

PÅLKOMMISSIONEN
Tekniskt PM 1:2014

Belastningsförsök Bergeforsen

**En studie av hur staglastökning
orsakad av yttre last påverkas av
förspänning av stagen**

Utförd av

Viveca Arvidsson

Granskad av

Anders Fredriksson

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Allmänt	3
Bakgrund	3
Spont i övre fångdamm, Bergeforsen	3
Metod	5
Belastningsprov	6
Allmänt	6
Försök 1: Olastade dumprar	6
Försök 2: Lastade dumprar 1	7
Försök 3: Lastade dumprar 2	7
Uppmätta stagkrafter	8
Jämförande beräkningar	10
Vilken utbredd last motsvarar dumprarna	10
Inverkan av förspänningen	12
Jämförelse med analytisk beräkning	16
Slutsats	17

Bilagor

Bilaga 1	Diagram stagkraftsvariation vid belastningsförsök 1
Bilaga 2	Diagram stagkraftsvariation vid belastningsförsök 2
Bilaga 3	Diagram stagkraftsvariation vid belastningsförsök 3

1 Allmänt

1.1 Bakgrund

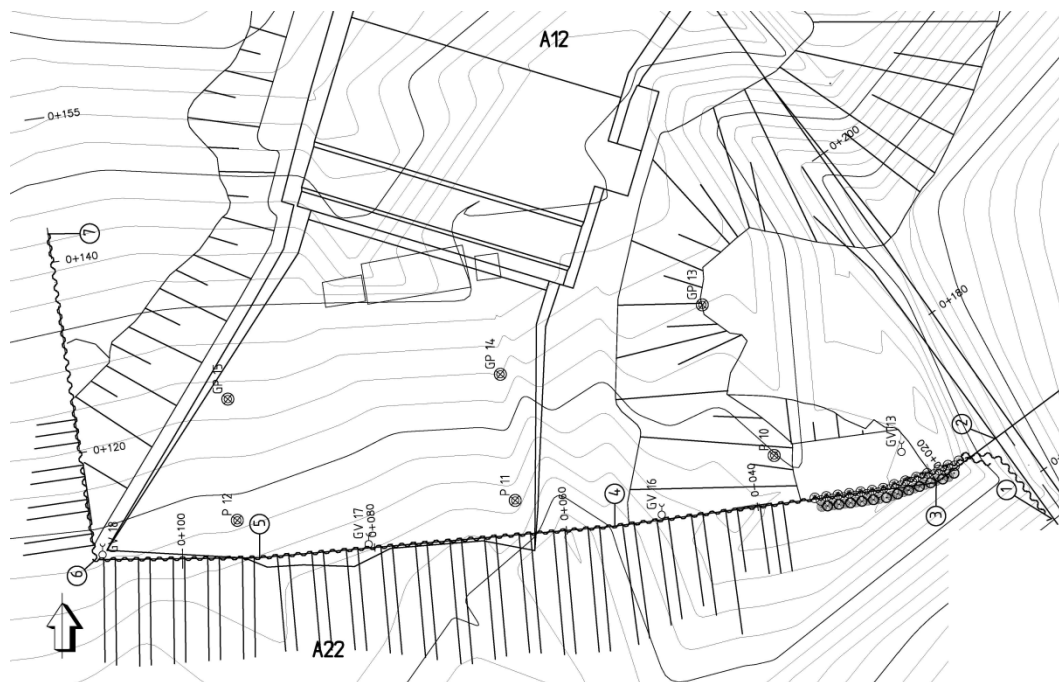
Införandet av Eurokoden och Trafikverkets publicering av TK Geo 2009 medförde att spårnära sponter ska dimensioneras för tåglast 2 istället för tåglast 1 som tidigare. Tåglast 1 är en kontinuerlig last med intensiteten 44 kPa och Tåglast 2 har intensiteten 96 kPa på en sträcka av 6,4 m (STAX 25, totalsäkerhetsanalys). Det innebär en ökning av tåglasten med 52 kPa och är en betydande lastökning som inte känns befogad. Bakgrunden till lastökningen är att belastningsbestämmelserna ska vara lika i hela Europa.

Stagkraftsmätningar från sponter visar mycket sällan på några avvikelser från förspänningslasten. Normalt ligger förspänningslasten på ca 30 till 50 % av stagets brottlast.

Genom att göra ett belastningsprov på en befintlig spont vill vi undersöka hur en trafiklast med olika intensitet och varaktighet påverkar stagkrafterna.

1.2 Spont i övre fångdamm, Bergeforsen

I samband med byggnationen av ett nytt utskov vid Bergeforsens kraftverk är en fångdamm utförd med en tätande spont i den centrala delen.

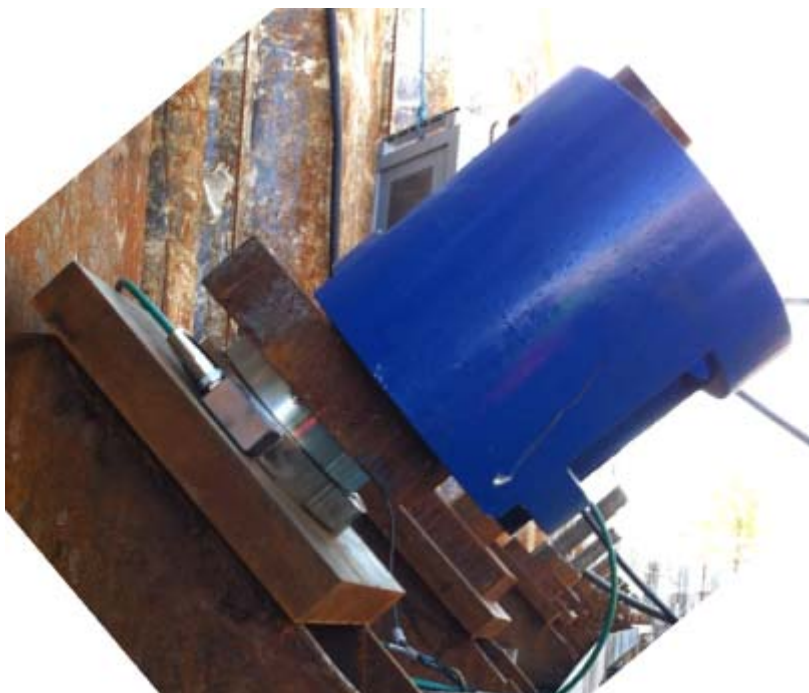


Figur 1. Plan över spont i fångdamm i Bergeforsen. Det nya utskovet med sin energiomvandlare ligger norr om sponten. Efter installation av sponten har delar av fångdammen schaktats bort på nedströmssidan för att bygga det nya utskovet med sina ledmurar. Sponten installerades under hösten 2011 och slutlig schakt till schaktbotten utfördes under våren 2013. Största schaktdjup är ca 12,5 m och antalet hammarband varierar mellan 1 till 4 st.



Figur 2. Bild på spont i fångdamm i Bergeforsen. Bild tagen från vänster ledmur

Vid Pkt 4 sitter 4 st stagkraftsgivare, en på respektive hammarbandsnivå. Stagkraftsmätningarna utförs av Teroc AB och under byggtiden har mätdata redovisats 3 gånger per dag på Terocs webbportal. Systemet har samlat in värden var 5 minut och sparat det högsta, det lägsta samt medelvärde inom varje timme. Var åttonde timme har dessa värden skickats till webbportalen. Vid behov kan både mätningar och redovisning förtätas. Lufttemperaturen mäts också intill sponten på nedströmssidan.



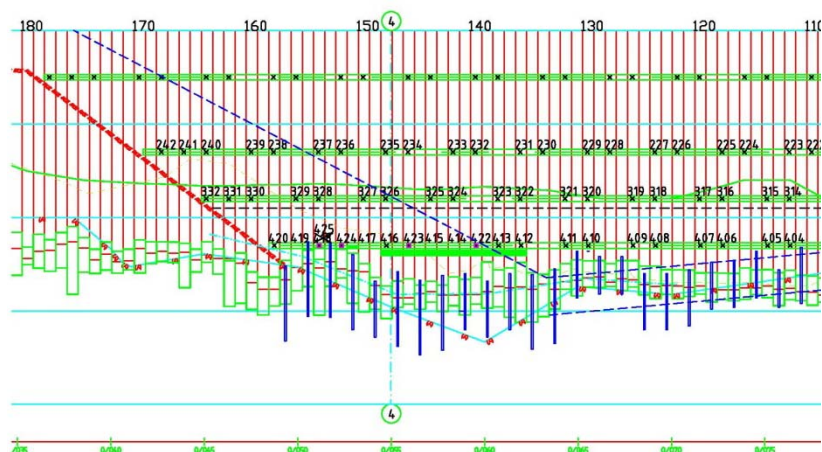
Figur 3. Bild på stagkraftsgivare i punkt 4 på hammarbandsnivå 1

Sponten är dimensionerad enligt BKR för jordtryck, vattentryck samt en jämt utbredd överlast på 15 kPa som verkar på en 3 m bred strimla precis intill sponten. Stagen är förspända till 320 kN på hammarbandsnivå 1 och 2 samt till 720 kN på hammarbandsnivå 3 och 4. Det motsvarar ca 30 % av stagens brottlast och ca 40 - 90 % av brukslasten.

1.3 Metod

Försöken utfördes över 3 helger mellan 2013-09-05 Och 2013-09-23.

De två första helgerna fanns det tillgång till 1 st A35D dumper samt en A25C dumper på arbetsplatsen. Sista helgen fanns två st A35 dumpers att tillgå. En fullastad A35 dumper väger ca 70 ton och motsvarande A25 väger ca 50 ton fullastad. Markytan är plan ca 15 till 20 m från sponten men där går en transportväg som inte kan blockeras under dagtid. Dumprarna placeras intill sponten över helgen från torsdag eftermiddag till måndag morgon. Läget för parkerade dumprar mäts in i förhållande till spontplanka 148 och tidpunkterna för när dumprarna parkeras samt körs bort noteras. Till att börja med enbart med olastade dumprar parallellt med sponten därefter med fullastade dumprar. De olika lastkonstellationerna representerar ytlaster på ca 11 kPa, 21 kPa respektive 42 kPa baserat på boggitycken.



Figur 4. Spontelelevation vid pkt 4. Nummer ovanför sponten avser spontplanka

Stagkraftsgivarna på hammarbandsnivå 1 är placerade i plank 146 till höger om pkt 4. Stagkraftsgivarna på hammarbandsnivå 2, 3 och 4 är placerad i spontplanka 148, se ovanstående figur.

Mät noggrannheten för stagkraftsgivarna ligger på 0,5 % av mätområdet. Maxlaster för respektive stagkraftsgivare framgår av nedanstående tabell.

Stagkraftsgivare	Max last	Mät noggrannhet
Stagkraftsgivare HB-nivå 1	1000 kN	$< 0,005 \times 1000 = 5,0$ kN
Stagkraftsgivare HB-nivå 2	1500 kN	$< 0,005 \times 1500 = 7,5$ kN
Stagkraftsgivare HB-nivå 3	1500 kN	$< 0,005 \times 1500 = 7,5$ kN
Stagkraftsgivare HB-nivå 4	1800 kN	$< 0,005 \times 1500 = 9,0$ kN

Marknivån ovan sponten ligger på +125, vattennivån i magasinet ligger på nivå +123, hammarbandsnivåerna ligger på nivå +122,5, +118,5 +116 samt +113,5 och slutligen så ligger lägsta schaktbotten +111,5.

Under den första helgen samlades mätdata in var femte minut och sparat högsta, lägsta samt medelvärde inom varje timme. Var åttonde timme har dessa värden skickats till webbportalen. Under de två sista helgerna samlades mätdata in varje minut och sparades.

2 Belastningsprov

2.1 Allmänt

Belastningsproven utfördes av Lemminkäinen AB och Härnösands Schakt och Trädgårdsanläggningar AB. Som last användes Volvo A25 och Volvo A35 dumptrar. Alla dumptrarna har förhöjd korg, vilket gör att det är svårt att uppskatta dumptrarnas totallast exakt. Nedan återfinns en sammanställning över mått och axeltryck för de olika dumptrarna. Uppgifterna på totallast och boggilast kommer från Härnösands Schakt och Trädgårdsanläggningar. I övrigt kommer data från Volvos produktionskataloger

Typ	Total-last	Last axel	Last boggi	Bredd	Total längd	Mått till/mellan hjulaxlar	Utbredd last
A25 olastad	220 kN	125 kN	95 kN	2,9 m	10,3 m	2,8+4,2+1,7+1,6	7,4 kN/m ²
A25 lastad	500 kN	145 kN	355 kN	2,9 m	10,3 m	2,8+4,2+1,7+1,6	16,7 kN/m ²
A35 olastad	290 kN	157 kN	134 kN	3,2 m	10,75 m	3,1+4,6+1,8+1,7	8,4 kN/m ²
A35 lastad	700 kN	187 kN	555 kN	3,2 m	10,75 m	3,1+4,6+1,8+1,7	20,3 kN/m ²

2.2 Försök 1: Olastade dumptrar

Torsdagen den 5 september, klockan 16:45, ställdes de olastade dumptrarna parallellt med spanten. A25 dumpern ställdes med fören mot öster och A35 dumpern med fören mot väster. A25:ans bakre boggiaxel placerades i linje med spantplanka 148. Avstånd mellan dumptrar och spant mättes upp till ca 2 m. Dumptrarna stod parkerade över helgen och klockan 06:00 kördes A25 bort och klockan ca 10:30 kördes A35 bort. I bilaga 1 återfinns diagram som visar mätningar av stagkrafterna.



Figur 4. Olastade dumptrar uppställda intill spanten, A25 till vänster och A35 till höger. Till höger syns början på höger ledmur.

2.3 Försök 2: Lastade dumprar 1

Torsdagen den 12 september, ca 16:30, ställdes de lastade dumprarna parallellt med sponten A35 dumpern ställdes med fören mot öster längst till höger och A25 dumpern med fören mot öster direkt bakom A35. A35:ans bakre boggiaxel placerades i linje med spontplanka 144. Avstånd mellan dumprar och spont mättes upp till ca 1,5 m. Dumprarna stod parkerade över helgen och klockan 05:20 på måndag morgon kördes dumprarna bort. I bilaga 2 återfinns diagram som visar mätningar av stagkrafterna.



Figur 5. Lastade dumprar uppställda intill sponten, A25 till vänster och A35 till höger.

2.4 Försök 3: Lastade dumprar 2

Torsdagen den 19 september klockan 16:27 placerades en A35C dumper till höger om stagkraftsgivarna. Klockan 16:45 placerades en A35 D till vänster om stagkraftsgivarna. Dumprarna placerades med boggiaxlarna mot varandra och ca 2 m från sponten. Dumprarna kördes bort klockan 6:06 respektive 6:18 måndagen den 23 september. Klockan 5:55 på måndag morgon larvade en Cartepillar 329 grävmaskin förbi utanför parkerade dumprar. Arbetsvikten för en 329 är 32 ton. I bilaga 3 återfinns diagram som visar mätningar av stagkrafterna.



Figur 6. Lastade dumprar uppställda intill sponten, 2 st A35-or.

3 Uppmätta stagkrafter

Baserat på mätningar så ökade stagkrafterna enligt nedanstående tabell vid pålastning:

Belastning	Ökning av staglast på HB-nivå 1	Ökning av staglast på HB-nivå 2	Ökning av staglast på HB-nivå 3	Ökning av staglast på HB-nivå 4
Försök 1: Olastade dumprar	2,9 kN	0,9 kN	0,5 kN	-
Försök 2: Lastade dumprar A25 + A35	13,9 kN	3,0 kN	2,0 kN	0,5 kN
Försök 3: Lastade dumprar 2 st A35	15,3 kN	5,4 kN	3,0 kN	0,9 kN

Det är värt att notera att det endast är stagkraftsökningarna på HB-nivå 1 för försök 2 och 3 som överskrider stagkraftsgivarnas mätnoggrannhet. Nedan redovisas tabellens resultat i ett stapeldiagram.

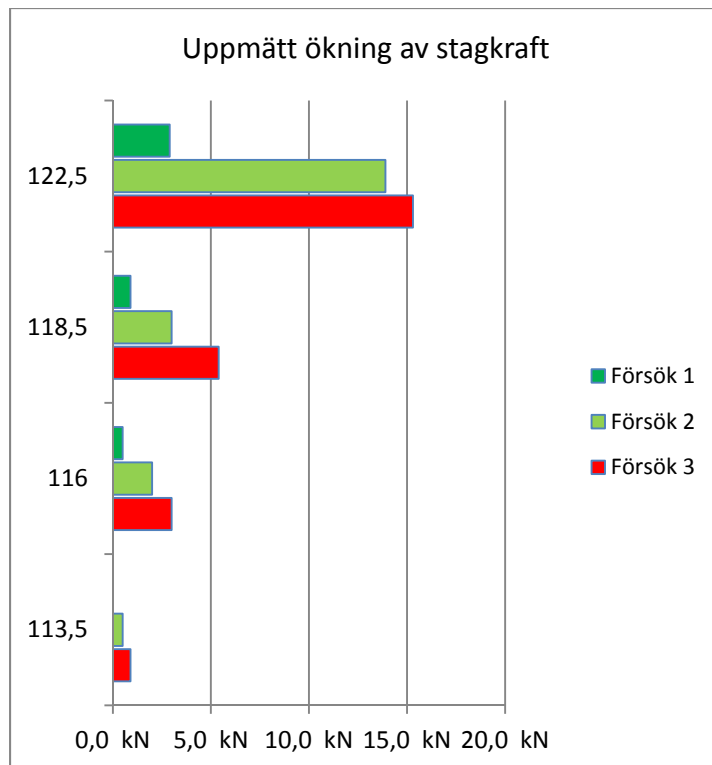


Diagram 1. Uppmätt ökning av stagkrafter på de olika hammarbandsnivåerna för de olika försöken.

Ökningen är som störst på den översta hammarbandsnivån och avtar sedan för varje nivå. Relationen mellan stagkraftsökningen för varje nivå i förhållande till nivå 1 var ca 30% på nivå 2, ca 17% på nivå 3 och 5% på nivå 4.

