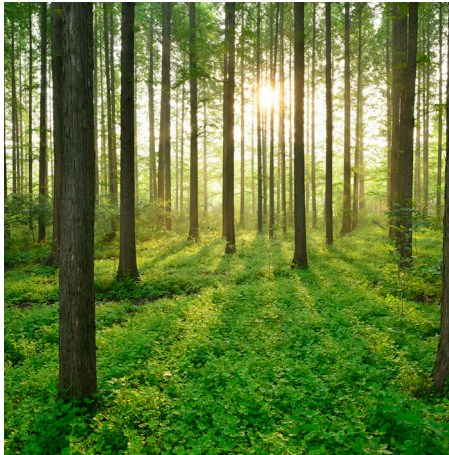
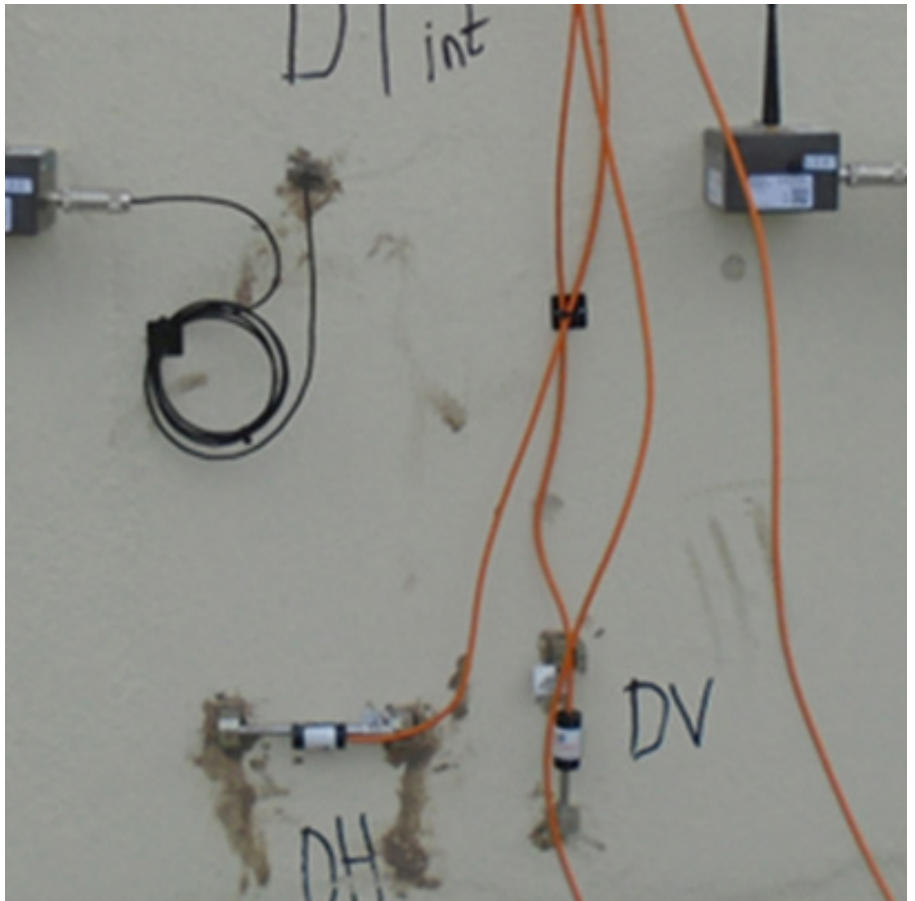


# DEFORMATIONER OCH TÖJNINGAR RESULTERANDE AV HÅLTAGNING I REAKTORINNESLUTNING PÅ RINGHALS 2

RAPPORT 2026:1179



BETONGTEKNISKT PROGRAM  
KÄRNKRAFT





# Deformationer och töjningar resulterande av håltagning i reaktorinneslutning på Ringhals 2

Mätning av temperatur, töjningar och deformationer

MANOUCHEHR HASSANZADEH



## Förord

Denna rapport redovisar resultaten från ett projekt som genomförts inom Energiforsks forskningsprogram för kärnkraftens betongkonstruktioner. Betongprogrammet syftar till att öka kunskapen om faktorer som påverkar säkerhet, underhåll och utveckling av betongkonstruktioner vid de nordiska kärnkraftverken.

Strukturella modifieringar av inneslutningar vid kärnkraftverk kräver noggranna bedömningar för att säkerställa upprätthållande av säkerhetsmarginaler. Förändringar kan påverka spänningar och deformationer, vilket gör tillförlitliga mätningar och korrekt tolkning avgörande för säker drift och långsiktig integritet.

Denna studie genomfördes för att mäta och utvärdera töjningar och deformationer i reaktorinneslutningen vid Ringhals 2 i samband med håltagning I reaktorinneslutningen. Projektets syfte var att öka förståelsen för konstruktionens respons vid sådana ingrepp.

Resultaten visar att kapning av spännkablar, särskilt horisontella kablar, hade en betydande inverkan på uppmätta töjningar, medan temperaturvariationer starkt påverkade både töjningar och deformationer. Studien drar slutsatsen att temperatureffekter är kritiska och bör hanteras genom kombinerade mätningar och analytisk modellering.

Studien har genomförts av Manouchehr Hassanzadeh, Sweco. Arbetet utfördes inom Energiforsks forskningsprogram för kärnkraftens betongkonstruktioner, som finansieras av Vattenfall, Uniper, Fortum, TVO, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi, Strålsäkerhetsmyndigheten och SKB.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

## Foreword

This report forms the results of a project performed within the Energiforsk Nuclear Power Concrete Program. The Concrete Program aims to increase the knowledge of aspects affecting safety, maintenance and development of concrete structures in the Nordic nuclear power plants.

Structural modifications to nuclear power plant containments require careful assessment to maintain safety margins. Changes can influence stresses and deformations, making reliable measurement and interpretation essential for safe operation and long-term integrity.

This study was conducted to measure and evaluate strains and deformations in the Ringhals 2 reactor containment associated with prestressing tendon release and concrete openings. The objective was to improve understanding of structural response under such interventions.

The results show that tendon release, particularly of horizontal tendons, significantly affected measured strains, while temperature variations strongly influenced both strains and deformations. The study concludes that temperature effects are critical and should be addressed through combined measurements and analytical modelling.

The study was carried out by Manouchehr hassanzadeh, Sweco. The study was performed within the Energiforsk Nuclear Power Concrete Program, which is financed by Vattenfall, Uniper, Fortum, TVO, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi, the Swedish Radiation Safety Authority and SKB.

These are the results and conclusions of a project, which is part of a research Program run by Energiforsk. The author/authors are responsible for the content.

## Sammanfattning

**Två öppningar har skapats i Ringhals 2:s reaktorinneslutning för att ta ut utrustning och material. Inför håltagningen avspändes flera spännkablar, vilket förväntades leda till lokala och globala deformationer och töjningar.**

Mätningarna utfördes med trådlösa sensorer som inkluderade:

- Temperatur.
- Töjning med trådlösa vibrerande stränggivare.
- Vertikal deformation med optiska sensorer.
- Radiell deformation med tiltsensorer.

Resultaten visade att avspänningen av spännkablarna, särskilt de horisontella, hade stor påverkan på de uppmätta töjningarna. Töjningarna varierade även med temperaturförändringar, vilket indikerar att luftens temperatur har en betydande inverkan på betongens töjning.

Vertikala deformationer följde överlag temperaturvariationer, men avspänningen av de vertikala kablarna visade en omedelbar ökning av deformationerna. Avspänningens av de horisontella kablarna påverkade dock inte deformationerna lika tydligt, vilket kan ha överskuggats av den samtidiga temperatursänkningen.

Radiella deformationer mättes med tiltsensorer, som visade stark korrelation med temperaturförändringar. Förskjutningar mellan två nivåer på reaktorinneslutningens yttre betongvägg kunde kvantifieras, och både avspänning och håltagningar hade en märkbar inverkan. Emellertid krävs mer detaljerade numeriska analyser för att särskilja effekterna än enbart temperatur.

Sammanfattningsvis är temperaturens inverkan på konstruktionens respons avgörande. För framtida uppdrag rekommenderas mätningar på flera djup, samt en kombination av praktiska mätningar och teoretiska analyser för att optimera resultatens tillförlitlighet och helhetstäckning.

## Nyckelord

Håltagning, reaktorinneslutning, deformationer, töjningar, vertikal deformation, radiell deformation, temperaturpåverkan, Ringhals II.

## Summary

**Two openings were created in the Ringhals 2 reactor containment to remove equipment and materials. Prior to the openings, several prestressing tendons were released, which was expected to cause both local and global deformations and strains.**

The measurements were carried out using wireless sensors, including:

- Temperature sensors
- Strain measurements using wireless vibrating wire gauges
- Vertical deformation measurements using optical sensors
- Radial deformation measurements using tilt sensors

The results showed that the release of the prestressing tendons, especially the horizontal tendons, had a significant effect on the measured strains. The strains also varied with temperature changes, indicating that air temperature has a strong influence on concrete strain.

Vertical deformations generally followed temperature variations. However, the release of the vertical tendons caused an immediate increase in deformation. The release of the horizontal tendons did not show a similarly clear effect on vertical deformation, which may have been masked by a simultaneous decrease in temperature.

Radial deformations were measured using tilt sensors and showed a strong correlation with temperature changes. Displacements between two levels on the outer concrete wall of the reactor containment could be quantified, and both tendon release and concrete openings had a noticeable effect. However, more detailed numerical analyses are required to separate these effects from temperature effects alone.

In summary, temperature has a critical influence on the structural response. For future projects, measurements at several depths are recommended, together with a combination of field measurements and theoretical analyses, to improve the reliability and completeness of the results.

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>8</b>
1.1	Bakgrund	8
1.2	Syfte	8
1.3	Genomförande	8
1.4	Begränsningar	8
<b>2</b>	<b>Ringhals II</b>	<b>9</b>
2.1	Reaktorinneslutningens konstruktion	9
2.2	Tidigare genomförd håltagning	10
2.3	Nya håltagningar	13
<b>3</b>	<b>Mätningar</b>	<b>15</b>
3.1	Typ och placering av mätninggivare	15
3.1.1	Töjningar	15
3.1.2	Vertikal deformation	17
3.1.3	Radiell deformation	18
3.1.4	Vibrationer	26
3.2	Mätningperioden och tidsintervallen för olika åtgärder	27
3.3	Exempel på Mätningresultat	27
3.3.1	Töjningar	27
3.3.2	Vertikala deformationer	28
3.3.3	Radiella deformationer	29
3.4	Mätningresultat	30
3.4.1	Temperatur	30
3.4.2	Töjningar	31
3.4.3	Vertikala deformationer	36
3.4.4	Radiella deformationer	43
<b>4</b>	<b>Diskussion och slutsatser</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>Referenslista</b>	<b>52</b>

# 1 Inledning

## 1.1 BAKGRUND

Två håltagningar har utförts i reaktorinneslutningen vid Ringhals 2 i syfte att möjliggöra uttag av utrustning och material. Inför genomförandet av håltagningarna avspändes ett antal spännkablar. Avspänning av spännkablar i kombination med håltagning bedömdes kunna ge upphov till både lokala och globala deformationer samt töjningar i reaktorinneslutningen, särskilt i områden i anslutning till håltagningszonerna.

Sweco har, på uppdrag av Energiforsks Betongprogram Kärnkraft, utarbetat förslag på mätstrategi omfattande val av mätmetoder, antal mätpunkter och deras placering, samt upphandlat entreprenör för leverans och installation av mätutrustning samt insamling och leverans av mätdata. Sweco har ansvarat för bearbetning och redovisning av mätdata.

I denna rapport redovisas underlaget för val av mätmetoder och placering av givare. Vidare presenteras uppmätta resultat samt en analys av de töjningar och deformationer som kan ha inducerats av avspänningen av spännkablar och genomförda håltagningar.

## 1.2 SYFTE

Uppdragets syfte var att bestämma deformationer i reaktorinneslutningens yttre betongvägg orsakade av avspänning av spännkablar samt utförda håltagningar.

## 1.3 GENOMFÖRANDE

Uppdraget genomfördes genom att:

- studera en tidigare genomförd avspänning av spännkablar och tillhörande håltagningar,
- fastställa lämplig typ av mätningar samt val och placering av sensorer,
- medverka i kontakter med entreprenör avseende leverans av sensorer och utförande av mätningar, samt
- bearbeta och rapportera mätresultat.

## 1.4 BEGRÄNSNINGAR

En fullständig bearbetning av mätresultaten förutsätter att temperatureffekter kan särskiljas och exkluderas. Detta kräver fördjupade analyser av mätdata, vilket inte har omfattats av föreliggande uppdrag.

## 2 Ringhals II

### 2.1 REAKTORINNESLUTNINGENS KONSTRUKTION

Följande uppgifter är en avskrift från Roth, Silfwerbrand och Sundquist (2002):

Ringhalsverket II har en effekt av 875 MW är av s. k. tryckvattentyp (PWR) av modifierad Westinghouse - modell. Verket byggdes under perioden 1971–73. Entreprenör var Vattenfall och projekteringen utfördes av Vattenfall.

Bottenplattan är grundlagd på inhomogen gnejs, efter förstärkning och utjämnades berget med betong. På betongen som gavs god planhet, utlades ett lager asfalt som glidskikt. På detta grundlades bottenplattan som är 3,35 m tjock. Bottenplattan utgör mothåll för de vertikala krafterna och bär i sin yttre del förankringarna för spännarmeringen till cylinderväggarna. Bottenplattan har belagts med 5 mm tätplåt av kvalitet SS2102. Denna plåt skyddas med ett 0,2 m tjockt lager expanderande lerkulor (Leca) och 0,3 m skyddsbetong. I efterhand har spalten med Leca fyllts med kalkvatten.

Betong Klass I, grupp c, K35, cement Gullhögen LH, max stenstorlek 64 (32-16) mm, tillsatsmedel 0,3 % Plastiment V, vct = 0,49. Ballast av grus, sand och sten.

Endast slakarmering Ks40 och Ks40S  $\Phi$ 32.

Cylinderväggen med total tjocklek 1,1 m och inre diameter 35,4 m tillverkades genom glidformsgjutning av först det inre skiktet med tjocklek 0,33 m och sedan det yttre med tjocklek 0,76 m. Glidformsgjutningen gjordes mot det tidigare tillverkade täta stålskalet med tjocklek 7 mm. Cylinderväggen är förspänd horisontellt och vertikalt. Den vertikala spännarmeringen är i den passiva änden förankrad i bottenplattan. Dessa ankare är åtkomliga från en tunnel under bottenplattan. De aktiva ankarna på ovansidan av ringbalken är åtkomliga för utbyte, provdragning och inspektion. De horisontella spännarmeringsenheterna är förankrade i fyra längsgående klackar på cylinderns utsida. Kablarna är från dessa klackar åtkomliga för inspektion, provdragning och utbyte.

Det inre missilskyddet är uppbyggt av betong Klass I, grupp d, K50, cement Limhamn Std, max. stenstorlek 32 mm, tillsatsmedel, vct = 0,42, ballast av grus, sand och sten, ballastens bergart gnejs.

Det yttre missilskyddet är uppbyggt av betong Klass I, grupp d, K50, cement Limhamn Std, max. stenstorlek 32 mm, tillsatsmedel 0.10-0.40 % Plastiment V, vct = 0,42, ballast av grus, sand och sten, ballastens bergart gnejs.

Slakarmering utgjordes av Ks40S.

Spännarmering utgjordes av system BBRV 139 $\Phi$ 6 i stålqualität 1500/1800 MPa. Kablarna lämnades efter uppspänningen vid en kraft av 4,8 MN vilket svarar mot spänningen 1220 MPa. Kablarna omges av spiralfalsade foderrör med tjocklek 0,5 mm som är fyllda med fett.

Taket utgörs av en i huvudsak sfärisk kupol med radie 28,4 m och pilhöjd 6,7 m. Kupolen göts mot det täta plåtskalet som var förstärkt med T-profiler i två skikt.

Det första inre skiktet var 0,2 m och det yttre 0,6 m. Kupolen är allsidigt förspänd genom tre lager spännarmering som ligger i tre olika riktningar med en inbördes förskjutning av ett tredjedels varv. Övergången mellan väggcylindern och kupolen utgörs av en ringbalk med höjd 7 m och tjocklek 1,8 m. Ringbalken kan sägas utgöra en påtjockning av cylinderväggen i den övre delen. Genom att kupolen mot cylindern övergår via en torusformad krökning blir ringbalkens tjocklek större i denna del. Ringbalken innehåller förankringar för såväl den vertikala spännarmeringen till cylinderväggarna som förankringarna till kablarna till kupolen. I kupoldelen ligger tätplåten med tjocklek 7 mm oskyddad för eventuell missilverkan.

Kupolen är uppbyggd av betong Klass I, grupp d, K50, cement Gullhögen LH, max. stenstorlek 32 mm, tillsatsmedel 0,25 % Plastiment V, vct = 0,42, ballast av grus, sand och sten, ballastens bergart gnejs.

Ringbalken är uppbyggd av betong Klass I, grupp d, K50, cement Limhamn Std, max. stenstorlek 32 mm, tillsatsmedel 0,25 % Plastiment V, vct = 0,42, ballast av grus, sand och sten, ballastens bergart gnejs.

Slakarmering utgjordes av Ks40S. Spännarmering utgjordes av system BBRV 139Φ6 i stålqualität 1500/1800 MPa. Kablarna lämnades efter uppspänningen vid en kraft av 4,8 MN vilket svarar mot spänningen 1220 MPa. Kablarna omges av spiralfalsade foderrör med tjocklek 0,5 mm som är fyllda med fett.

## 2.2 TIDIGARE GENOMFÖRD HÅLTAGNING

I slutet av 1980-talet utfördes, i samband med byte av ånggenerator, en håltagning i reaktorinneslutningen vid Ringhals 2. Inom ramen för detta arbete genomfördes beräkningar i syfte att bestämma deformationerna längs håltagningens kanter i olika skeden, från före avspänning av spännkablarna till efter genomförd håltagning, återgjutning och återuppspänning, se Carlsson, Thelandersson och Ottosen (1986). Ett av de nya hålen är lokaliserat till samma position som det tidigare hålet, vilket senare hade gjutits igen.

Några av de antaganden som låg till grund för beräkningarna redovisas nedan. Inneslutningen modellerades som en slät, homogen, vertikalt orienterad betongcylinder med följande geometriska mått:

Höjd	56 m
Radie, medel	18,25 m
Tjocklek	1,1 m

Cylinderväggen betraktas som ett solitt skal av betong (ett skikt) där ingen hänsyn tas till inverkan av den gastäta plåt som finns i väggen eller till slakarmeringen.

Inverkan av befintliga öppningar, pilastrar för förankring av spännkablar, infästningar för travers etc medräknas ej.

Inneslutningen är efterspänd i vertikalled och i ringsled med följande avstånd mellan kablarna:

Vertikala kablar c/c 750 mm

Horisontella kablar c/c 400 mm.

Kablarna som antages löpa friktionsfritt i kabelrören är placerade i väggens mittsektion vertikalt och med en radie av 18,5 m horisontellt (0,25 m utanför mittsektionen i väggen).

Av de vertikala kablarna avspännes 8 st vid öppningen (de som passerar genom hålet). Av de horisontella kablarna avspännes förutom 18 som passerar själva hålet även 9 st ovanför och 9 st nedanför hålet.

Den gamla respektive den ingjutna betongens E-modul antas vara 42 GPa respektive 38 GPa.

Beräkningarna beaktar två inbördes vinkelräta symmetriplan, vilket innebär att analysen utförs för en fjärdedel av cylindern och hålet (se Figur 1).

Rapporten redovisar även beräkningsresultat där den ingjutna betongens krypning och krympning har beaktats.

Figur 1 visar håltagningen från 80-talet. Hålets bredd och höjd uppgår till 6 respektive 7 m. Beräkningarna utfördes för en fjärde del av cylindern respektive hålet. Den del av hålet som är markerats med nodnummer 569, 729, 577 och 737 ingick i beräkningarna, och resultaten redovisas för de dessa noder i beräkningsrapporten. I figuren har dock symmetrierna i både höjd- och ringled utnyttjats för att illustrera de vertikala deformationerna hos samtliga hörn och kanter runt hålet.

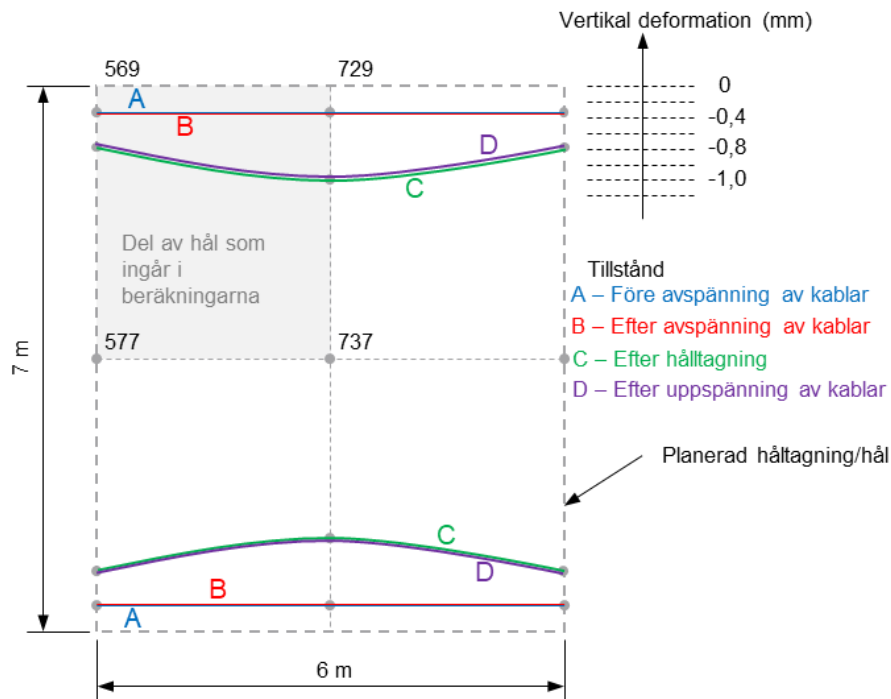
Deformationerna i olika skeden redovisas med kurvorna A – D i Figur 1:

- A. Före avspänning av spännkablarna. Detta belastningsfall motsvarar kablarnas initiala uppspänning. Som beskrivits ovan är beräkningen baserad på linjärelastisk teori.
- B. Efter avspänning av spännkablarna. Åtta vertikala kablar och 36 ringkablar spänns av.
- C. Efter genomförd håltagning.
- D. Efter återuppspänning av spännkablarna. Åtta vertikala kablar och 36 ringkablar spänns upp.

Deformationsskalan redovisas i figurens övre högra hörn. För den övre symmetridelen innebär en negativ deformation att håltagningsområdet är utsatt för hoptryckning.

Av figuren framgår att håltagningsområdet är hoptryckt i samtliga belastningsfall. Hoptryckningen i fall A är ungefär lika stor som i fall B, vilket indikerar att avspänning av spännkablarna inte har någon nämnvärd inverkan på hoptryckningen i håltagningsområdet. Detta beror sannolikt på att borttagningen av åtta vertikala kablar inte påverkar de vertikala deformationerna i någon större utsträckning.

Efter håltagning, fall C, pressas håltagningsområdets vertikala kanter samman. Mittpunkten på de horisontella kanterna förskjuts inåt i större utsträckning än ändpunkterna, vilket innebär att hålets mittsnitt utsätts för större vertikal hoptryckning än dess kanter. Efter ingjutning och återuppspänning, fall D, reduceras hoptryckningen marginellt.

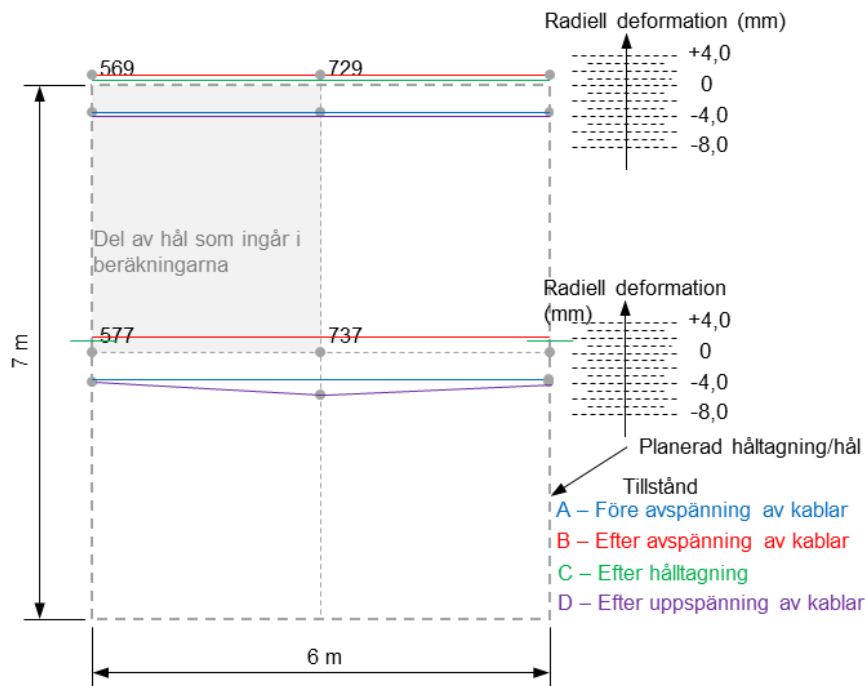


Figur 1 – Håltagning i reaktorinneslutningen. Beräkningarna utförs med två vinkelräta symmetriplan, motsvarande en fjärdedel av cylinderväggen. Resultat redovisas för noderna 577, 569, 729 och 737. Övre respektive nedre kurvor visar den vertikala deformationen hos hålets övre respektive nedre kant. Negativa värden anger nedåtriktad förflyttning.

Figur 2 visar de radiella deformationerna. Den initiala uppspänningen (fall A) samt uppspänningen efter ingjutning av betong (fall D) ger upphov till negativa radiella deformationer, det vill säga en minskning av reaktorinneslutningens diameter. Någon väsentlig skillnad mellan fall A och D kan inte konstateras. En mindre avvikelse förekommer dock i nod 737 (mitt i håltagningsområdet), vilket kan bero på förändrade spänningsförhållanden i hålets mitt till följd av att ett hål först tas upp och därefter gjuts igen.

Vid avspänning av kablarna (fall B) uppstår en relativt liten positiv radiell deformation. Detta beror på att håltagningsområdet inte är uppspant med horisontella kablar och därför förskjuts något utåt. Själva håltagningen (fall C) har ingen nämnvärd inverkan på de radiella deformationerna.

Beräkningarna visar att spänningskoncentrationer uppstår vid hålets hörn. Beräkningsmodellen möjliggör dock inte en kvantifiering av spänningarnas storlek eller deras inverkan på konstruktionen. Spänningarna bedöms emellertid kunna medföra lokala sprickbildningar efter återuppspänning av kablarna (fall D).



Figur 2 - Håltagning i reaktorinneslutningen. Beräkningarna utförs med två vinkelräta symmetriplan, motsvarande en fjärdedel av cylinderväggen. Resultat redovisas för noderna 577, 569, 729 och 737. Kurvorna visar radiell deformation vid hålets övre kant samt i hålets mitt. Negativa värden anger minskad diameter. Skalor redovisas till höger i figuren.

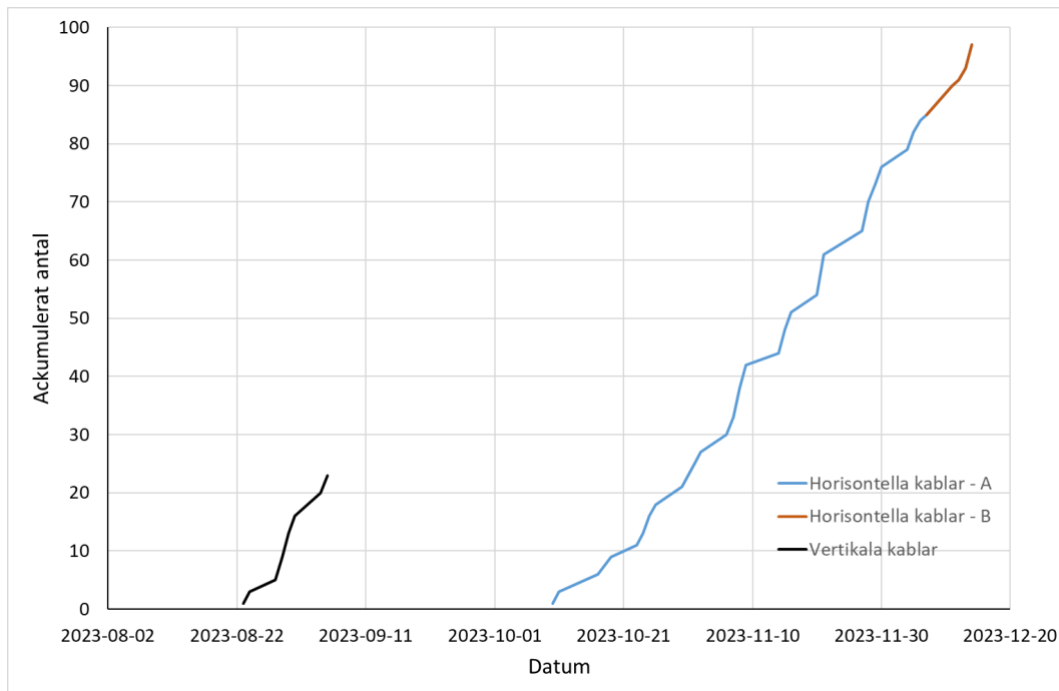
### 2.3 NYA HÅLTAGNINGAR

Håltagningspositionerna redovisas schematiskt i Figur 4. Ritningar och listor i bilaga 1 redovisar de spännkablar som avspändes före håltagningarna. Hål 1 har samma position och dimensioner som det äldre hål som beskrivs i avsnitt 2.2. Totalt avspändes 23 vertikala och 97 horisontella spännkablar.

Figur 3 visar det ackumulerade antalet kablar som avspändes under perioden augusti-december 2023. Figuren avser "Horisontella kablar – A", det vill säga de kablar som passerar genom håltagningsområdena eller är placerade i direkt anslutning till dessa. Tabell 1 redovisar start- och slutdatum för avspänningen av kablarna.

Tabell 1 – Start- och slutdatum för avspänningen av kablarna.

Kablar	Startdatum	Avslutningsdatum
Vertikala	2023-08-23	2023-09-05
Horisontella – A	2023-10-10	2023-12-06
Horisontella – B	2023-12-07	2023-12-14



Figur 3 – Ackumulerat antal avspända kablar under perioden augusti–december 2023. Horisontella kablar A passerar genom håltagningsområdena eller är placerade i direkt anslutning till dessa.

### Håltagning

Tabell 2 redovisar tidplan och tidsåtgång för de genomförda håltagningarna i Ringhals 2. Håltagningen mot bränslebyggnaden (Hål 2) genomfördes under perioden 29 januari-4 mars, 2024. Håltagningen mot gården (Hål 1) genomfördes under perioden 3 oktober-14 november, 2024.

Tabell 2 – Schemat för håltagningarna i Ringhals II.

#### Hål nr 2

Hål in mot bränslebyggnaden:

WP1 Pilot borrarling mellan reaktor byggnad och bränsle byggnad.	40.0h	2024-01-29 07:00 A
WP1 Borrarling av bottensektion i väggen mellan reaktor byggnad och bränsle byggnad.	56.0h	2024-02-15 07:00 A
Borrarling av toppsektion mellan reaktor byggnad och bränsle byggnad.	207.0h	2024-03-04 07:00 A

#### Hål nr 1

ÅG hål ut mot gården:

Borrarling av 2st mindre betongblock mellan Utsidan och reaktor byggnad	120.0h	2024-10-03 07:00 A
Borrarling av stora betongblock del 1	312.0h	2024-10-28 07:00 A
Borrarling av stora betongblock del 2	368.0h	2024-11-14 07:00 A

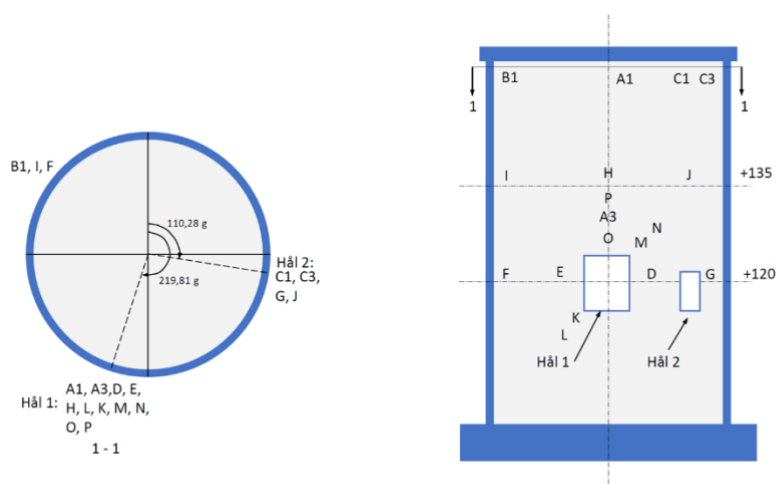
## 3 Mätningar

### 3.1 TYP OCH PLACERING AV MÄTNINGSGIVARE

Följande storheter mäts i samband med håltagningarna i Ringhals II:

1. Töjning och temperatur
2. Vertikal deformation
3. Radiell deformation
4. Vibrationer

Figur 4 visar den schematiska placeringen av mätställena på reaktorinneslutningen. Nivåangivelserna i figuren baseras på en lokal referenspunkt där bottenplattans överkant är definierad som nivå +100. Vinklar anges i gon (g), även kallat nygrad, vilket är en vinkelenhet motsvarande 1/100 av en rät vinkel. Ett helt varv motsvarar 400 gon. För exakt placering av de olika typerna av givare, se avsnitten om mätningar.



