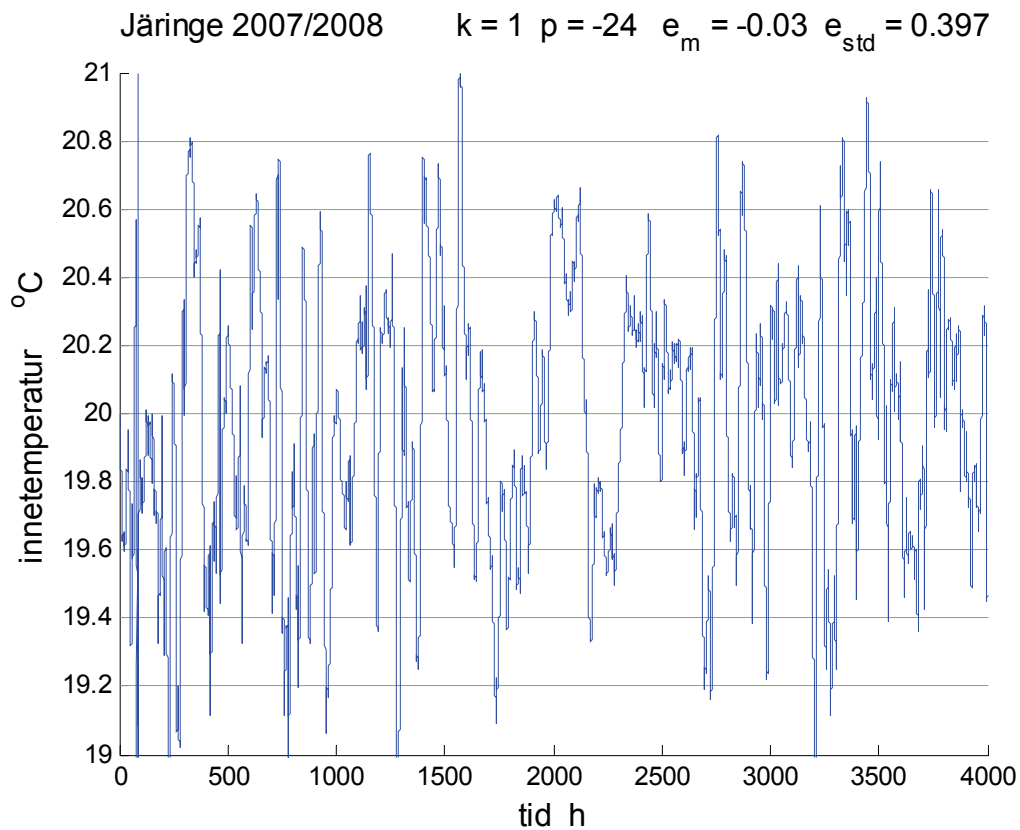
Figur 5.18 Sorterad innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=1$ och $p=6$.



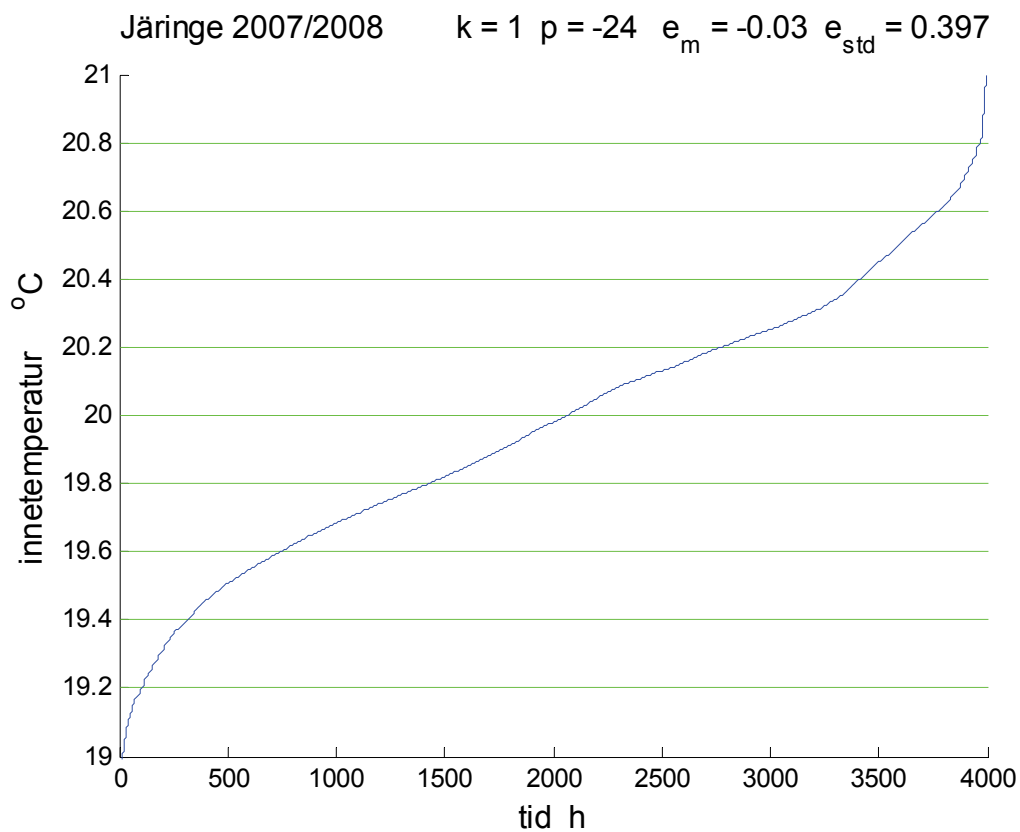
Figur 5.19 Innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=1$ och $p=24$.