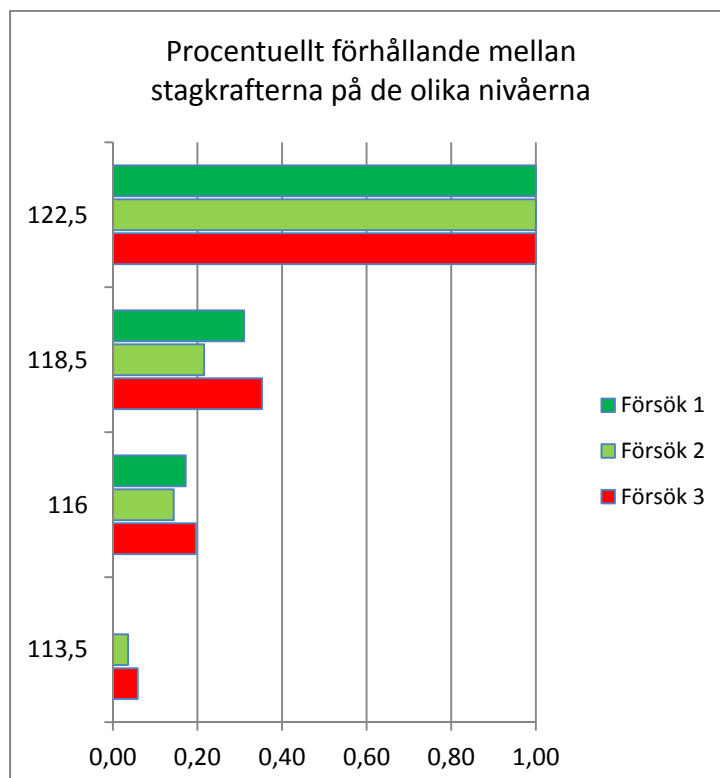


Diagram 2. Procentuellt förhållande mellan stagkraftsökningen på respektive nivå i relation till HB-nivå 1.

En jämförelse av relationen mellan stagkraftsökningen på varje nivå mellan de olika försöken ger att försök 1 motsvara ca 20% av lastökningen för försök 3 samt att försök 2 motsvara ca 90% på nivå 1 och ca 60% av försök 3 på övriga nivåer.

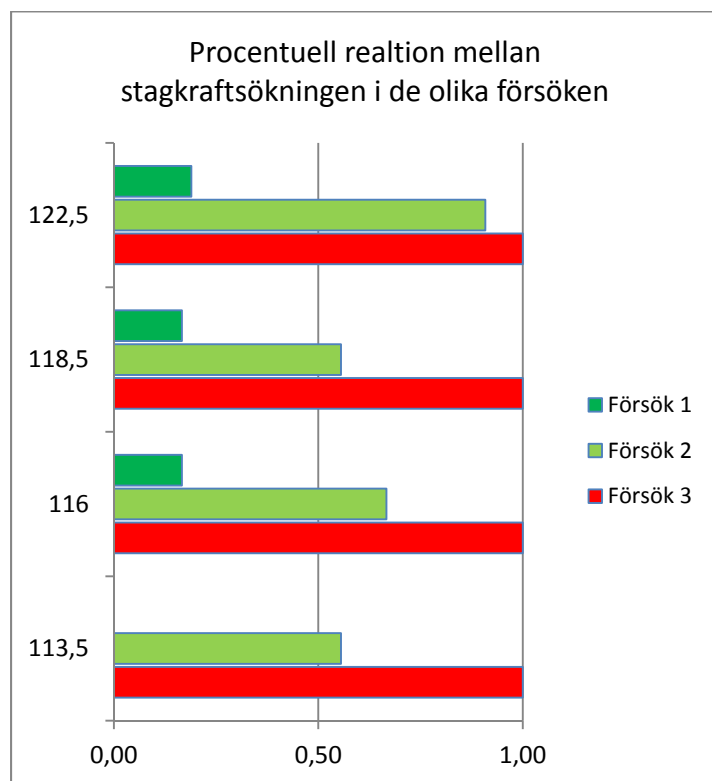


Diagram 3. Procentuellt förhållande mellan stagkraftsökningen för de olika försöken i relation till försök 3.

Vid avlastning så minskade stagkrafterna enligt nedan.

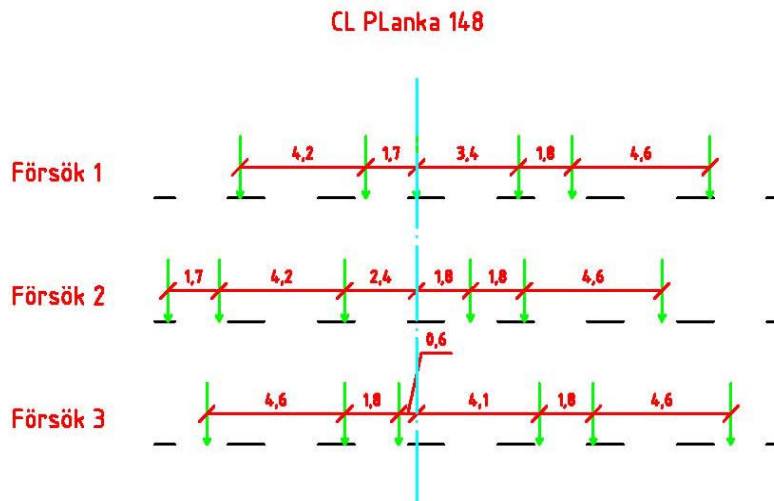
Belastning	Minskning av staglast på nivå 1	Minskning av staglast på nivå 2	Minskning av staglast på nivå 3	Minskning av staglast på nivå 4
Olastade dumprar	-	-	-	-
Lastade dumprar A25 + A35	-8 kN	-2,1 kN	-1,7 kN	-0,5 kN
Lastade dumprar 2 st A35	-9,6 kN	-4,3 kN	-3,0 kN	-1,0 kN

Värdena från avlastningen är mindre än från pålastningen och det tyder på att sponten har fått en kvarstående deformation.

4 Jämförande beräkningar

4.1 Vilken utbredd last motsvarar dumprarna

Tre olika lastkonstellationer ställdes upp intill sponten med respektive 510/1200/1400 kN i totallast men vilken utbredd last kan man anta att dessa motsvarar. Placeringen av axeltrycken framgår av nedanstående figur.



Figur 7. Placering av hjulaxlarna i de olika försöken.

Två olika fall har studerats:

Fall 1: Axeltrycken närmast planka 148 har beaktats, för försök 1 och 3 är det två boggitryck och för försök 2 är det ett boggitryck och ett axeltryck.

Försök	Last	Längd	Bredd	q	
Försök 1	230 kN	$1,7 + 3,4 + 1,8 = 6,9 \text{ m}$	3,05 m	$q_1 = 11 \text{ kN/m}^2$	$q_1/q_3 = 26\%$
Försök 2	655 kN	$4,2 + 1,8 = 6,0 \text{ m}$	3,05 m	$q_2 = 21 \text{ kN/m}^2$	$q_2/q_3 = 51\%$
Försök 3	1020 kN	$1,8 + 4,1 + 1,8 = 7,7 \text{ m}$	3,2 m	$q_3 = 42 \text{ kN/m}^2$	

Fall 2: Den totala vikten av dumprarna fördelas jämnt över den yta som dumprarna totalt täcker.

Försök	Last	Längd	Bredd	q	
Försök 1	510 kN	$10,3 + 10,8 = 21,1 \text{ m}$	3,05 m	$q_1 = 11 \text{ kN/m}^2$	$q_1/q_3 = 39\%$
Försök 2	1200 kN	$10,3 + 10,8 = 21,1 \text{ m}$	3,05 m	$q_2 = 18,5 \text{ kN/m}^2$	$q_2/q_3 = 91\%$
Försök 3	1400 kN	$10,8 + 10,8 = 21,6 \text{ m}$	3,2 m	$q_3 = 20,3 \text{ kN/m}^2$	

Baserat på resultatet av stagkraftsmätningarna så vet vi att ökningen av stagkrafter för försök 1 var ca 20% av ökningen för försök 3 samt att för försök 2 var motsvarande relation ca 90% för den översta hammarbandsnivån (se diagram 1). Med den bakgrunden verkar Fall 2 stämma bäst med stagkraftsmätningarna.

En Plaxis-beräkning har utförts för lastintensiteten 20 kPa. Baserat på den beräkningen erhålls en stagkraftsökning på 19,6 kN, 12,4 kN, 7,0 kN och 8,3 kN på de respektive nivåerna. Vilket är i ungefär samma storleksordning som uppmätta stagkraftsökningar, se diagram 5.

4.2 Inverkan av förspänningen

Enligt sponthandboken beror lasttillskottet av en tillfällig överlast i stor utsträckning på graden av förspänning av stagen. Där redovisas en principiell figur på hur lasttillskottet varierar med kvoten mellan förspänningen och det aktiva jordtrycket ($Q_{\text{tot,pr}}/P_a$).

Plaxis-beräkningar har utförts med ytlasten 20 kPa för 5 olika nivåer på förspänning. En beräkning är gjord utan förspänning för att få det aktiva jordtrycket. Övriga beräkningar utgår från utförd förspänning med olika multiplar av den. En beräkning är utförd för utförd förspänning (FSP) och resterande beräkningar är gjorda med ¼-del, hälften respektive 1,5 gånger utförd förspänning. Resultatet av beräkningarna redovisas i diagram 4.

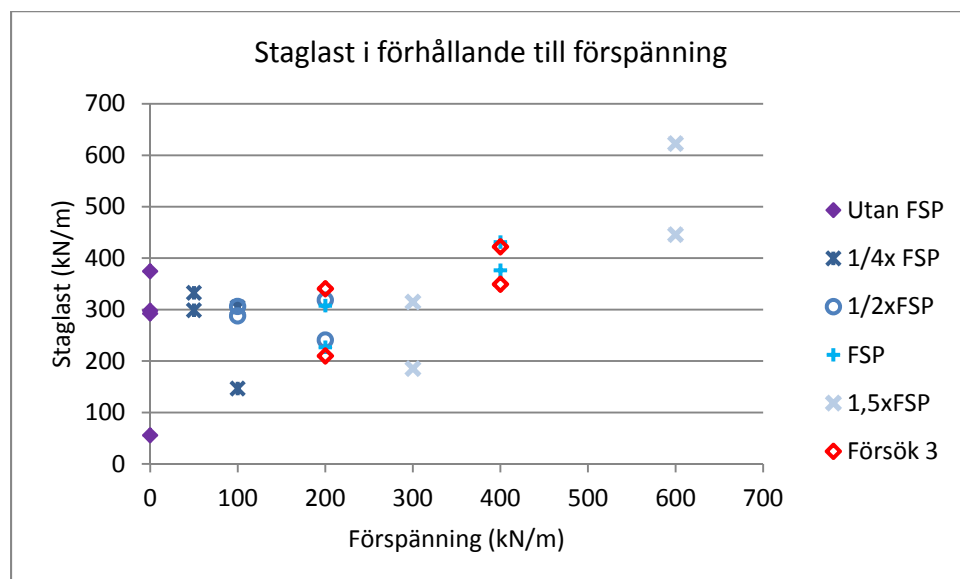


Diagram 4. Beräknad staglast för olika förspänningslaster samt uppmätt staglast.

Av diagrammet framgår att uppmätta stagkrafter från försök 3 och beräknade stagkrafter stämmer väl överens.

För att se hur förspänningen påverkar lastökningen har lastökningen beräknats för varje förspänningsfall och lagts in i ett diagram med den uppmätta lastökningen för försök 3, se diagram 5. Av diagrammet framgår att lastökningen ökar med ökad förspänning på hammarbandsnivå 1, men minskar på övriga hammarbandsnivåer.

För att få ett liknande diagram som i sponthandboken så har förspänningslasten gjorts dimensionslös genom att dividera med staglaster beräknade för det enbart jordtryck (P_a), se diagram 6. Diagrammet avser summan av krafterna på alla stagnivåer. I diagrammet redovisas också uppmätta staglaster för försök 3. Beräknad lastökning i förhållande till kvoten mellan förspänningen och aktivt jordtryck stämmer bra överens med den principiella figuren på sidan 23 i sponthandboken.

Motsvarande diagram för de enskilda hammarbandsnivåerna visar på en lastökning för den övre hammarbandsnivå och lastminskning för de övriga hammarbandsnivåerna, se diagram 7 till 10. Där framgår att förspänningsgraden (dvs kvoten $Q_{\text{tot,pr}}/P_a$) varierar mellan de olika hammarbandsnivåerna. I diagram 11 redovisas en jämförelse mellan beräknad stagkraftsökning för utförd förspänning och stagkrafter beräknade med enbart jordtryck (P_a). Den procentuella förändringen är ca 40 % på hammarbandsnivå 2, 3 och 4, dvs en rejäl minskning. På hammarbandsnivå 1 så ökar istället lasten med över 210 %. Detta ska jämföras med de uppmätta förändringarna som är ca 15 % för hammarbandsnivå 2, 3 och 4 och ca 170 % på nivå 1.

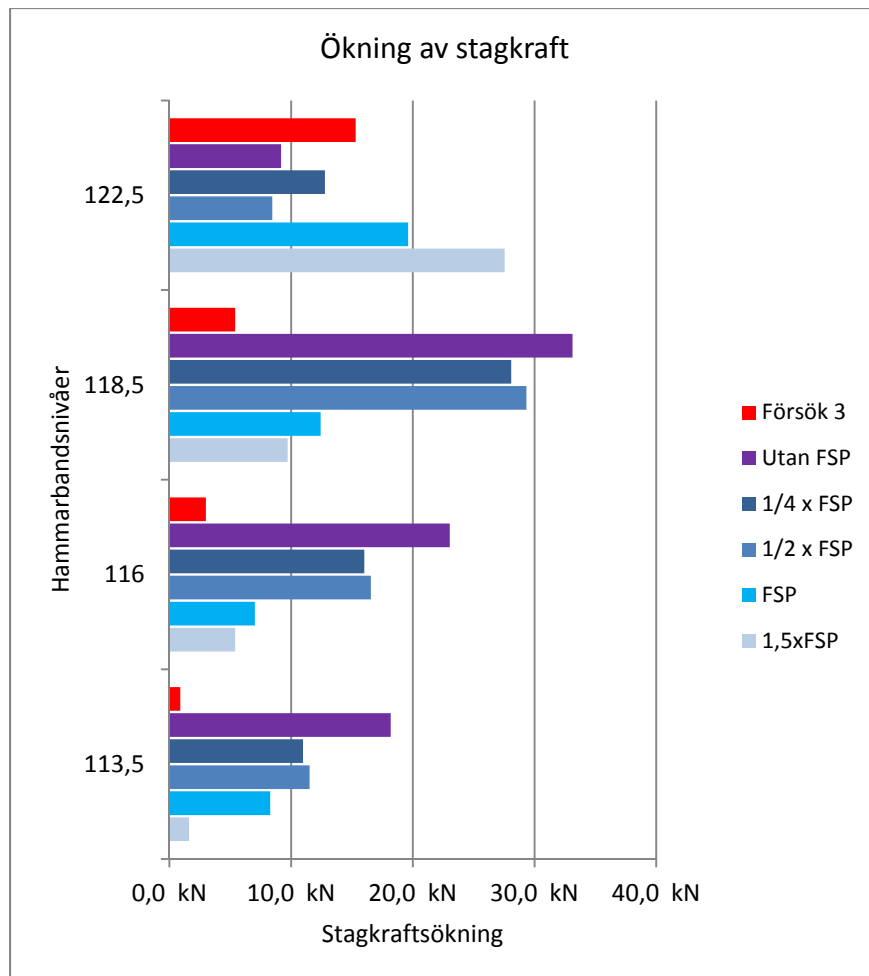


Diagram 5. Uppmätt och beräknad ökning av stagkrafter på de olika hammarbandsnivåerna för olika förspänningar.

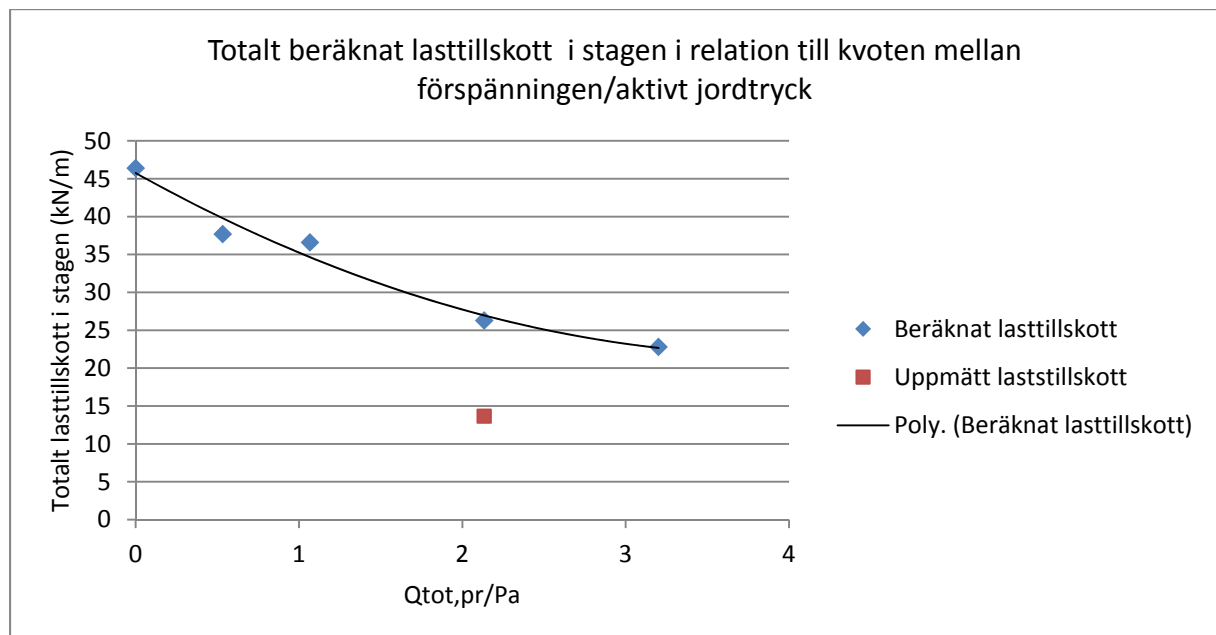


Diagram 6. Procentuellt förhållande mellan stagkraftsökning av last för de olika försöken i relation till försök 3.