Figur 4 – Schematisk placering av mätgivare. Nivåer anges relativt lokal referenspunkt med bottenplattans överkant på nivå +100. Vinklar anges i gon (nygrad), där ett helt varv motsvarar 400 gon

#### 3.1.1 Töjningar

Töjningar mäts med givare av typen vibrerande sträng (Vibrating Wire), vilka monteras mellan två ankare som limmas i borrarade hål (Figur 5). Givarens upplösning är 1 microstrain och noggrannheten är  $\pm 0,1$  % av fullskala, där fullskalan uppgår till 3000 microstrain.

Vid varje mätställe mäts töjning i både vertikal och horisontell riktning. Figur 6 visar två givare monterade i mätställe D, där beteckningarna DV och DH avser töjningar i vertikal respektive horisontell riktning.

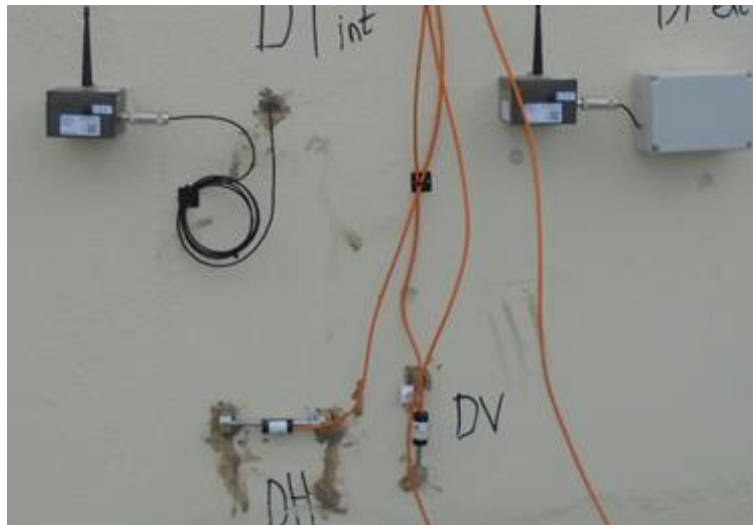
Vid vissa mätställen mättes även luftens och betongens temperatur. Betongens temperatur mättes i ett ca 40 mm borrarat hål (Figur 6), som efter installation av givaren fylldes med lim. Tabell 3 redovisar mätställets placering.

Tabell 3 – Placering av mätställen för mätning av vertikal och horisontell töjning samt temperatur.

Mätställe	Typ av givare	Höjd (+m)	Vinkel (gon)
D	Töjning och temperatur	119,5	200,2
E	Töjning	120	226,6
F	Töjning och temperatur	120,92	290,0
G	Töjning	120,8	84,0
H	Töjning	130,1	216,8
I	Töjning	130,92	288,0
J	Töjning	124	108,5
K	Töjning	118,5	234,4
L	Töjning	117,9	237,1
M	Töjning	124,85	205,2
N	Töjning	125,35	202,9
O	Töjning	125,5	217,8
P	Töjning	132,2	218,5



Figur 5 – Givare för mätning av betongs töjningar. Givaren är av typen vibrerande sträng (Vibrating Wire) som monteras på två ankare som limmas borrarade hål.



Figur 6 – Montering av givare för töjningsmätning, där DH och DV avser horisontell respektive vertikal töjning vid mätställe D.

### 3.1.2 Vertikal deformation

Deformationer, närmare bestämt förskjutningen mellan två relativt avlägsna punkter, mättes med en optisk metod. Mätutrustningen bestämmer avståndet mellan två punkter genom att sända ut en laserstråle från den ena punkten och ta emot den reflekterade strålen från den andra punkten. Metoden är särskilt lämpad för mätning av deformationer som uppstår mellan två avlägsna punkter.

Figur 7 visar den utrustning som användes vid mätningar i Ringhals 2. Utrustningen benämns FlatMesh Optical Displacement Sensor Node och levereras av Senceive.com. Mätinstrumentets upplösning är 0,1 mm och dess repeterbarhet är  $\pm 0,15$  mm.

De vertikala deformationerna mättes på mätställena A, B och C. Givarna monterades vid punkterna A1, A3, B1, C1 och C3, medan de motstående (reflekterande) punkterna utgjordes av A2, A4, B2, C2 och C4. Mätutrustningens respektive de reflekterande punkternas placering redovisas i Tabell 4.

Tabell 4 – Placering av optiska sensorer och reflekterande punkter.

Mätpunkt	Givare	Höjd (+m)	Vinkel (gon)	Vinkel (grad)
A1	Optisk	142,3	219,8	197,8
A2		105,1	219,8	197,8
A3	Optisk	125,5	219,0	197,1
A4		114,2	219,0	197,1
B1	Optisk	142,47	295,0	265,5
B2		104,5	295,0	265,5
C1	Optisk	142,0	109,0	98,1
C2		123,3	109,0	98,1
C3	Optisk	142,4	70,0	63,0
C4		120,0	70,0	63,0



Figur 7 – Optisk sensor för mätning av deformationer. Till vänster: monterad på Ringhals 2:s reaktorinneslutning. Till höger: bild från tillverkarens katalog.

### 3.1.3 Radiell deformation

#### *Allmänt*

Mätning av den yttre betongväggens radiella deformationer bör utföras i flera väl fördelade mätpunkter placerade på väggens inre och yttre sidor. Den yttre betongväggens insida är dock inte åtkomlig utan omfattande ingrepp och har därför uteslutits i denna studie.

De på utsidan placerade mätpunkternas rörelser måste bestämmas i förhållande till en eller flera stabila referenspunkter. Av flera praktiska skäl bedömdes detta förfarande vara svårt att genomföra. Mätningstreprenören föreslog därför att

mätning med triaxiella tilsensorer (tippningssensorer) skulle kunna vara lämplig i det aktuella fallet.

Tilsensorer består av tre accelerometrar som mäter acceleration i tre riktningar (x, y och z). De uppmätta accelerationerna kan integreras till hastighet respektive rörelse hos den punkt där sensorn är monterad. Rörelsen anges vanligtvis som lutning (m/m) eller vinkeländring i grader eller radianer. Mätmetoden är trådlös och relativt enkel att hantera.

Vid beställning och montering av sensorerna uppstod ett missförstånd mellan mätningstreprenören och författaren till denna rapport. Författaren ställde vid flera tillfällen frågan om sensorerna enbart mäter vinkeländring i en punkt eller om de även mäter förflyttning av punkten. Svaret var vid samtliga tillfällen att båda dessa storheter mäts.

Författaren saknade tidigare erfarenhet av mätmetoden och tidspresen var stor, då tiden för avspänning av kablarna närmade sig. Det korrekta svaret på frågan är emellertid att varje mätenhet i praktiken enbart mäter vinkeländring i den punkt där sensorn är monterad, vilket beskrivs närmare nedan i detta avsnitt.

Mätmetoden kan dock användas för att bestämma en konstruktions deformationer och rörelser, förutsatt att flera sensorer används och kombineras på ett ändamålsenligt sätt. Med facit i hand kan konstateras att placeringen av sensorerna borde ha valts annorlunda.

#### *Metodbeskrivning*

Tilsensorer kan ha olika yttre utformning men mäter samma storheter. Vanligen presenteras vinkeländringen mellan sensorns axlar (x, y och z) och gravitationsaxeln (tyngdaccelerationsaxeln). Sensorn monteras normalt så att dess x-axel sammanfaller med gravitationsaxeln. Det är emellertid svårt att montera sensorn så att x-axeln exakt sammanfaller med gravitationsaxeln, och denna avvikelse måste beaktas vid bearbetning av mätresultaten.

Figur 9 visar den situation där sensorns x-axel inte sammanfaller exakt med gravitationsaxeln. Figuren illustrerar vinklarna  $\theta$  och  $\varphi$ , vilka definieras som vinklarna mellan y- respektive z-axeln och deras projektioner på det horisontella planet. Som framgår av figuren lutar yz-planet i förhållande till horisontalplanet. I initialläget gäller  $\theta = \theta_1$  och  $\varphi = \varphi_1$ . Det bör noteras att  $\theta_1$  och  $\varphi_1$  ska bestämmas innan mätningarna påbörjas.

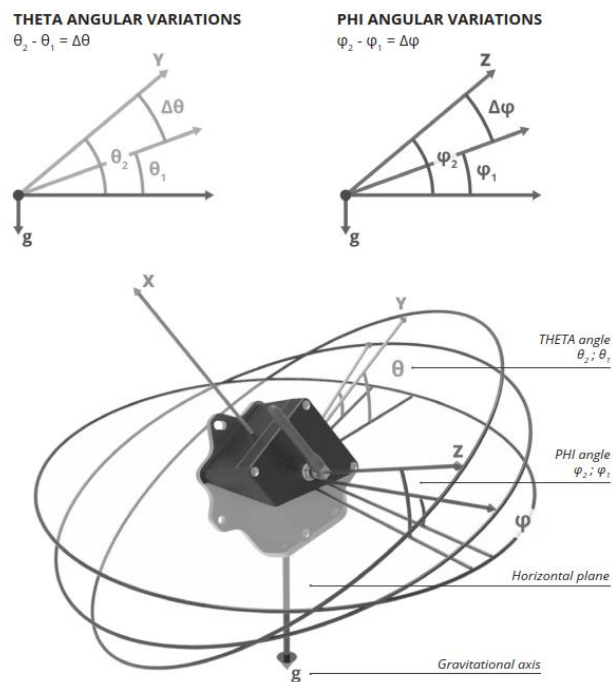
I de fall där flera tilsensorer monteras på en konstruktion bör konstruktionens huvudriktningar först fastställas, och de lokala sensorriktningarna benämnas i enlighet med dessa. Figur 10 visar två tilsensorer monterade på en bro. Som framgår av figuren är den ena sensorns z-axel orienterad i konstruktionens längdriktning (longitudinalriktning), medan den andra sensorns z-axel är orienterad i tvärriktningen (transversalriktning).



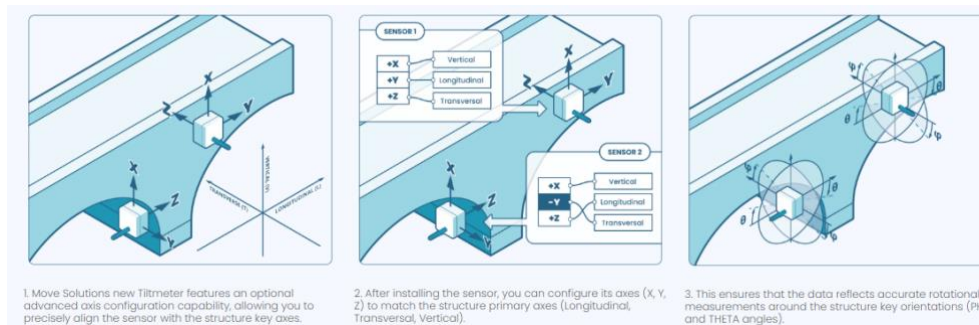
(a) [www.movesolutions.it](http://www.movesolutions.it)

(b) [www.senceive.com](http://www.senceive.com)

Figur 8 – Olika utformningar av triaxiella tilsensorer. Typ (b) har använts vid mätningar i Ringhals 2.



Figur 9 – Presentation av tilsensors rotation i förhållande gravitations- och horisontalaxeln.



Figur 10 – Exempel på placering av tilt-sensorer på en bro, <https://www.movesolutions.it/tiltmetrer/>.

Den tiltsensor som användes vid mätningar i Ringhals II benämns Nano Triaxial Tilt Sensor Node Range och levererades av företaget Senceive. Sensorns upplösning respektive repeterbarhet är  $0,0001^\circ$  ( $0.0018 \text{ mm/m}$ ) och  $\pm 0.0005^\circ$  ( $\pm 0.009 \text{ mm/m}$ ) - <https://www.senceive.com/products/tilt-sensors/nano-triaxial-tilt-sensor-node-range>.

Betrakta stolparna i Figur 11. Stolpen i Figur 11a är ledad i både punkt A och Punkt C, medan stolpen i Figur 11b är fastinspänd i punkt A och fri i punkt C. Antag att en triaxiell tiltsensor är monterad i punkt B på båda stolparna. Stolpens x-axel sammanfaller med gravitationsaxeln. Figuren visar stolpens xy-plan, och z-axeln är vinkelrätt mot xy-planet. Båda tiltsensorerna mäter vinkeländringar i tre riktningar:  $\theta_z, \theta_y, \theta_x$ .

Antag vidare att längderna hos sträckorna A-B och A-C är  $l_B$  respektive  $l_C$ . Antag att punkt C på båda stolparna förskjuts  $\delta_{Y,C0}$  i Y-riktningen, det vill säga  $\delta_{Y,C} = \delta_{Y,C0}$ . Förskjutning i z-riktningen antas vara noll,  $\delta_z = 0$ .

Förskjutningen i punkt B söks, under antagande om små vinkeländringar.

### Fall a

Tiltsensorn i Figur 11a mäter följande vinkeländringar:

$$\theta_{a-y} = \theta_{a-y,0}$$

$$\theta_{a-z} = 0$$

$\theta$  är vinkeln mellan tangenten till stolpens längdaxel och gravitationsaxeln. I det följande förutsätts att vinklar anges i radianer. Vinkeln utgör antingen sensorns direkta mätresultat eller kan beräknas utifrån sensors utdata. Eftersom stolpen inte kröks är  $\theta_{a-y}$  konstant längs stolpens x-axel.

Förskjutningarna i punkt B kan därefter beräknas enligt nedan:

$$\delta_{Y,B} = l_B \cdot \sin \theta_{a-y,0} = l_B \cdot \theta_{a-y,0} \quad (3-1)$$

$$\delta_{Z,B} = 0$$

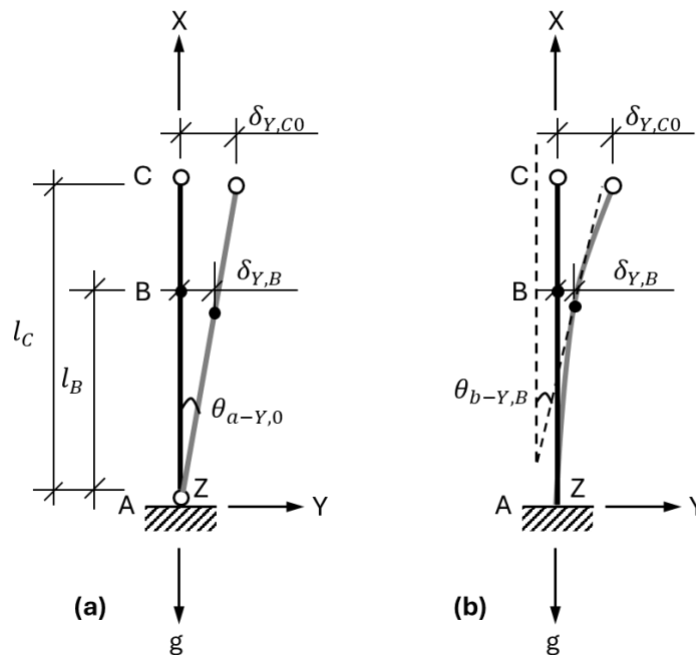
$$\delta_{X,B} = -l_B \cdot (\sin \theta_{a-y,0})^2 = -l_B \cdot (\theta_{a-y,0})^2 \quad (3-2)$$

Eftersom stolpen inte kröks kan förskjutningen i punkt C beräknas enligt nedan:

$$\delta_{Y,C} = l_C \cdot \theta_{a-y,0} = \delta_{Y,C0}$$

$$\delta_{z,c} = 0$$

$$\delta_{x,c} = -l_C \cdot (\theta_{a-y,0})^2$$



Figur 11 – Tippning hos en ledad stolpe samt deformation hos en fast inspänd stolpe under inverkan av en horisontell kraft.

### Fall b

Tiltssensorn i Figur 11b mäter följande vinkeländringar:

$$\theta_{b-y} = \theta_{b-y,B}$$

$$\theta_{b-z} = 0$$

Stolpen är fast inspänd, vilket innebär att krökningen är noll i inspänningsnittet och ökar längs med stolpens x-axel. Tiltssensorn mäter krökningen i punkt B. För att beräkna förskjutningen i punkt B måste krökningarna mellan punkt A och B integreras. Detta kan utföras på flera sätt. Nedan anges två exempel:

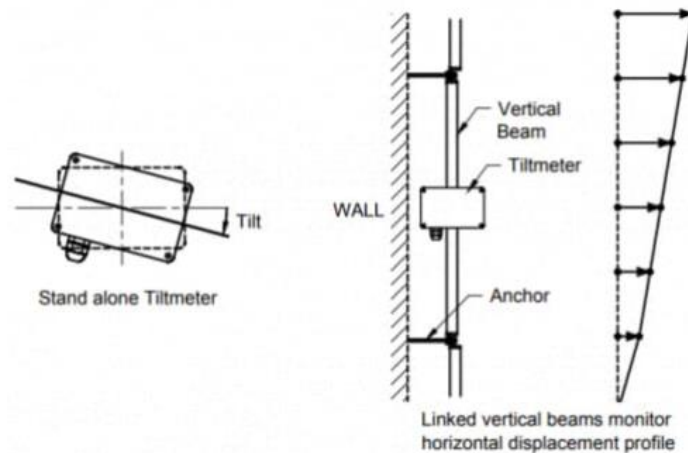
#### Exempel b1

Om krökningsfunktionen är känd, vilket i detta fall gäller för ett relativt enkelt belastningsfall, kan funktionen anpassas till mätresultatet för att bestämma förskjutningen i punkt C.

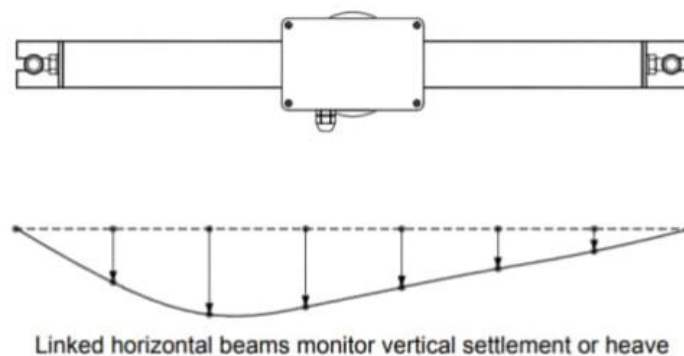
#### Exempel b2

Om krökningsfunktionen inte är känd måste flera tilt-sensorer användas, se Figur 12 och Figur 13. Tilt-sensornerna mäter luntningen hos varje segment, och den förskjutning som uppstår inom respektive segmentet kan beräknas med hjälp av Ekvation (3-1). Genom att summera segmentförskjutningarna kan konstruktionens

förskjutningsprofil bestämmas. Alternativt kan en funktion anpassas till de uppmätta krökningarna (vinkeländringarna), varefter krökningsfunktionen integreras.



Figur 12 – Mätning av horisontella förskjutningar med tilsensorer längs en väggs vertikalaxel, <https://www.encardio.com/blog/el-tiltmeters-operation-installation-applications>.

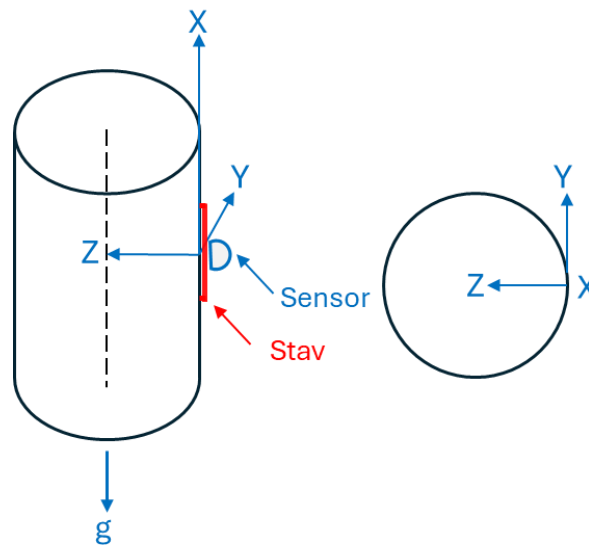


Figur 13 – Mätning av vertikala förskjutningar längs en balks längdaxel, <https://www.encardio.com/blog/el-tiltmeters-operation-installation-applications>.

Nedan beskrivs de vinkeländringar som mäts av den tilsensor som monterades på utsidan av reaktorinneslutning vid Ringhals 2.

Anta att den cylinder som visas i Figur 14 representerar reaktorinneslutningen. Vidare antas att tilsensorn är monterad på en liten stav som är upplagd på två punkter. Stavens längdaxel sammanfaller med x-axeln, som är parallell med gravitationsaxeln. y-axeln utgör tangenten till cylinderns yttre rand, projicerad på horisontalplanet. z-axeln sammanfaller med cylindertvärsnittets radiella riktning.

Om dessa förutsättningar är uppfyllda mäter sensorn stavens tippning i y- respektive z-riktning. Därutöver mäter sensorn vinkeländringen mellan stavens längdaxel (x-axeln) och gravitationsaxeln.



Figur 14 – Montering av tilt-sensorn i Ringhals och mätningsriktningar.

*Placering av tilt-sensorer*

Placering av tilt-sensorer framgår av Tabell 5

Tabell 5 – Placering av tilt-sensorer.

Mät punkt	Givare	Höjd (+m)	Vinkel (gon)
D	Radiell deformation	120	202,2
E	Radiell deformation	120	227,9
F	Radiell deformation	120,92	290,0
G	Radiell deformation	120,8	81,0
H	Radiell deformation	129,5	216,8
I	Radiell deformation	130,92	290,0
J	Radiell deformation	129,633	108,0

En reaktorinneslutning är en stor konstruktion som är exponerad för uteklimatet. Den består dessutom av flera olika delar – såsom piedestal, genomföringar, ringbalk och bottenupplag – vilka påverkar dess styvhet och deformationsegenskaper. Den uppställning av tiltsensorer som enligt ovan valdes för att mäta reaktorinneslutningens radiella deformationer var därför inte lämplig. Nedan visas i stället en uppställning som borde ha valts.

Anta att cylindern i Figur 15a representerar den yttre cylinderväggen med en höjd av 56 m, en yttre diameter på 37,6 m och en tjocklek på 0,77 m. Cylindern är uppspänd med vertikala spännkablar mot en tjock betongplatta. På ovasidan är den ansluten till en ringbalk och uppspänd mot takkonstruktionen (kupolen).

För att mäta cylinderns vinkeländringar längs en vertikal linje från botten (VB) till toppen (VT) krävs minst tre sensorer, markerade SVB, SVM och SVT i Figur 15a. För att bestämma variationen av vinkeländringen mellan punkterna VB och VT anpassas en kurva - lämpligen med minsta kvadratmetoden - till sensorernas mätresultat. Denna kurva benämns i fortsättningen rotationskurva.

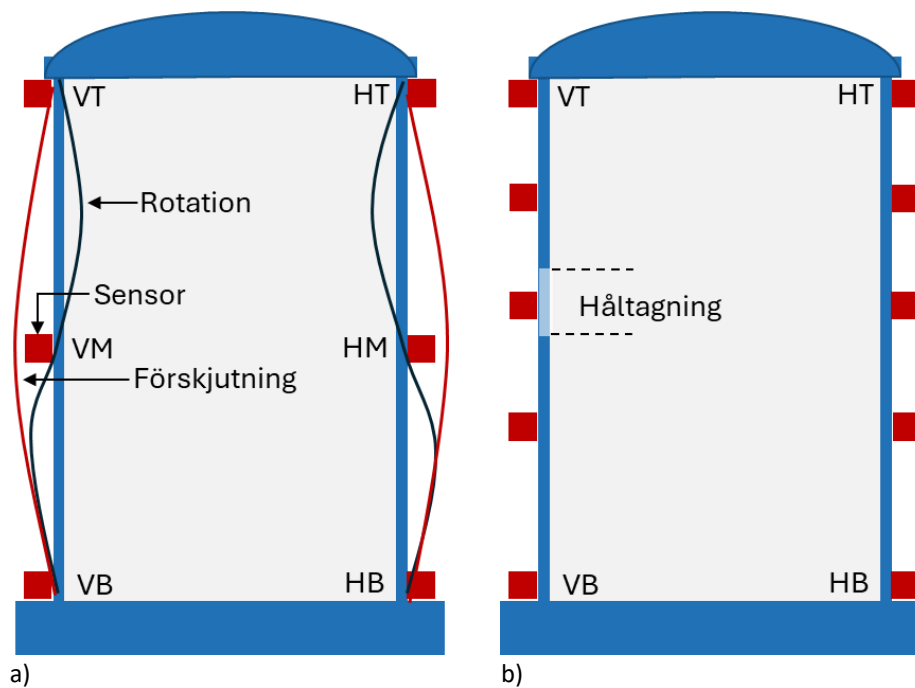
För att bestämma deformationerna måste förskjutningen i en av punkterna (referenspunkten) vara känd. Det kan antas att punkt VB är fixerad och inte förskjuts, varefter förskjutningarna av övriga punkter mellan VB och VT bestäms relativt VB. Förskjutningen av punkt VM relativt VB erhålls genom att integrera rotationskurvan från VB till VM. Motsvarande erhålls för punkt VT genom integration av rotationskurvan från VB till VT.

Vid bestämning av förändringar i konstruktionens diameter ska samma antal sensorer placeras på den diagonalt motstående sidan (se punkterna HB, HM och HT). Diametervariationer erhålls genom algebraiskt (med tecken) adderade förskjutningar från båda sidorna, där förskjutning utåt från cylindern ges positivt tecken.

Mätmetoden förutsätter att temperaturen är likformig över hela konstruktionen. Vidare antas att konstruktionen har homogena fysikaliska och mekaniska egenskaper längs sträckan VB-VT. Om dessa förutsättningar inte är uppfyllda bör antalet sensorer ökas.

Vid håltagning genom cylinderväggen bör antalet sensorer ökas till minst fem, eller till tio om även diametervariationer ska bestämmas (se Figur 15b). Mätningarna bör påbörjas ett par månader före håltagningen och fortsätta ett par månader efter att arbetet avslutats.

Det rekommenderas att numeriska analysmetoder används för att bestämma lämpligt antal sensorer samt deras placering på konstruktionen. Med hjälp av numeriska modeller kan man lättare särskilja reversibla temperatureffekter från andra effekter som avspänning och håltagning samt inverkan av fysikaliska och mekaniska ojämnheter, såsom varierande godstjocklek och genomföringar.



Figur 15 – Lämplig placering av mätsensorer för bestämning av deformationer i en cylindrisk konstruktion med hjälp av tiltssensorer.

### 3.1.4 Vibrationer

Vibrationerna mättes på mätställena D och O ( Tabell 6). Mätningarna utfördes med vibrationssensorn SWARM (Figur 16), som tillhandahålls av OMNIDOTS (www.omnidots.com). Sensorn är trådlös ansluten till OMNIDOTS:s mätsystem, där mätdata lagras och kan hämtas för granskning och vidare bearbetning.

Sensorn registrerar acceleration i tre ortogonala riktningar. Mätresultaten kan redovisas i olika former, exempelvis som hastighet eller dominerande frekvens som funktion av tiden.

Inga mätdata registrerades på grund av ett missförstånd mellan leverantörerna Senceive och OMNIDOTS.

Tabell 6 – Placering av utrustning.

Mätpunkt	Givare	Höjd (+m)	Vinkel (gon)
D	Vibrationer	120	191,7
O	Vibrationer	125,5	212,5



Figur 16 – Vibrationsmonitorn SWARM (<https://www.omnidots.com/en/products/swarm-vibration-monitor>).

## 3.2 MÄTNINGSPERIODEN OCH TIDSINTERVALLEN FÖR OLIKA ÅTGÄRDER

Mätningarna inleddes den 5 juli 2023 och pågår fortfarande. Avspänning av spännkablarna påbörjades i slutet av september 2023 och pågick till slutet av december 2023. Figur 17 redovisar uppmätta töjningar och temperaturer vid mätställe D under perioden juli 2023-maj 2025.

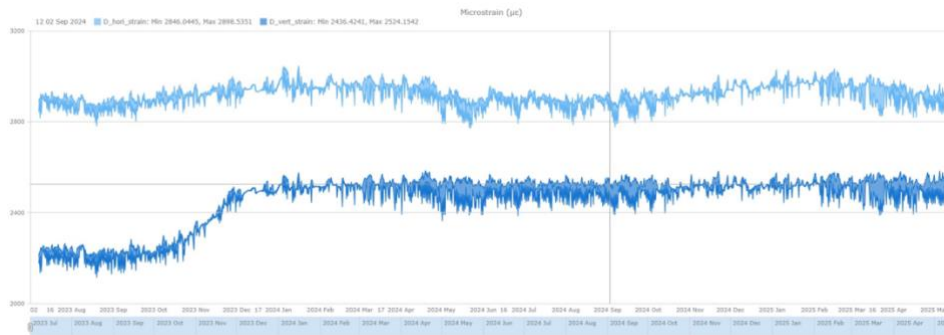
## 3.3 EXEMPEL PÅ MÄTNINGSRESULTAT

### 3.3.1 Töjningar

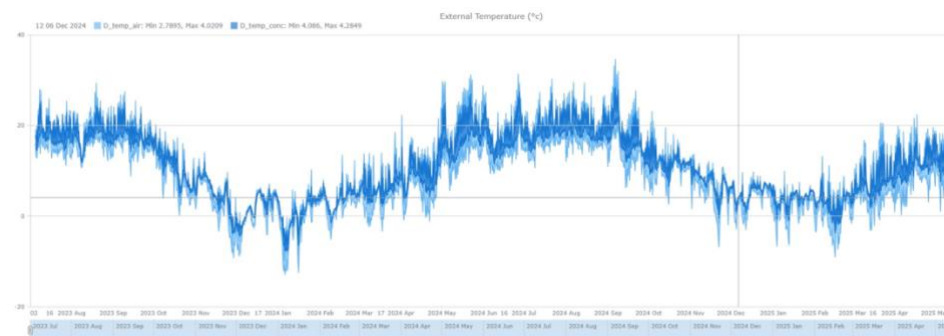
Resultaten från mätningar av töjningar och temperaturer under perioden juli 2023-maj 2025 redovisas sammanställda i Bilaga 2a. Nedan presenteras resultaten från mätställe D.

Av Figur 17 framgår att avspänningen av spännkablarna har haft en tydlig inverkan på uppmätta töjningar. Töjningarna påverkas även av temperaturvariationer. Temperaturberoende variationer i töjning är mer framträdande i vissa mätpunkter och riktningar, medan de är mindre uttalade i andra.

Betongens temperatur följer i huvudsak lufttemperaturen, men är högre än lufttemperaturen under den kalla årstiden och lägre under den varma årstiden. Betongen dämpar dessutom luftens temperaturvariationer, med en större dämpning under den kalla årstiden. Motsvarande beteende kan även observeras vid mätställe F.



a) Ljusblå: horisontal töjning. Mörkblå: vertikal töjning.



b) Ljusblå: lufttemperatur. Mörkblå: temperatur i betong.