Figur 5.20 Sorterad innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=1$ och $p=24$.



Figur 5.21 Innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=1$ och $p=-24$.



Figur 5.22 Sorterad innetemperatur för tidsviktad framkoppling med $k=1$ och $p=-24$.

6 Slutsatser

En enkel dynamisk modell för en byggnad och dess värmesystem har undersökts och simulerats med tre olika framkopplingsätt, vilka har redovisats i avsnitt 3, 4 och 5. I detta avsnitt görs en sammanställning av de viktigaste resultaten för en dygnsperiodisk utetemperatur och för simulering med mätdata.

Syftet med regleringen är att hålla en konstant innetemperatur, men i praktiken gäller det att hålla en innetemperatur över en lägsta tillåten gräns. Brukarna klagar om detta gränsvärde underskrids en viss tid. En bra reglering har små avvikelser kring medelvärdet, vilket gör det möjligt att ligga nära denna lägsta tillåtna innetemperatur och därmed spara värmeenergi.

Resultat för dygnsperiodisk utetemperatur

Alla tidigare reglerats resultat för hur en dygnsperiodisk signal dämpas redovisas i Tabell 6.1 nedan. Fall 1, ingen reglering, har en betydande dämpning. Det återstår endast 0.05 av utetemperaturens variation. Fall 2, statisk framkoppling, har en något bättre dämpning med siffervärdet 0.04. Bäst resultat fås för dynamisk framkoppling, fall 3-5, med en amplitudgång lägre än 0.01. Tidsviktad framkoppling mellan rådande och tidigare utetemperatur, fall 6-7, ger en amplitudgång på 0.02. Tidsviktad framkoppling mellan rådande och framtida utetemperatur, fall 8-9, ger sämre resultat än statisk framkoppling. Den bästa tidsviktade framkopplingen enligt Figur 5.3 är omkring $k = 0.25$ och $p = 15$ h med amplitudgången lägre än 0.02. Samma framkoppling testad på mätdata ger sämre resultat enligt Figur 5.5-8 än statisk framkoppling med $k = 0$ och $p = 0$ h.

Tabell 6.1 Amplitudgång för dygnsperiodisk utetemperatur

fall	framkoppling	amplitudgång	Figur
1	ingen	0.050	2.3
2	statisk	0.040	3.2
3	dynamisk(9 h)	0.008	4.5
4	dynamisk(4.5+4.5 h)	0.003	4.7
5	dynamisk(3+3+3 h)	0.008	4.9
6	tidsviktad(0.4,-6)	0.020	5.4
7	tidsviktad(0.3,-12)	0.020	5.4
8	tidsviktad(0.5,6)	0.055	5.3
9	tidsviktad(1.0,6)	0.110	5.3

Resultat för simulering med mätdata

Alla tidigare redovisade reglerats resultat sammanställs i Tabell 6.2. Medelfelen är genomgående försumbara. Bästa reglerätt är dynamisk framkoppling med ett andra ordningens filter med tidskonstanten 4.5 h för en filterdel, men även ett första och tredje ordningens filter ger bra resultat.