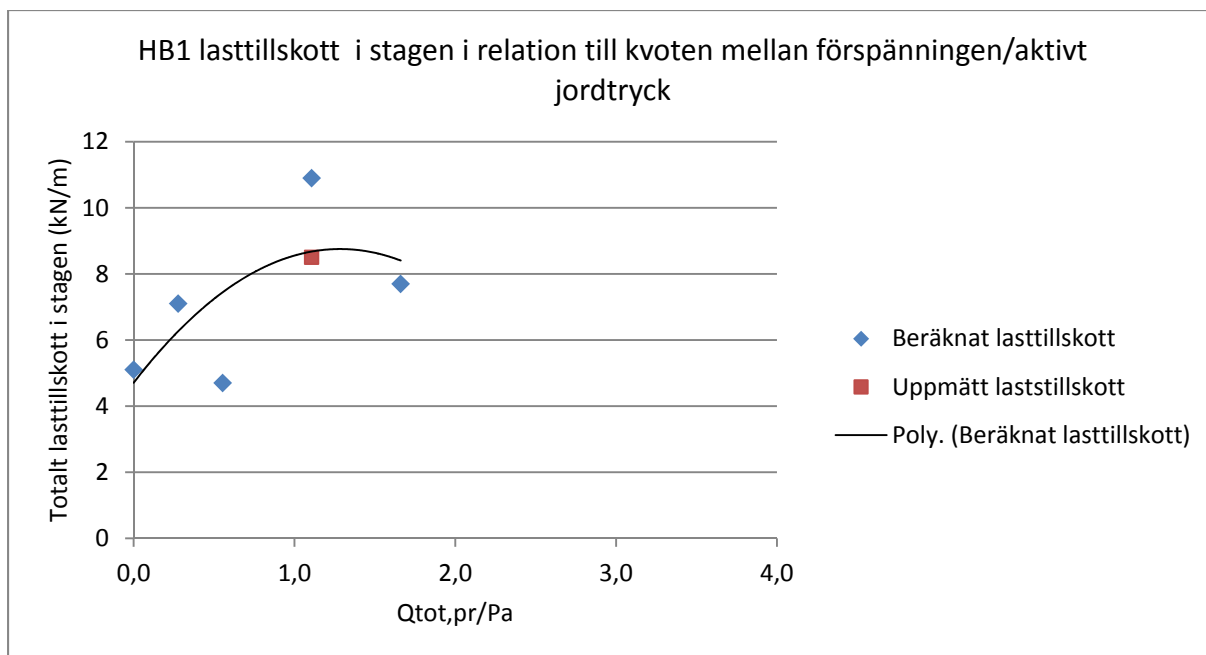


Diagram 7. Procentuellt förhållande mellan stagkraftsökning av last på hammarbandsnivå 1 för de olika beräkningarna i relation till försök 3.

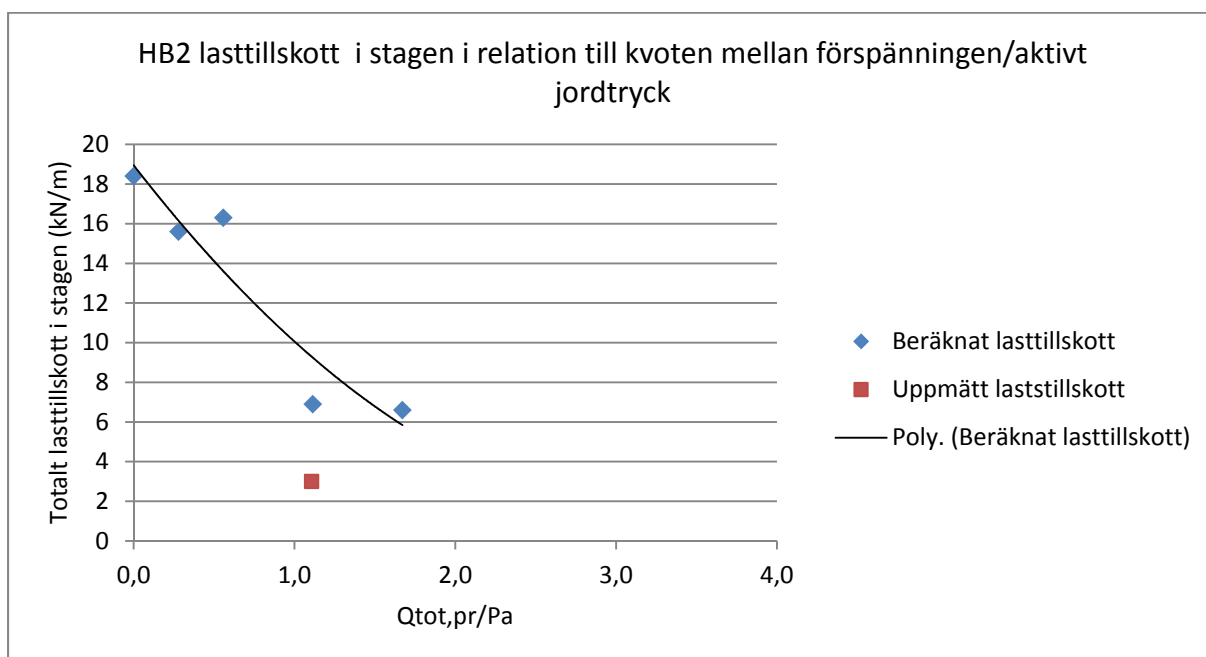


Diagram 8. Procentuellt förhållande mellan stagkraftsökning av last på hammarbandsnivå 2 för de olika beräkningarna i relation till försök 3.

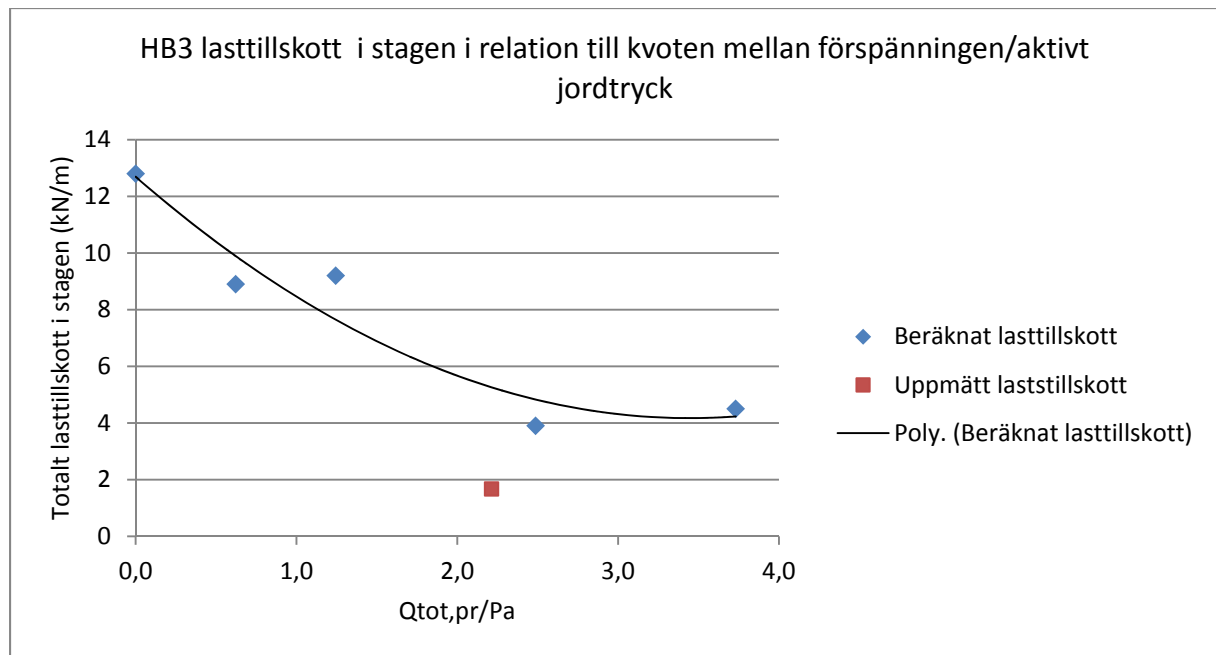


Diagram 9. Procentuellt förhållande mellan stagkraftsökning av last på hammarbandsnivå 3 för de olika beräkningarna i relation till försök 3.

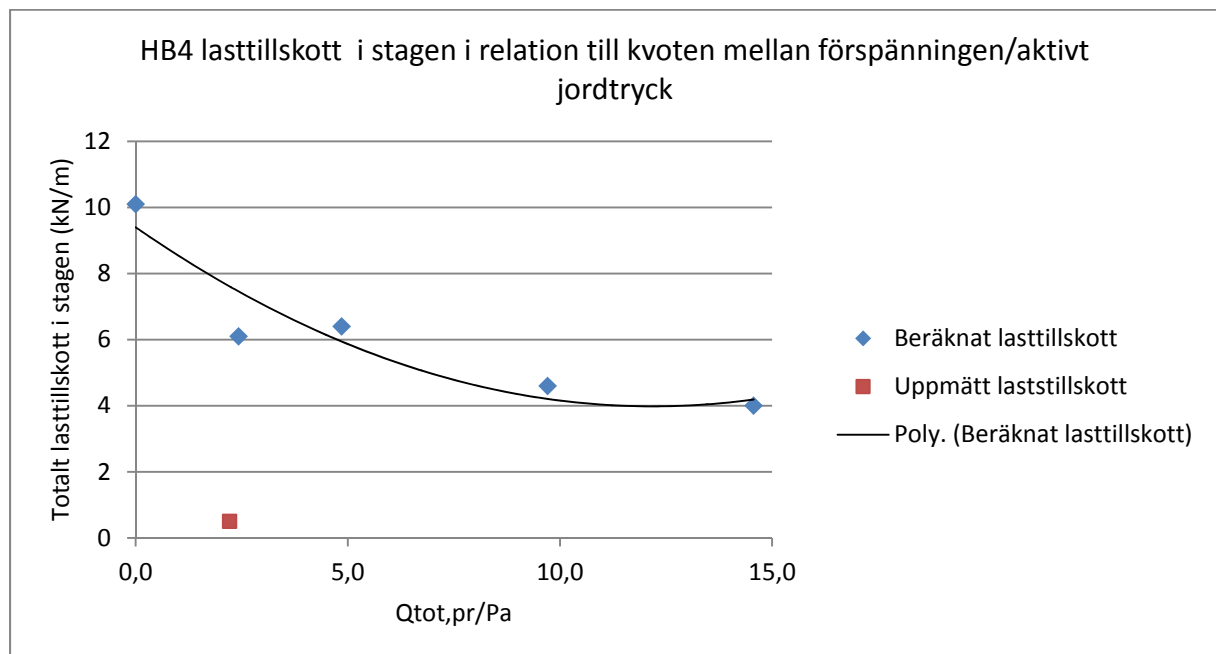


Diagram 10. Procentuellt förhållande mellan stagkraftsökning av last på hammarbandsnivå 3 för de olika beräkningarna i relation till försök 3.

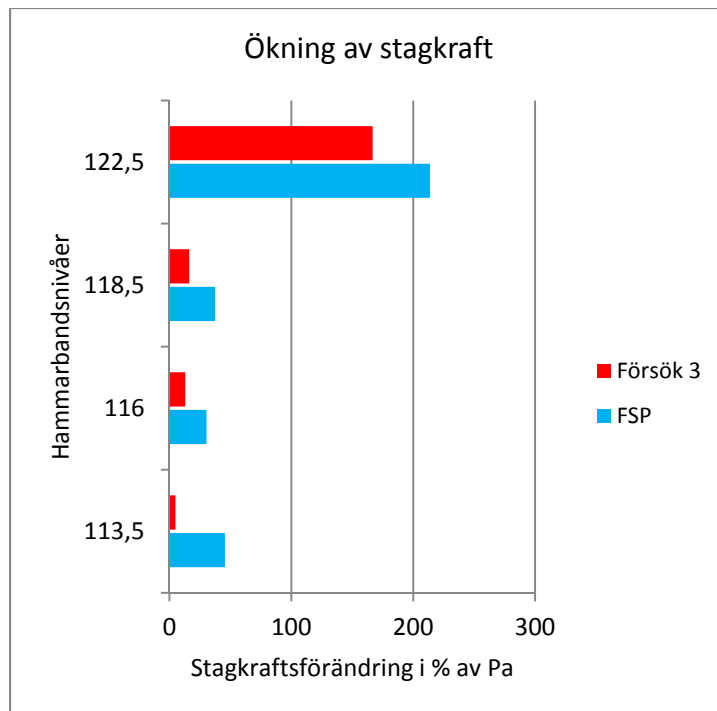


Diagram 11. Procentuellt förhållande mellan stagkraftsökning av last och Pa

4.3 Jämförelse med analytisk beräkning

Vid analytiska beräkningar är det vanligt att beräkna inverkan av tillfälliga laster med spänningsberäkning enligt Boussinesq och enligt sponthandboken så ska jordtrycksökningen fördubblas om spontväggen anses som oändligt styv.

Två stycken beräkningar enligt Boussinesq har utförts, en med faktorn 1 och den andra med faktorn 2. Lasten i båda beräkningarna har samma intensitet, utbredning och placering som i Plaxis-beräkningarna. I diagram 12 redovisas resultatet från de två beräkningarna enligt Boussinesq tillsammans med Plaxis-beräkning utförd utan förspänning. Kurvan för Plaxis-beräkningen har två hack i sig. En på nivå 120 som beror på att det är en övergång ifrån ett jordmaterial med högre hållfasthetsvärden till ett med lägre värden. Den andra ligger ca 1 m under markytan och beror på att lastens placering i relation till sponten och översta hammarbandets läge ger en avlastning i den översta delen av sponten.

I övrigt är det en tydlig sammanstämmighet mellan Plaxis-beräkningen och spänningeberäkningen 1xBoussinesq. Det innebär att spontväggen inte kan betecknas som oändligt styv. Spänningsfördelning enligt Boussinesq stämmer dock endast så länge sponten inte är förspänd.

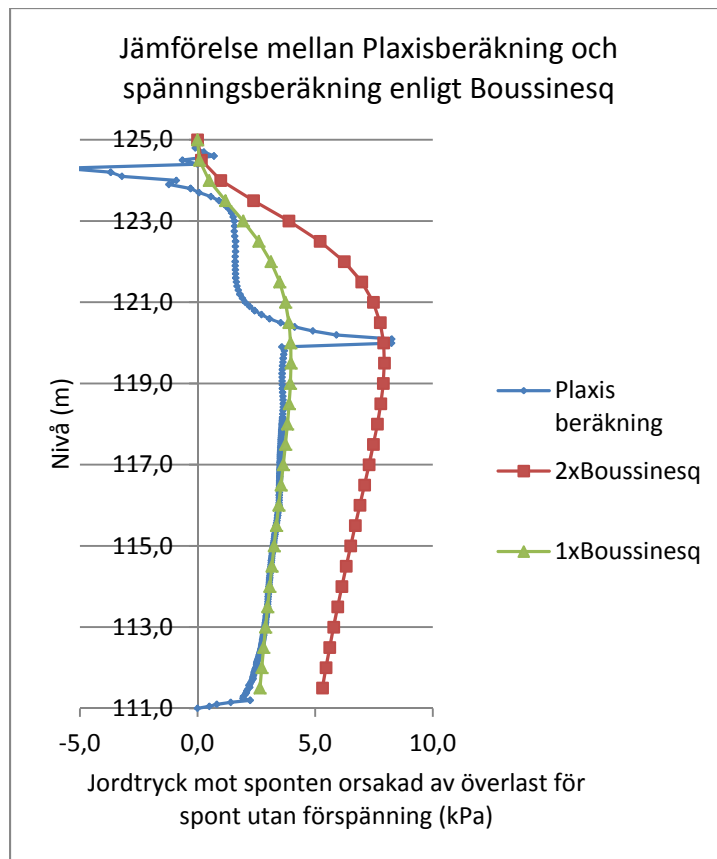


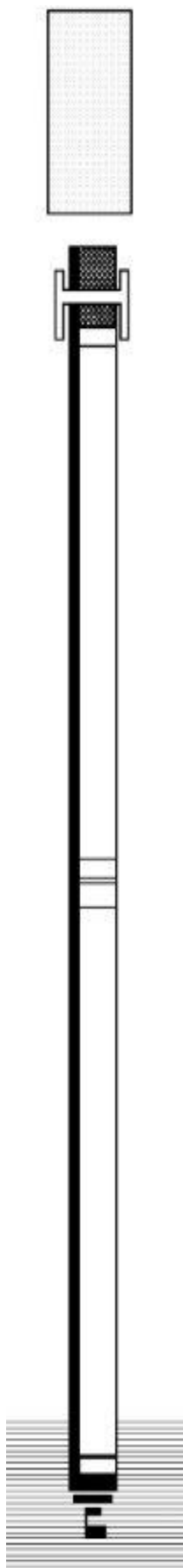
Diagram 12. Jämförelse mellan olika sätt att bestämma jordtrycket mot spanten för en utbredd last

5 Slutsats

Inverkan av trafiklast bakom spanten vid förspända spantkonstruktioner är förväntat låg. Förhållandet mellan förspänningen och det aktiva jordtrycket inverkar på hur mycket stagkrafterna ökar på grund av en tillfällig trafiklast. Redan vid måttliga förspänningsgrader ($Q_{tot,pr}/P_a < 1$) så minskar stagkraftsökningen av last till ca 40 % av P_a , på hammarbandsnivå 2, 3 och 4. Däremot så ökar stagkraftsökningen av last till ca 210 % av P_a på den översta hammarbandsnivån. Motsvarande uppmätta värden är ca 15 % respektive ca 170 %.

Vid analytisk spantdimensionering ska beräkning av spänningsfördelningen av utbredd last med Boussinesq multipliceras med 1. Med den förutsättningen stämmer spänningsfördelningen väl så länge som ingen förspänning påförs.