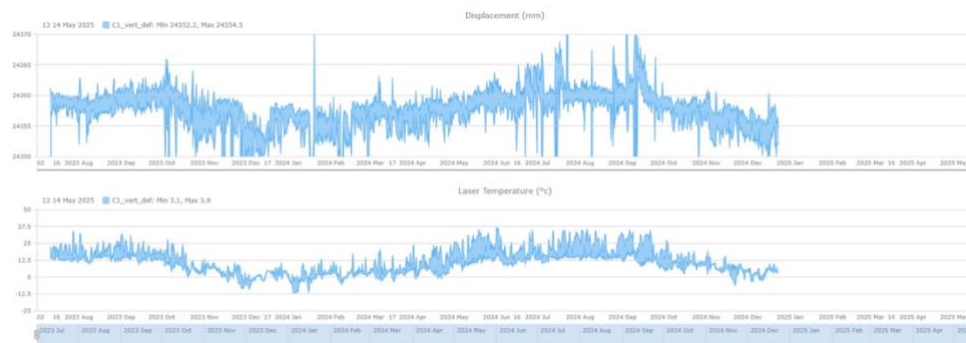
Figur 17 – Resultat från mätningar av töjningar och temperaturer vid mätställe D.

### 3.3.2 Vertikala deformationer

Resultaten från mätningar av vertikal deformation under perioden juli 2023-maj 2025 redovisas sammanställda i Bilaga 3. Nedan presenteras resultaten från mätställe C1 (Figur 18) och mätställe B1 (Figur 19).

Av figurerna framgår att variationerna i vertikal deformation vid mätställe C1 i huvudsak följer temperaturvariationerna, medan motsvarande samband inte kan observeras vid mätställe B1. Vid mätställe B1 uppvisar mätkurvan i februari 2024 ett plötsligt språng, vilket orsakades av att laserreflektorn tillhörande mätutrustningen oavsiktligt flyttades. Laserreflektorn återplacerades i november 2024, varefter mätningarna återupptogs (Figur 19 - Figur 20).

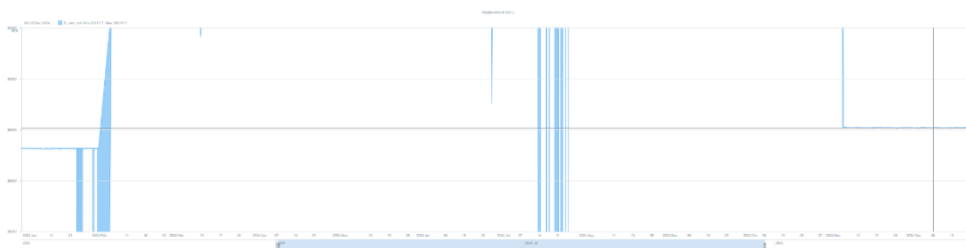
Mot bakgrund av detta bedöms resultaten från mätställe B1 vara behäftade med osäkerheter och därmed inte tillförlitliga.



Figur 18 – Resultaten av mätningar av vertikal deformation (överst) och temperatur (nederst) i mätställe C1.



Figur 19 – Resultat från mätningar av vertikal deformation (övre diagram) och temperatur (nedre diagram) vid mätställe B1.



Figur 20 – Resultat från mätningar av vertikal deformation vid mätställe B1 under perioden januari 2024-januari 2025.

### 3.3.3 Radiella deformationer

Resultat från mätningar av radiell deformation under perioden juli 2023-maj 2025 redovisas sammanställda i Bilaga 4. Mätningarna avser vinkeländringar (rotationer) i tre riktningar (x, y och z); se avsnitt 3.1.3 för riktningssdefinitioner. Nedan redovisas resultaten från mätställe D (Figur 21).



Figur 21 – Resultat från mätningar av radiell deformation vid mätställe D; se avsnitt 3.1.3 för definition av riktningarna.

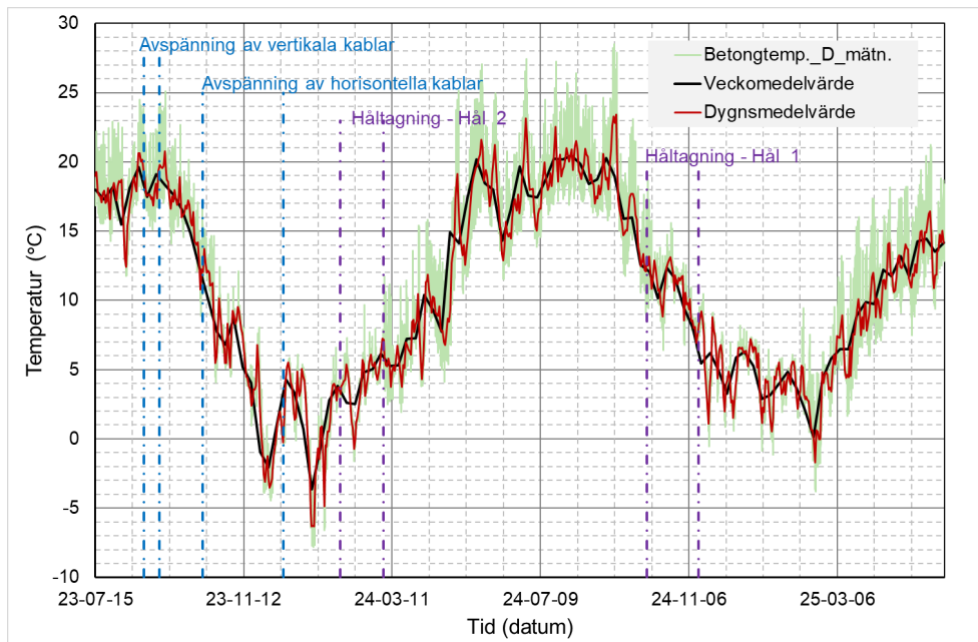
### 3.4 MÄTNINGSRESULTAT

#### 3.4.1 Temperatur

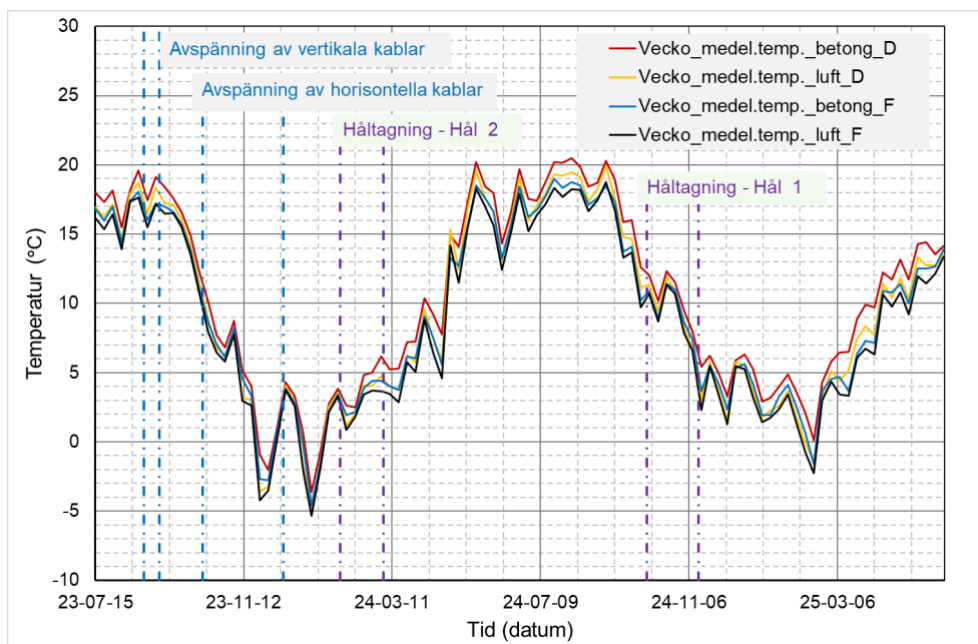
Temperaturen har uppmätts i både luft och betong (40 mm in i betongen) vid mätpunkterna D och F.

Figur 22 redovisar uppmätt betongtemperatur i punkt D under perioden juli 2023-maj 2025. Figuren visar dels sensorernas registrerade temperaturer med en mätfrekvens om två mätningar per timme, dels dygns- och veckomedelvärden. Motsvarande sammanställningar för betongtemperaturen i punkt F samt för lufttemperaturen vid punkterna D och F redovisas i Bilaga 1.

Figur 23 visar temperaturens veckomedelvärden för luft och betong i punkt D och punkt F mellan juli 2023 och maj 2025. Av figuren framgår att temperaturvariationerna följer varandra väl och att skillnaden mellan medeltemperaturerna är liten.



Figur 22 – Uppmätt betongtemperatur vid mätpunkt D under perioden juli 2023-maj 2025.



Figur 23 – Veckomedelvärden för luft- och betongtemperatur vid mätpunkterna D och F under perioden juli 2023-maj 2025.

### 3.4.2 Töjningar

Två typer av töjningsförändringar kan identifieras i provningsresultaten (Figur 24):

Typ A En tydlig förändring, ofta en ökning, av töjningen som initieras mellan slutet av september och början av november 2023 och som avtar mot slutet av december samma år.

Typ B En tydlig förändring som i huvudsak följer samma frekvens som omgivningens säsongsbundna temperaturvariationer.

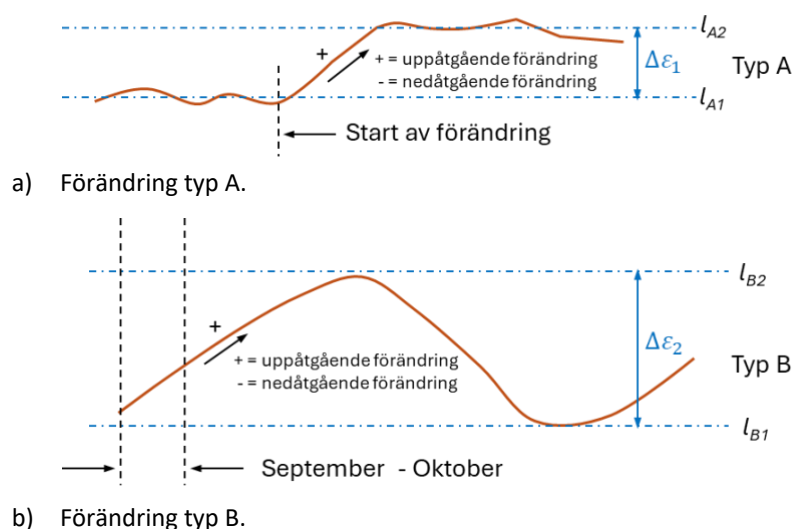
Mätresultaten har sammanställts i Bilaga 2a. Resultaten från töjningarna redovisas i Tabell 7.

Typ A töjningsförändringar ( $\Delta\varepsilon_1$ , microstrain) definieras som avståndet mellan de horisontella linjerna  $l_{A1}$  och  $l_{A2}$  i Figur 24a. Linjen  $l_{A1}$  är anpassad till mätresultaten före avspänning av kablarna, i huvudsak mätdata från augusti 2023. Linjen  $l_{A2}$  är anpassad till mätresultaten efter att samtliga kablar har avspänts, det vill säga från och med den 14 december 2023 (se Bilaga 2b). Värden på  $\Delta\varepsilon_1$  redovisas i Tabell 7, kolumn 2. I tabellens fjärde kolumn anges typ av förändring med tecknet "+" respektive "-", där uppåtgående kurva betecknas "+" och nedåtgående kurva "-". I den femte kolumn anges den månad då förändringen börjar utvecklas.

Typ B töjningsförändringar ( $\Delta\varepsilon_2$ , microstrain) definieras som avståndet mellan de horisontella linjerna  $l_{B1}$  och  $l_{B2}$  i Figur 24a. Linjerna är anpassade till mätresultatens minimi- respektive maximivärden under perioden augusti 2023-april 2024 (se Bilaga 2b). Värden på  $\Delta\varepsilon_2$  redovisas i Tabell 7, kolumn 3. En uppåtgående kurva mellan september och oktober 2023 betecknas "+" medan en nedåtgående kurva betecknas "-".

I Figur 25 har mätresultaten placerats ut vid respektive mätpunkt. Töjningsvärden lika med noll redovisas inte i figuren. De värden som visas i Figur 25 överensstämmer med värdena i Tabell 7.

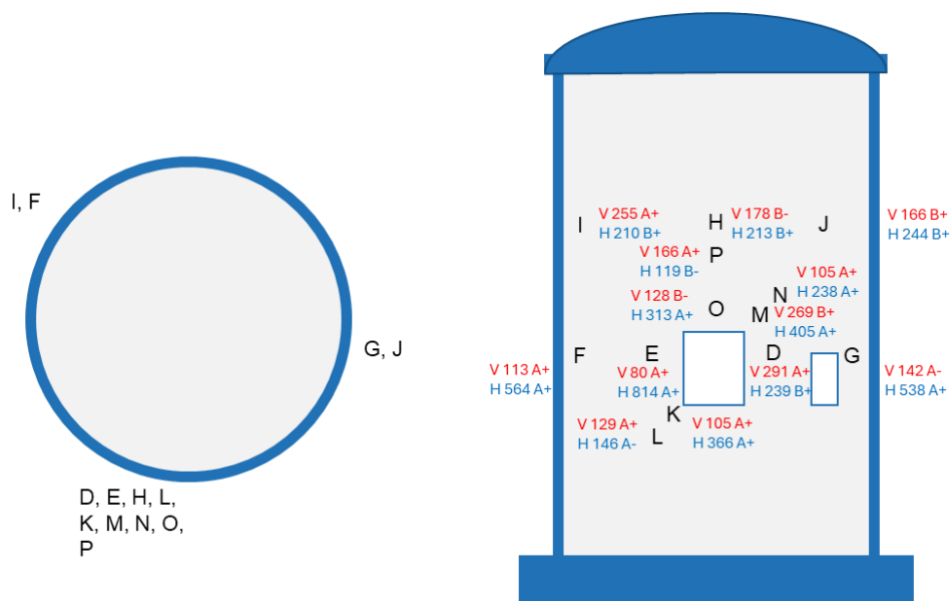
Resultaten som redovisas i Tabell 7 och Figur 25 avser mätningar utförda före håltagningen.



Figur 24 – Beskrivning av förändringar i töjningar och töjningsdifferenser.

Tabell 7 – Resultaten av töjningsmätningar.

	$\Delta\varepsilon_1$ $\mu$ -strain	$\Delta\varepsilon_2$ $\mu$ -strain	Typ	Start av förändring för typ A
<b>Punkt D</b>				
Vertikal	291		A +	Oktober
Horisontal	0	239	B +	
<b>Punkt E</b>				
Vertikal	80		A +	Oktober
Horisontal	814		A +	Oktober
<b>Punkt F</b>				
Vertikal	113		A +	Oktober
Horisontal	564		A +	Oktober
<b>Punkt G</b>				
Vertikal	142		A -	April
Horisontal	538		A +	Oktober
<b>Punkt H</b>				
Vertikal	0	178	B -	
Horisontal	0	213	B +	
<b>Punkt I</b>				
Vertikal	255		A +	September
Horisontal	0	210	B +	
<b>Punkt J</b>				
Vertikal	0	166	B +	
Horisontal	0	244	B +	
<b>Punkt K</b>				
Vertikal	105		A +	Oktober
Horisontal	366		A +	Oktober
<b>Punkt L</b>				
Vertikal	129		A +	September
Horisontal	146		A -	September
<b>Punkt M</b>				
Vertikal	0	269	B +	
Horisontal	405		A +	September
<b>Punkt N</b>				
Vertikal	105		A +	September
Horisontal	238		A +	September
<b>Punkt O</b>				
Vertikal	0	128	B -	
Horisontal	313		A +	Oktober
<b>Punkt P</b>				
Vertikal	166		A +	September
Horisontal	0	119	B -	



Figur 25 – Resultaten av töjningsmätningar.

Avspänningen av de vertikala kablarna avslutades den 5 september 2023 (Tabell 1). Ingen tydlig påverkan på uppmätta töjningar kan identifieras i samband med avspänningen av de vertikala kablarna. Däremot noteras en tydlig påverkan på töjningarna i samband med avspänningen av de horisontella kablarna. Avspänningen av de horisontella kablarna påbörjades den 10 oktober 2023 och avslutades den 14 december samma år.

Den vertikala töjningen av typ A som registreras i punkt G uppstod i april 2024, d.v.s. efter håltagning av Hål 2. Detta töjningsvärde ingår därför inte i de medelvärden som presenteras Tabell 8 och Tabell 9.

Tabell 8 redovisar medelvärden för uppmätta töjningar. Tabell 9 redovisar töjningarnas medelvärden på den yttre väggens olika nivåer. Vid beräkning av medelvärden har nollvärden exkluderats eftersom 0 anger att en annan typ av töjning (A eller B) har uppstått.

För en betong med en elasticitetsmodul om 30 GPa motsvarar en töjning på 100  $\mu$ -strain en spänning på 3 MPa, vilket är av samma storleksordning som betongens draghållfasthet. En temperaturskillnad mellan sommar och vinter på 25 °C ger upphov till en töjningsförändring på 250  $\mu$ -strain, under förutsättning att betongens längdutvidgningskoefficient är 10  $\mu$ -strain/°C.

**Tabell 8 – Medelvärden av töjningar.**

	Typ A ( $\Delta\varepsilon_1$ )	Typ B ( $\Delta\varepsilon_2$ )
Vertikal töjning ( $\mu$ -strain)	+ 155	+ 218
	- 0	- 153
Horisontell töjning ( $\mu$ -strain)	+ 462	+ 227
	- 145	- 119

**Tabell 9 – Medelvärden av töjningar vid olika nivåer.**

Nivå →	- 119	119 - 121	124 - 126	126 -
Mät punkt →	K, L	D, E, F, G	J, M, N, O	H, I, P
V-töjning (typ A)	117	161	105	210
H-töjning (typ A)	256	639	319	0
V-töjning (typ B)	0	0	103	-178
H-töjning (typ B)	0	239	244	181

Figur 17b visar temperaturvariationer i luft och betong i punkt D. Motsvarande temperaturvariationer har även uppmätts i punkt F. Temperaturen når sitt maximum under perioden juli–september och sitt minimum under perioden december–februari. Om konstruktionen är spänningsfri och inte utsatt för tvång eller temperaturgradienter bör töjningsgivarna följa temperaturvariationerna. I ett sådant fall förväntas töjningarna minska från september till februari och därefter öka fram till september.

Töjningar av typ B– följer temperaturvariationerna, medan töjningar av typ B+ förändras i motsatt riktning.

Ett exempel är punkt H, där den vertikala töjningen (typ B–) följer temperaturvariationerna, medan den horisontella töjningen (typ B+) förändras i motsatt riktning. I punkt J, som är belägen på samma nivå som punkt H men 109 gon åt höger, förändras både den vertikala och den horisontella töjningen i motsatt riktning jämfört med temperaturen. I punkt I, som är belägen på samma nivå som punkt H men cirka 73 gon åt vänster, är den vertikala töjningen av typ A+ medan den horisontella töjningen är av typ B+. Båda töjningarna förändras i motsatt riktning jämfört med temperaturen.

Huvuddelen av de uppmätta töjningarna förändras i motsatt riktning jämfört med temperaturvariationerna, vilket indikerar att spänningar i konstruktionens yta påverkar ytans töjningsförhållanden.

Punkterna D, E, F och G är belägna på samma nivå och nära centrum av det område där de horisontella kablarna har avspänts. Samtliga töjningar i dessa punkter, med undantag för den horisontella töjningen i punkt D som är av typ B+, är av typ A+. Samtliga töjningar förändras i motsatt riktning jämfört med

temperaturen. Efter att samtliga horisontella kablar har avspänts uppvisar givarna ett töjningsbeteende av typ B+, dock med relativt liten amplitud.

Punkterna L, K, M och N är belägna längs en diagonal genom det stora hålet. Redovisade mätresultat avser tiden före håltagningen. Det bör noteras att en avspänning och håltagning, med efterföljande igengjutning och uppspänning, utfördes i slutet av 1980-talet (se avsnitt 2.2) på samma plats som den planerade stora håltagningen. Samtliga töjningar, förutom den vertikala töjningen i punkt M som är typ B+, är av typ A. Endast den horisontell töjning i punkt L är av typ A-.

I punkt O uppvisas vertikal töjning av typ B- och horisontell töjning av typ A+, medan punkt P uppvisar vertikal töjning av typ A+ och horisontell töjning av typ B-.

Cirka 81 % av samtliga mätpunkter uppvisar töjningsförändringar av typ A+ eller typ B+, vilket innebär att töjningarna sker i motsatt riktning jämfört med vad som förväntas vid enbart temperaturpåverkan. För att utreda orsaken till detta rekommenderas kompletterande mätningar samt analyser med numeriska modeller.

Vidare uppvisar cirka 65 % av mätpunkterna töjningsförändringar av typ A, vilket indikerar att töjningarna påverkas av avspänningen av de horisontella kablarna. Eftersom avspänningen genomfördes under en relativt kort tidsperiod kan temperatureffekten antas vara begränsad. Den genomsnittliga töjningsförändringen redovisas i Tabell 8. Denna slutsats bör dock verifieras genom kompletterande mätningar och numeriska analyser.

### 3.4.3 Vertikala deformationer

Den vertikala deformationen har bestämts genom mätning av avståndet mellan två punkter på fem olika ställen (se avsnitt 3.1.2). Punktparen A1-A2, A3-A4, B1-B2, C1-C2 och C3-C4 definierar fem mätsträckor inom vilka deformationerna har registrerats. Punkternas placering redovisas Tabell 4 och Figur 4.

I Figur 26 redovisas den vertikala deformationen för sträckan A1-A2 samt betongtemperaturen uppmätt i punkt D under perioden juli 2023 till maj 2025. Rektanglar i figuren markerar perioder då avspänning av kablar respektive håltagningar har utförts (se även avsnitt 2.3). Röda rektanglar avser avspänning av kablar och lila rektanglar avser håltagning. Det bör noteras att Hål 2 skapades före Hål 1. Samtliga figurer som refereras i detta avsnitt återfinns även i Bilaga 3 i större format.

Av Figur 26 framgår att variationerna i vertikal deformation i huvudsak följer variationerna i betongtemperaturen. Det kan dock noteras att avspänning av kablar och håltagningar i viss mån har påverkat den vertikala deformationen.

- I samband med avspänning av de vertikala kablarna (augusti–september) observeras en ökning av deformationen, trots att medeltemperaturen förefaller vara relativt konstant. Detta indikerar att deformationen ökar när de vertikala kablarna spänns av.

- Inga tydliga indikationer kan identifieras som visar att avspänningen av de horisontella kablarna har påverkat deformationerna. Teoretiskt bör den vertikala deformationen minska vid avspänning av horisontella kablar. Det är dock möjligt att en sådan effekt har överskuggats av den samtidiga deformationsminskning som orsakas av sjunkande temperatur.
- Tydliga störningar i mätningarna kan observeras i samband med skapandet av Hål 2 (januari–mars 2024) och Hål 1 (oktober–november 2024). Någon entydig inverkan på de uppmätta vertikala deformationerna kan dock inte fastställas, eftersom mätvärdena samtidigt påverkas av temperaturrelaterade deformationer.



Figur 26 – Vertikal deformation för sträckan A1–A2 samt betongtemperatur uppmätt i punkt D under perioden juli 2023-maj 2025.

Figur 27 visar den inledande delen av Figur 26, d.v.s. perioden juli-september 2023. Figuren redovisar de dagliga variationerna i vertikal deformation och temperatur. Amplituden för dessa variationer har uppskattats genom okulär bedömning inom ett intervall med i huvudsak konstant medeltemperatur. Enstaka extrema värden har exkluderats från analysen. Resultaten för sträckorna A1–A2 och A3–A4 redovisas i Tabell 10.

Tabell 10 – Dagliga variationer i vertikal deformation och temperatur under en begränsad period med i huvudsak konstant medeltemperatur.

	Temperatur °C	Deformation (mm)	Töjning (microstrain/°C)
A1-A2	4,89	1,22	6,7
A3-A4	4,08	1,19	25,8

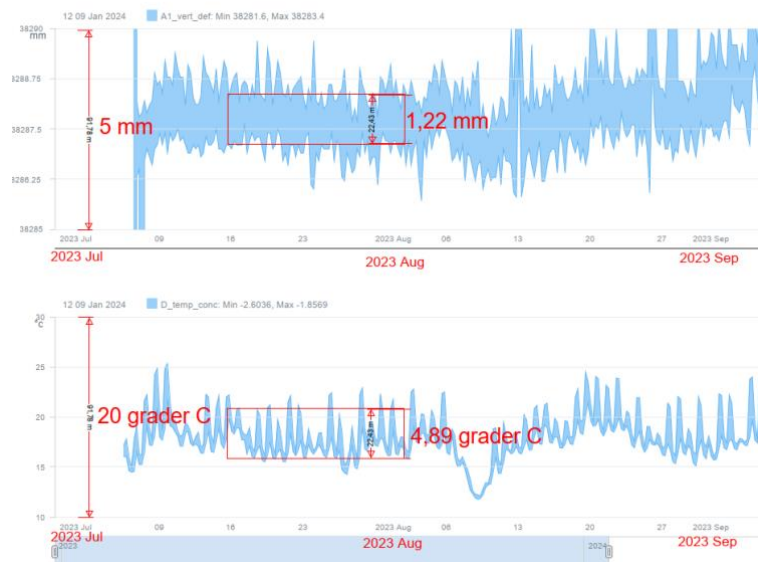
Som framgår av Tabell 10 har temperaturen en betydande inverkan på de uppmätta deformationerna. Eftersom temperaturen mäts nära konstruktionens yta representerar de uppmätta temperatursvängningarna inte konstruktionens medeltemperatur. Av Figur 27 framgår vidare att deformationsgivaren reagerar på dessa temperatursvängningar, vilket innebär att deformationsmätningarna påverkas av ytliga temperaturförändringar. Den uppmätta deformationssvängningen representerar därmed inte konstruktionens genomsnittliga deformation.

Sträckan A1-A2 är 37,2 m lång (se Tabell 4). Skillnaden mellan högsta och lägsta uppmätta betongtemperatur uppgår till 25 °C (se Figur 26). Med antagandet att betongens termiska längdutvidgningskoefficient är  $10 \mu\text{strain}/^\circ\text{C}$  erhålls en årlig deformationsändring mellan maximal och minimal temperatur om cirka 9,3 mm. Den dagliga deformationssvängningen motsvarar cirka 13 % av den termiska deformationen mellan lägsta och högsta temperatur. Motsvarande värden för sträckan A3–A4 är cirka 2,8 mm respektive 42 %.

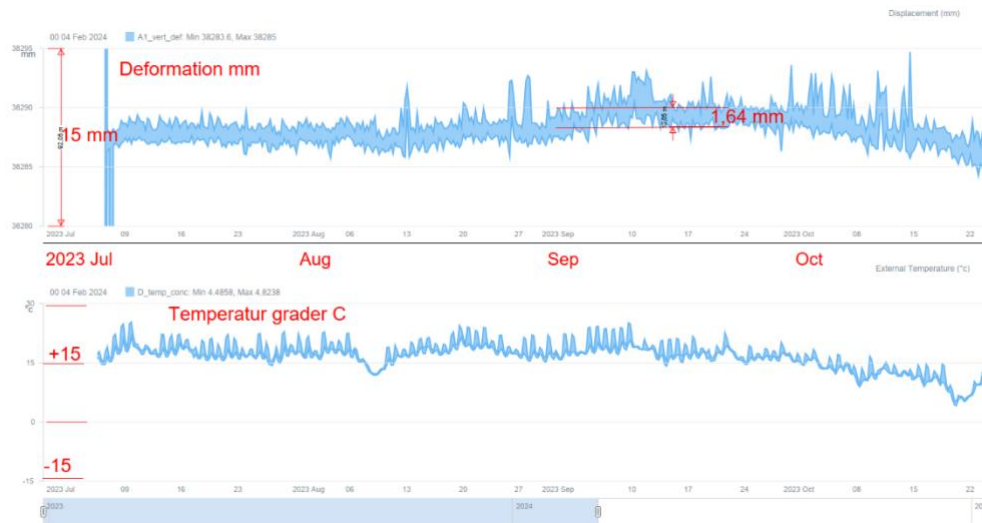
Enligt de beräkningsresultat som presenteras i avsnitt 2.2 (Figur 1) medför avspänning av kablarna ingen märkbar vertikal deformation inom området för det planerade hålet. Det bör noteras att Hål 1:s placering sammanfaller med placeringen av det hål som redovisas i Figur 1. Anledningen till den uteblivna omedelbara deformationen är att avspänningen leder till en elastisk avlastning, medan reversibla tidsberoende deformationer kan uppträda först efter en viss fördröjning.

Efter håltagning av det hål som redovisas i Figur 1 deformeras området cirka 1 mm i vertikal riktning, vilket är av samma storleksordning som den deformationsändring som orsakas av de dagliga temperatursvängningarna.

För att uppskatta den deformation som eventuellt har uppstått till följd av avspänning av de vertikala kablarna (se september 2023 i Figur 26) antas här att den uppgång som kan urskiljas i figuren är orsakad av avspänningen. Denna deformation uppmäts i Figur 28 till 1,6 mm.



Figur 27 – Vertikal deformation A1-A2 och betongtemperatur i punkt D juli-september 2023.



**Figur 28 – Uppmätt deformation som bedöms ha orsakats av avspänning av vertikala kablar.**

Figur 29 redovisar den vertikala deformationen mellan A3 och A4 samt betongtemperaturen i punkt D under perioden juli 2023 till maj 2025. Håltagning av Hål 1, som genomfördes under oktober-november 2024, är markerad i figuren.

I figuren kan en plötslig minskning av den vertikala deformationen observeras i augusti 2024. Orsaken till denna förändring är okänd. Under den efterföljande håltagningsperioden i oktober–november kan tydliga förändringar i den vertikala deformationen noteras.

Då det saknas information om hur mätinstrumentet har hanterats efter augusti 2024, och i synnerhet under håltagningen, bedöms mätresultaten från denna period vara osäkra. Dessa resultat beaktas därför inte i den fortsatta analysen.



**Figur 29 – Vertikal deformation mellan A3 och A4 samt betongtemperatur i punkt D under perioden juli 2023 till maj 2025.**

Figur 30 redovisar den vertikala deformationen mellan A3 och A4 samt betongtemperaturen i punkt D under perioden juli 2023 till augusti 2024. Variationerna i den vertikala deformationen följer inte temperaturutvecklingen, utan uppvisar en kontinuerligt ökande trend fram till augusti 2024.

Avspänning av vertikala kablar har påverkat deformationen. Under perioden augusti–september 2024 ökar den vertikala deformationen trots att medeltemperaturen är i stort sett konstant.

En störning i mätningarna noteras även i februari 2024 i samband med håltagning nr 2. Vidare kan en ökning av den vertikala deformationen observeras från slutet av augusti 2023 till slutet av oktober 2023, trots att medeltemperaturen är relativt konstant under augusti och september. Därefter avtar deformationen.

Under perioden oktober–november 2023, då de horisontella kablarna avspändes, är medeldeformationen i huvudsak konstant trots sjunkande temperatur. I mitten av november 2023 kan en tydlig mätstörning noteras, bestående av en kraftig ökning följt av en kraftig minskning av deformationen. Jämfört med deformationen före denna störning kan en bestående ökning av den vertikala deformationen konstateras efteråt.

Ytterligare tydliga störningar, i form av både minskningar och ökningar av deformationen, noteras under november och december 2023. Dessa sammanfaller tidsmässigt med avspänningen av de horisontella kablarna.



**Figur 30 – Vertikal deformation mellan A3 och A4 samt betongtemperatur i punkt D under perioden juli 2023 till augusti 2024.**

Den vertikala deformationen ökar från tidpunkten för avspänning av de vertikala kablarna fram till augusti 2024. Den totala ökningen uppgår till cirka 1,6 mm. Ökningen har bestämts genom att, med stöd av Figur 31, jämföra medeldeformationen i augusti 2023 med motsvarande medelvärde i augusti 2024.

Den uppmätta deformationen bör korrigeras med avseende på temperaturskillnaden mellan augusti 2023 och augusti 2024. Medeltemperaturen i augusti 2024 var 2,2 °C högre än motsvarande temperatur i augusti 2023.