Näst bästa regelsätt är tidsviktad framkoppling mellan rådande och en tidigare utetemperatur, vilket mer än halverar standardavvikelsen jämfört med utgångsfallet med statisk framkoppling. Notera att prognosvikten bakåt är 0.4 och 0.3 enligt fall 6 och 7 i Tabell 6.2. Tidsviktad framkoppling mellan rådande och en framtida utetemperatur ger sämre resultat än statisk framkoppling från endast rådande utetemperatur.

Tabell 6.2 Medelfel och standardfel för olika framkoppling och simulering med mätdata

fall	framkoppling	medelfel °C	standardfel °C	Figur
1	konstant 43.25 °C	0.009	1.574	2.8-9
2	statisk	0.006	0.097	3.7-8
3	dynamisk(9 h)	0.000	0.012	4.5-6
4	dynamisk(4.5+4.5 h)	0.000	0.004	4.7-8
5	dynamisk(3+3+3 h)	0.000	0.011	4.9-10
6	tidsviktad(0.4,-6)	0.002	0.045	5.11-12
7	tidsviktad(0.3,-12)	0.000	0.035	5.13-14
8	tidsviktad(0.5,6)	0.009	0.155	5.15-16
9	tidsviktad(1.0,6)	0.013	0.253	5.17-18

Slutsatser

En viktig anmärkning eller förutsättning är att denna studie har utformats för att särskilt undersöka olika framkopplingar och under de förutsättningar som angavs i avsnitt 1.

Dynamisk framkoppling ger bäst dämpning eller lägsta amplitudgång för en dygnsperiodisk utetemperatur och lägst standardavvikelse för utetemperatur enligt mätdata.

Tidsviktad framkoppling ger bättre resultat än statisk framkoppling för vissa värden på prognosviktning och negativ prognoshorisont. Samma framkoppling med positiv prognoshorisont ger sämre resultat än statisk framkoppling för simulering med mätdata. Amplitudgången är dock för vissa värden på prognosviktning och positiv prognoshorisont bättre.

Huvudslutsatsen är att dynamisk framkoppling med ett andra ordningens filter är bäst, eftersom filtret kan utformas att kompensera för byggnadens dynamik i förhållande till värmesystemets dynamik med avseende på utetemperaturen. Detta går alltid att genomföra om värmesystemets dynamik är snabbare än byggnadens dynamik, vilket troligen inte gäller för av golvvärmesystem.

Det dynamiskt filter är enkelt att programmera. Filtrets tidskonstant anpassas efter dynamiken för fasader, golv och tak med avseende på utetemperaturen. Uppdelning i en direkt och en filterad del motsvaras av värmebehovet för ventilation och fönster gentemot det övriga värmebehovet för fasader, golv och tak. Filtrets tillstånd anpassas vid uppstart alltid till rådande utetemperatur.

Bilaga A Definition av en dynamisk modell

Matlab används för beräkningarna och här återges de delar av datorprogrammet som definierar den dynamiska modellen. Modellens tillstånd ges av vektorn x och dess tidsderivata av vektorn dx . Modellens insignaler är rådande utetemperaturändring $^{\circ}\text{C}/\text{h}$, önskad innetemperatur och tidsförskjuten utetemperaturändring $^{\circ}\text{C}/\text{h}$. Utetemperaturen är linjär i tiden mellan timvärdena. Modellen definieras av två matriserna A och B och en vektor C . Beräkningsmodellen visas nedan:

```
dx=(A*x+B*[ dTu(t) Tir dTu(t+p) ]')./C;
```