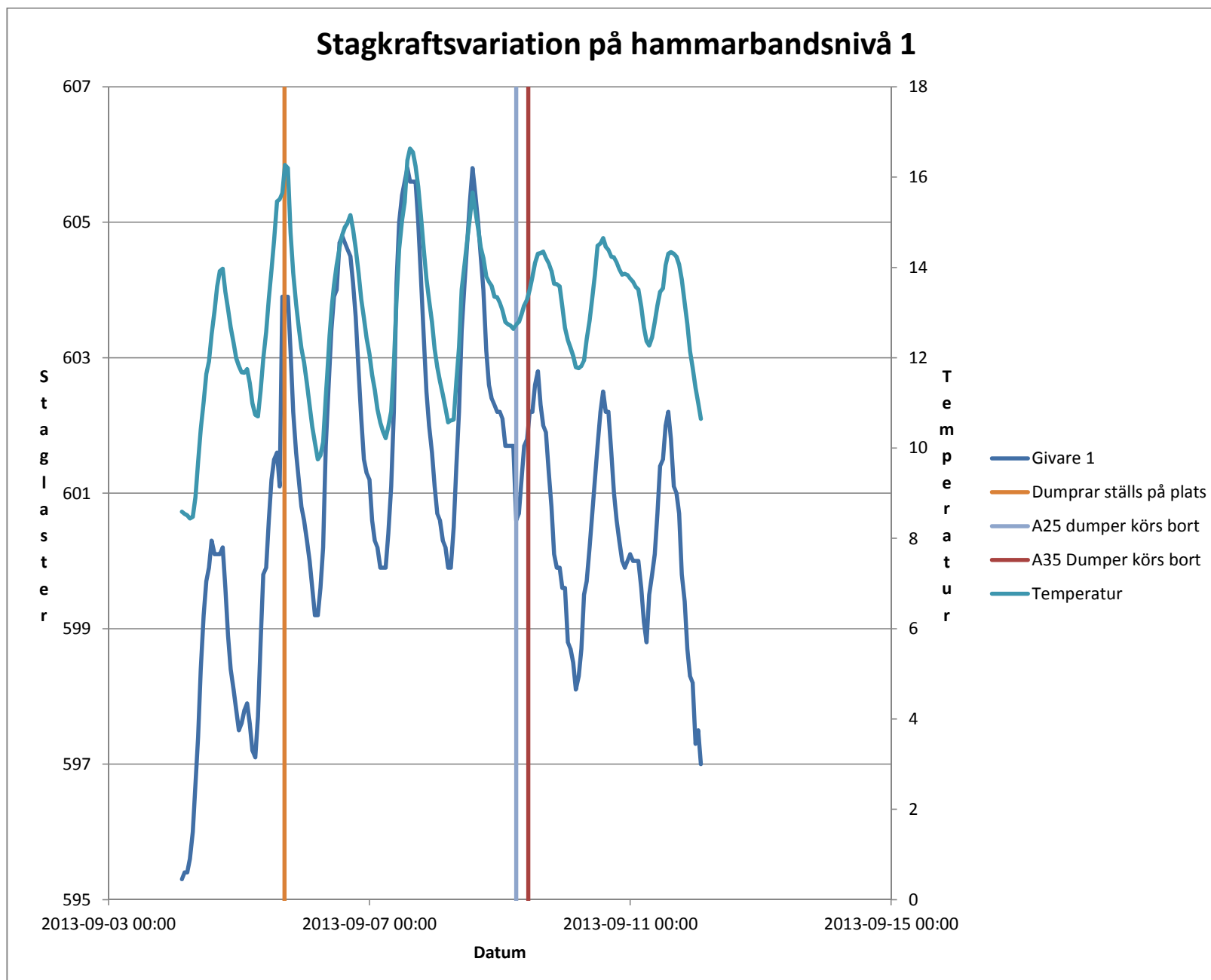
Det är också värt att notera att för att resultatet i beräkningarna ska motsvara mätresultaten, måste dumparnas vikt spridas på en yta som motsvarar dess yttermått.