Temperatureffekten beräknas enligt nedan:

$$\Delta\delta_{A3-A4} = \Delta T \cdot \Delta\alpha_{A3-A4} \cdot l_{A3-A4} \quad (3-3)$$

$$\Delta T \quad \text{temperaturdifferens (}^\circ\text{C)} = 2,2$$

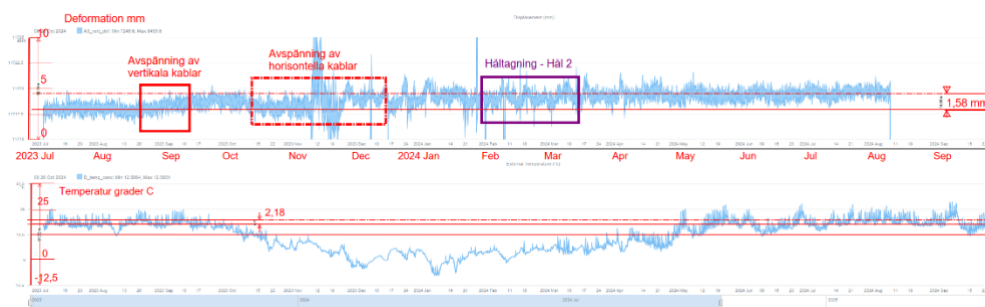
$$\Delta\alpha_{A3-A4} \quad \text{töjning enligt Tabell 10 (microstrain/}^\circ\text{C)} = 25,8$$

$$l_{A3-A4} \quad \text{Avståndet mellan A3 och A4 (m)} = 11,3$$

$$\Delta\delta_{A3-A4} = 2,2 \cdot 25,8 \cdot 11300 = 0,64 \text{ (mm)}$$

Den vertikala deformationen har således ökat med  $1,6 - 0,64 = 0,96$  mm från tidpunkten för avspänning av de vertikala kablarna fram till augusti 2024.

Mätsträckan A3–A4 är belägen ovanför området för Hål 1. Den uppmätta deformationen överensstämmer väl med medelvärdet av de beräkningsresultat som redovisas i Figur 1. Det bör dock noteras att de uppmätta värdena avser förhållanden fram till augusti 2024 och inte inkluderar effekten av håltagningen för Hål 1. De beräkningsresultat som presenteras i Figur 1 inkluderar däremot effekterna av håltagningen av Hål 1.



Figur 31 – Vertikal deformation mellan A3 och A4 samt betongtemperatur i punkt D under perioden juli 2023-augusti 2024.

Figur 32 redovisar den vertikala deformationen mellan B1 och B2 samt betongtemperaturen i punkt D. Som framgår av avsnitt 3.3.2 kunde mätningarna inte fortsätta, eftersom reflektorn till mätinstrumentet hade förflyttats.

Av Figur 32 framgår att deformationerna följer variationerna i betongtemperaturen, där sträckan B1–B2 förkortas vid sjunkande temperatur. Mätningarna visar även en tydlig respons på avspänningen av de horisontella kablarna samt på håltagningen för Hål 2.



Figur 32 – Vertikal deformation mellan B1 och B2 samt betongtemperatur i mätpunkt D under perioden juli 2023-februari 2024.

Figur 33 redovisar den vertikala deformationen längs sträckan C1–C2, vilken är belägen nära den vertikala centrumaxeln för Hål 2. Av figuren framgår att deformationerna i huvudsak följer temperaturvariationerna. Samtidigt kan en tydlig påverkan från såväl avspänning av kablar som genomförda håltagningar urskiljas.

- Vid avspänning av de vertikala kablarna ökar deformationerna trots i stort sett konstant medeltemperatur. Den uppmätta deformationen är av samma storleksordning som för sträckan A1–A3 (cirka 1,6 mm).
- Vid avspänning av de horisontella kablarna ökar deformationerna trots sjunkande temperatur. Deformationens storlek är svår att kvantifiera eftersom temperaturpåverkan verkar i motsatt riktning. För att särskilja temperatureffekten krävs mer detaljerade beräkningar.
- Enligt beräkningar (se avsnitt 2.2) förväntas håltagning leda till minskad deformation, det vill säga en hoptryckning av hålområdet. Under perioden för håltagning av Hål 2 observeras dock i stort sett konstant deformation trots stigande temperatur, vilket normalt skulle ge upphov till ökad deformation.
- Håltagning av Hål 1 bedöms inte ha haft någon märkbar inverkan på de uppmätta deformationerna.



**Figur 33 – Vertikal deformation C1-C2 och betongtemperatur i punkt D från juli 2023 till januari 2024.**

Figur 34 redovisar den vertikala deformationen längs sträckan C3–C4, vilken är belägen nära den yttre kanten av Hål 2. Av figuren framgår att deformationerna i huvudsak följer temperaturvariationerna. Påverkan från såväl avspänning av kablar som genomförda håltagningar kan urskiljas, men utan mer ingående analys är det svårt att kvantifiera respektive effekt.



Figur 34 – Vertikal deformation C3-C4 och betongtemperatur i punkt D från juli 2023 till maj 2025.

### 3.4.4 Radiella deformationer

Reaktorinneslutningens radiella deformationer har bestämts med hjälp av triaxiella tiltssensorer (tippningssensorer), se avsnitt 3.1.3. En tiltssensor mäter förändringen i vinkel i den punkt där sensorn är installerad.

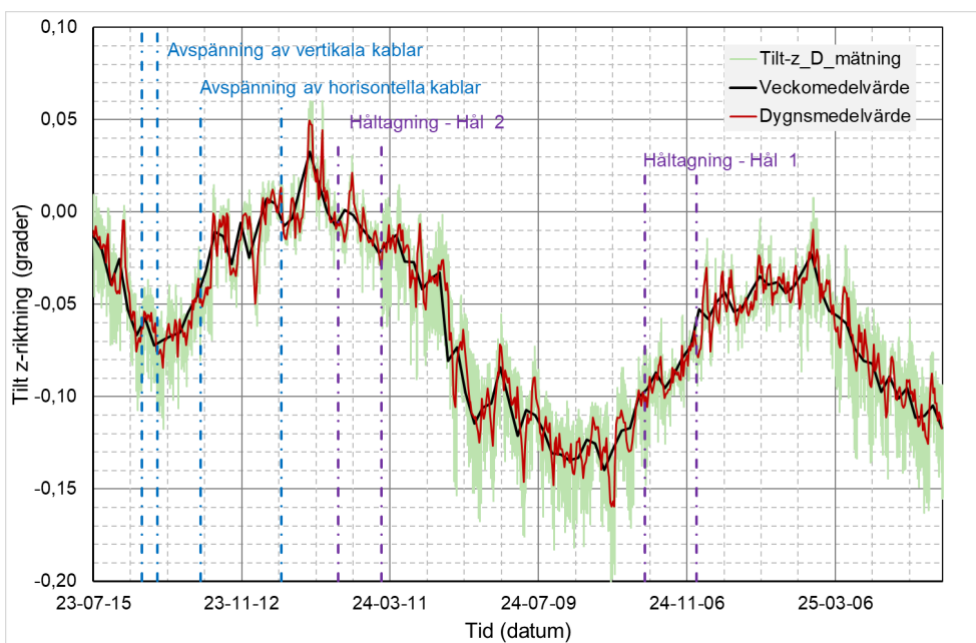
Inledningsvis redovisas resultaten av de uppmätta vinkeländringarna. Därefter används dessa resultat för att uppskatta de radiella deformationerna.

I samtliga figurer används beteckningen Tilt (tippning) synonymt med vinkeländring. Mätenheten är grader. För föreliggande studie är endast Tilt-z (tippning i z-riktningen) av relevans, se Figur 9. En lutningsförändring (tippning) riktad mot insidan av reaktorinneslutningen definieras som positiv, vilket innebär att en ökning av vinkeln motsvarar en ökad lutning inåt.

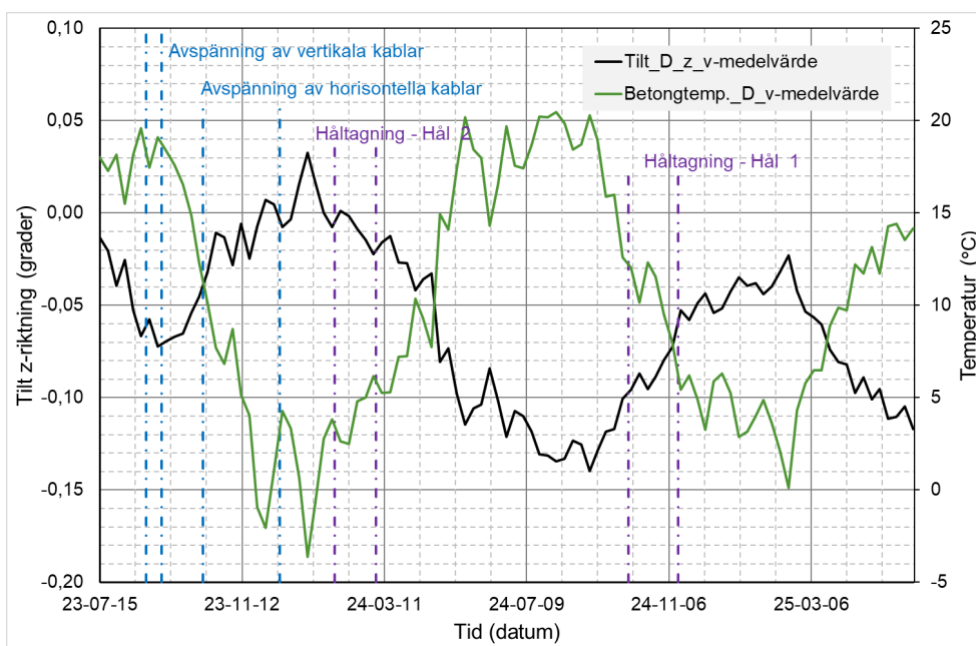
Figur 35 visar uppmätt Tilt-z i punkt D under perioden juli 2023 och maj 2025. I figuren avser "Tilt\_z\_D\_mätning" sensorns rådata med en registreringsfrekvens på två mätningar per timme. Värdena är nollställda mot mätningen vid, eller den första mätningen strax efter, den 15 juli 2023 kl. 00:00. Figuren redovisar även dygns- och veckomedelvärden. Motsvarande presentation av mätresultat för punkterna E, F, G, H, I och J återfinns i Bilaga 4.

I Figur 36 presenterar veckomedelvärden för tilt och betongtemperatur i punkt D. motsvarande diagram för övriga mätpunkter, där tilt redovisas tillsammans med betongtemperatur, återfinns i Bilaga 4.

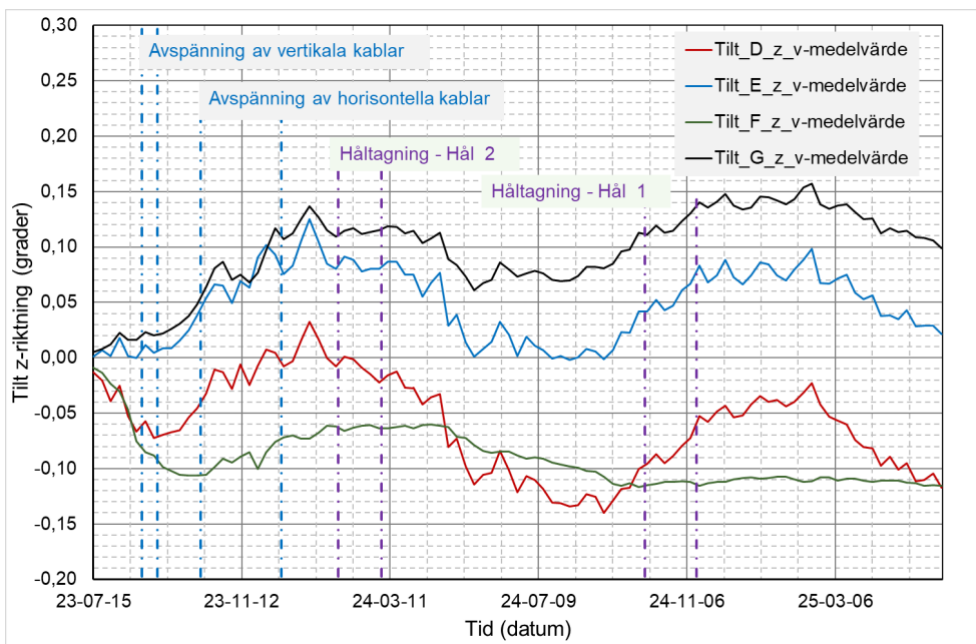
Av Figur 36 framgår att tilten ökar när temperaturen minskar och minskar när temperaturen ökar. Detta samband kan iaktas i samtliga mätpunkter, med undantag för en inledande fas under augusti-september i vissa punkter (se Figur 37 och Figur 38).



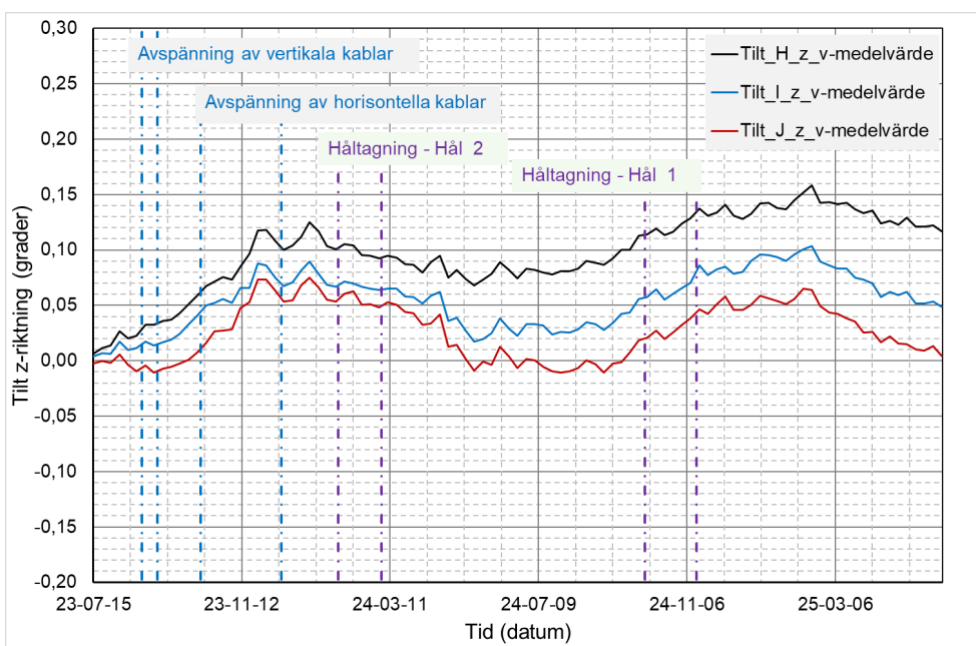
Figur 35 – Uppmätt Tilt-z i punkt D under perioden juli 2023–maj 2025.



Figur 36 – Veckomedelvärden för Tilt-z och betongtemperatur i punkt D under perioden juli 2023–maj 2025.



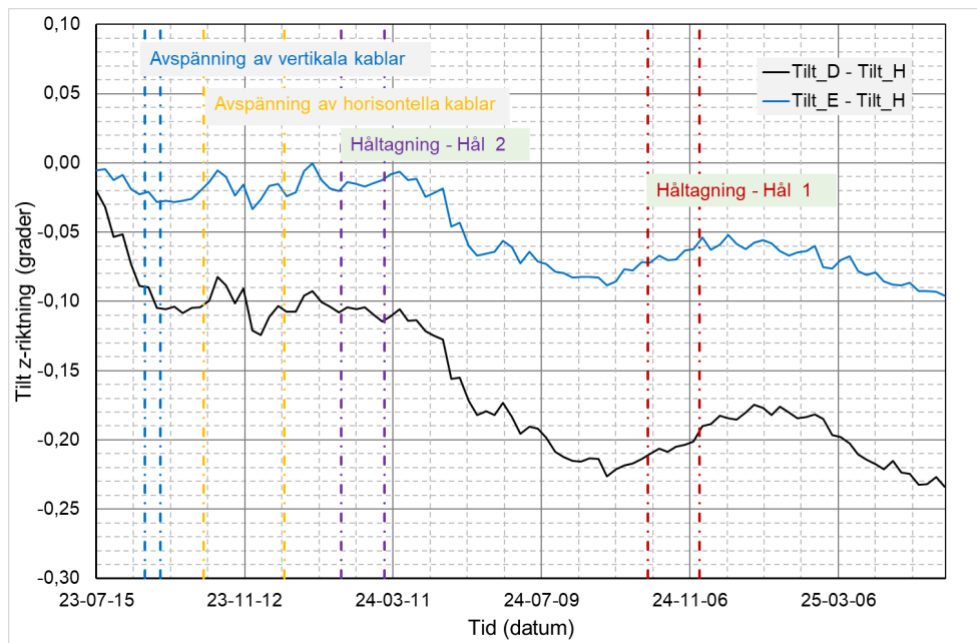
Figur 37 – Veckomedelvärden för tilt i punkterna D, E, F och G under perioden juli 2023–maj 2025.



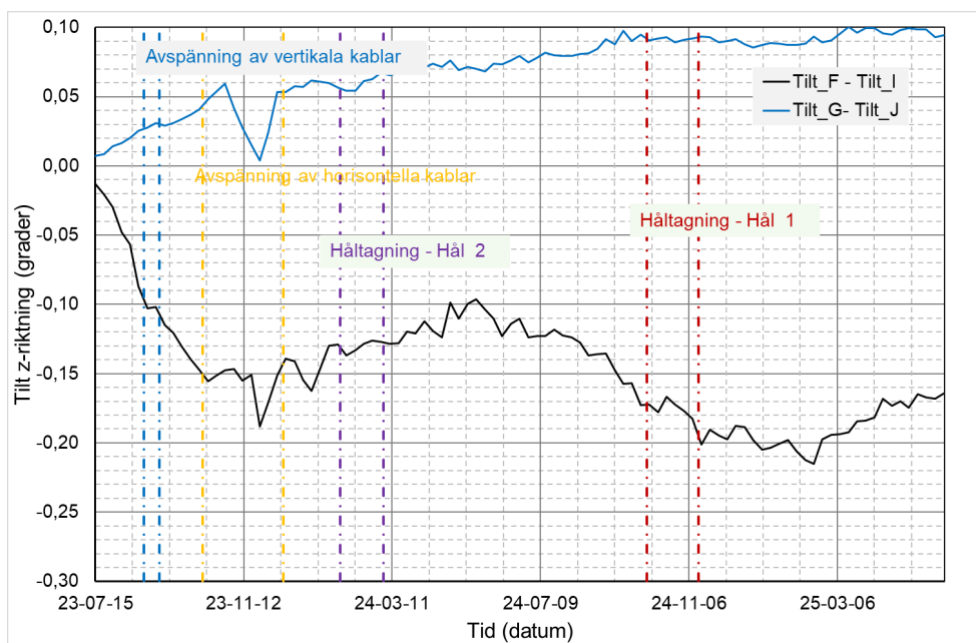
Figur 38 – Veckomedelvärden för tilt i punkterna H, I och J under perioden juli 2023–maj 2025.

Som beskrevs i avsnitt 3.1.3 var valet av antal och placeringen av tilt-ensornerna inte optimalt. Det tillgängliga mätunderlaget är därför inte tillräckligt för att tillämpa den analysmetod som redovisas i avsnitt 3.1.3. De mätresultat som ändå finns tillgängliga kan dock användas för att översiktligt uppskatta skillnader i tilt (vinkeländringar) och deformationer mellan nivå +120, där punkterna D, E, F och G belägna, och nivå +130, där punkterna H, I och J är belägna.

Figur 39 och Figur 40 visar differenser i vinkeländringar mellan nivå +120 och nivå +130. Differenserna har beräknats mellan punkter med minsta differenser i deras vinkelkoordinater (se Tabell 5). Vinkelkoordinaterna för punkterna D och E överensstämmer i stor utsträckning med punkt H. Motsvarande relation gäller för punkterna F och I respektive G och J.



Figur 39 – Differensen mellan veckomedelvärdet av tilt D och tilt H respektive tilt E och tilt H mellan juli 2023 och maj 2025.



Figur 40 – Differensen mellan veckomedelvärdet av tilt F och tilt I respektive tilt G och tilt J mellan juli 2023 och maj 2025.

Figur 41 visar schematiskt skillnaden mellan förskjutningen i punkt D och punkt H. Både förskjutning och vinkeländringen har nollställts i punkt H. Förskjutningen i en godtycklig punkt mellan H och D, med referens till punkt H, kan beräknas enligt följande samband:

$$\Delta\delta_v = \int_0^v \tan\left(\frac{\Delta\varphi_D}{\Delta h} \cdot v\right) dv \quad (3-4)$$

$\Delta\delta_v$  förskjutning (m) relativ punkt H i en godtycklig punkt mellan punkt H och punkt D.

$v$  lokalt koordinat axel och avstånd från punkt H i riktning mot punkt D.

$\Delta\varphi_D$  vinkeländring (radianer) i punkt D relativ punkt H.

$\Delta h$  avståndet (m) mellan punkt H och Punkt D.

Integralens lösning för  $v = \Delta h$  är enligt nedan:

$$\Delta\delta_D = -\frac{\Delta h}{\Delta\varphi_D} \cdot \ln|\cos \Delta\varphi_D| \quad (3-5)$$

$\Delta\delta_D$  förskjutning (m) i Punkt D relativ punkt H.

Följande villkor gäller för Ekvation (3-5):

1.  $\frac{d\Delta\varphi}{dv} = \text{konstant}$  för  $0 \leq v \leq \Delta h$
2.  $d\Delta\varphi = 0$  för  $v = 0$

Antagandena utgör sannolikt grova förenklingar av verkligheten men är nödvändiga för att möjliggöra en enkel härledning.

$\Delta\varphi_D < 0$  medför en förskjutning i riktning utåt, sett från reaktorinneslutningens insida, vilket motsvarar  $\Delta\delta_D > 0$ . Motsvarande innebär  $\Delta\varphi_D > 0$  en förskjutning i riktning inåt, sett från reaktorinneslutningens insida, vilket motsvarar  $\Delta\delta_D < 0$ .

Figur 42 visar förskjutningen i punkterna D och E relativ punkt H. Figur 43 visar förskjutningen i punkt F relativ punkt I samt punkt G relativ punkt J. Vid beräkningarna har  $\Delta h = 10$  m använts (se Tabell 5).

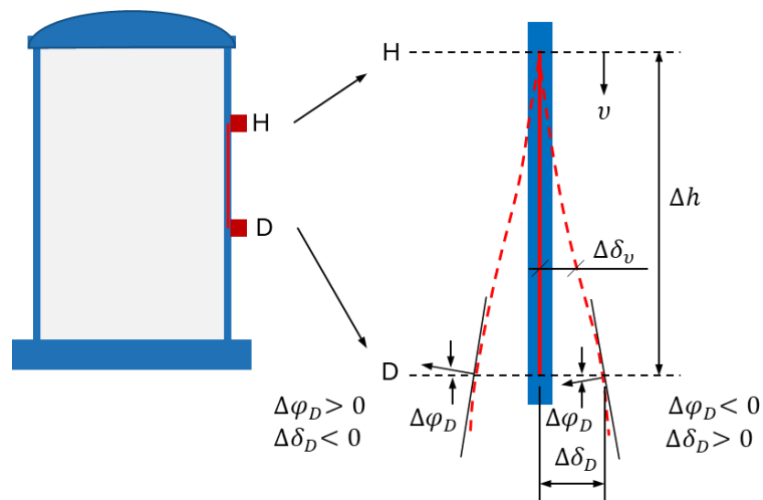
Före avspänning av kablarna uppvisar punkterna D, E och F en ökande förskjutning i riktning utåt, medan punkt G uppvisar motsatt trend. När avspänningen av kablarna påbörjas uppvisar punkterna D och E en i det närmaste konstant förskjutning fram till tiden efter håltagning av Hål 2. Denna period sammanfaller med sjunkande lufttemperatur, vilket sannolikt motverkar förskjutningen i riktning utåt från reaktorinneslutningen. Därefter ökar förskjutningen markant fram till tiden före håltagning av Hål 1. Ökningen sammanfaller med stigande lufttemperatur, vilket indikerar att avspänning av kablar och håltagning samverkar med temperaturökningen. Det är dock svårt att utan fördjupade analyser särskilja temperatureffekten från effekterna av de utförda ingreppen.

I punkt F ökar förskjutningen i riktning utåt fram till början av avspänningen av de horisontella kablarna. Därefter uppstår en plåtå, vilket kan bero på att effekterna av avspänning och temperatur (sjunkande temperatur) i stort sett tar ut varandra. Håltagning av Hål 2 förefaller inte ha någon tydlig inverkan på förskjutningen, men den sjunkande temperaturen kan även i detta fall ha motverkat förskjutningen i riktning utåt från reaktorinneslutningen. När temperaturen därefter ökar ändras utvecklingen i punkt F, och förskjutningen ökar. Denna trend fortsätter även under den efterföljande kalla perioden samt i samband med håltagning av Hål 1.

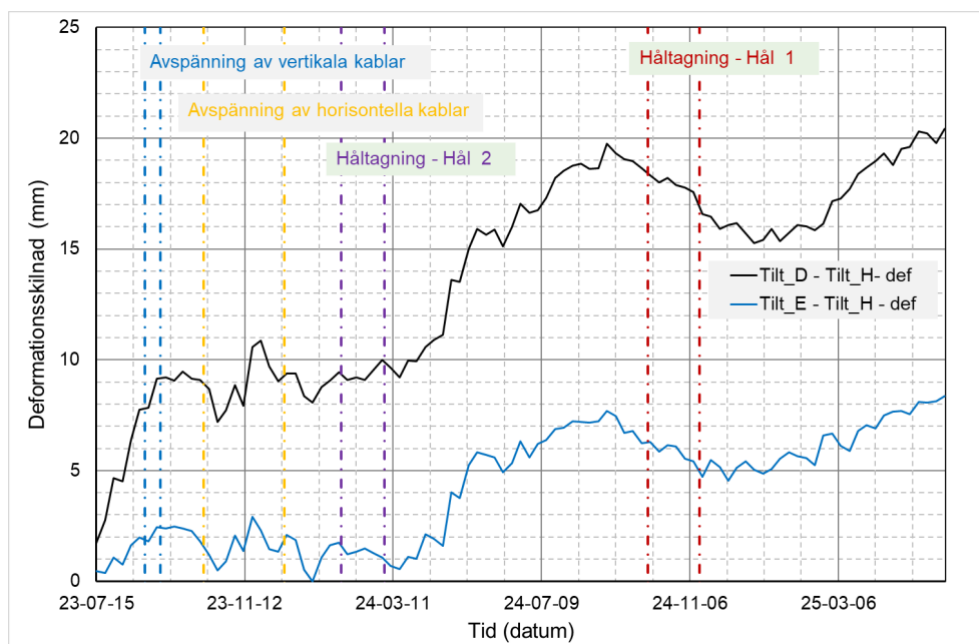
Förskjutningen i punkt G uppvisar en genomgående avtagande trend, med undantag för en kortvarig ökning i samband med avspänningen av de horisontella kablarna.

Sammanfattningsvis kan konstateras att avspänning av spännkablar och genomförda håltagningar har haft en betydande inverkan på de uppmätta förskjutningarna, samtidigt som temperaturen har stor påverkan på både förskjutningarnas riktning och storlek. Fördjupade analyser med numeriska modeller krävs för att bättre beskriva konstruktionens beteende och för att särskilja temperaturens inverkan från effekterna av de olika ingreppen.

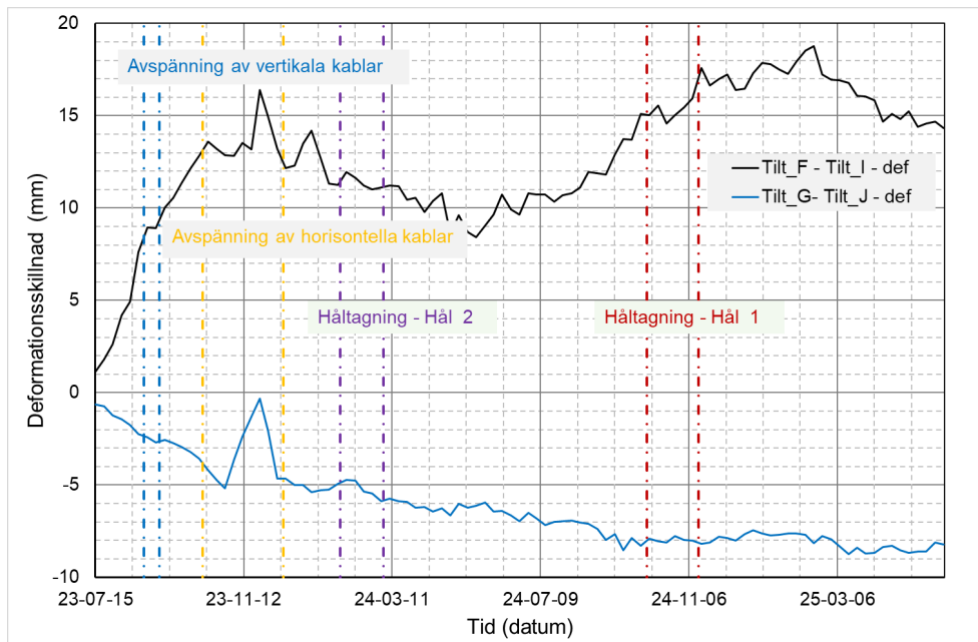
Enligt resultaten från den numeriska modellering som redovisas i avsnitt 2.2 medför avspänning av spännkablar en deformation på cirka 4 mm i riktning utåt från reaktorinneslutningen. Enligt analyserna har håltagning en försumbar inverkan på deformationerna. Det bör dock noteras att analysen avser endast en håltagning, ett begränsat antal avspända kablar samt att effekter av krypning (i detta fall reversibla tidsberoende deformationer) och temperaturvariationer inte har beaktats. En förskjutning om cirka 4 mm är därför svår att identifiera i mätdata när temperaturvariationer har stor inverkan på konstruktionens deformationer.



Figur 41 – Skillnaden i förskjutning mellan punkt D och punkt H.



Figur 42 – Förskjutning i punkterna D och E relativt punkt H.



Figur 43 – Förskjutning i punkterna F och G relativt punkterna I och J.

## 4 Diskussion och slutsatser

Mätningar visade tydliga förändringar i töjningar som korrelerar med avspänning av spännkablarna, särskilt de horisontella kablarna. Största förändringar observerades nära avspänningsområdet.

Variationerna i vertikal deformation följde i stort sett temperaturvariationerna. Avspänning av vertikala kablar visade en omedelbar effekt på deformationerna, som ökade vid avspänning. Ingen tydlig inverkan från avspänning av horisontella kablar kunde identifieras, möjligen på grund av den samtidiga temperatursänkningen.

Tiltsensorer, som används för bestämning av radiella deformationer, visade att vinkeländringarna korrelerade starkt med temperaturändringar. Genom att analysera differenser mellan nivåerna +120 och +130 kunde förskjutningar kvantifieras. Mätresultaten visade att både avspänning av kablar och håltagningar hade en signifikant inverkan på de radiella deformationerna. Emellertid, på grund av begränsat mätunderlag, krävs mer omfattande numeriska analyser för att separera de olika effekterna.

Samtliga sensorer påverkades av lufttemperaturens dagliga och säsongsberoende variationer. Variationerna i uppmätta mätvärden var i vissa fall större än de teoretiskt förutspådda deformationerna och töjningarna. Samtliga sensorer, inklusive temperaturgivare, var placerade på konstruktionens yta. De dagliga och i vissa fall veckovisa variationerna bör därför betraktas som yttre temperaturpåverkan och anses inte representera konstruktionens genomsnittliga respons.

Inför framtida uppdrag bör följande förbättringsåtgärder övervägas:

- Temperaturen bör mätas på flera djup i konstruktionen för att möjliggöra bestämning av konstruktionens medeltemperatur, eftersom både radiella och vertikala deformationer styrs av denna.
- Mätning av töjning på konstruktionens yta bör kompletteras med mätning djupare in i konstruktionen. Detta kan uppnås genom att fästa givarnas ankare längre in i konstruktionen. Ett sådant utförande kräver viss teknikutveckling samt en förstudie.
- Vid mätning av vertikala deformationer bör laserstrålekastarens ankare fästas djupare in i konstruktionen. Detsamma gäller för tiltsensorer som används för mätning av vinkeländringar. Även här krävs viss teknikutveckling och förstudier.
- Slutligen bör mätningarna kombineras med teoretiska analyser för att uppnå ett så tillförlitligt och heltäckande resultat som möjligt.

## 5 Referenslista

H. Carlsson, S. Thelandersson och N. S. Ottosen. Studie av temporär transportöppning. 1986-10-10, BIT-651196, Projekt, RÅG.

T. Roth, J. Silfwerbrand och H. Sundquist, (2002). Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk: En sammanställning över konstruktion och material. SKI Rapport 02:59, ISSN 1104-1374.