Bestämning av modellparametrar

```
kF=1;      kP=0;      kI=0;      % framkoppling och återkoppling P-del och I-del
Ti=20;     Tus=0;     % starttemperatur inne och ute
Tc=0.1;    Tr=0.1;    % tidskonstant h rörsystem och radiator
nf=3;      Tf=3;      % filterordningstal och tidskonstant h
hi=8;      hy=20;     hr=10;    % övergångstal för ytor inre, yttre och värmare

Aa=1.00;   ha=2.400;           ra=1.2;   ca=1000;   % luftvolym
Af=0.15;   df=0.008;   Uf=2.000;   rf=2500;   cf=800;    % fönster 4+4 mm
Av=0.60;   dv=0.200;   lv=0.220;   rv=800;    cv=960;    % vägg 200 mm
Ab=2.00;   db=0.100;   lb=1.400;   rb=2200;   cb=960;    % bjälklag 200/2 mm
Ar=0.05;   dr=0.010;           rr=1000;   cr=4190;   % radiator

Ci=Aa*ha*ra*ca/3600;           % Wh/K luft 2.4 m^3
Cf=Af*(df/2)*rf*cf/3600;       % Wh/K fönster 4+4 mm
Cv=Av*(dv/2)*rv*cv/3600;       % Wh/K fasad 100+100 mm
Cb=Ab*(db/2)*rb*cb/3600;       % Wh/K bjälklag 50+50 mm
Cr=Ar*dr*rr*cr/3600;           % Wh/K radiator

rcq=ra*ca*0.00035;             % W/K 0.35 l/sm^2 ventilation
Qfy=Af*hy;                      % W/K fönster
Qfi=Af*hi;                      % W/K
Qf=Af/(1/Uf-1/hi-1/hy);         % W/K
UAf=Af*Uf;                      % W/K
Tfy=Tus+UAf*(Ti-Tus)/Qfy;       % ^oC
Tfi=Ti-UAf*(Ti-Tus)/Qfi;       % ^oC

Qvy=Av*(1/(1/hy+(dv/4)/lv));    % W/K vägg
Qvi=Av*(1/(1/hi+(dv/4)/lv));    % W/K
Qv=Av*lv/(dv/2);               % W/K
UAv=Av*(1/(1/hi+dv/lv+1/hy));   % W/K
Tvy=Tus+UAv*(Ti-Tus)/Qvy;      % ^oC
Tvi=Ti-UAv*(Ti-Tus)/Qvi;       % ^oC

Qbi=Ab*(1/(1/hi+(db/4)/lb));    % W/K bjälklag
Qb=Ab*lb/(db/2);               % W/K

Qr=2*Ar*hr;                     % W/K radiatoryta
Qq=Cr/Tr;                       % W/K radiatorflöde
```


Bestämning av framkoppling

```
% P=(rcq+Uaf+UAv)*(Ti-Tu)=Qr*(Tr-Ti) statisk framkoppling

a=- (rcq+Uaf+UAv)/Qr;
ac=a*(1+Qr/Qq);
fac=kF*ac;

f=UAv/(rcq+Uaf+UAv); % f=0; inget filter

if p==0    dac=kF*ac;      pac=0;          rac=kF*(1-ac);
else      dac=(1-k)*ac;   pac=k*ac;      rac=1-ac;      end;
          dac=(1-f)*dac;  pac=(1-f)*pac;

fac=f*ac;
if nf==1  f1=fac;  else  f1=0;  end;
if nf==2  f2=fac;  else  f2=0;  end;
if nf==3  f3=fac;  else  f3=0;  end;

bb=rac-kP;

Trs=a*Tus+(1-a)*Ti;          % starttillstånd radiator
Tfs=ac*Tus+(1-ac)*Ti;      % starttillstånd framledning
```

Definition av matriserna A och B och vektorn C samt starttillstånd xs

```
A=[ 0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0; % uteluft
    rcq  0  0  Qfi  0  Qvi  0  Qbi  Qr  0  0  0  0  0  0; % inneluft
    Qfy  0  0  Qf  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0; % fönster yttre
    0  Qfi  Qf  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0; % fönster inre
    Qvy  0  0  0  0  Qv  0  0  0  0  0  0  0  0  0; % fasad yttre
    0  Qvi  0  0  Qv  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0; % fasad inre
    0  0  0  0  0  0  0  Qb  0  0  0  0  0  0  0; % bjälklag
    0  Qbi  0  0  0  0  Qb  0  0  0  0  0  0  0  0; % bjälklag inre
    0  Qr  0  0  0  0  0  0  0  Qq  0  0  0  0  0; % radiator
    dac  kP  0  0  0  0  0  0  0  0  -1  kI  pac  f3  f2  f1; % regulatorutsignal

    0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0; % felintegral
    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0; % uteluft prognos
    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  -1  1  0; % uteluft filter
    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  -1  1; % uteluft filter
    1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  -1]; % uteluft filter

B=[ 1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0; % dTu
    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  bb  -1  0  0  0  0; % Ti
    0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0]; % dTu prognos

C=[ 1  Ci  Cf  Cf  Cv  Cv  Cb  Cb  Cr  Tc  1  1  Tf  Tf  Tf ]'; % Wh/K

for id=2:9  A(id,id)=-sum(A(id,:));  end; % bildar A-diagonal

xs=[ Tus  Ti  Tfy  Tfi  Tvy  Tvi  Ti  Ti  Trs  Tfs  0  Tusp  Tus  Tus  Tus ]';
```