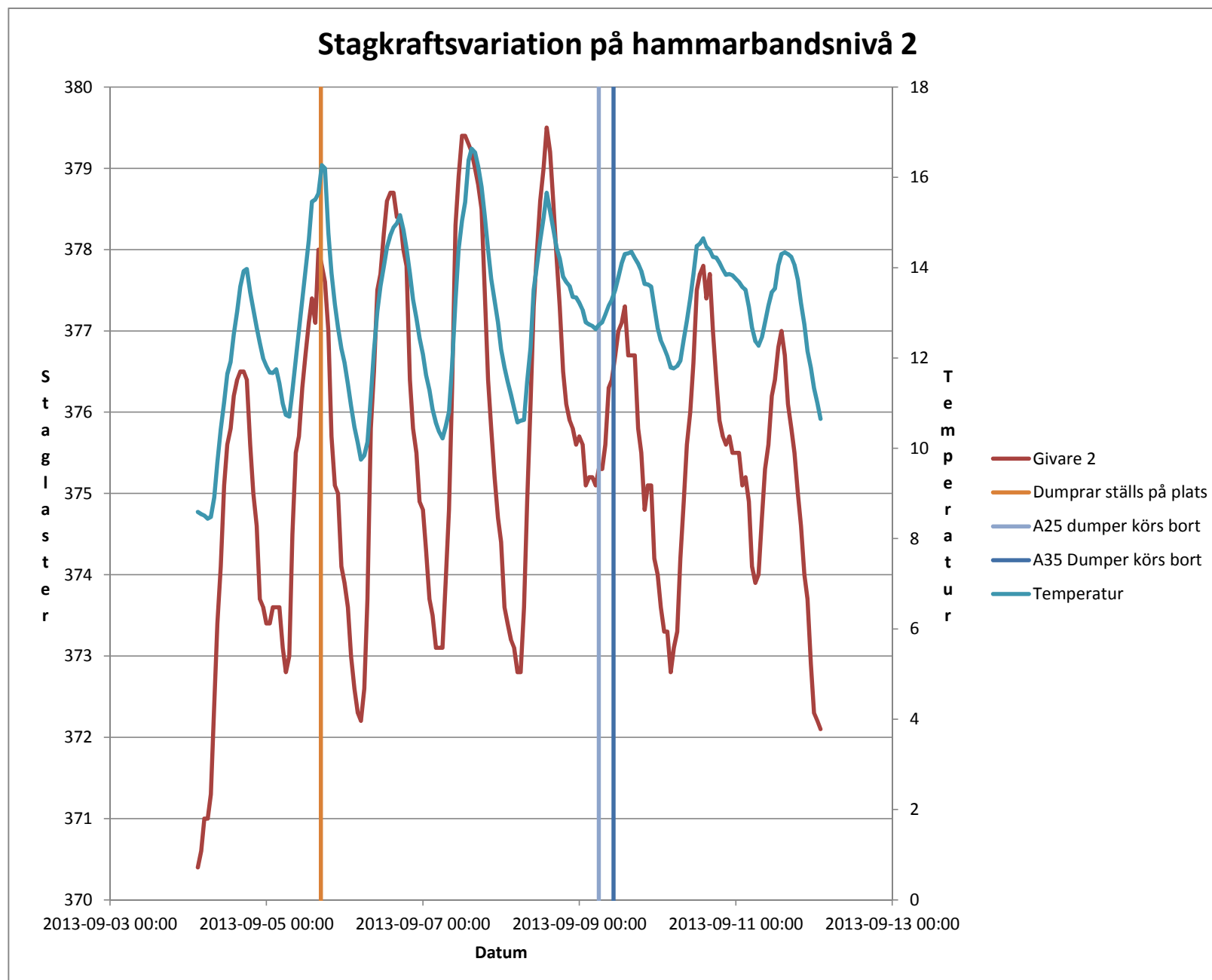


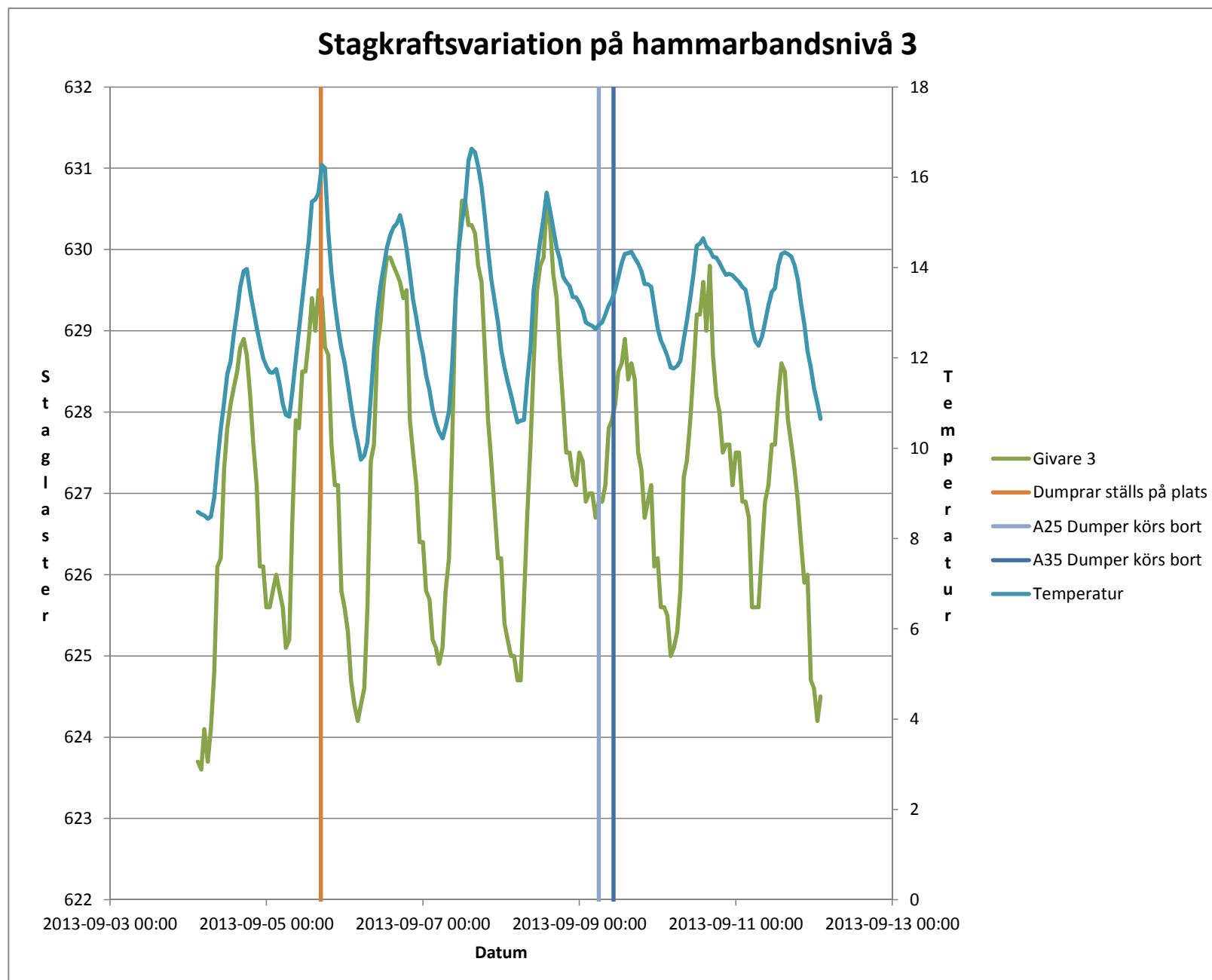
PÅLKOMMISSIONEN

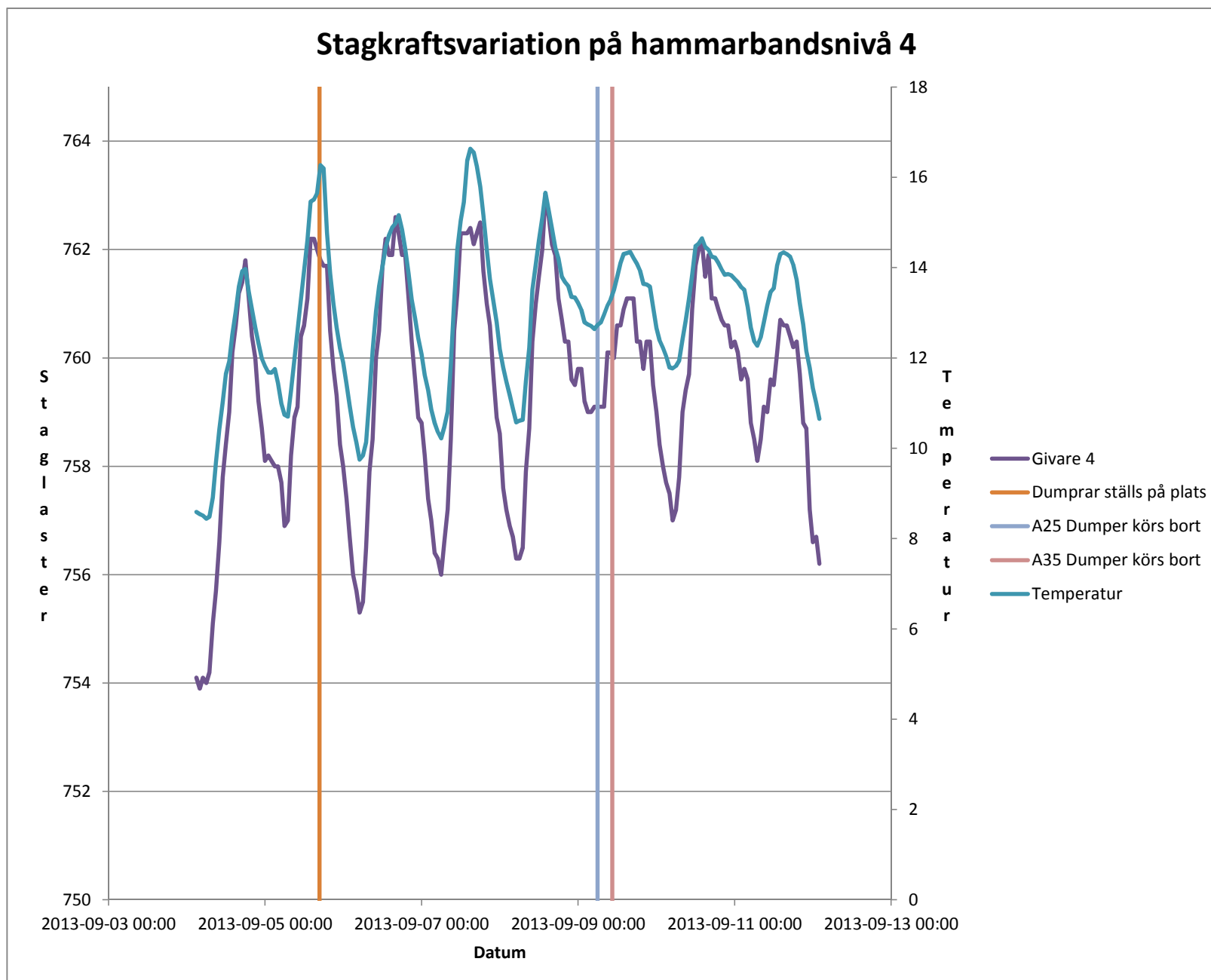
Tekniskt PM 1:2014

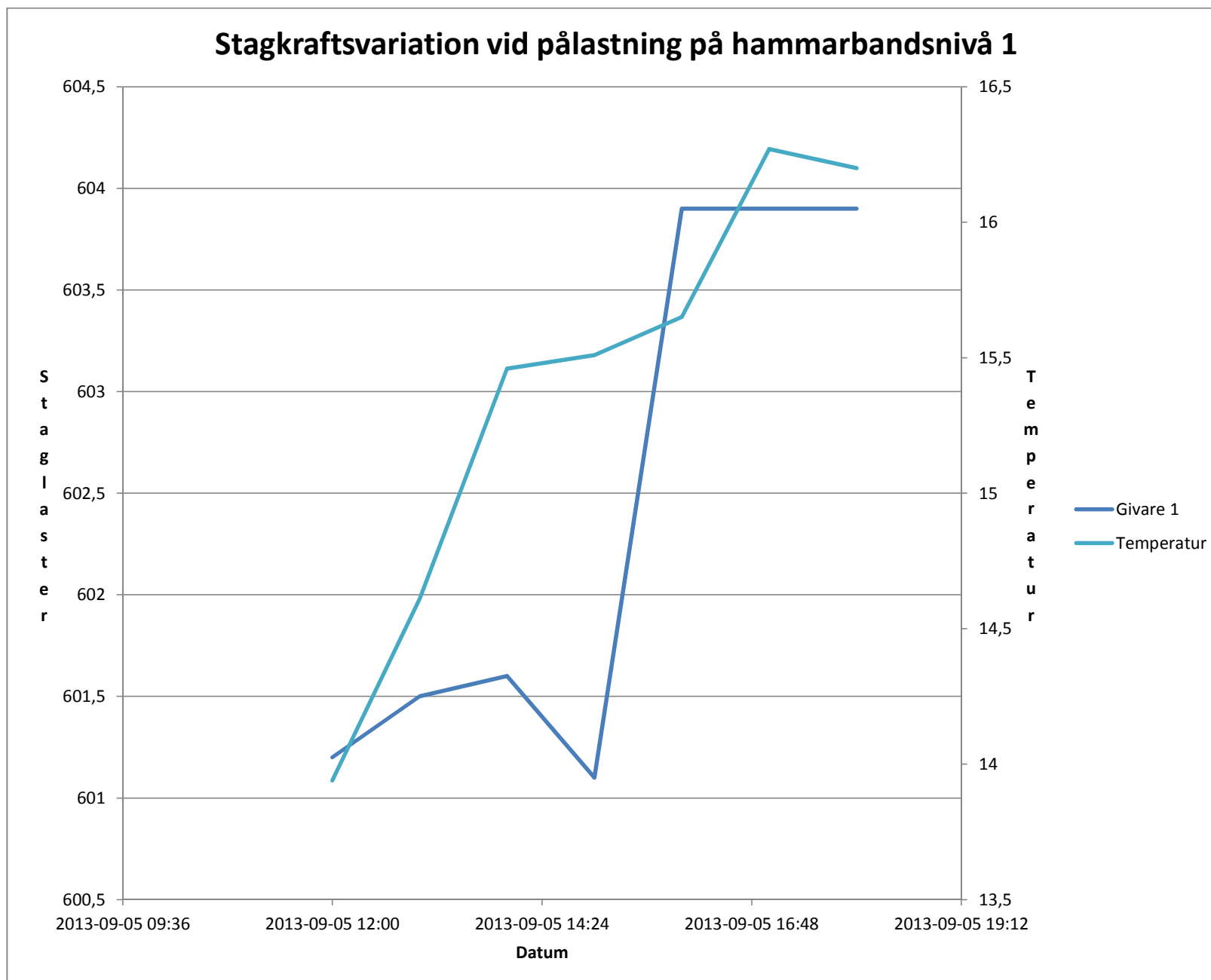
Bilaga 1

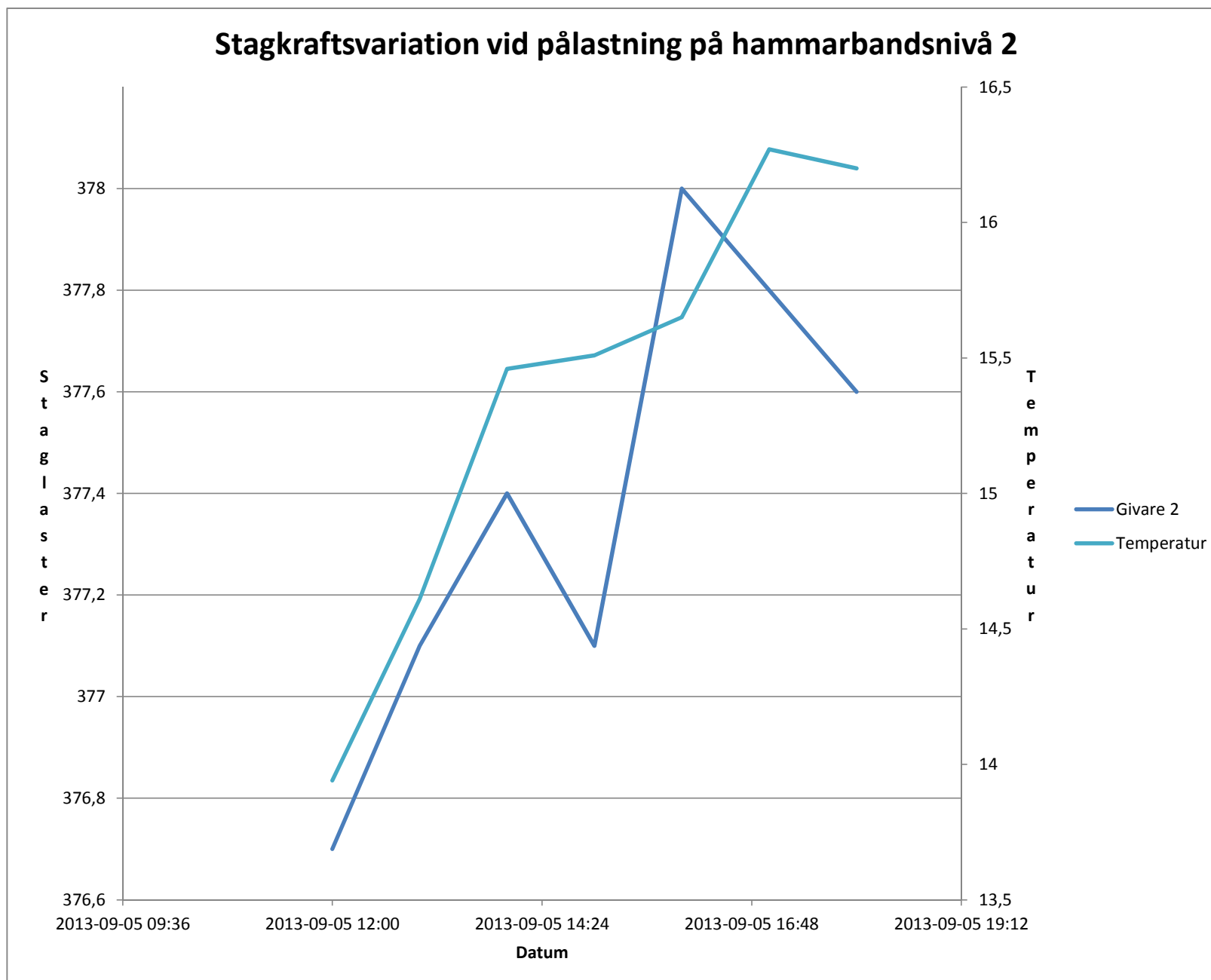


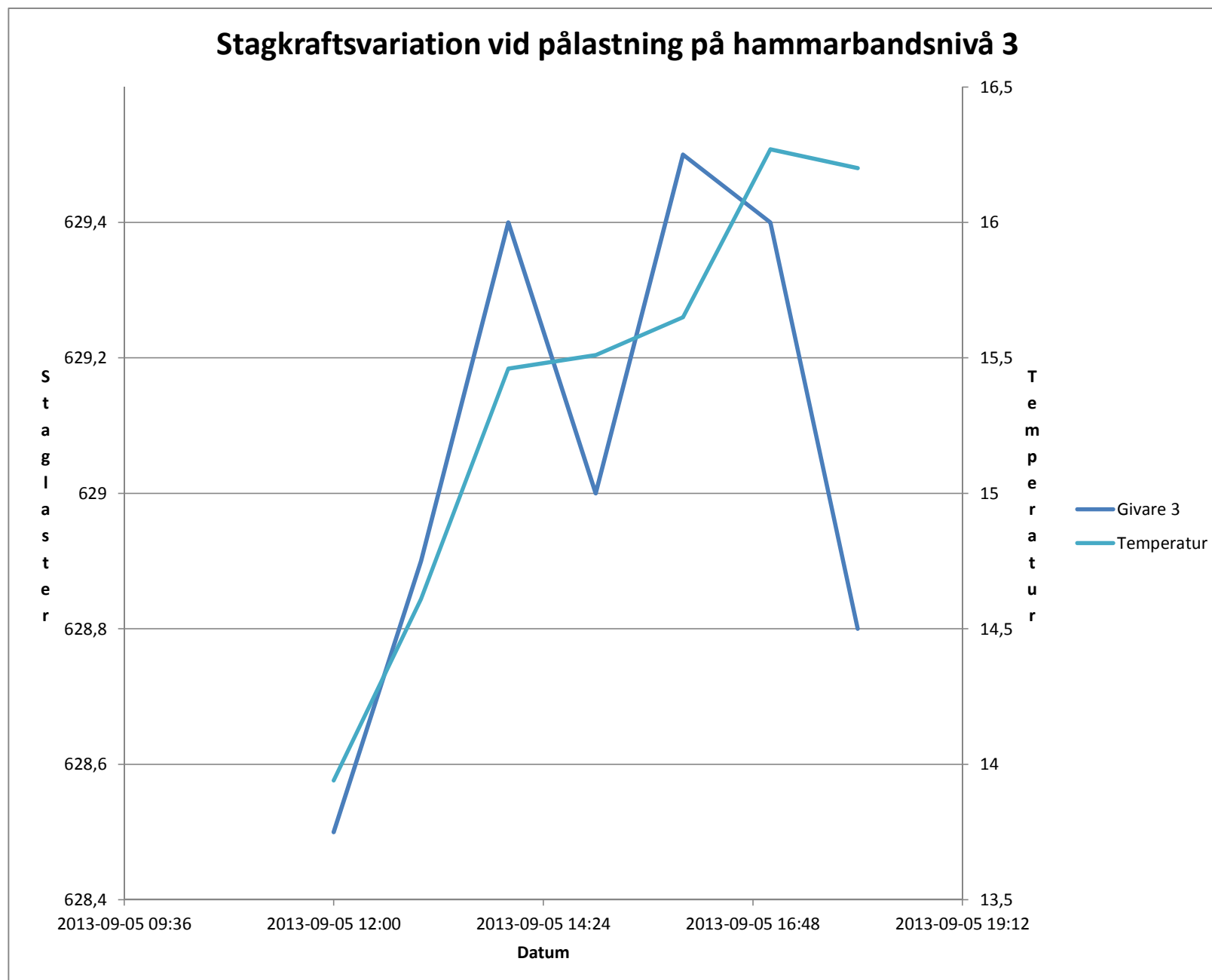