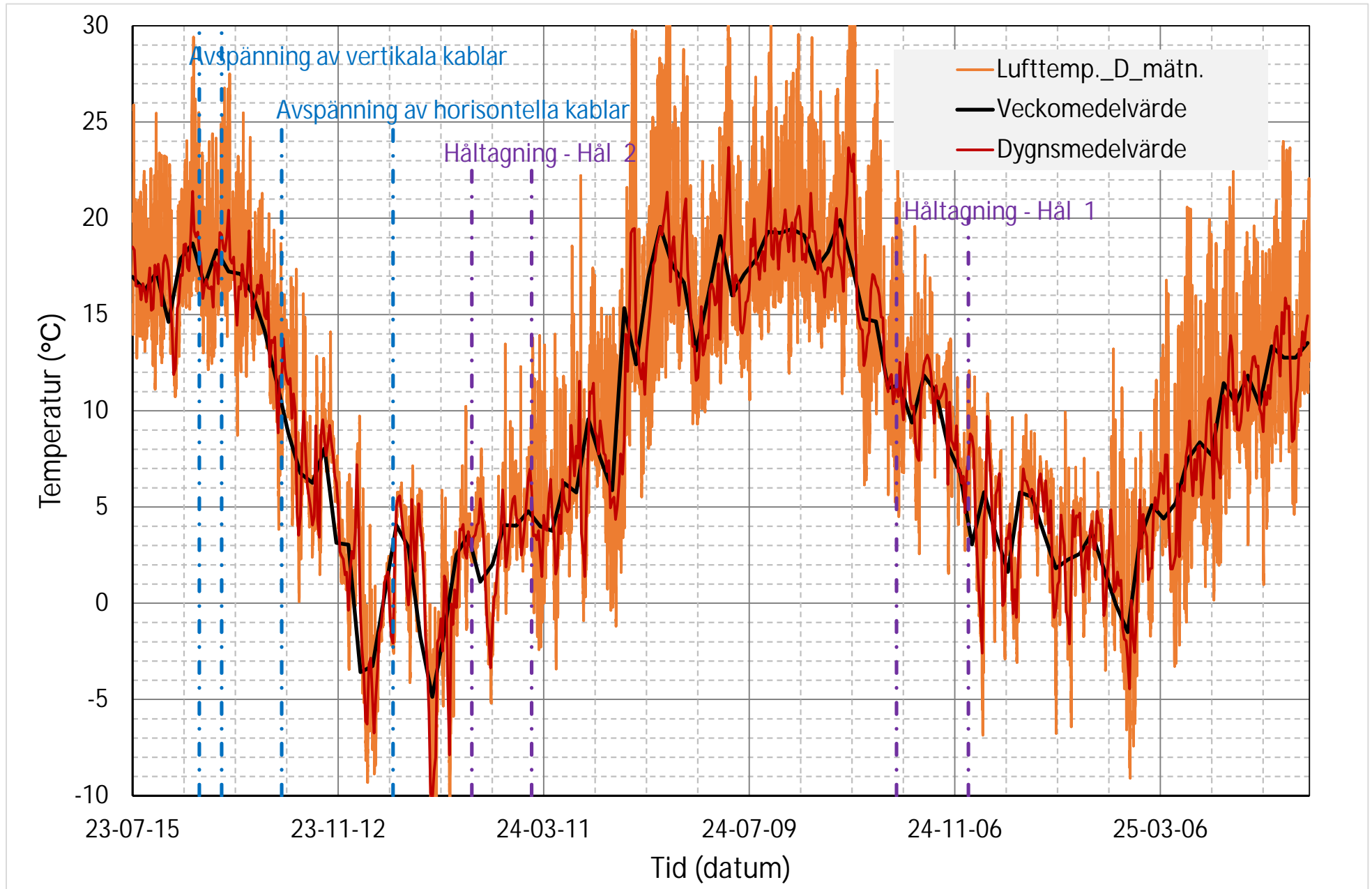


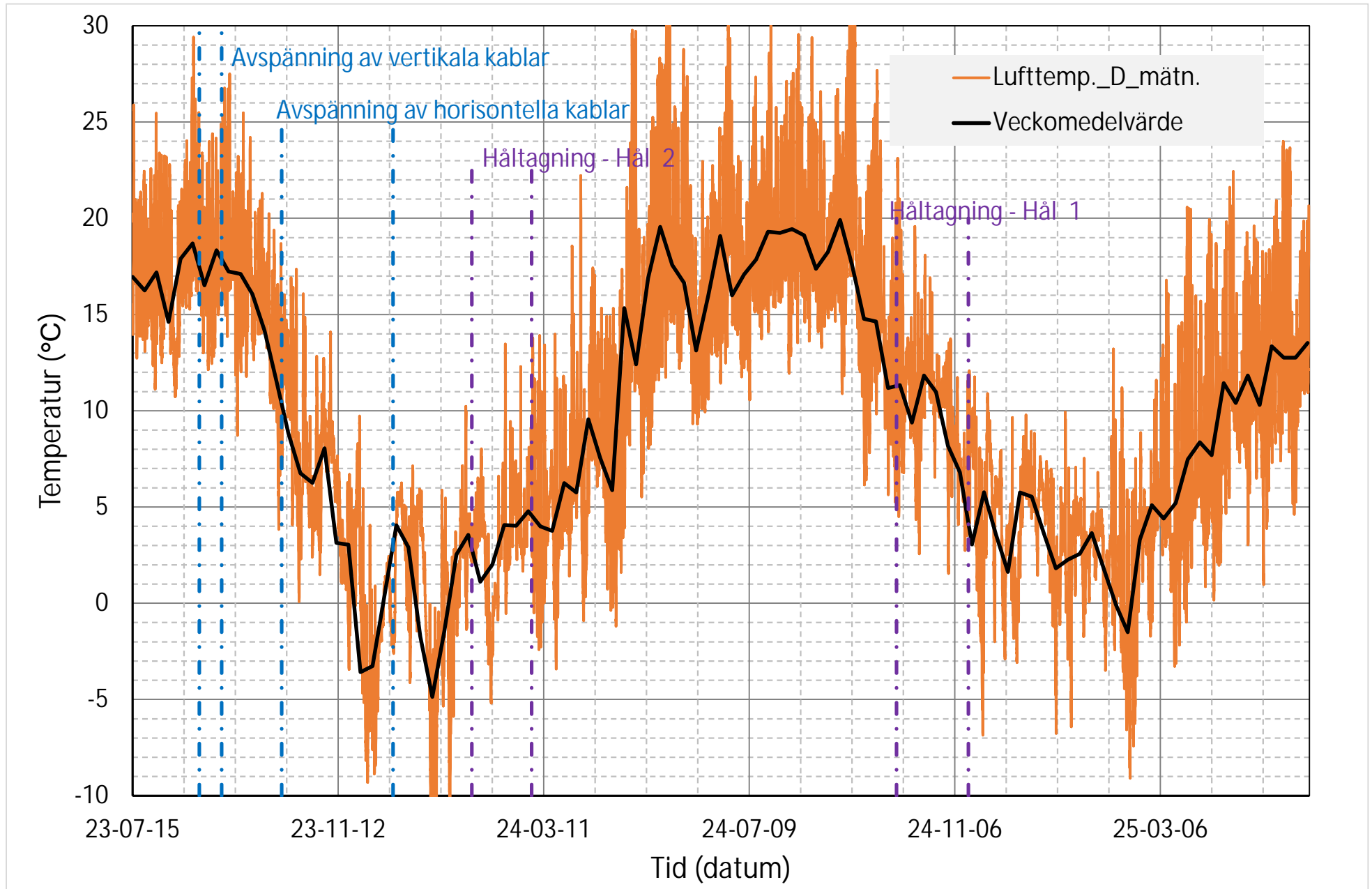
## Deformationer och töjningar resultaterande av håltagning i reaktorinneslutning på Ringhals 2

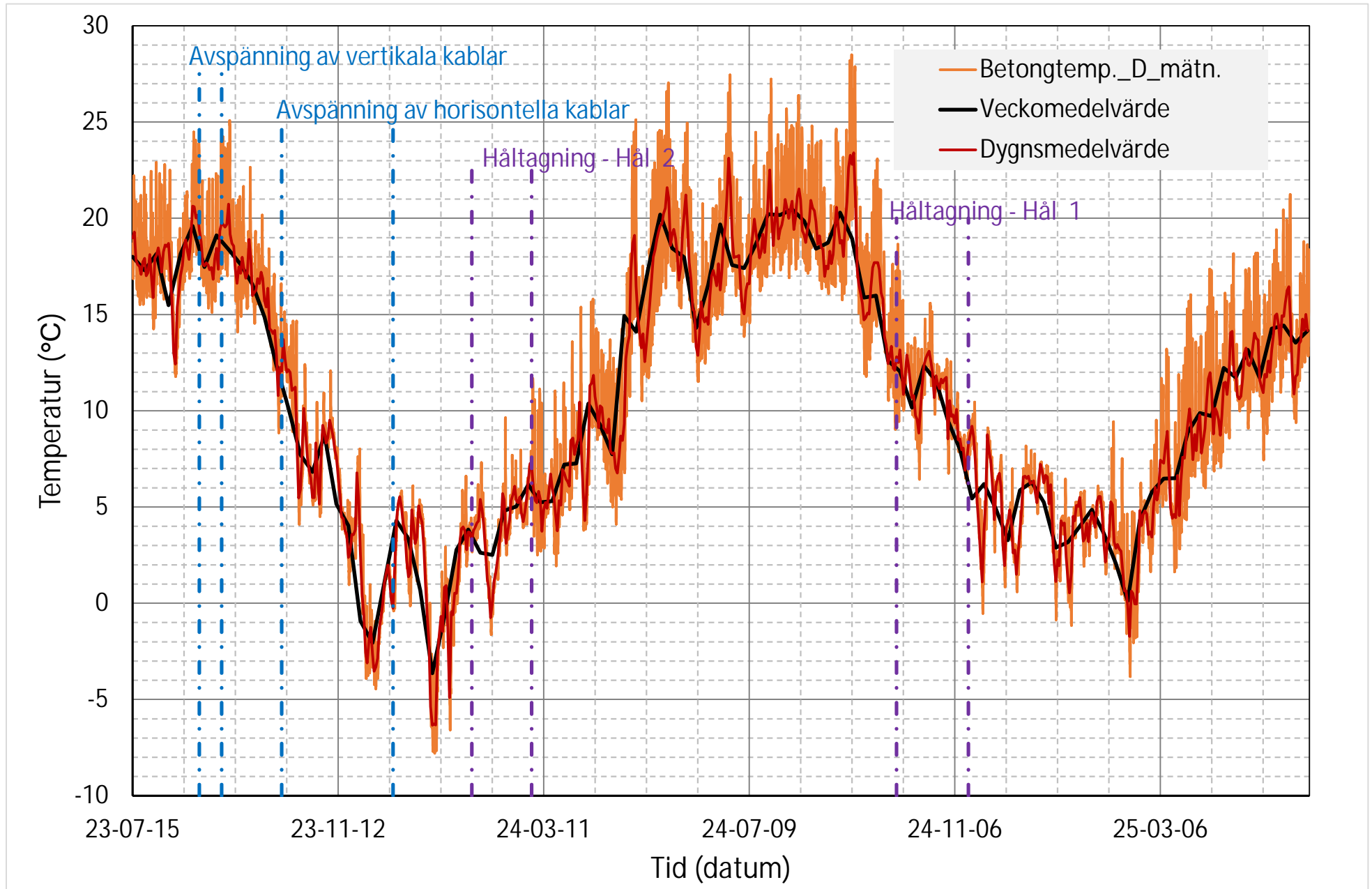
Två öppningar skapades i Ringhals 2:s reaktorinneslutning för att ta ut utrustning. I samband med arbetet avspändes spännkablar. Arbetet övervakades genom mätningar med trådlösa sensorer som visade att avspänningen, särskilt av horisontella kablar, hade stor påverkan på uppmätta töjningar som även varierade med temperaturförändringar. Vertikala deformationer följde temperaturvariationer, medan radiella deformationer visade en stark korrelation med temperaturförändringar. Ytterligare numeriska analyser rekommenderas för att särskilja effekterna av temperatur och avspänning.

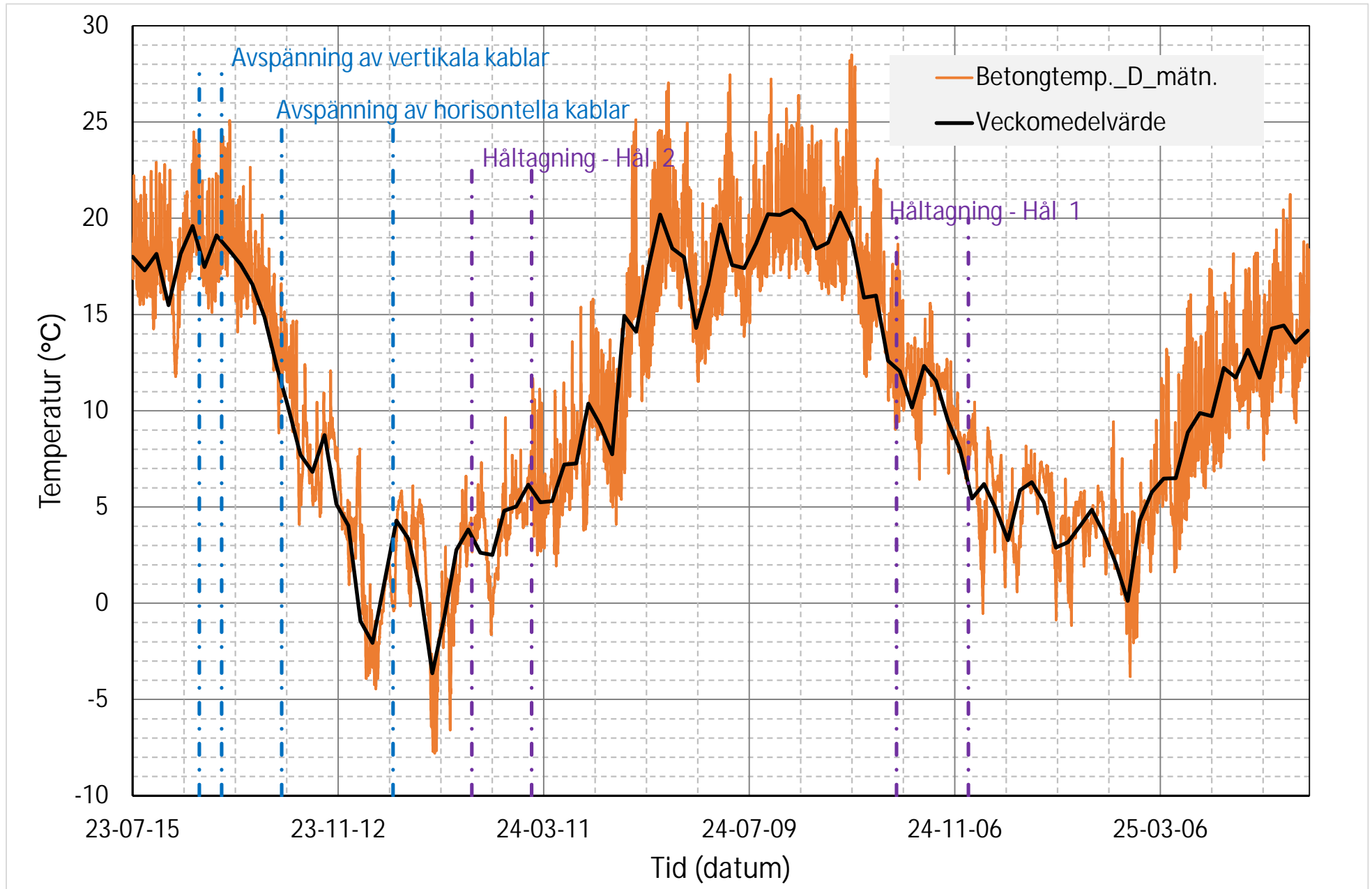
### Ett nytt steg i energiforskningen

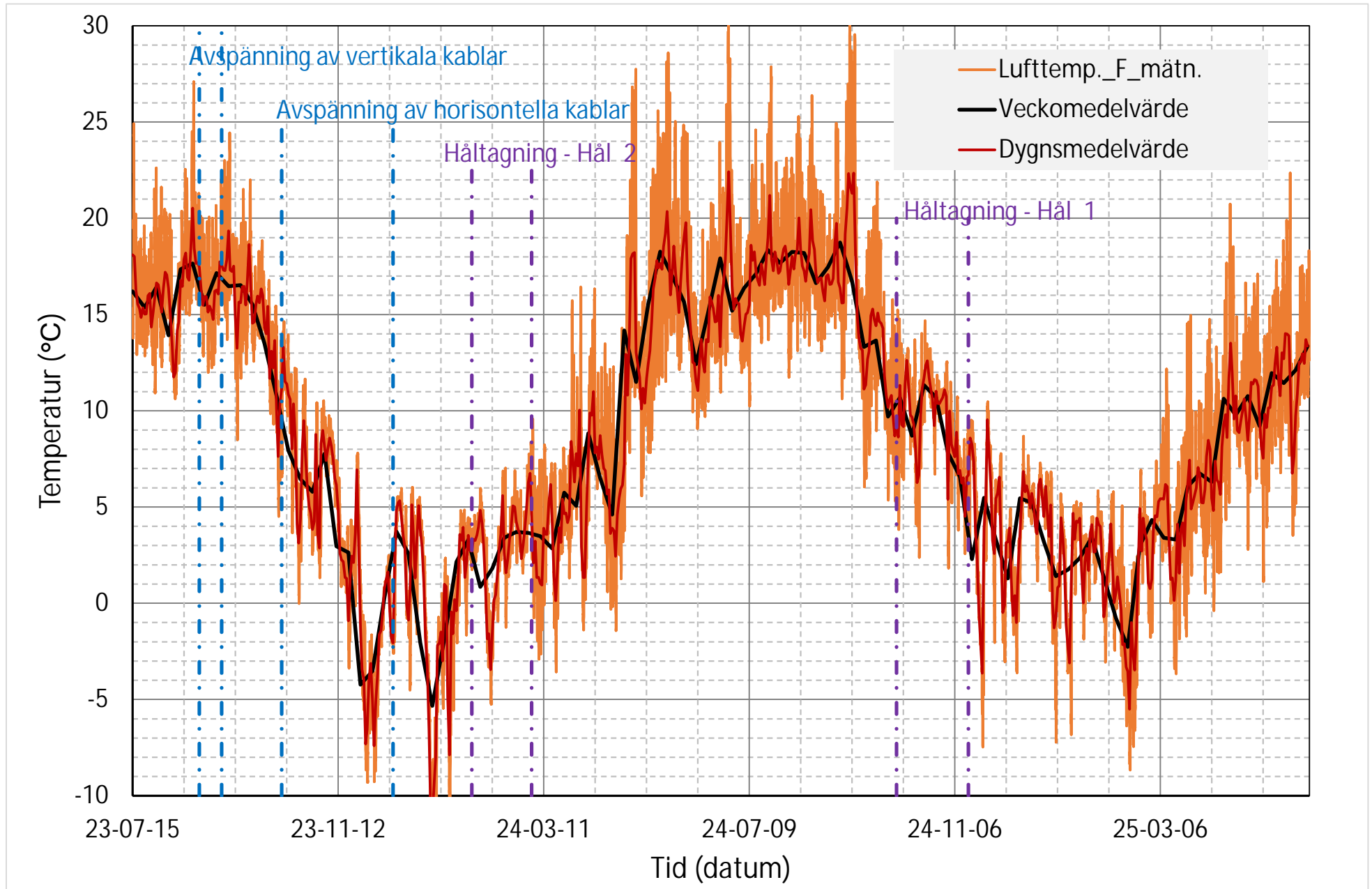
Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)

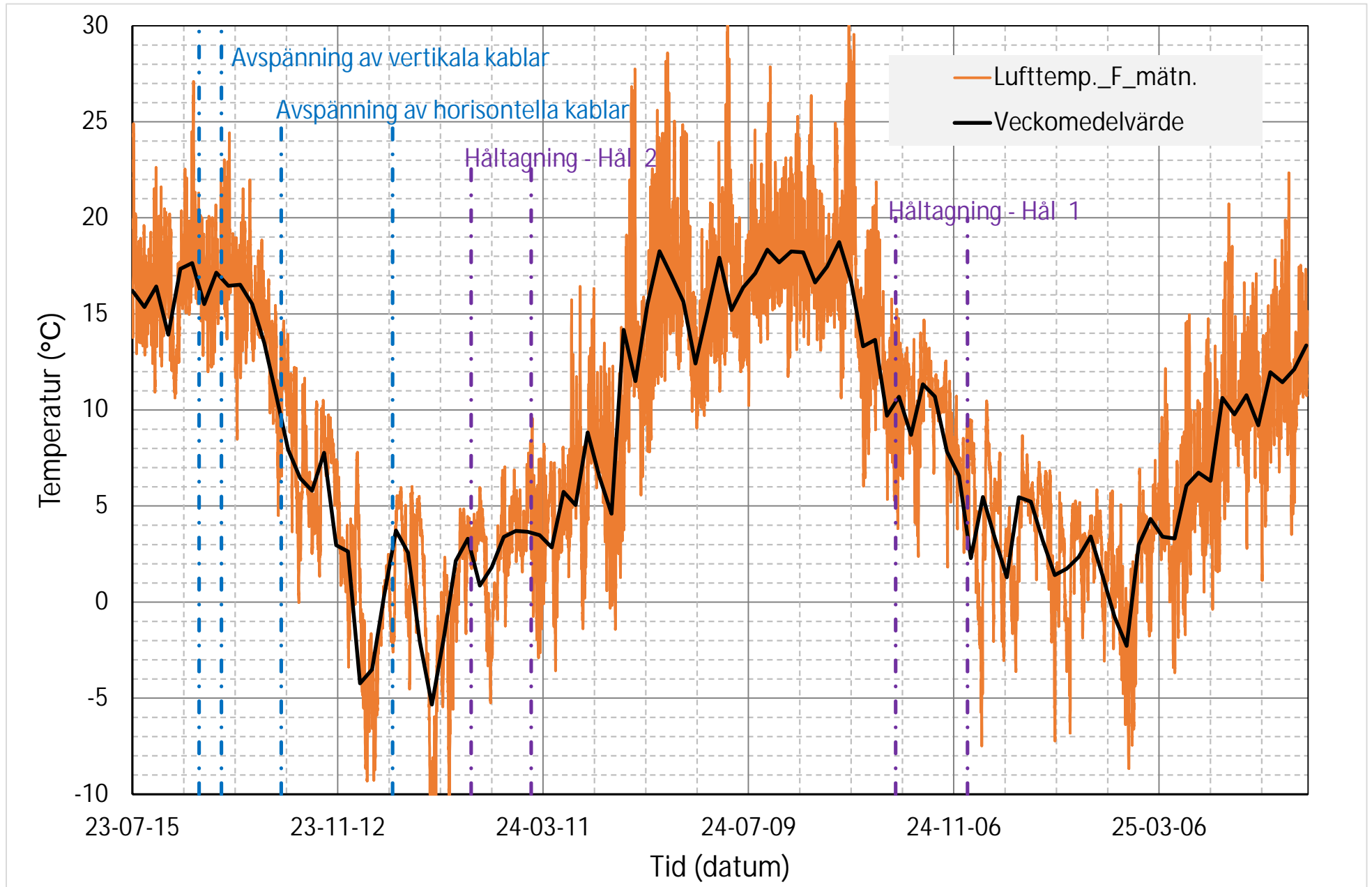


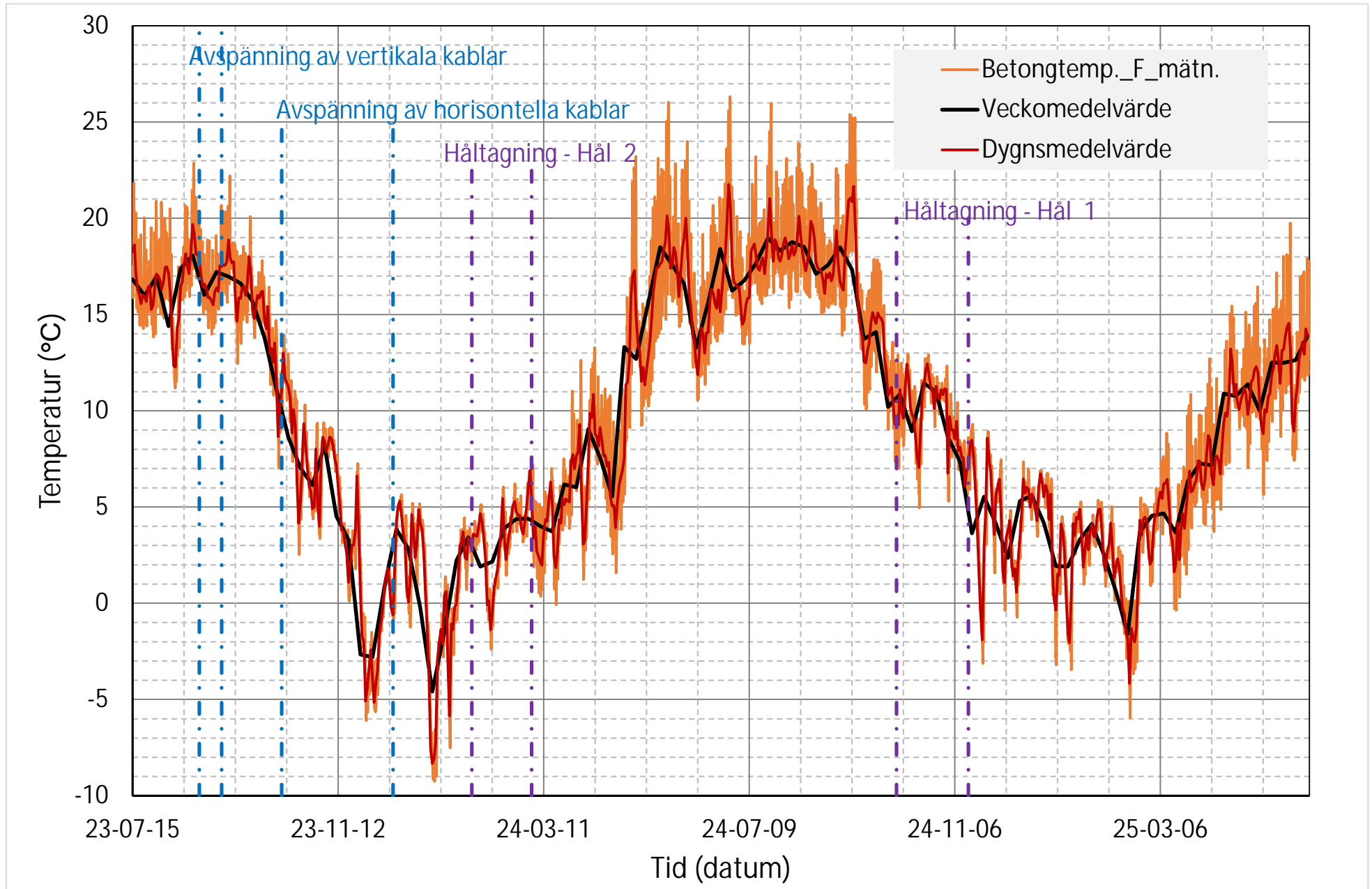


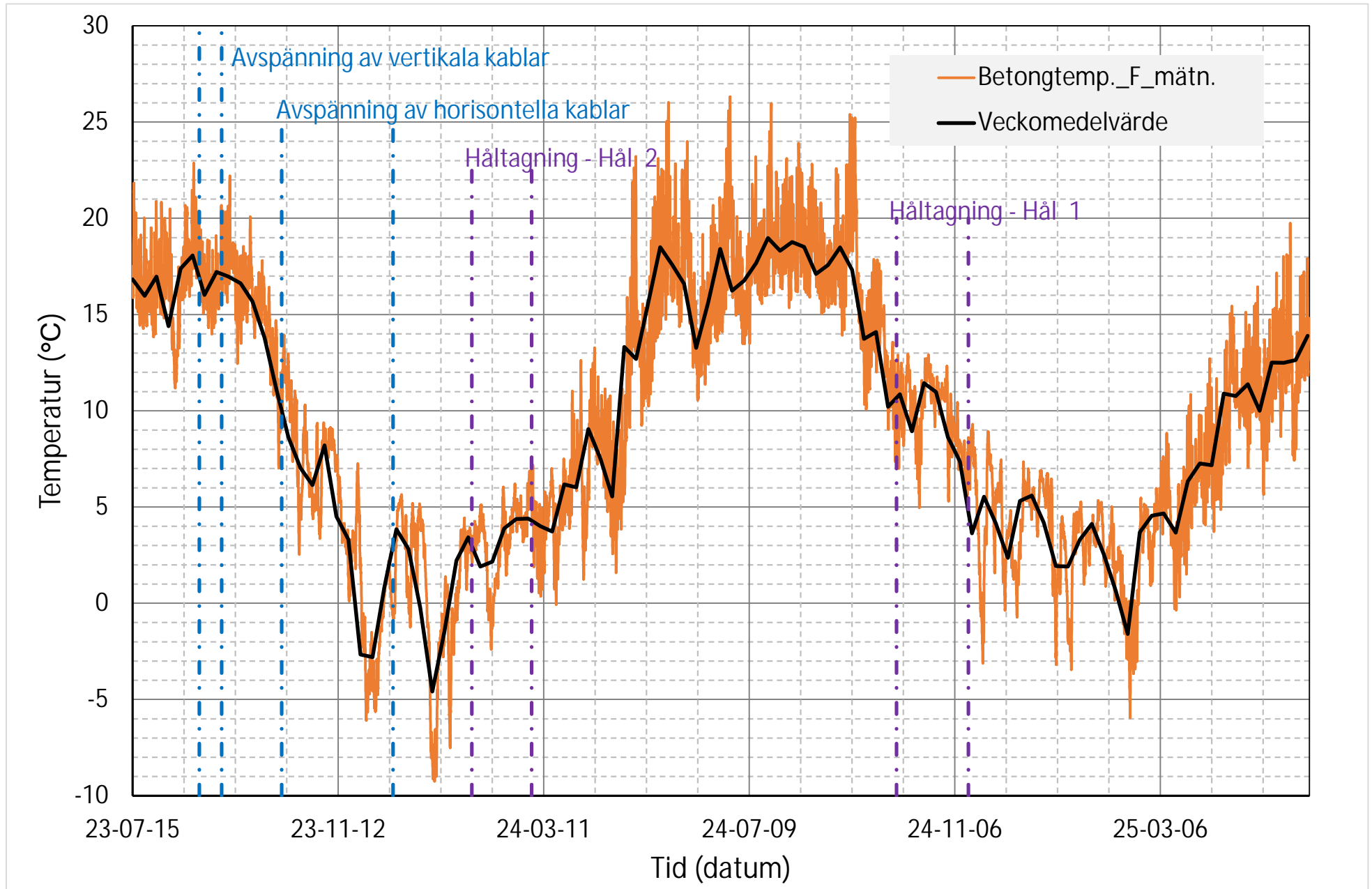




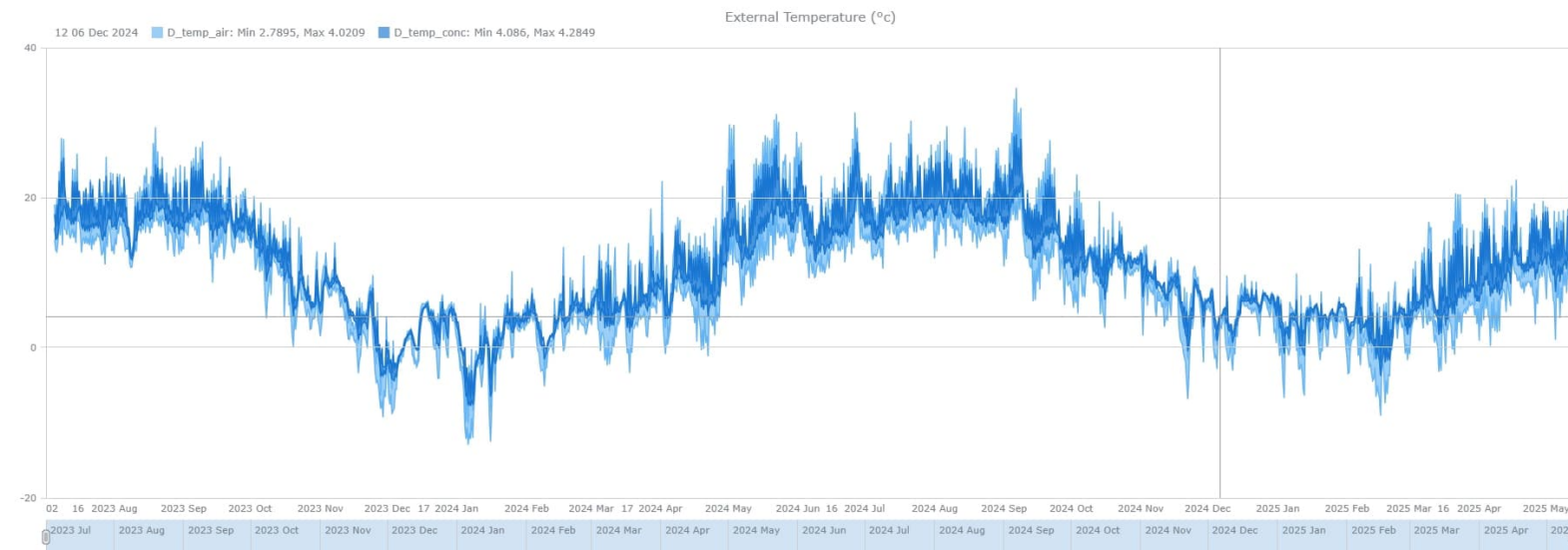
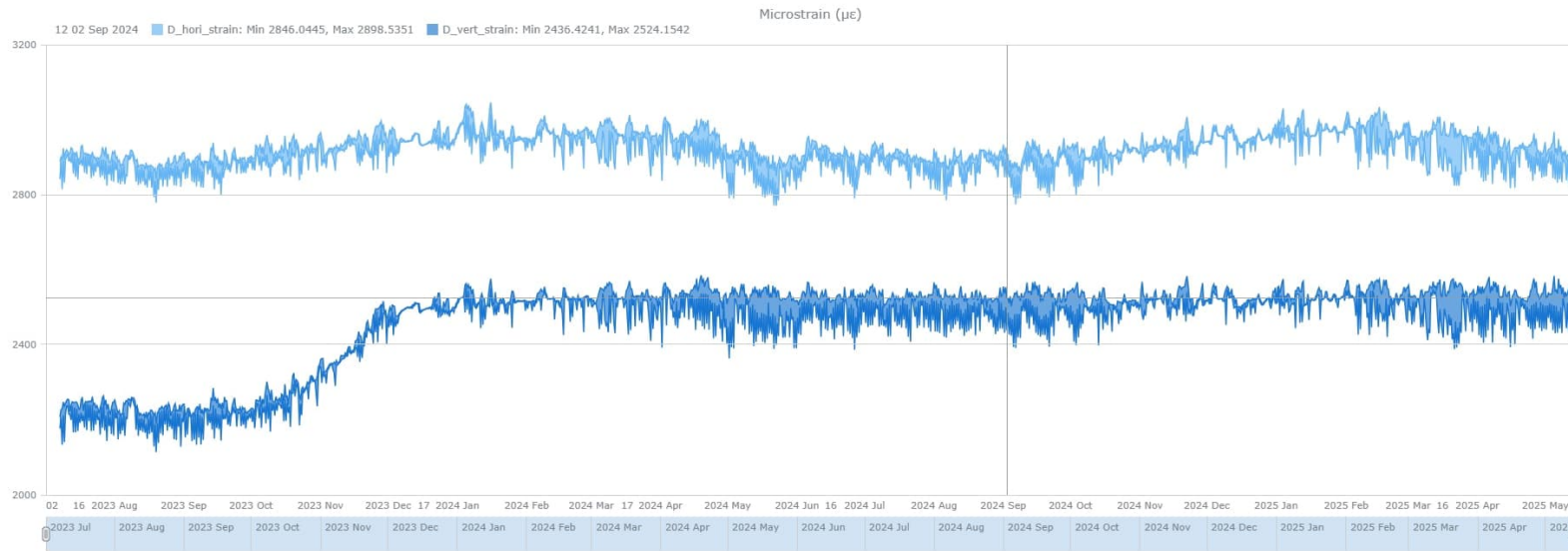




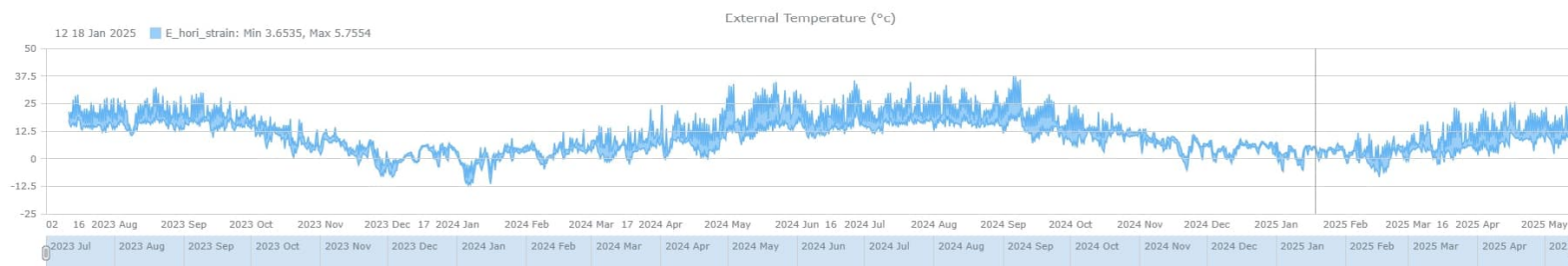
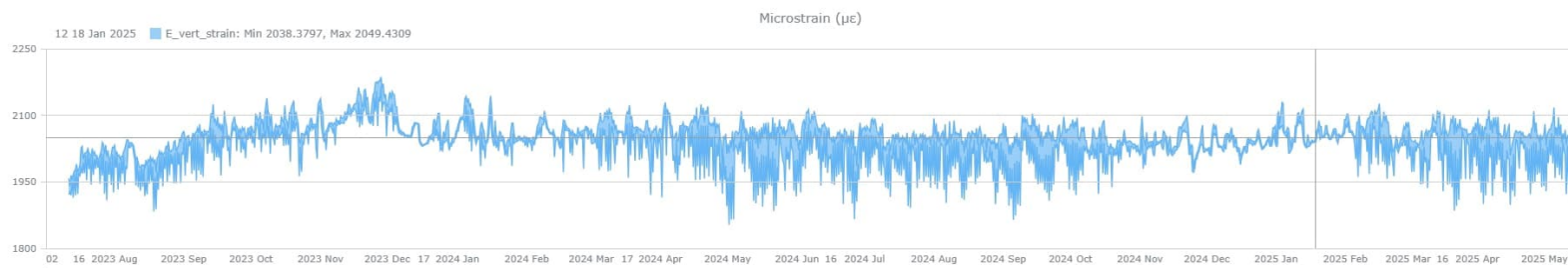
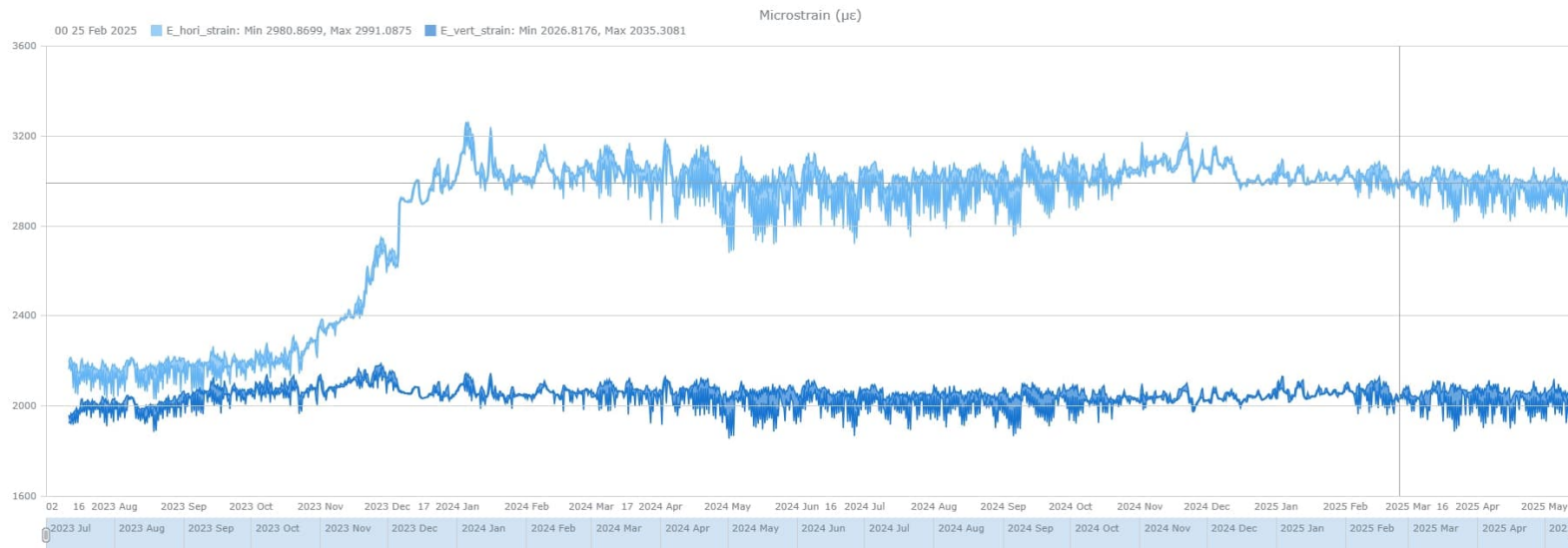




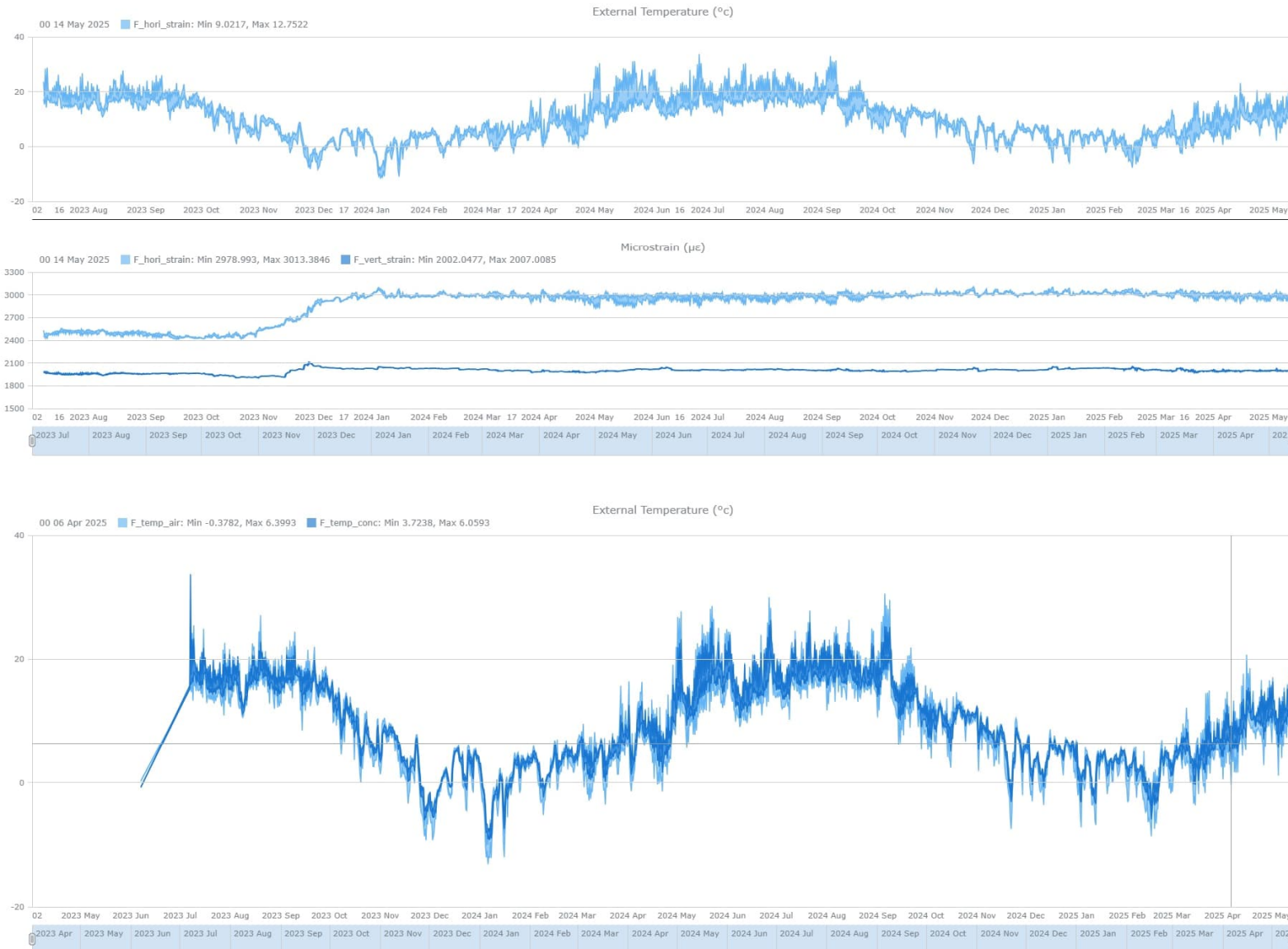
Mätställe D – horisontal töjning och vertikal töjning (överst), luft- och betongtemperatur (nederst).



Mätställe E – horisontal töjning och vertikal töjning (överst), vertikal töjning och lufttemperatur (nederst).

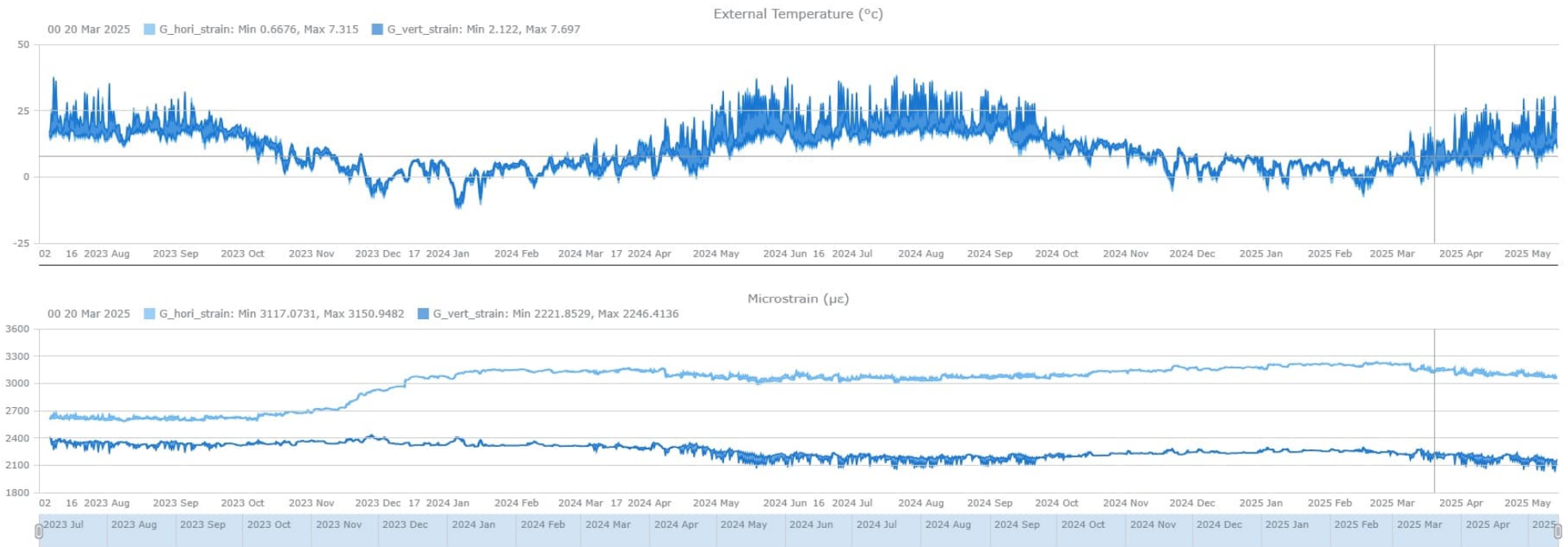


Mätställe F – Lufttemperatur samt horisontal och vertikal töjning (överst), luft- och betongtemperatur (nederst).



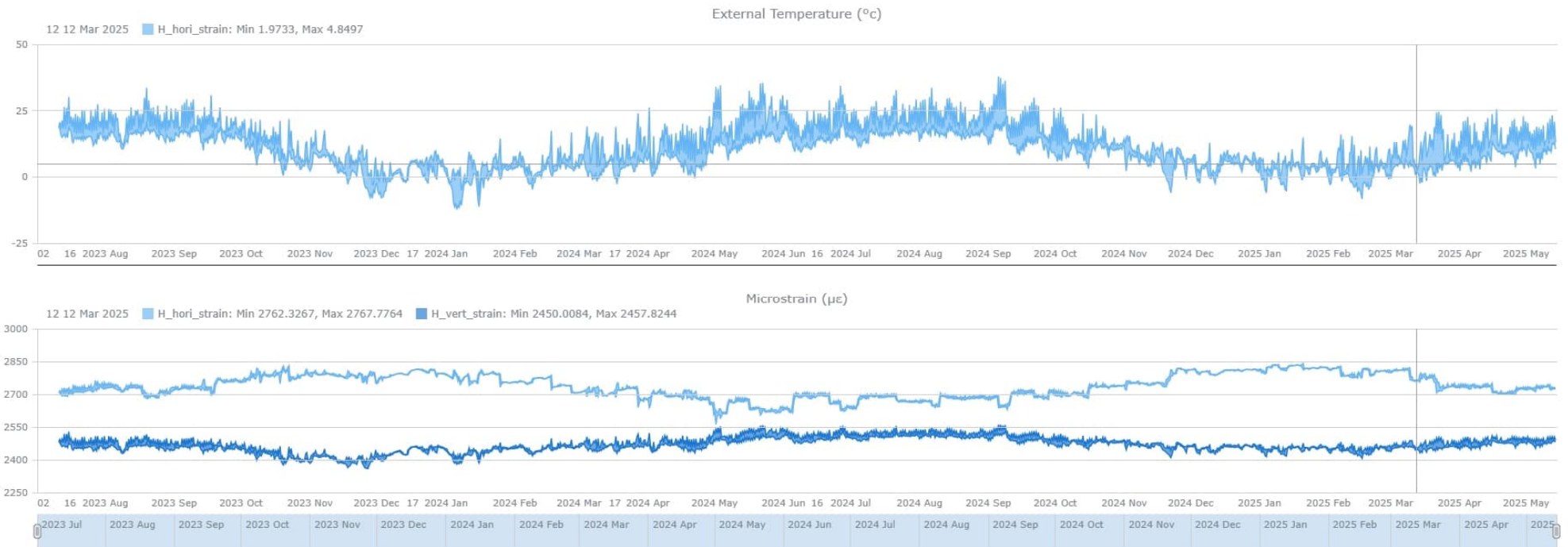
Töjningar

Mätställe G – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal töjning (nederst).



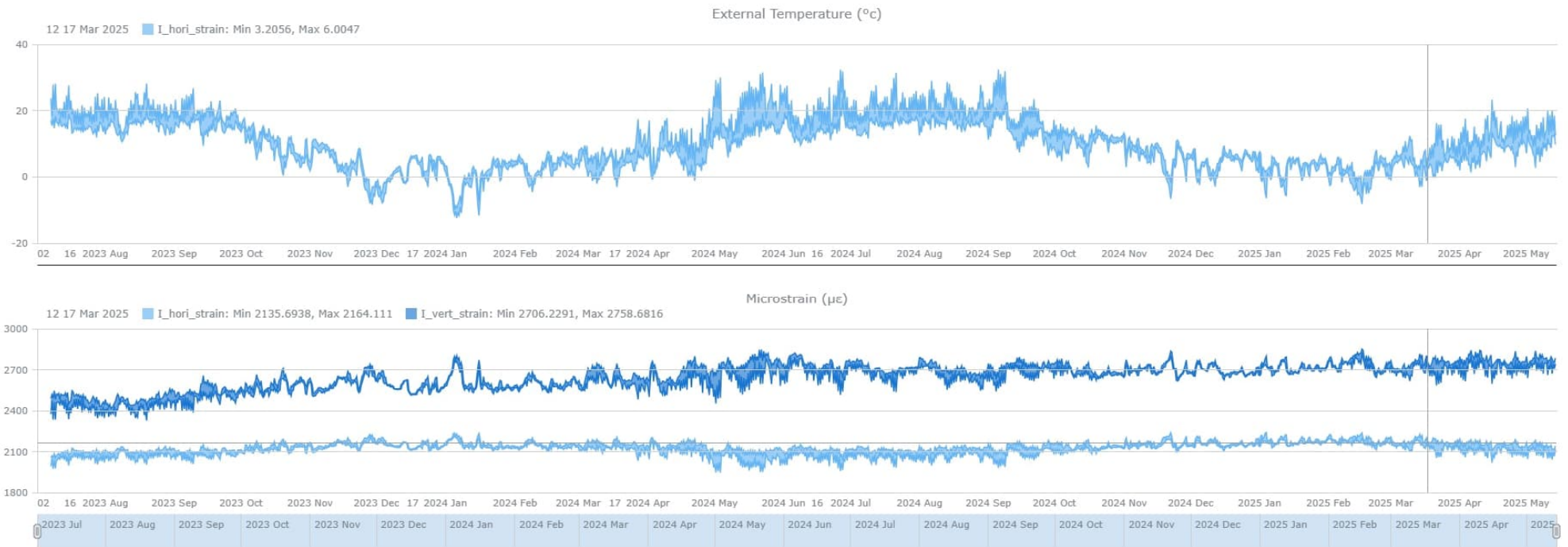
Töjningar

Mätställe H – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal töjning (nederst).



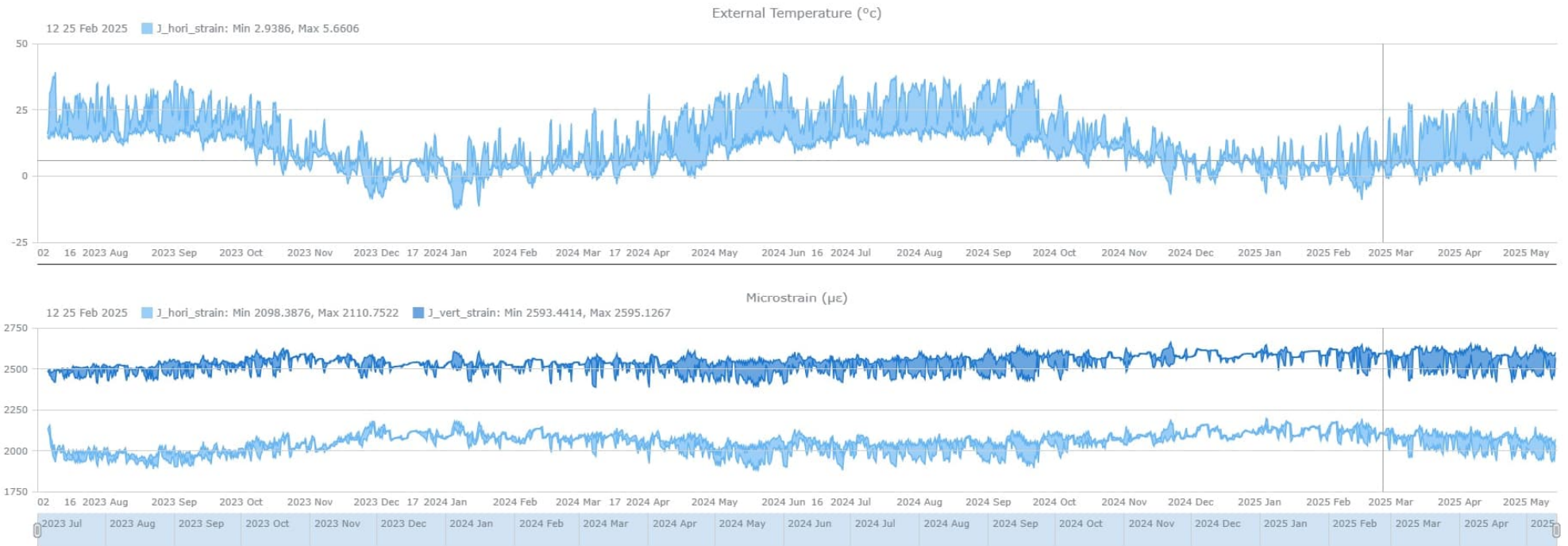
Töjningar

Mätställe I – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal töjning (nederst).



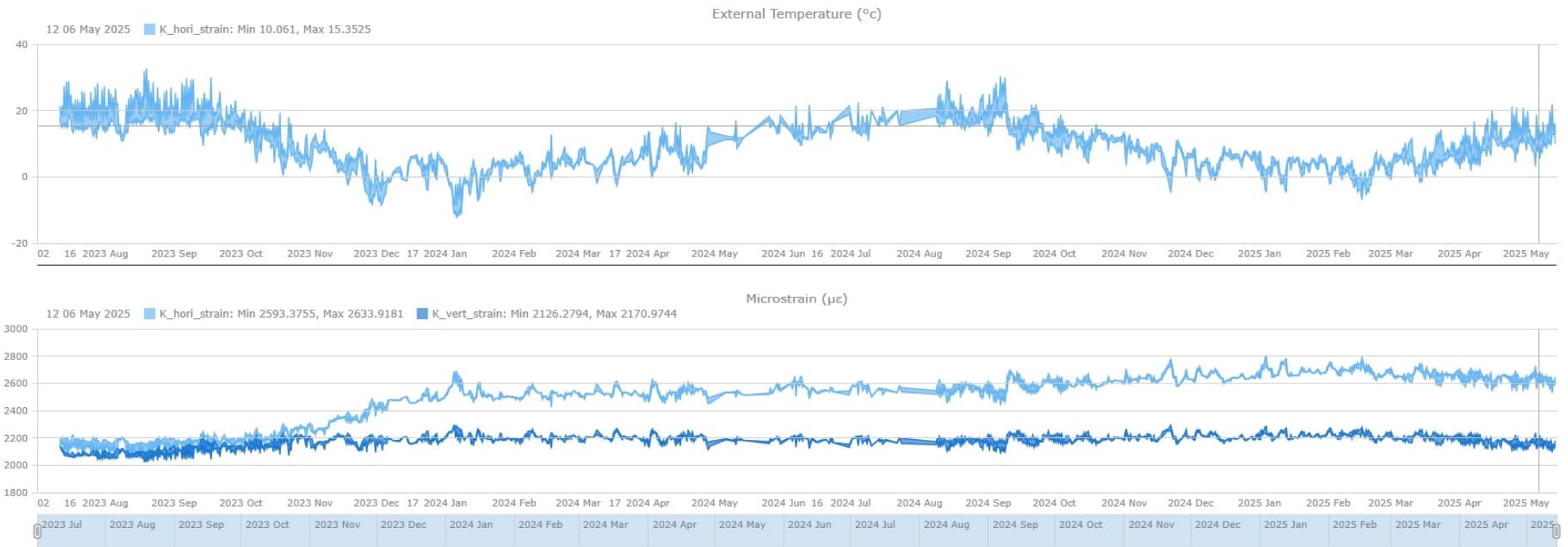
Töjningar

Mätställe J – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal töjning (nederst).



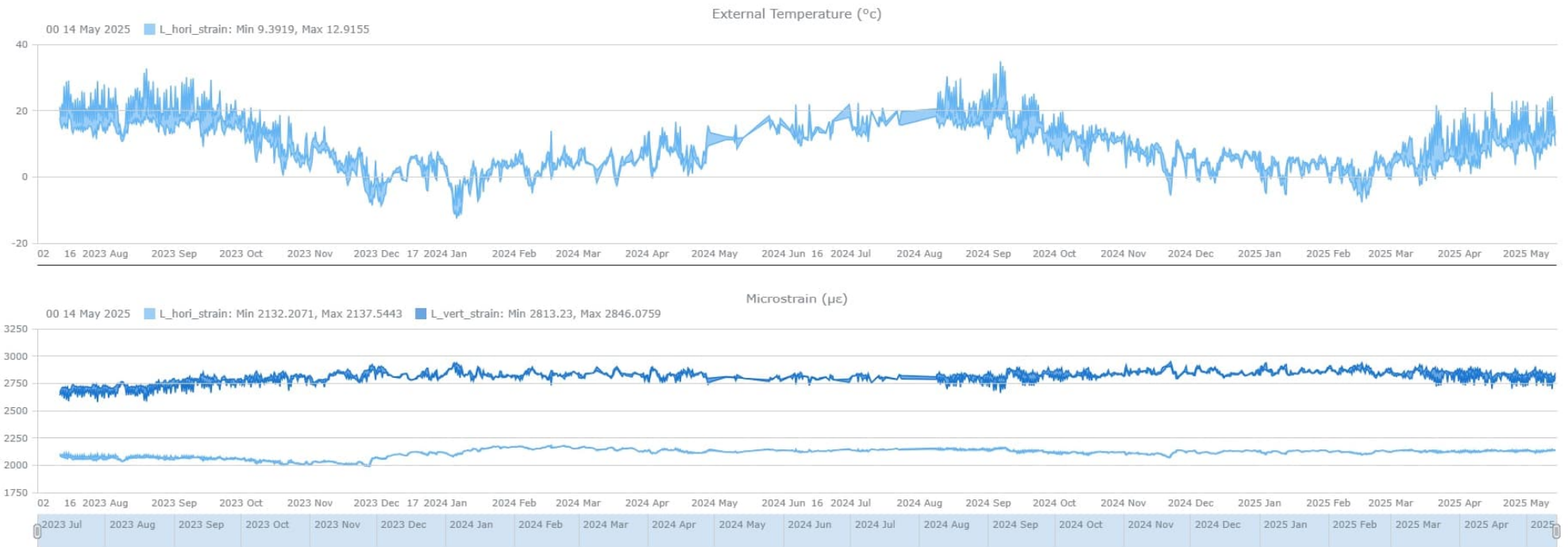
# Töjningar

Mätställe K – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal töjning (nederst).



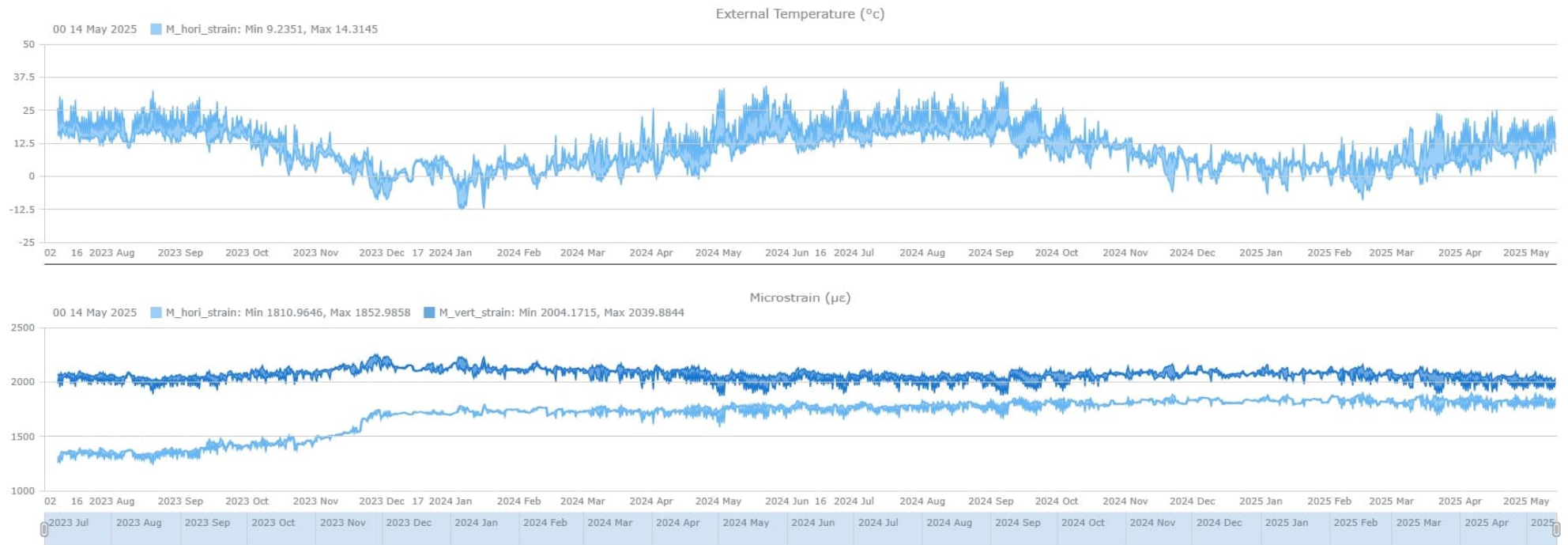
Töjningar

Mätställe L – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal töjning (nederst).