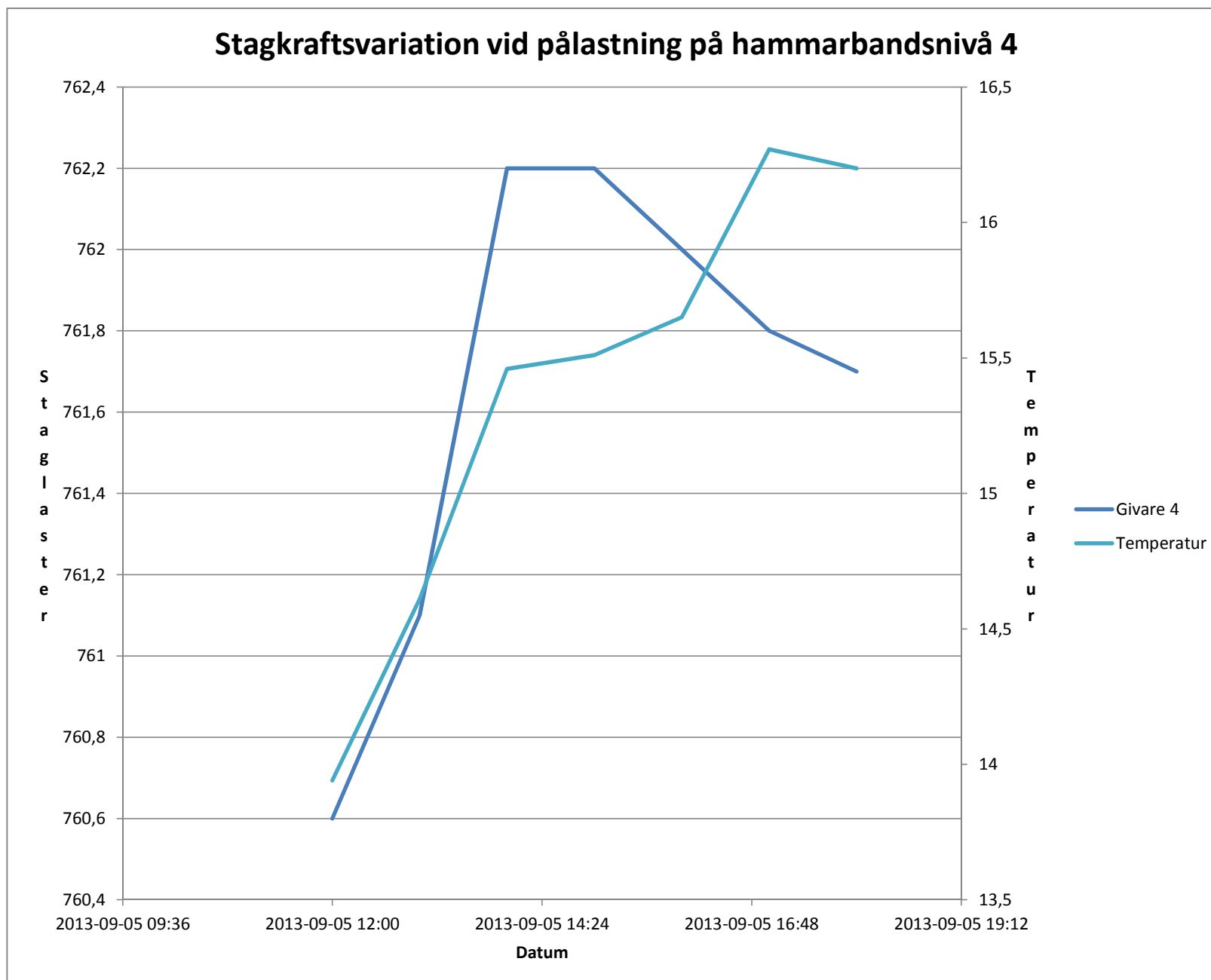


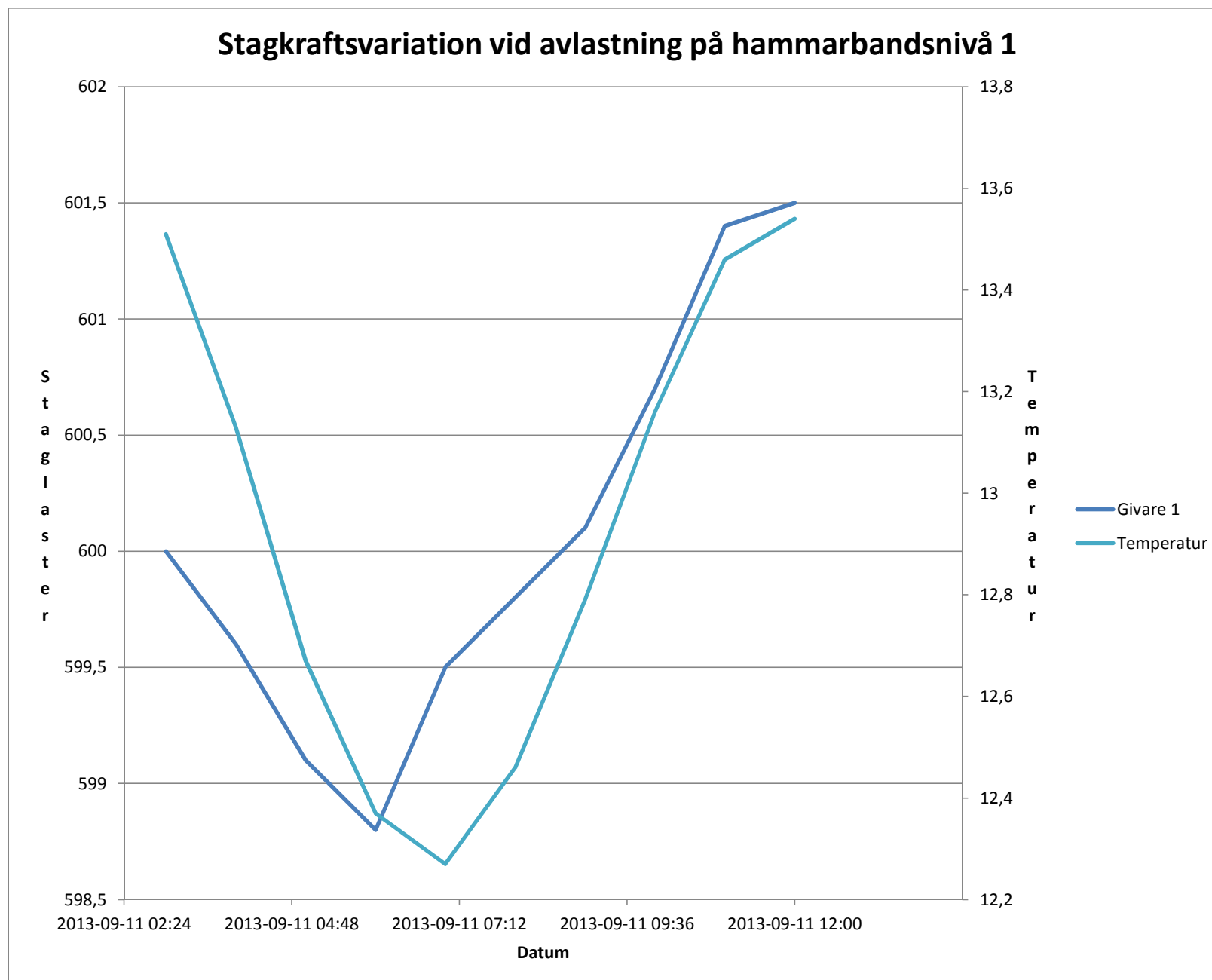


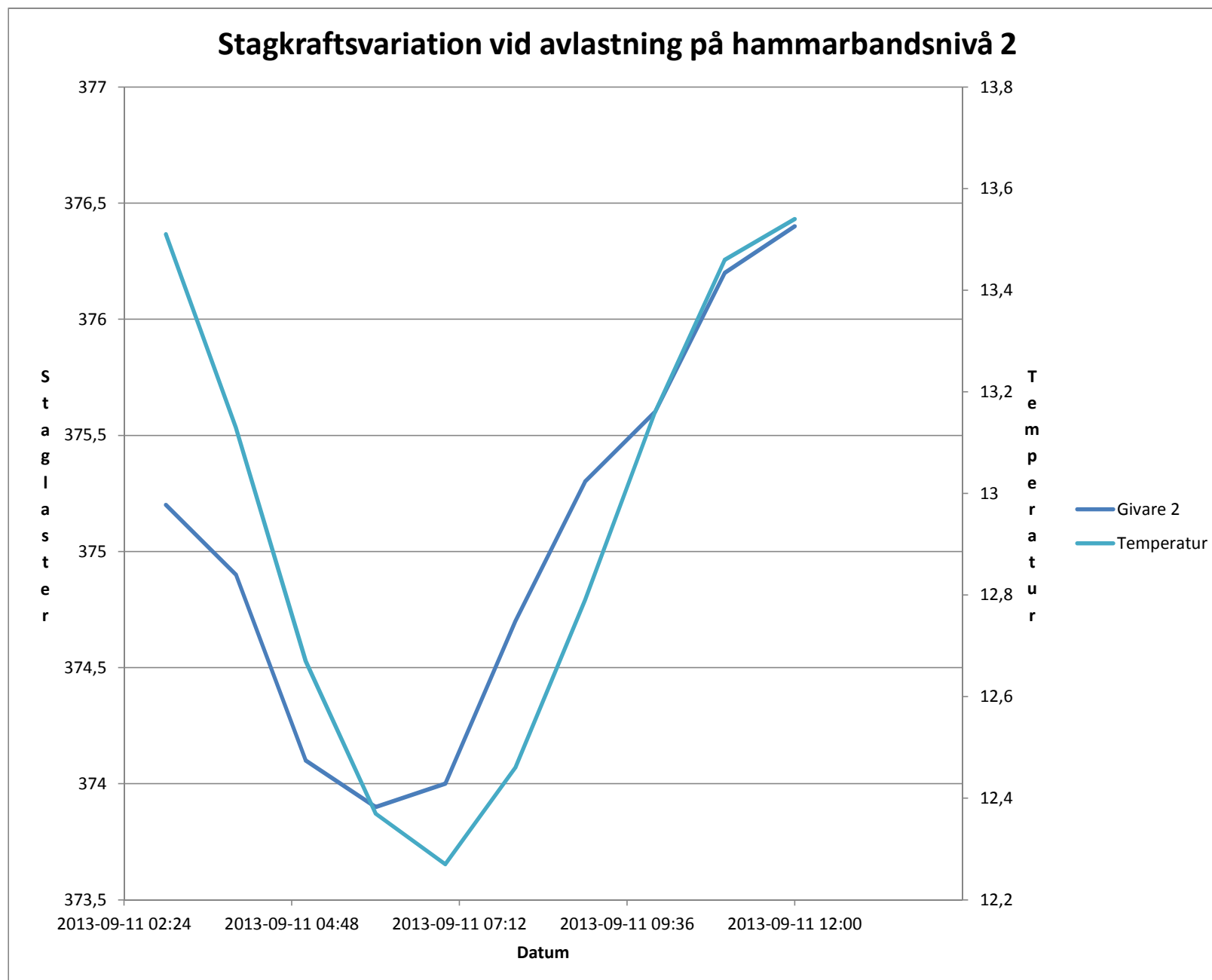


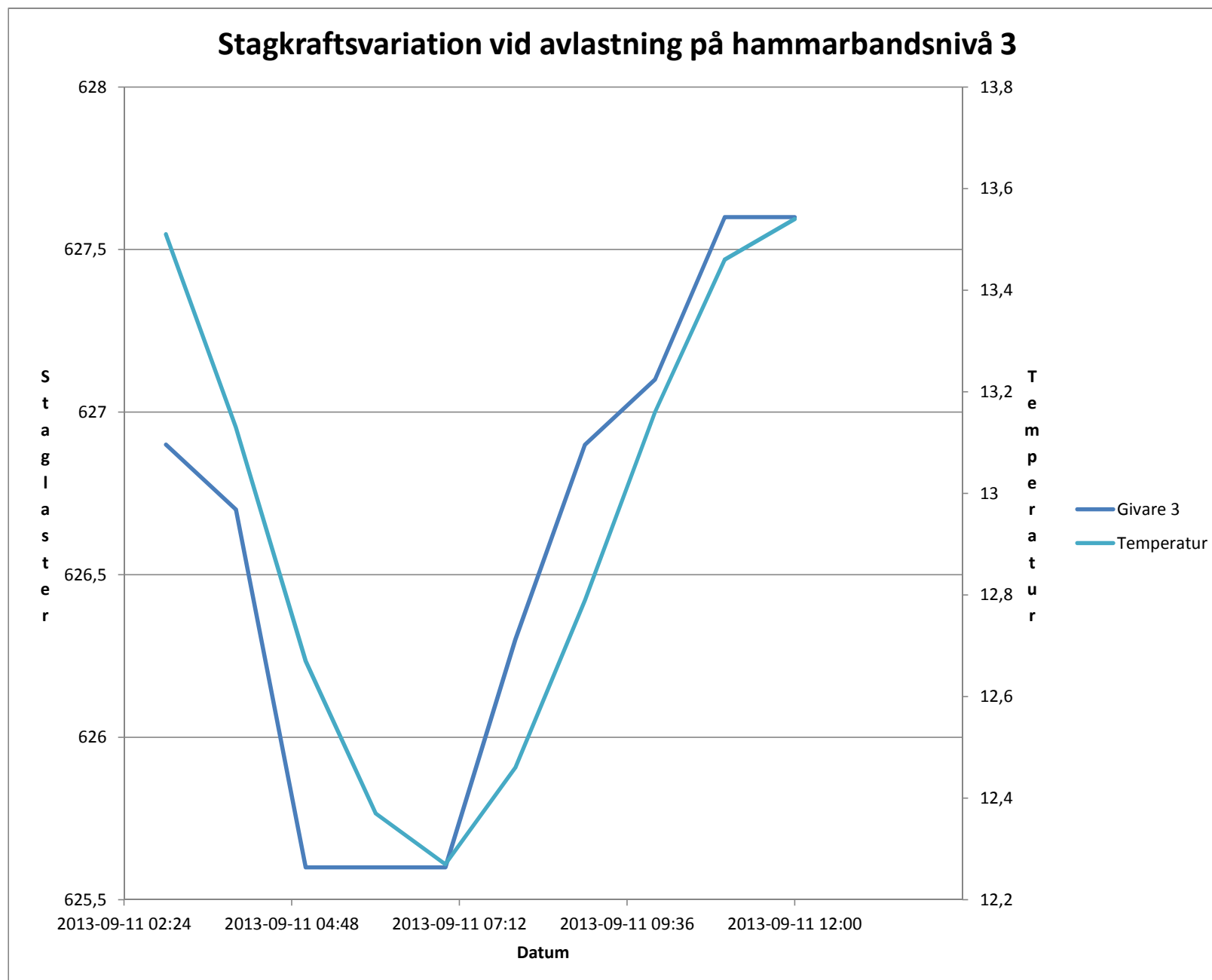


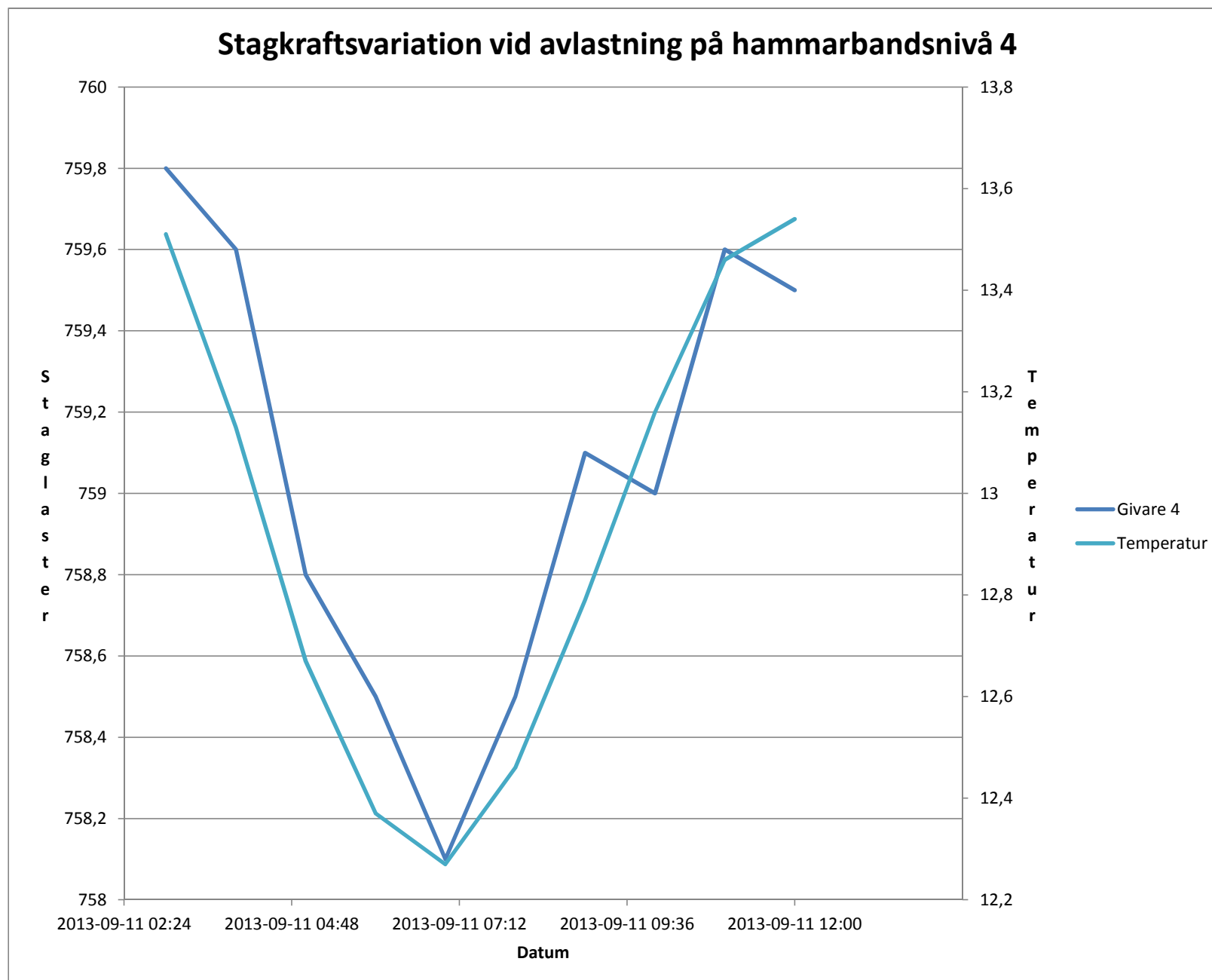


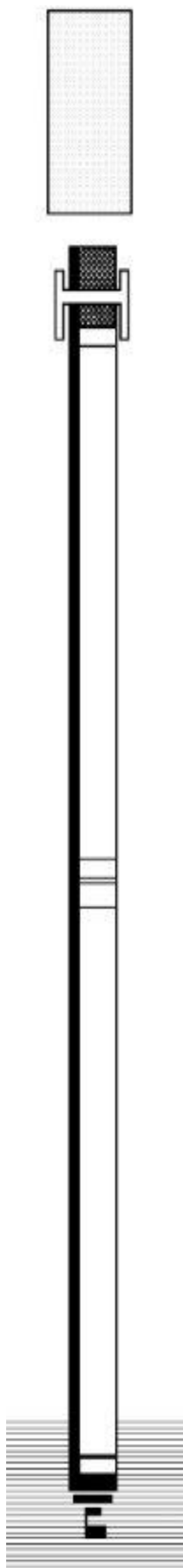








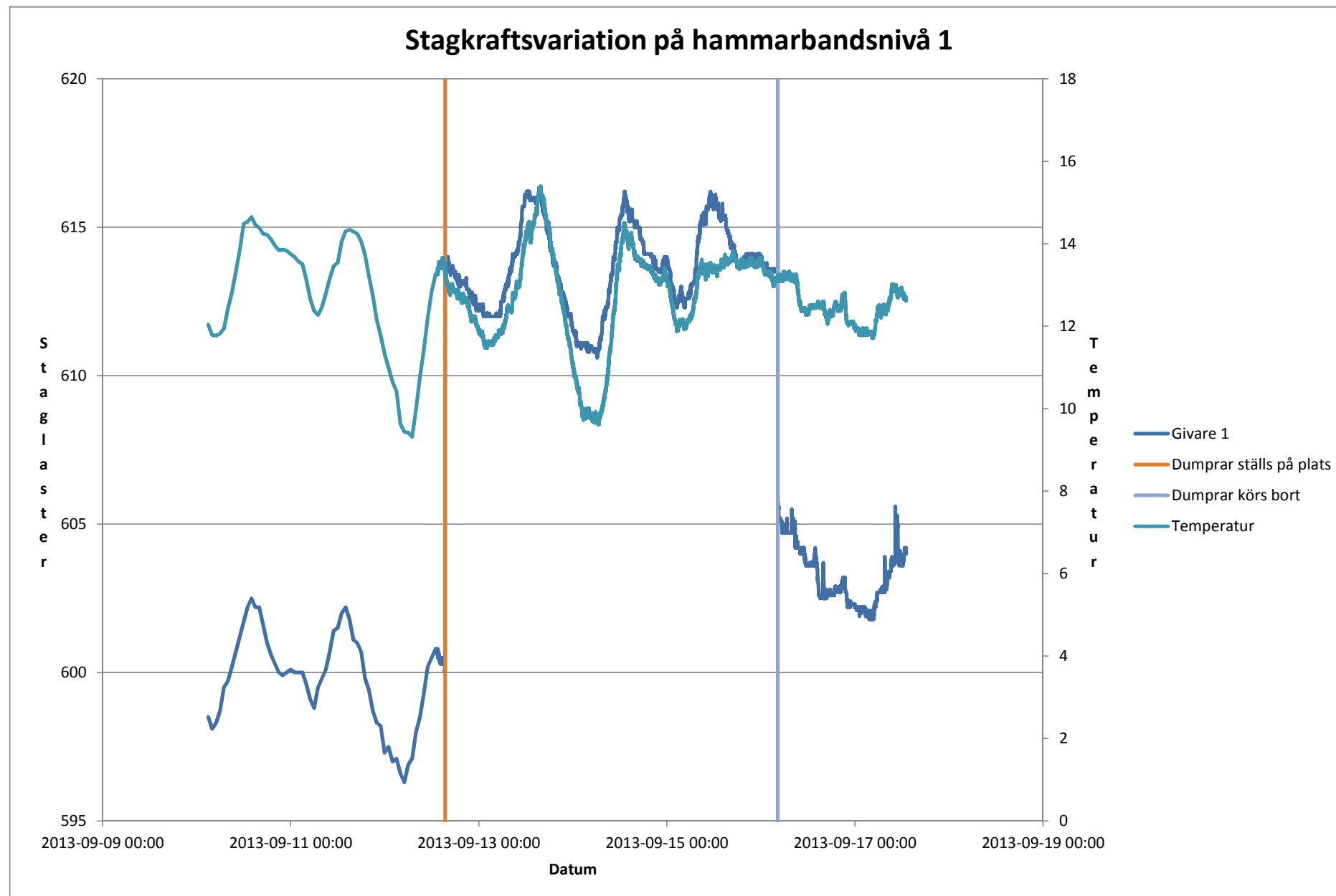


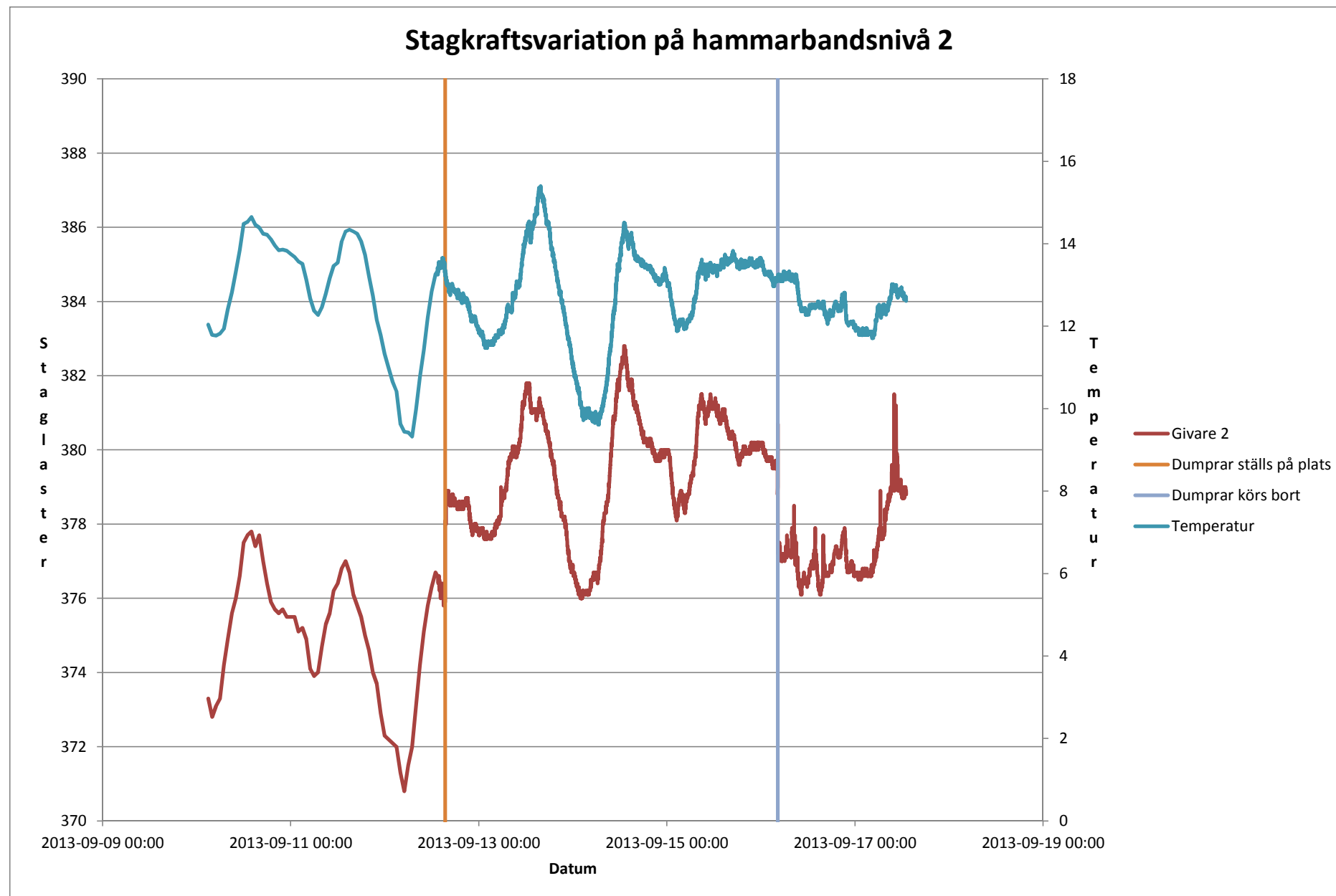


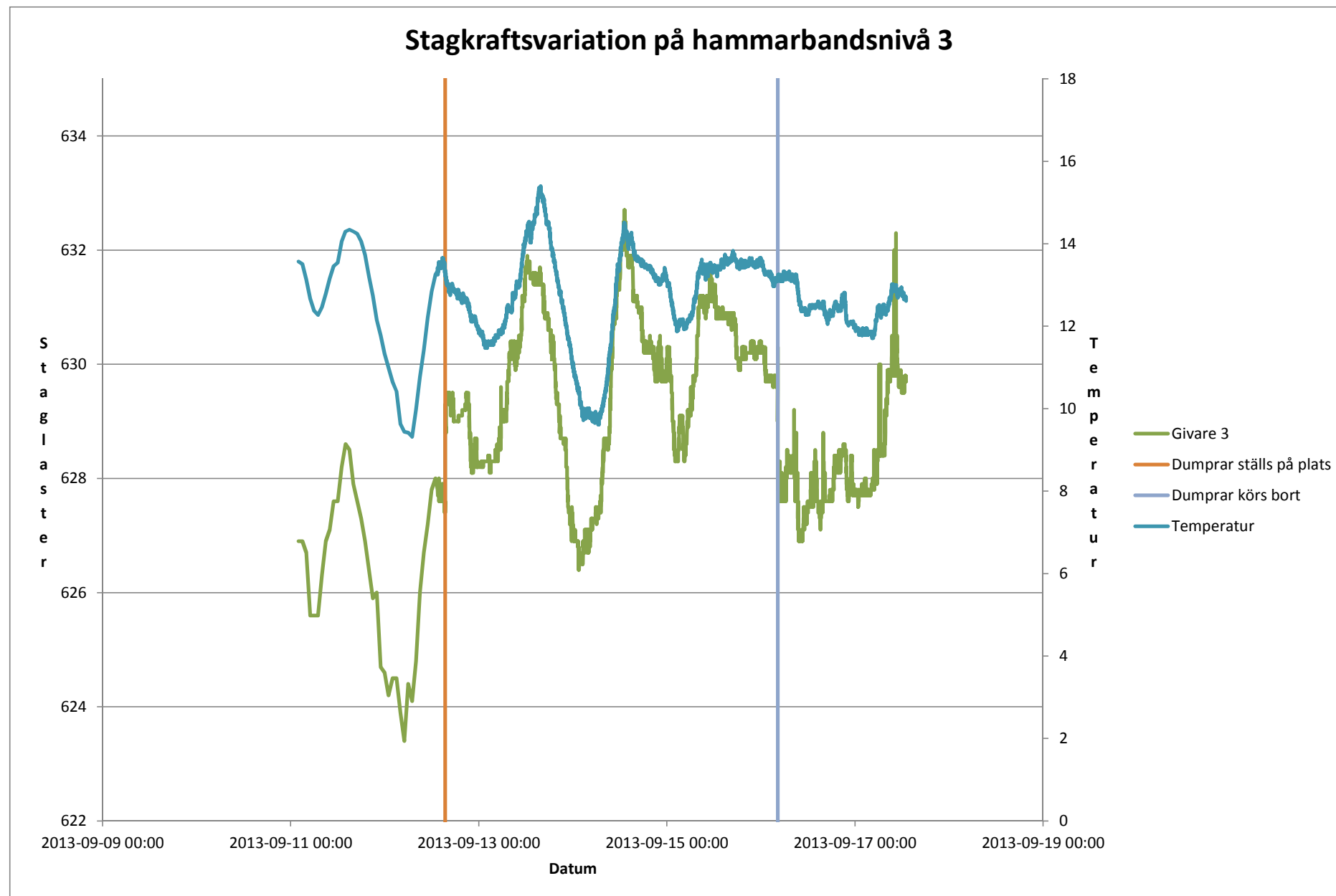
PÅLKOMMISSIONEN

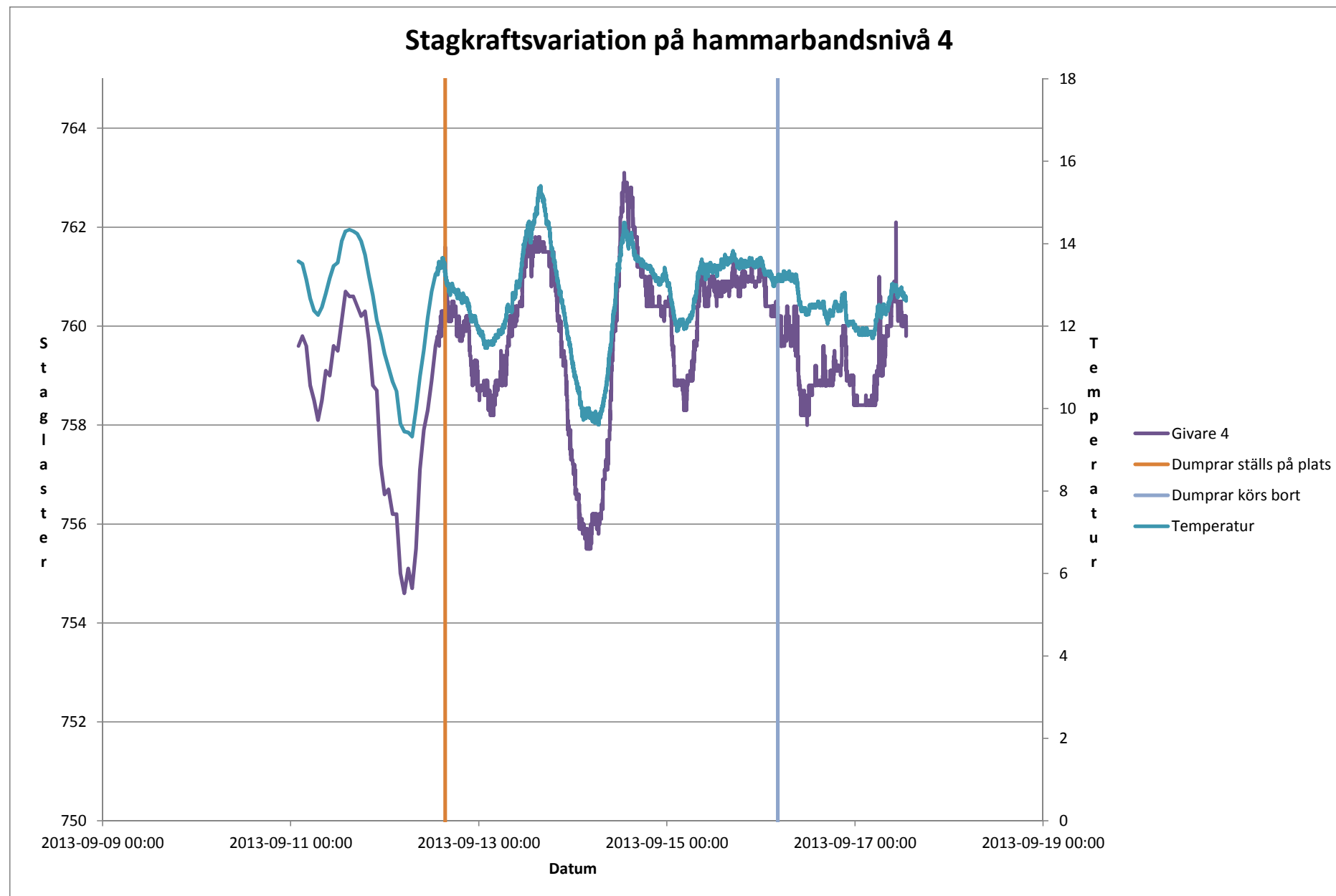
Tekniskt PM 1:2014

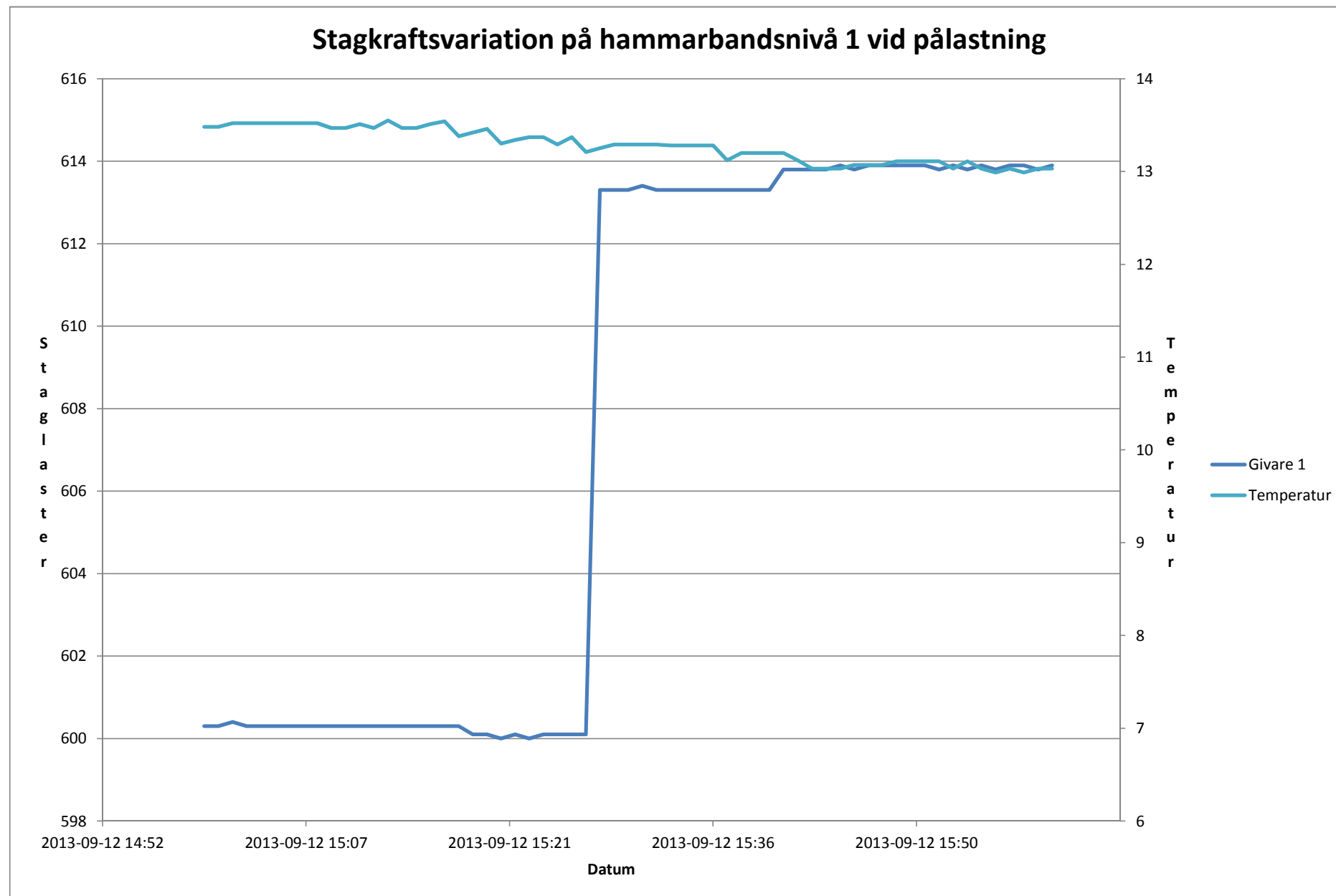
Bilaga 2

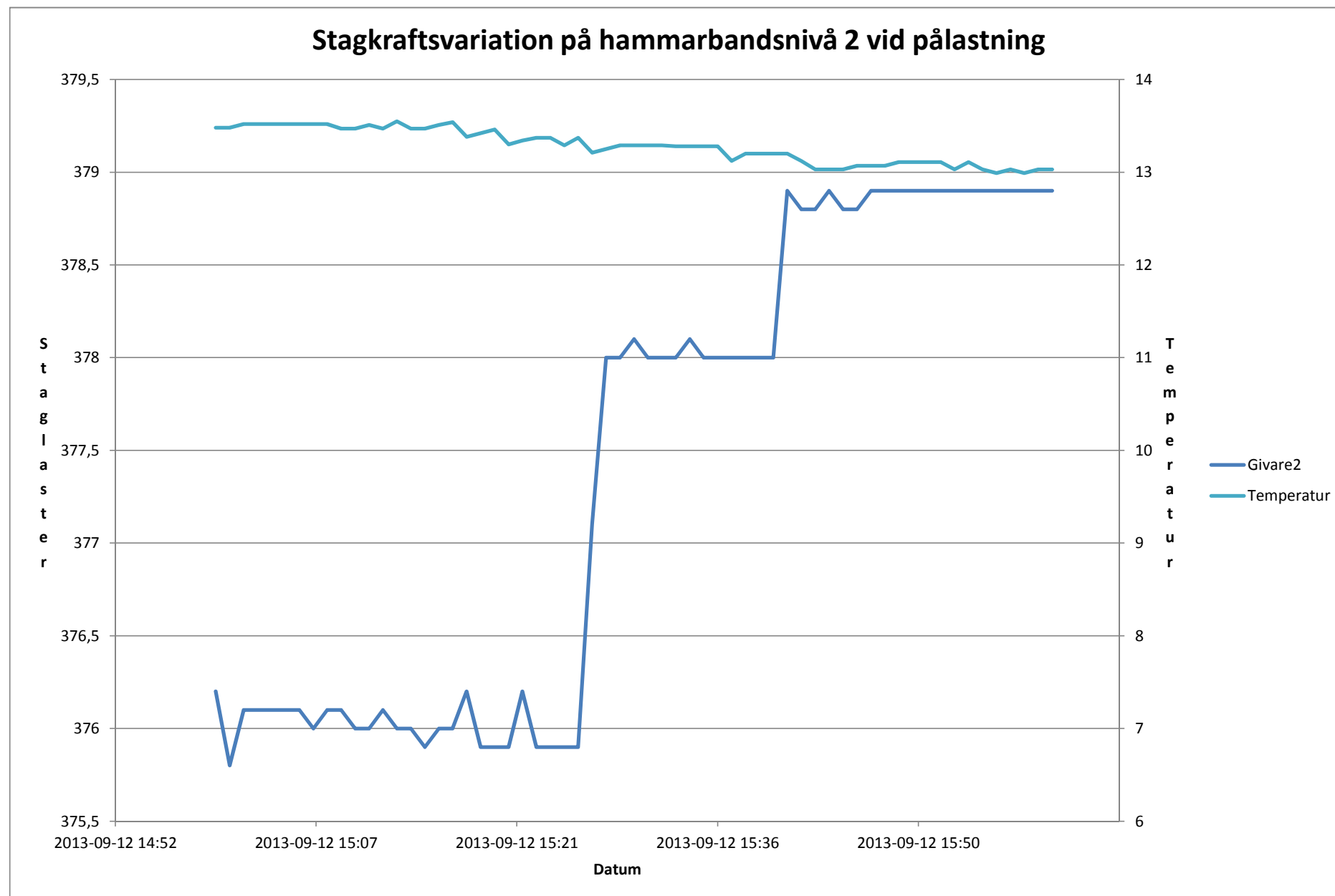


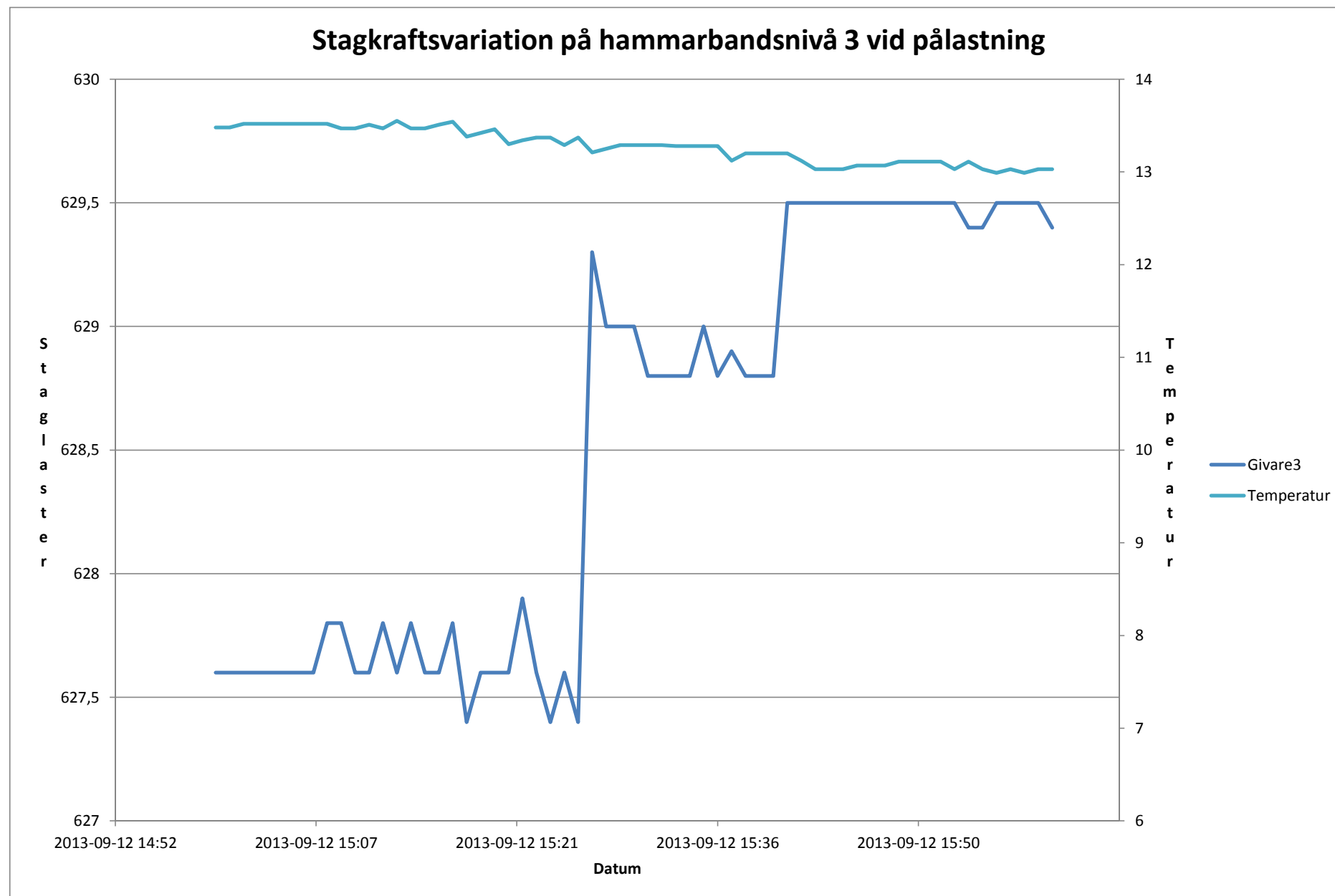