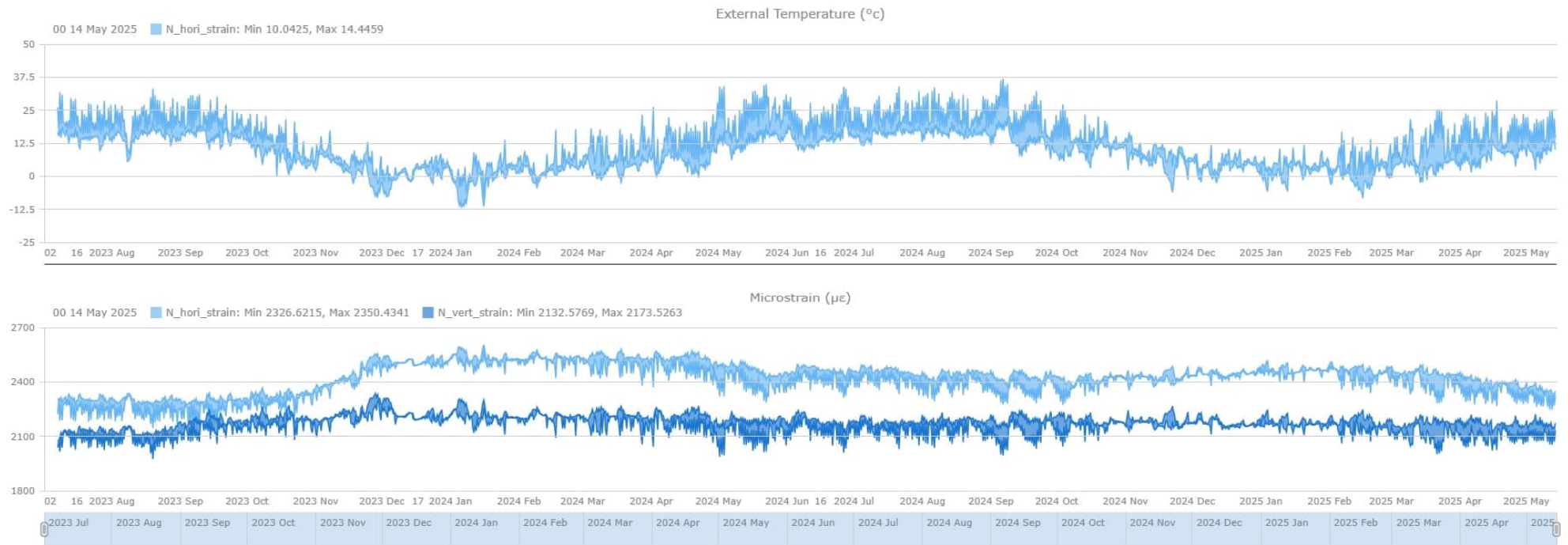
Tøjningar

Mätställe M – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal tøjning (nederst).



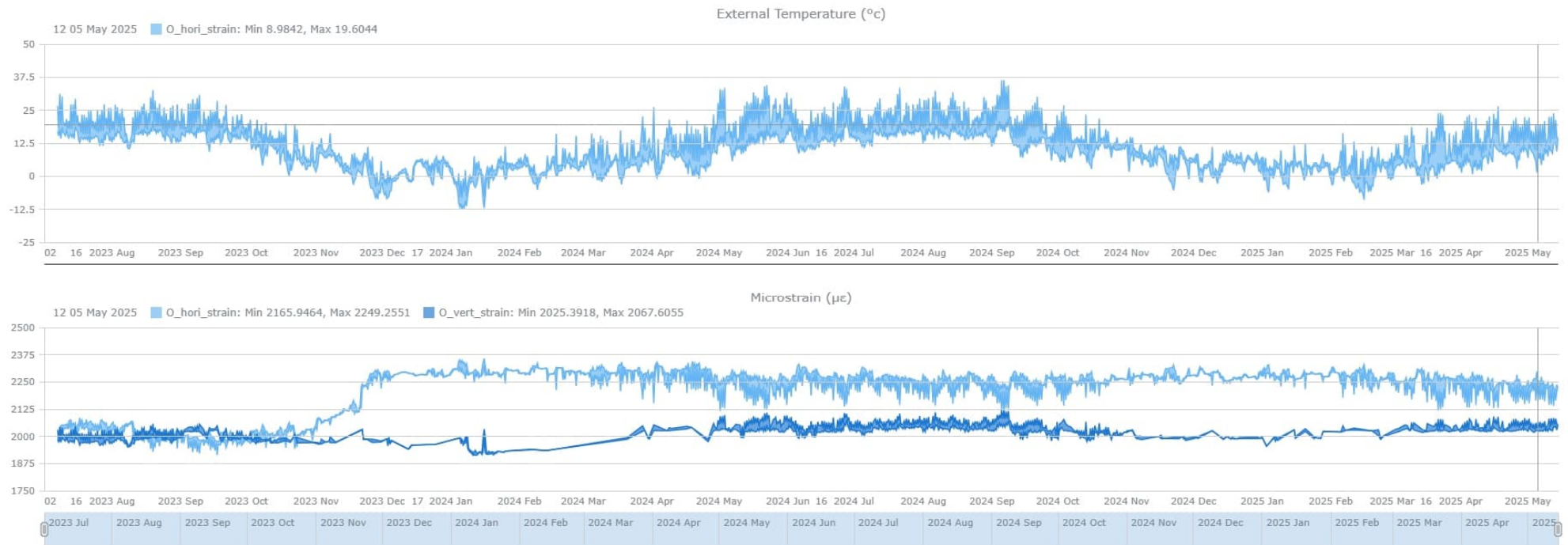
Tøjningar

Mätställe N – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal tøjning (nederst).



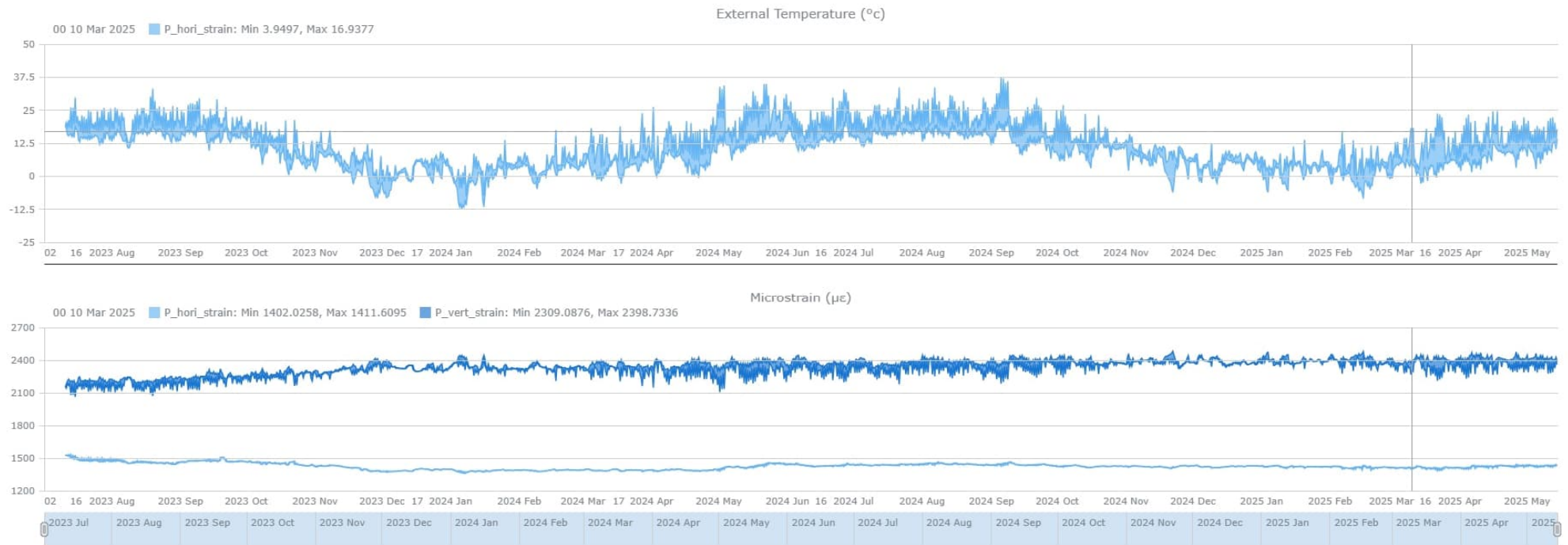
Tøjningar

Mätställe O – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal tøjning (nederst).



Töjningar

Mätställe P – Lufttemperatur (överst) samt horisontal och vertikal töjning (nederst).



## Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain

I Bilaga 2b utförs mätningar direkt i figurerna. Mätningen avser det vertikala avståndet mellan två horisontella linjer och genomförs med verktyget "Avstånd" i modulen "Notera IMät" i programmet PDF-XChange. De värden som anges i figurerna motsvarar programmets interna mätvärden baserade på dess skala och ska inte tolkas som uppmätta eller registrerade töjningar.

För att beräkna det skalenliga vertikala avståndet mellan två horisontella linjer bestäms först den figurens vertikala skalfaktor,  $s$ . Skalfaktorn erhålls genom att dividera den verkliga längden på den vertikala axeln ( $L_{as}$ ) med den längd som mäts i programmet ( $L_{af}$ ). Därefter mäts avståndet mellan de två horisontella linjerna i figuren ( $L_{hf}$ ). Det skalenliga avståndet mellan linjerna ( $L_{hs}$ ) beräknas som produkten av  $s$  och  $L_{hf}$ .

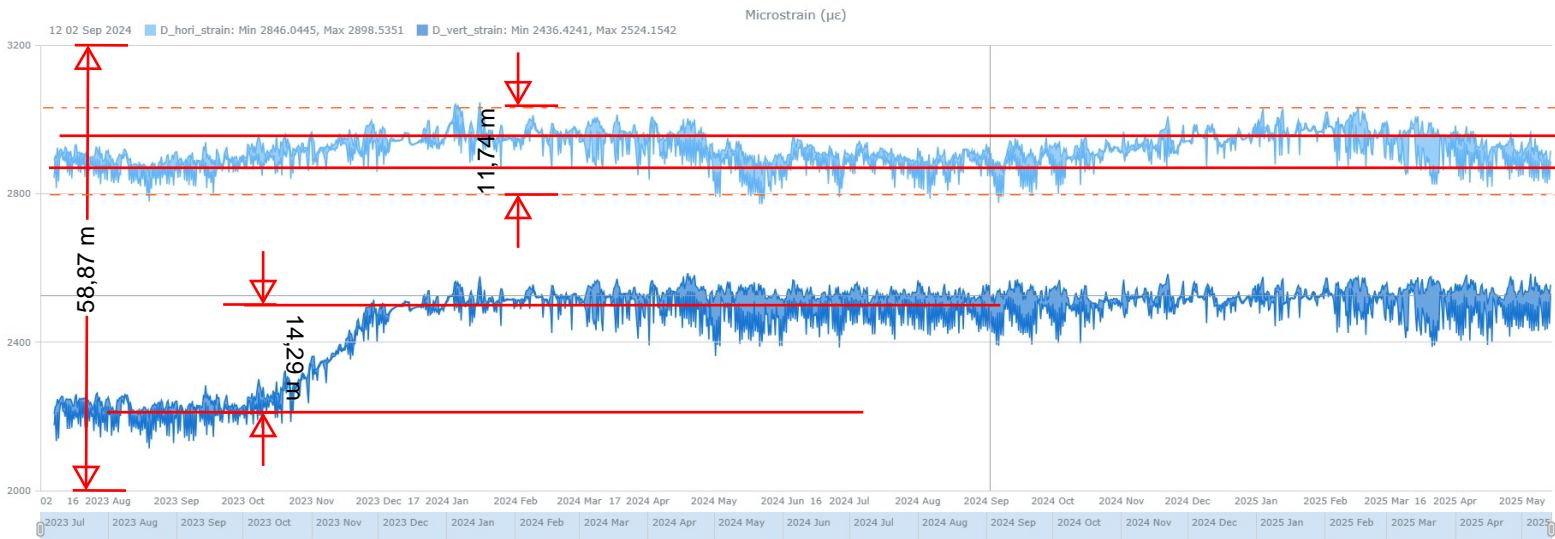
Nedan redovisas en tillämpning av metoden för den vertikala töjningen i punkt D.

$$L_{as} = 3200 - 2000 = 1200 \text{ microstrain}$$

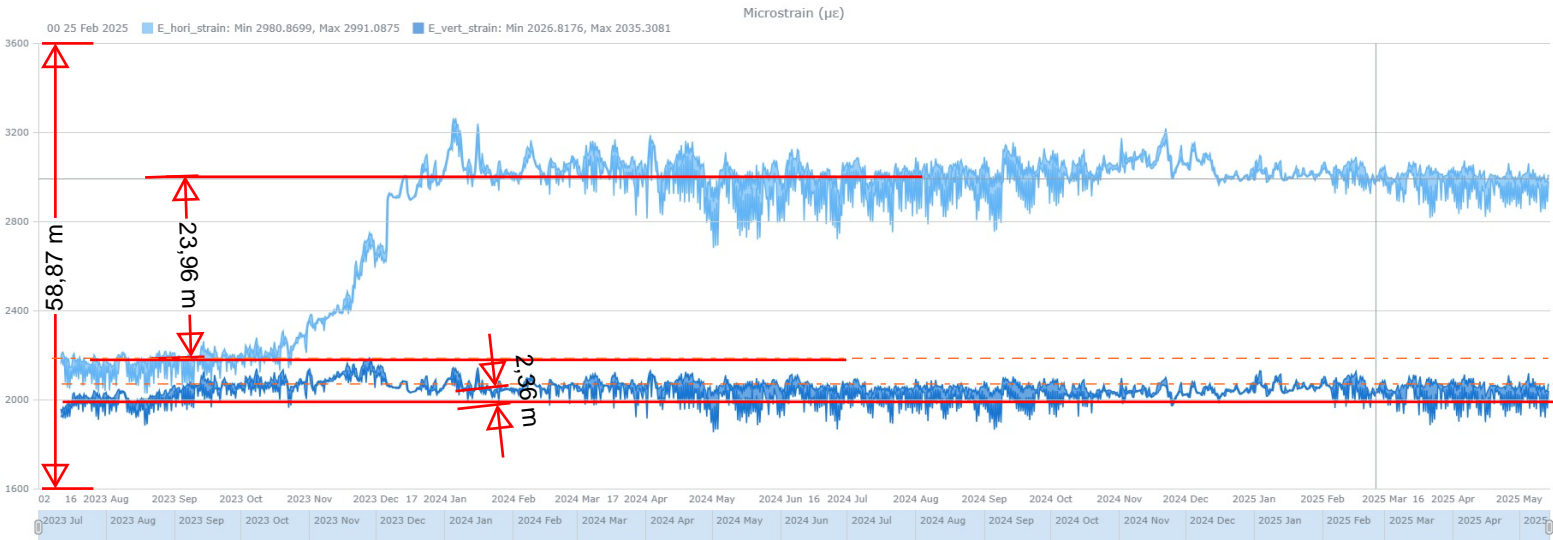
$$L_{af} = 58,78 \text{ m}$$

$$s = L_{as} / L_{af} = 1200 / 58,78 = 20,42 \text{ microstrain/m}$$

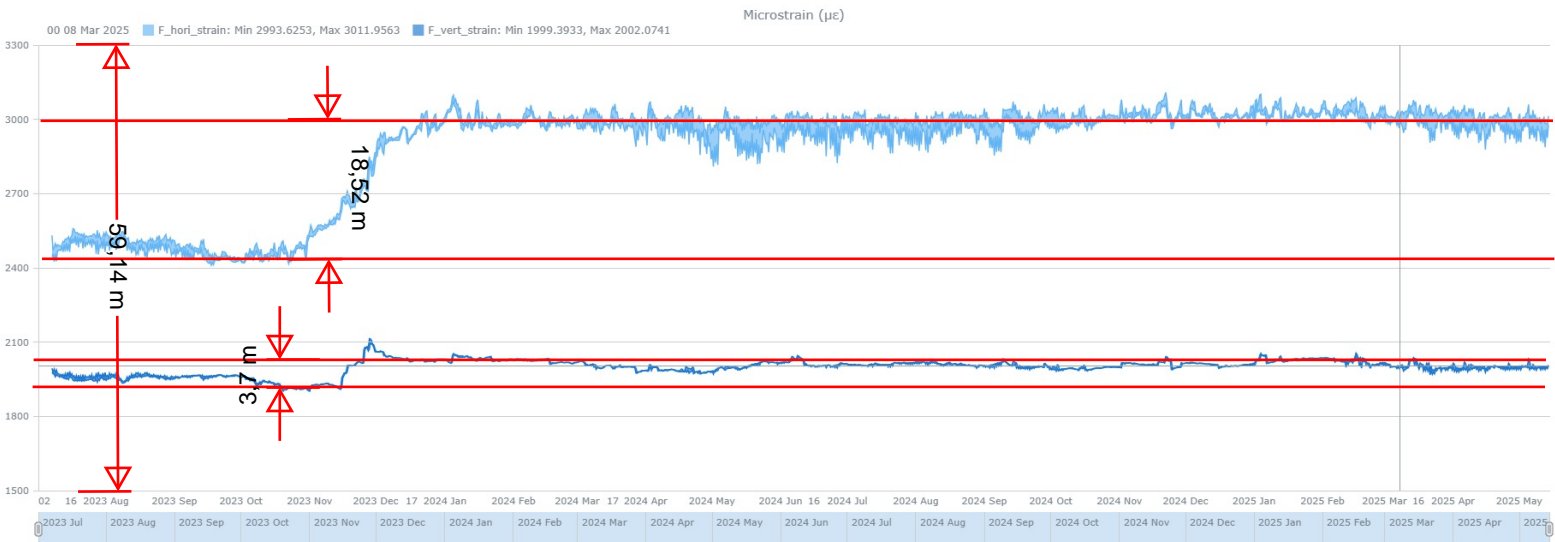
$$L_{hs} = s \times L_{hf} = 20,42 \times 14,29 = 292 \text{ microstrain}$$



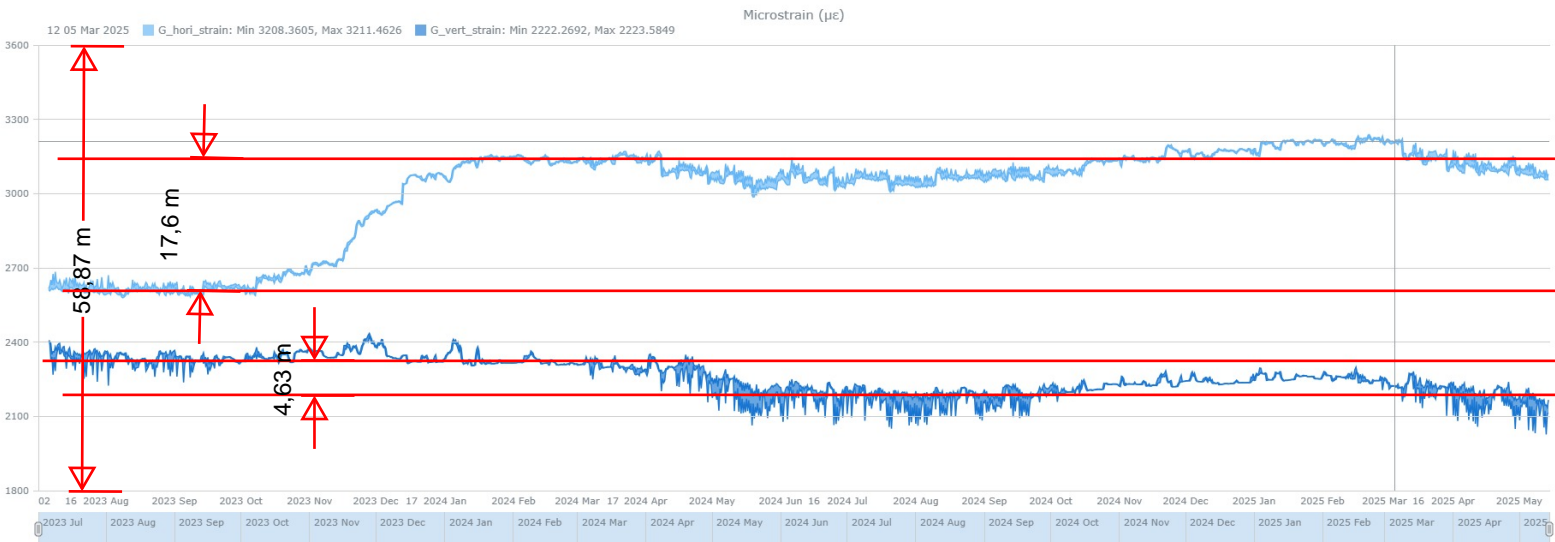
# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



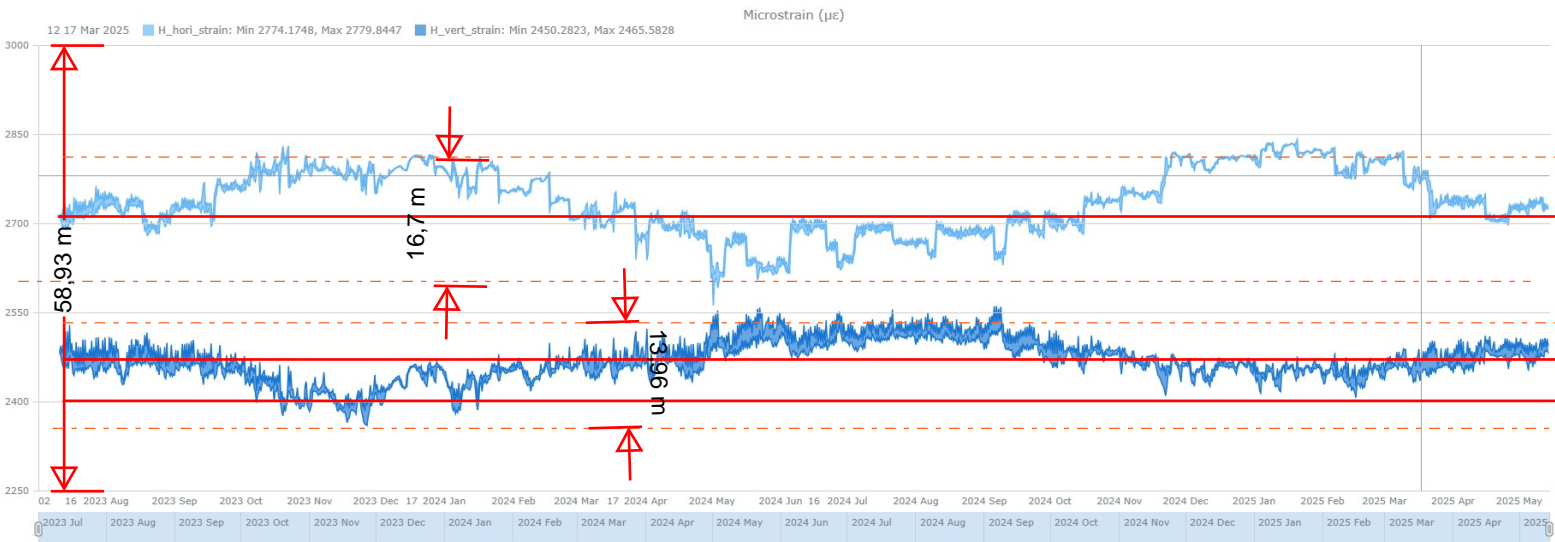
# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



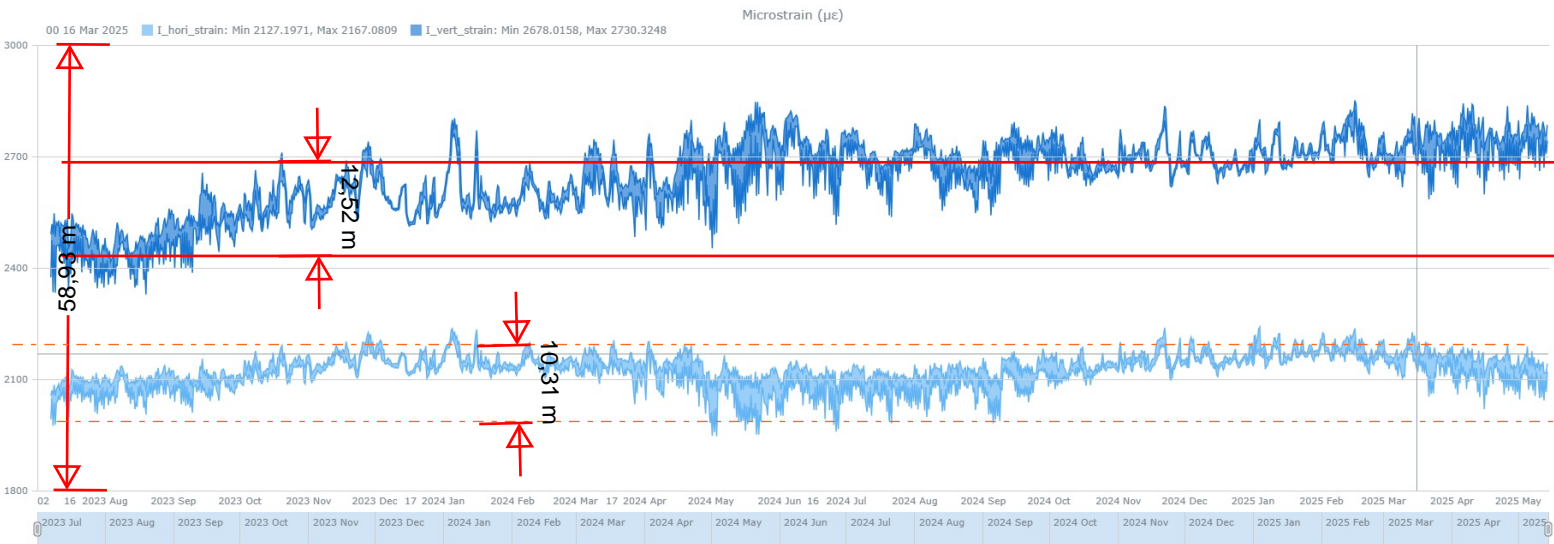
# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



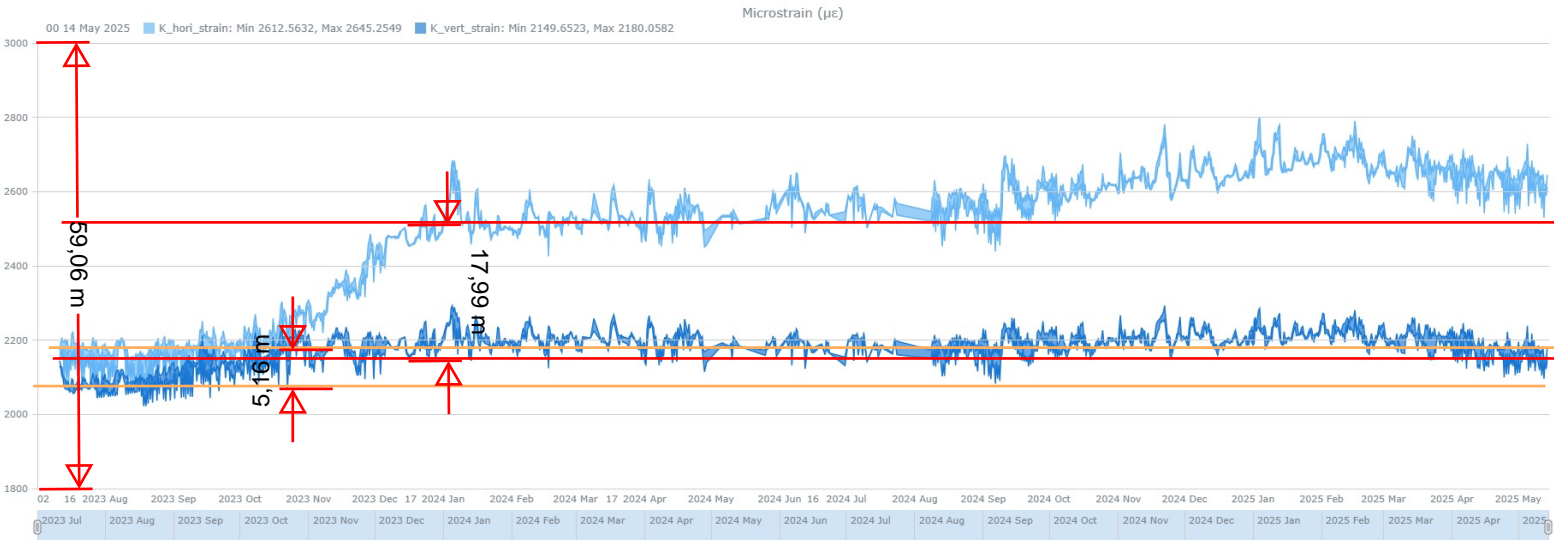
# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



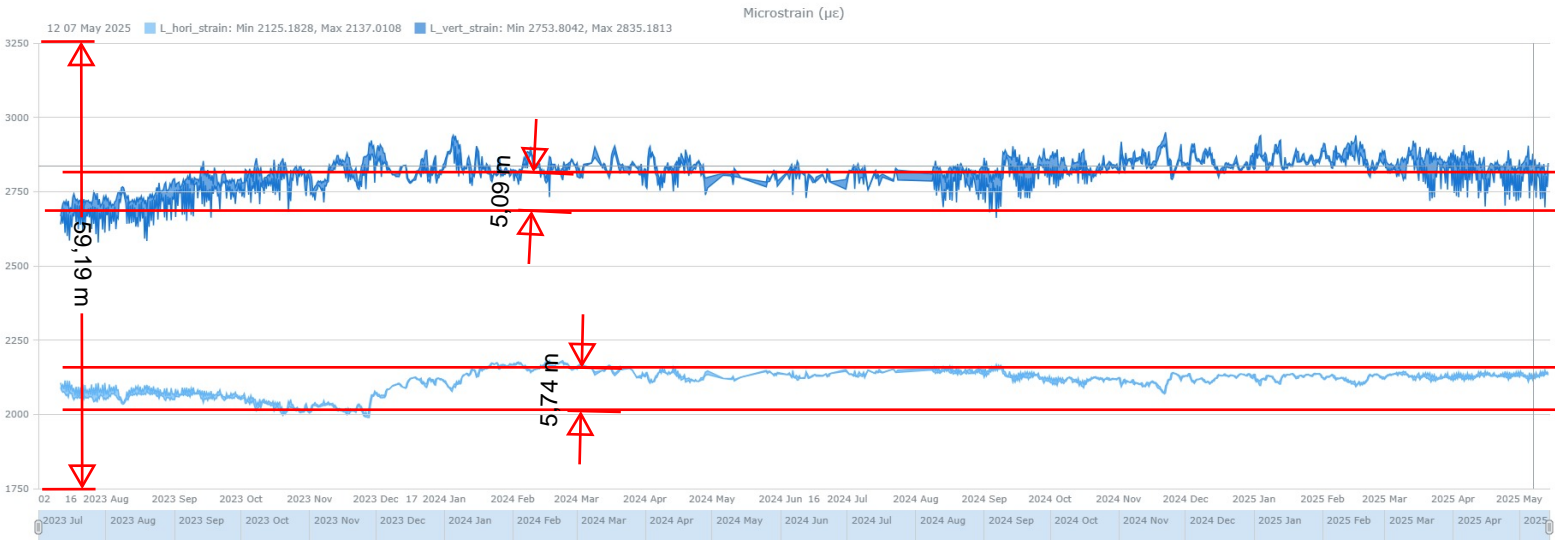
# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