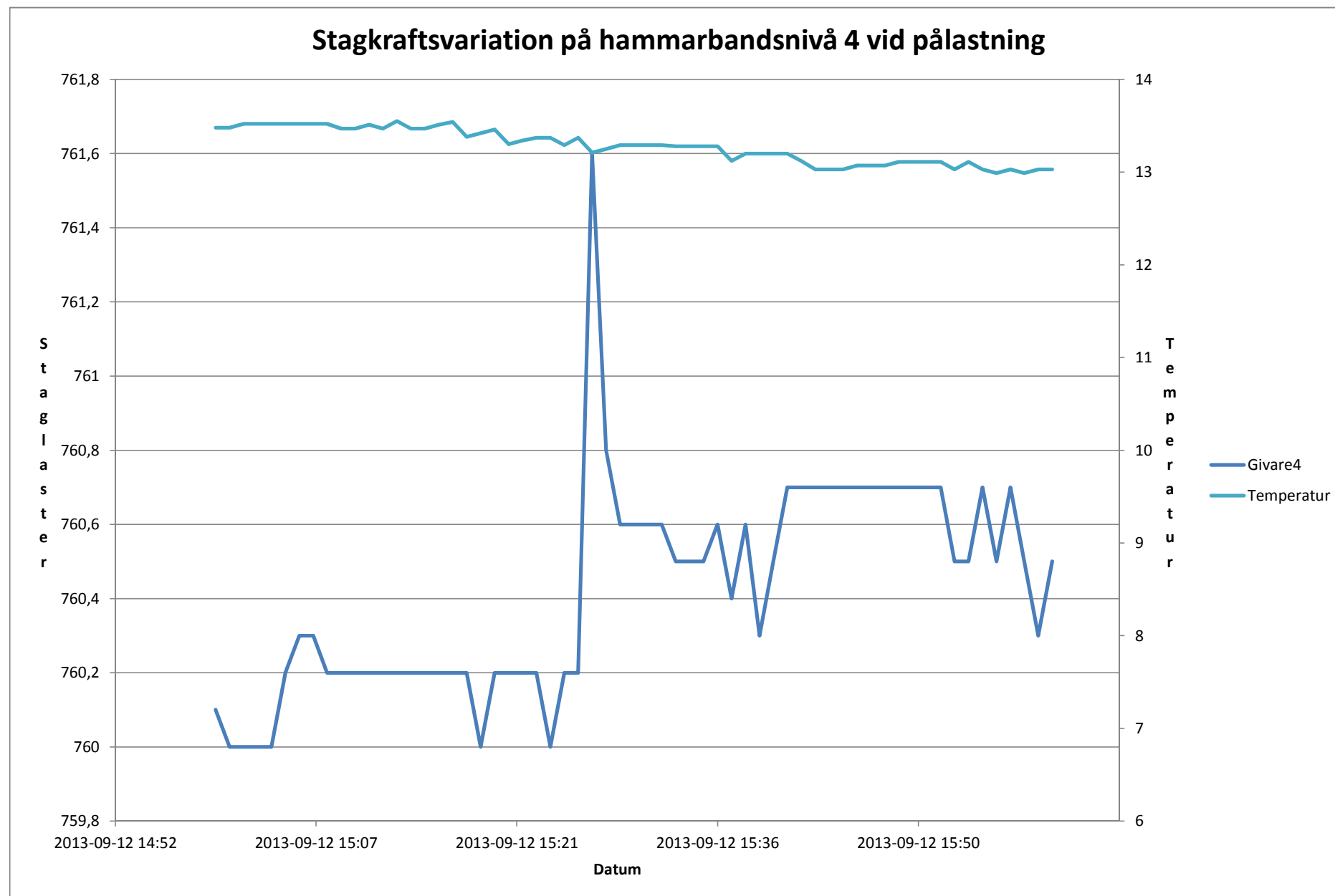


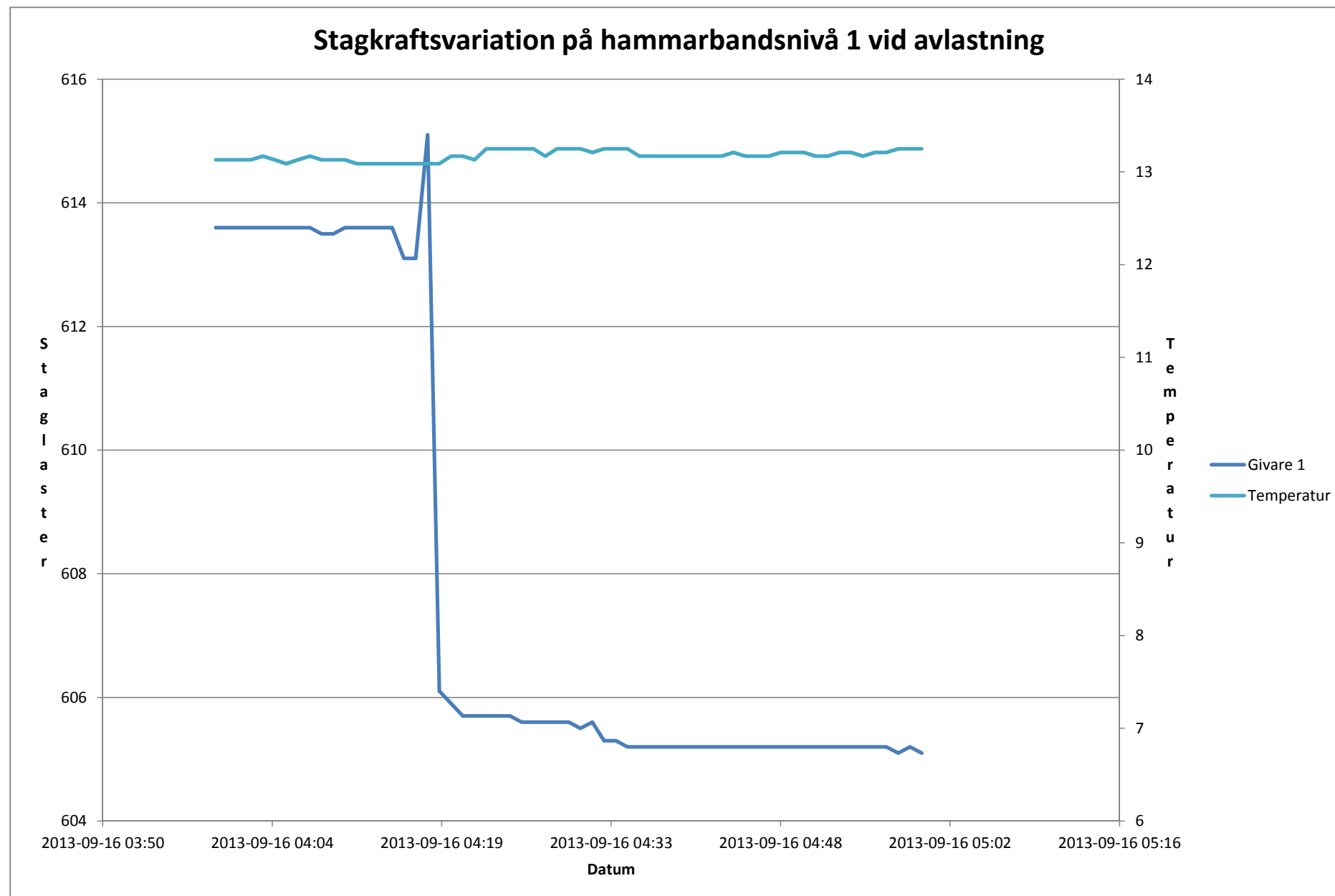


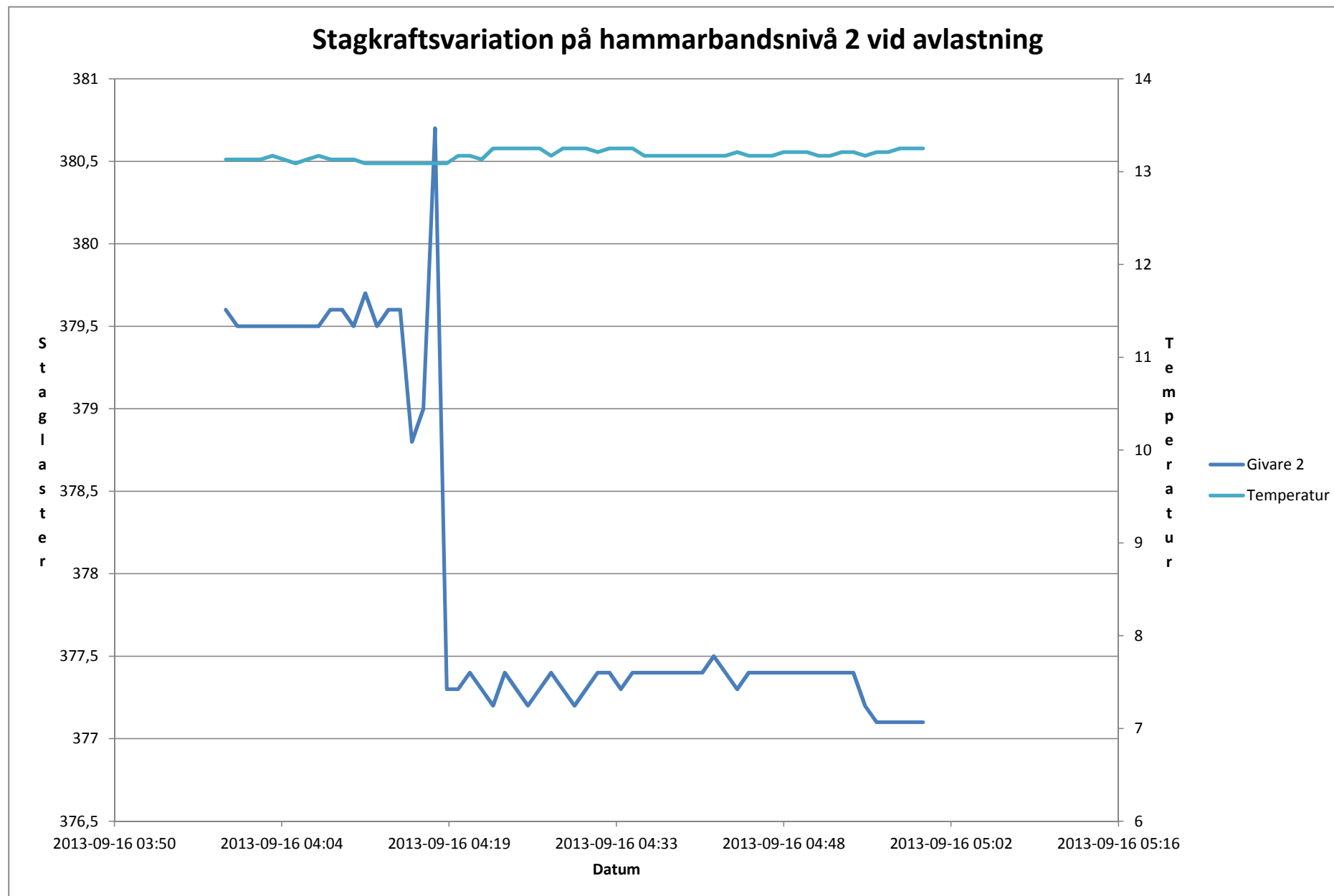


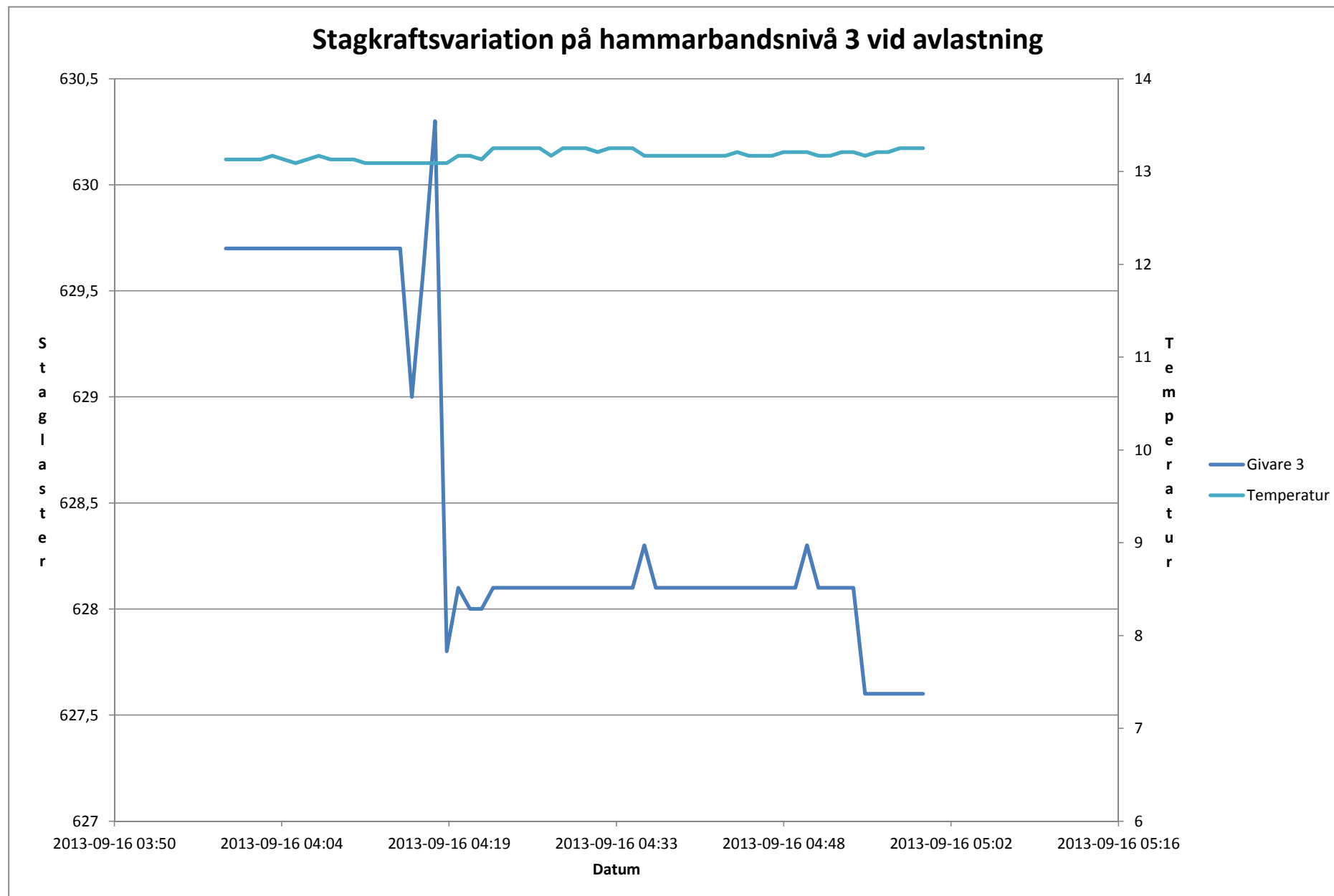


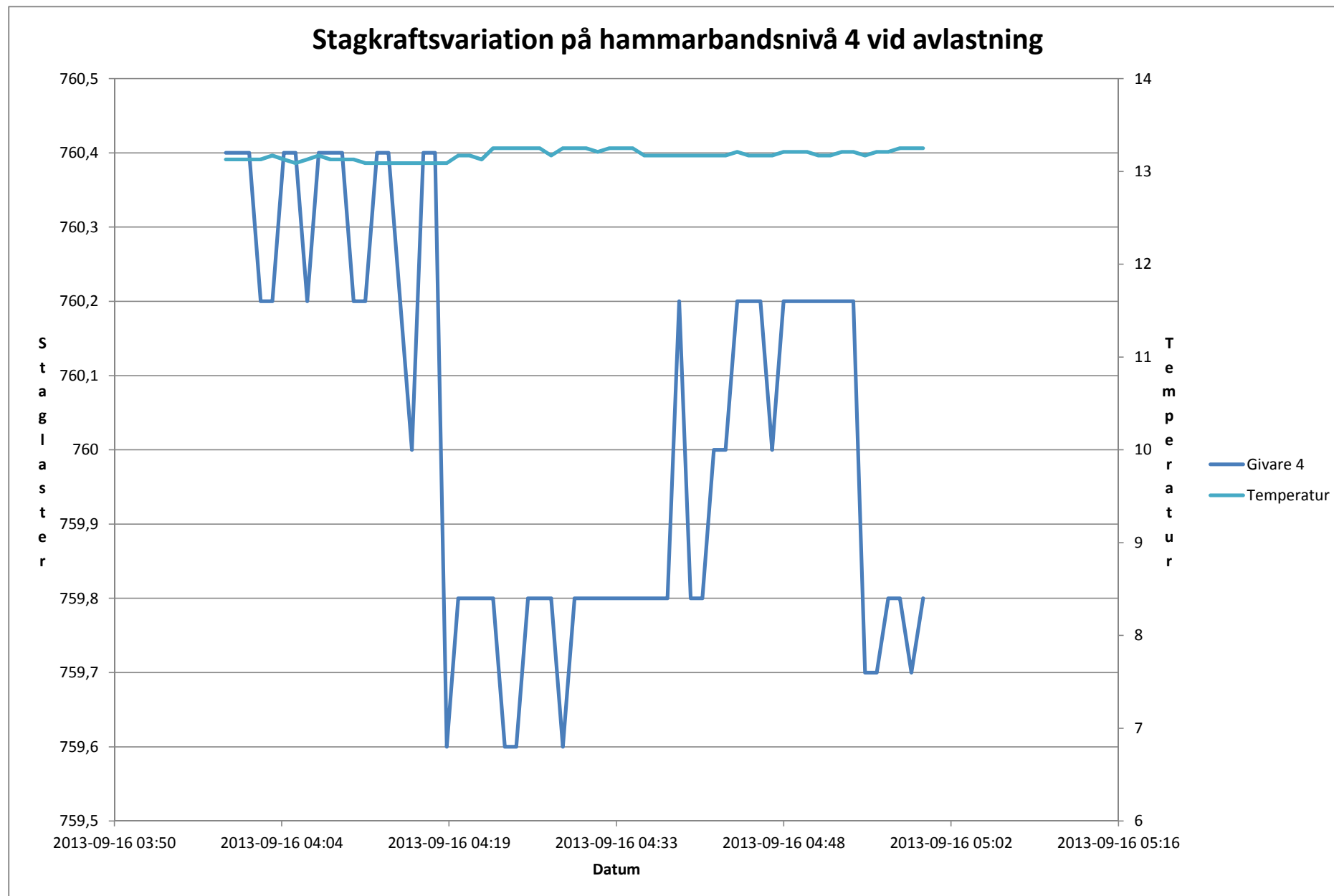


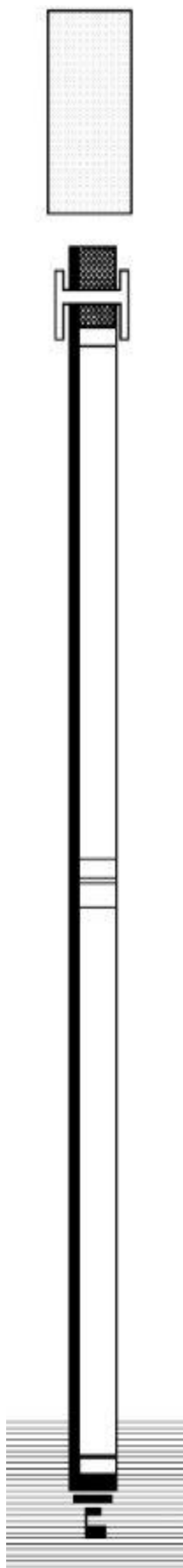












PÅLKOMMISSIONEN

Tekniskt PM 1:2014

Bilaga 3