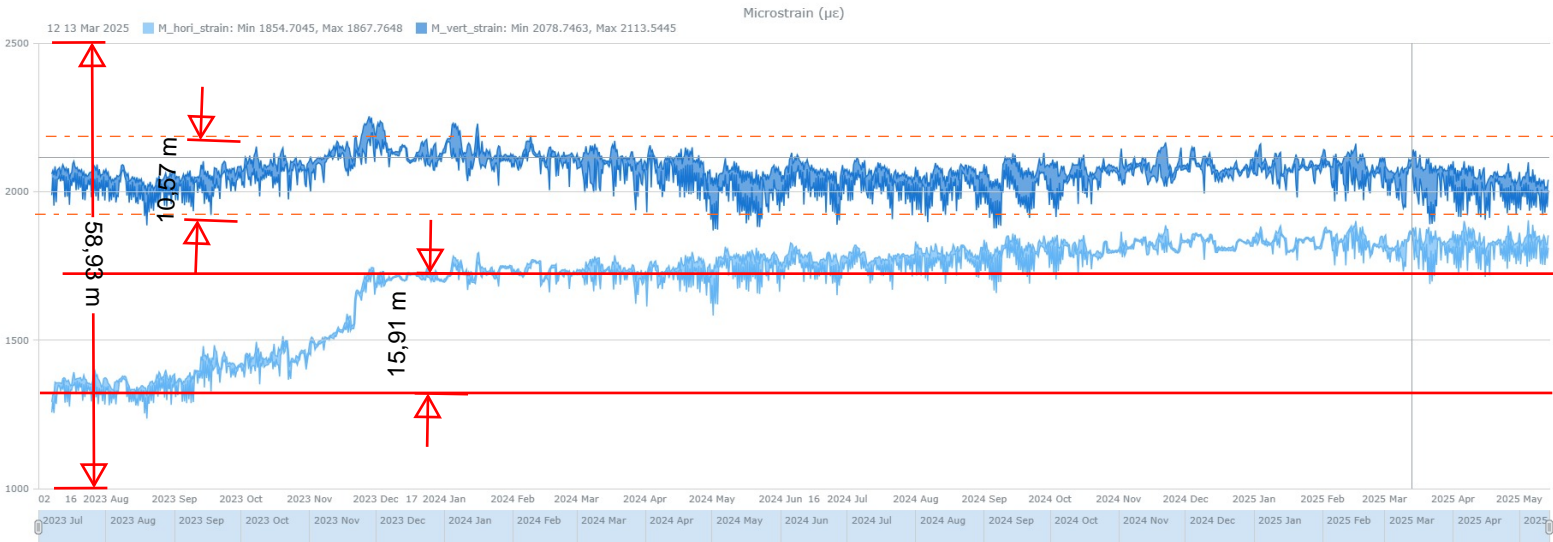
# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



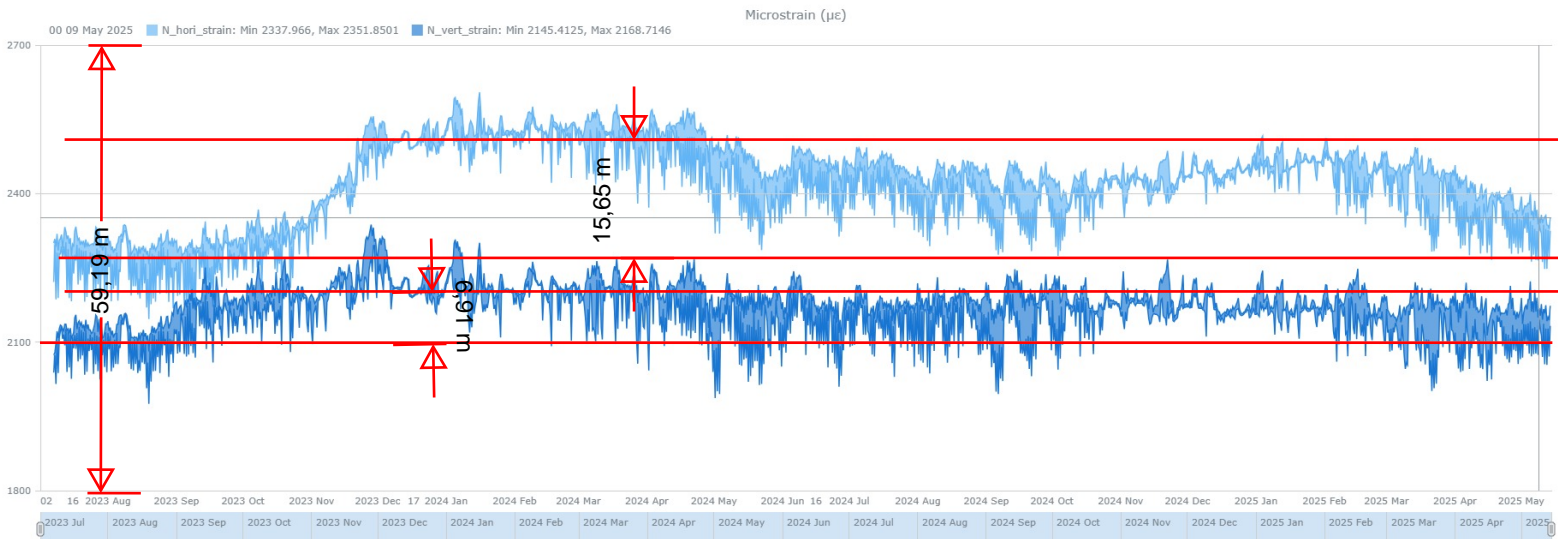
# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



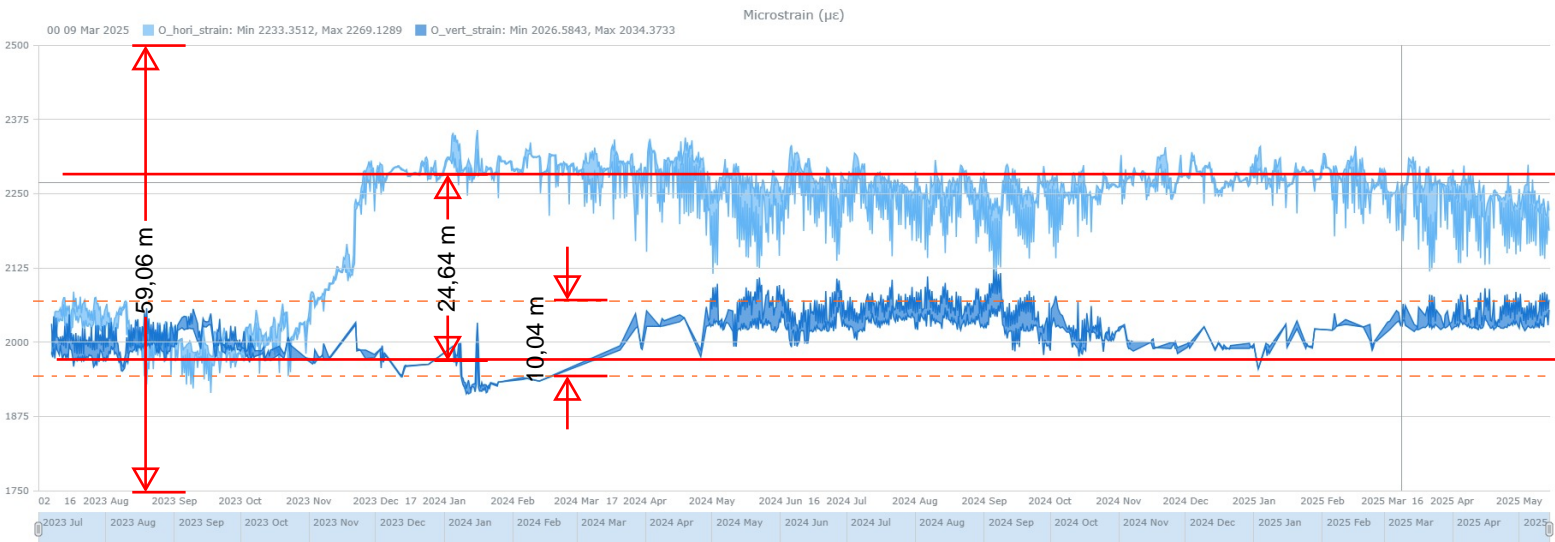
# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



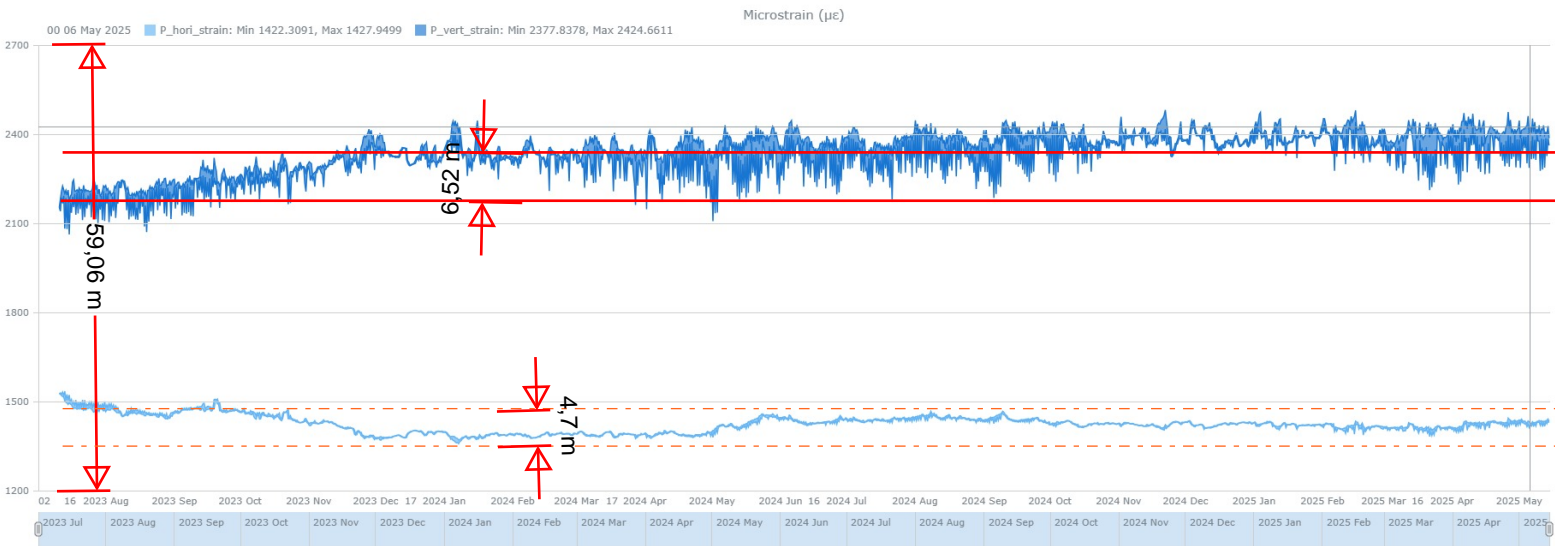
# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain

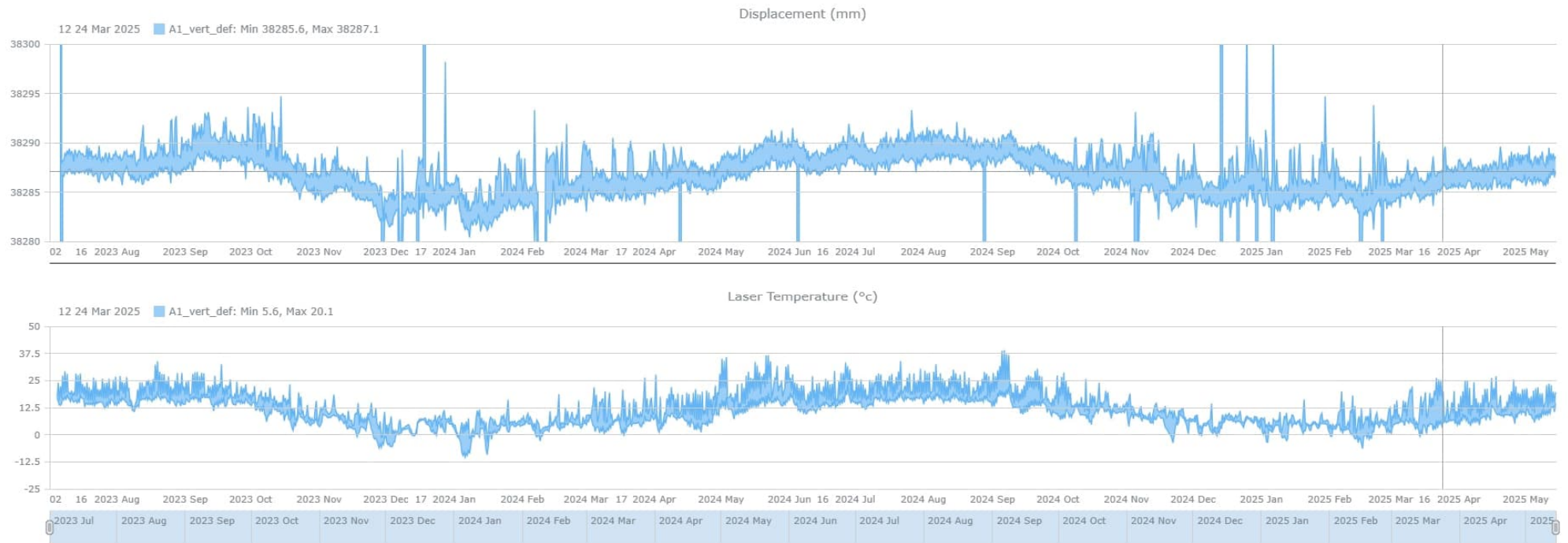


# Bilaga 2b - Bearbetning av mätresultat - h\_strain och v\_strain



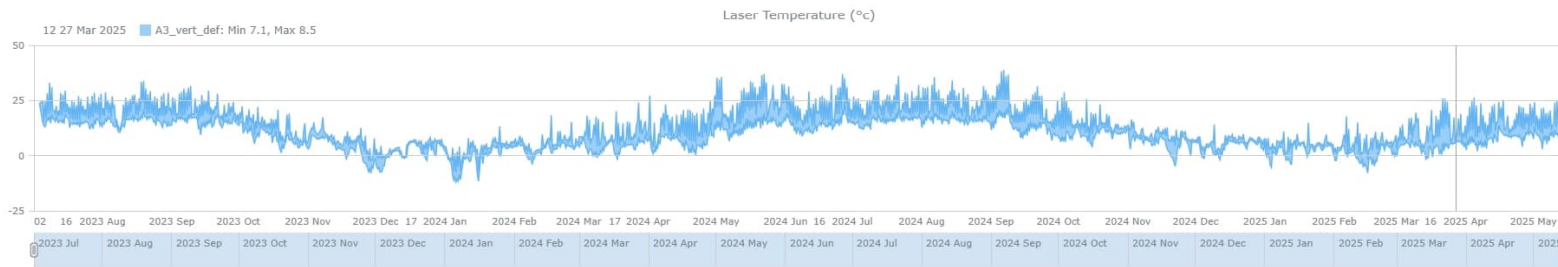
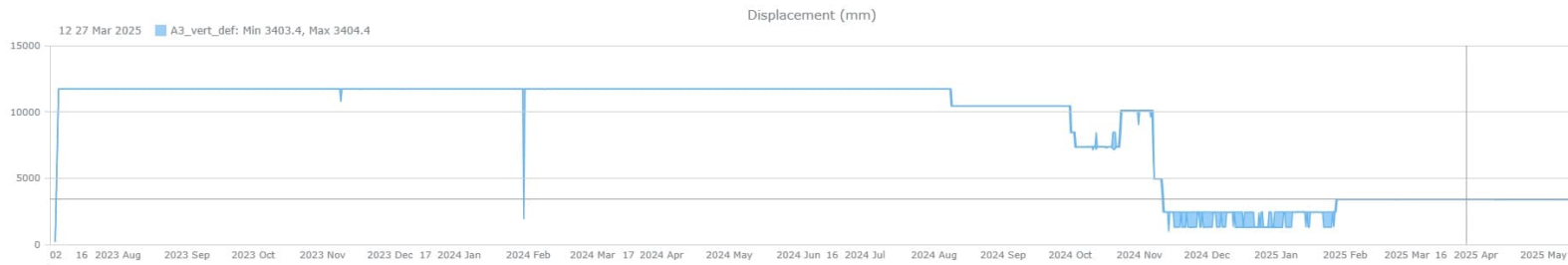
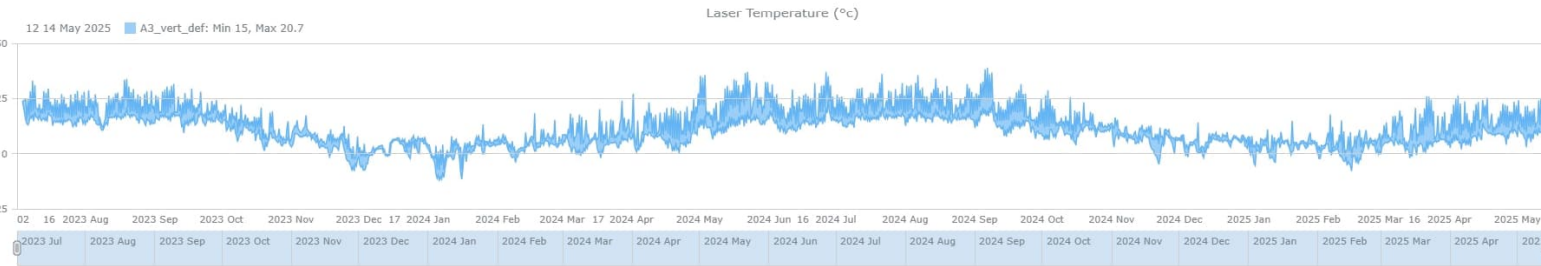
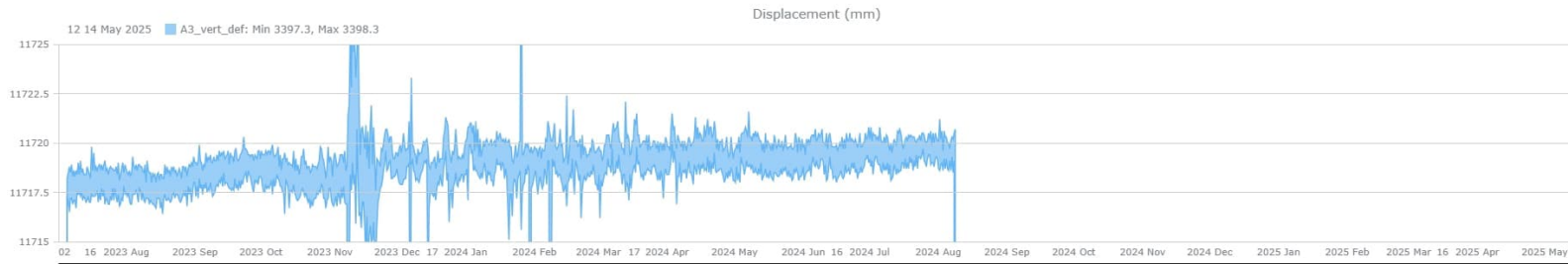
## Vertikal deformation

Mätställe A1 – vertikal deformation.



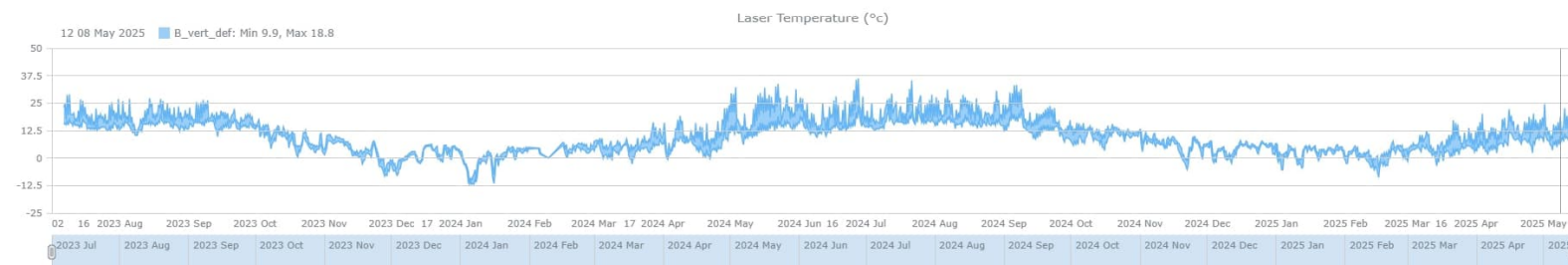
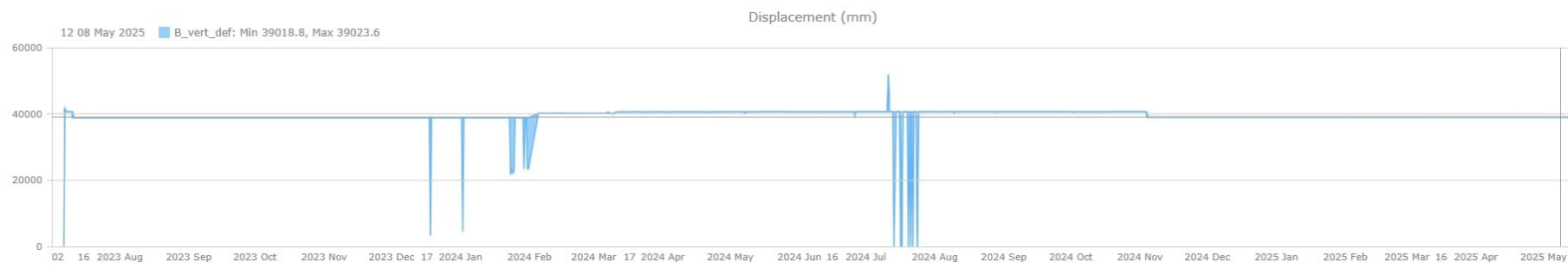
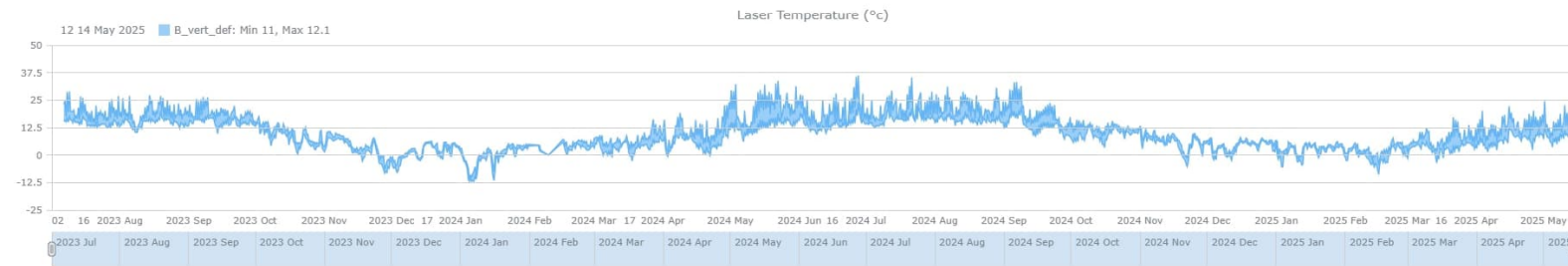
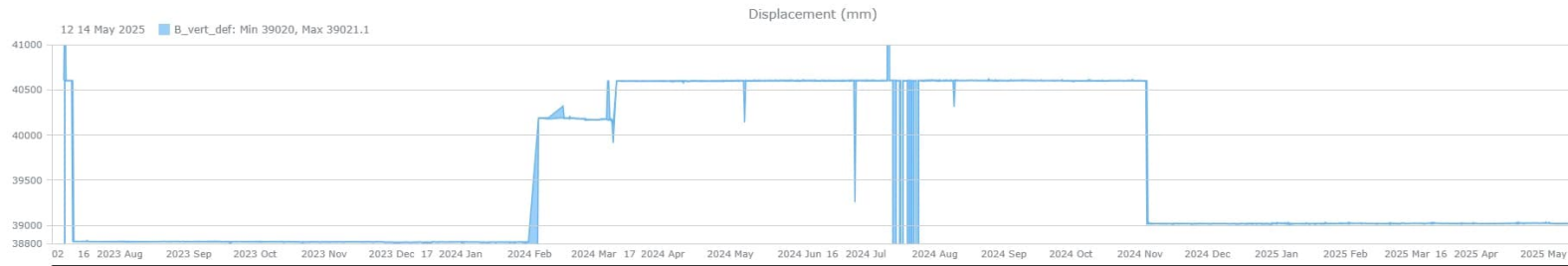
## Vertikal deformation

Mätställe A3 – vertikal deformation.



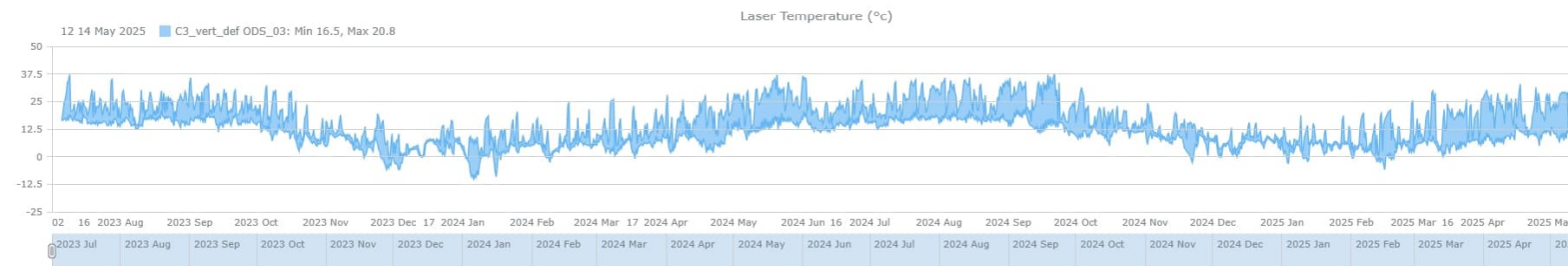
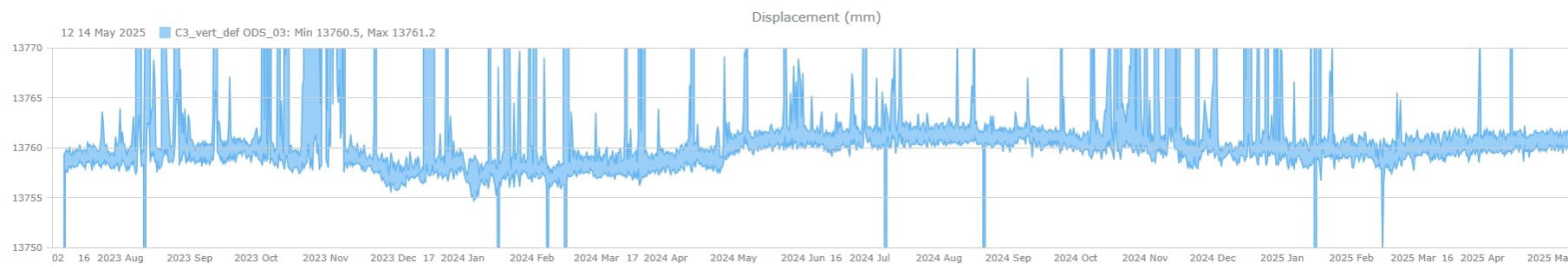
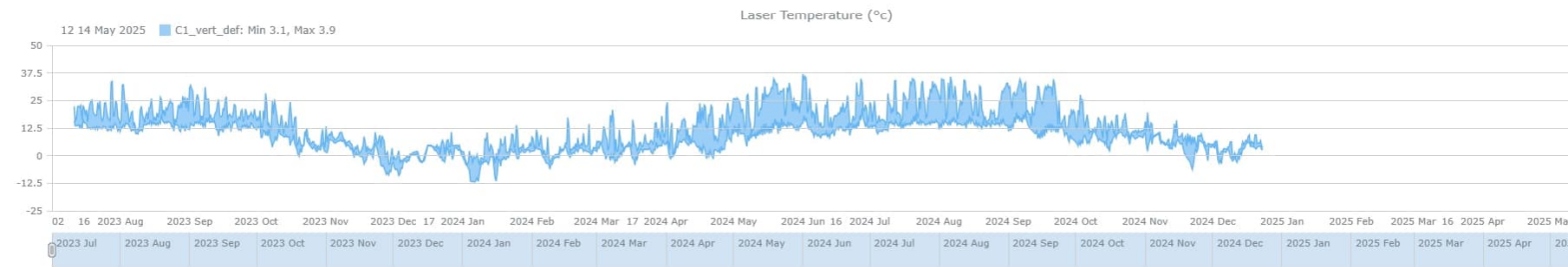
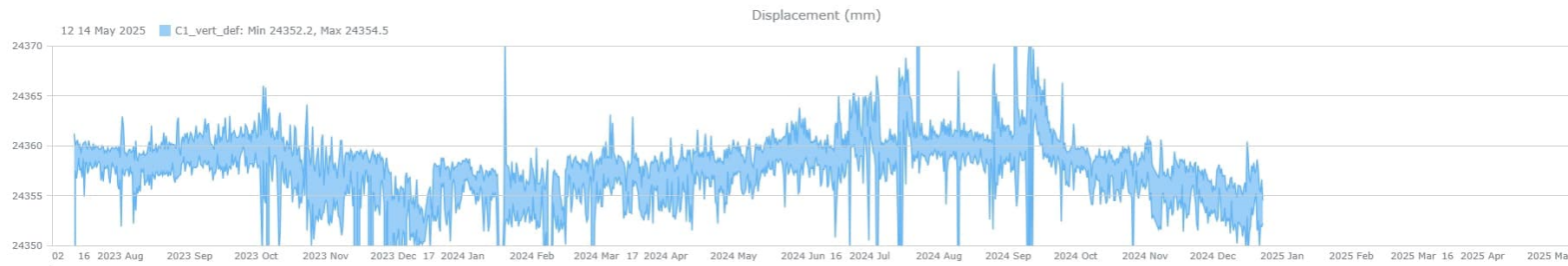
# Vertikal deformation

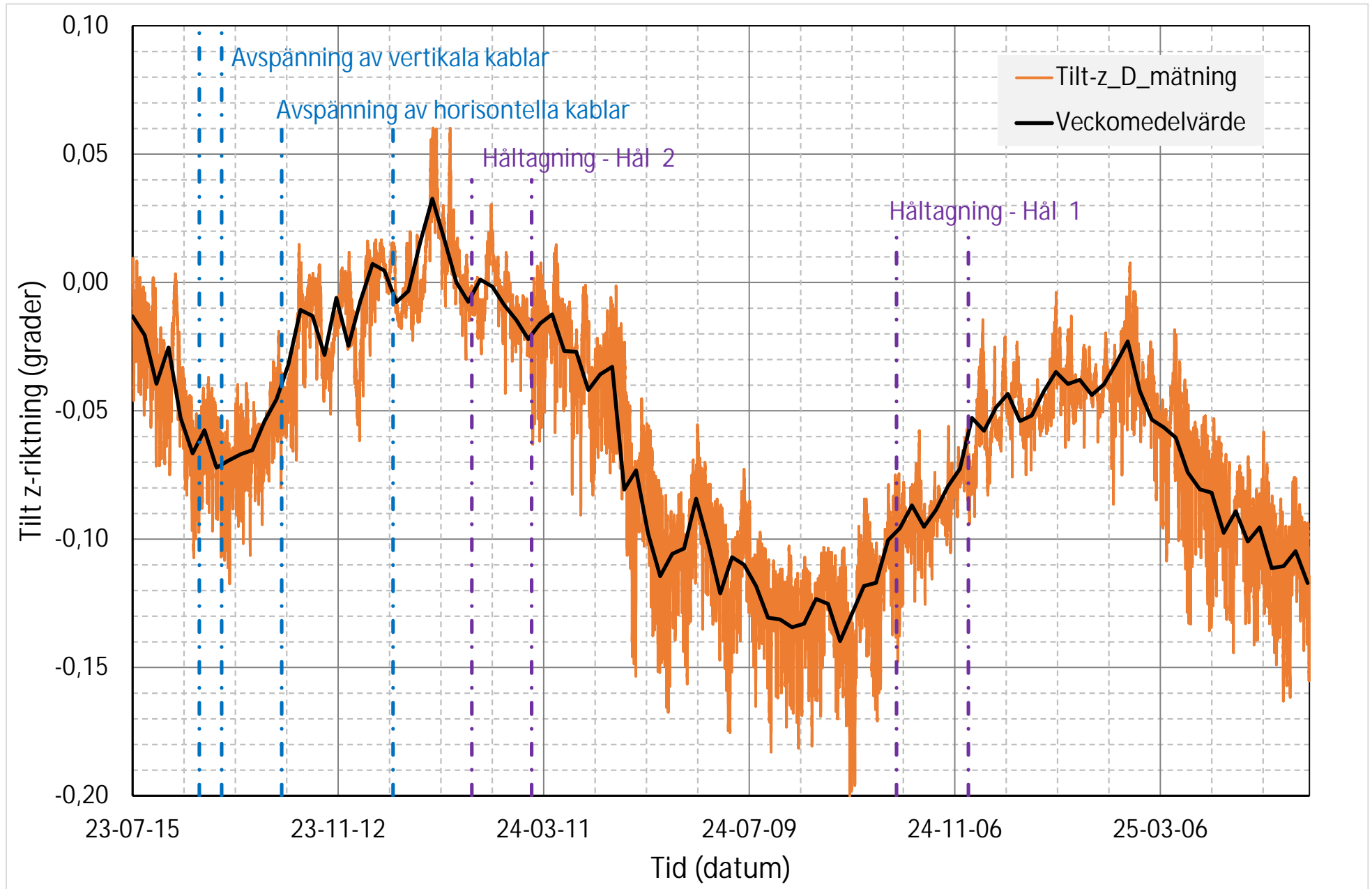
Mätställe B – vertikal deformation.

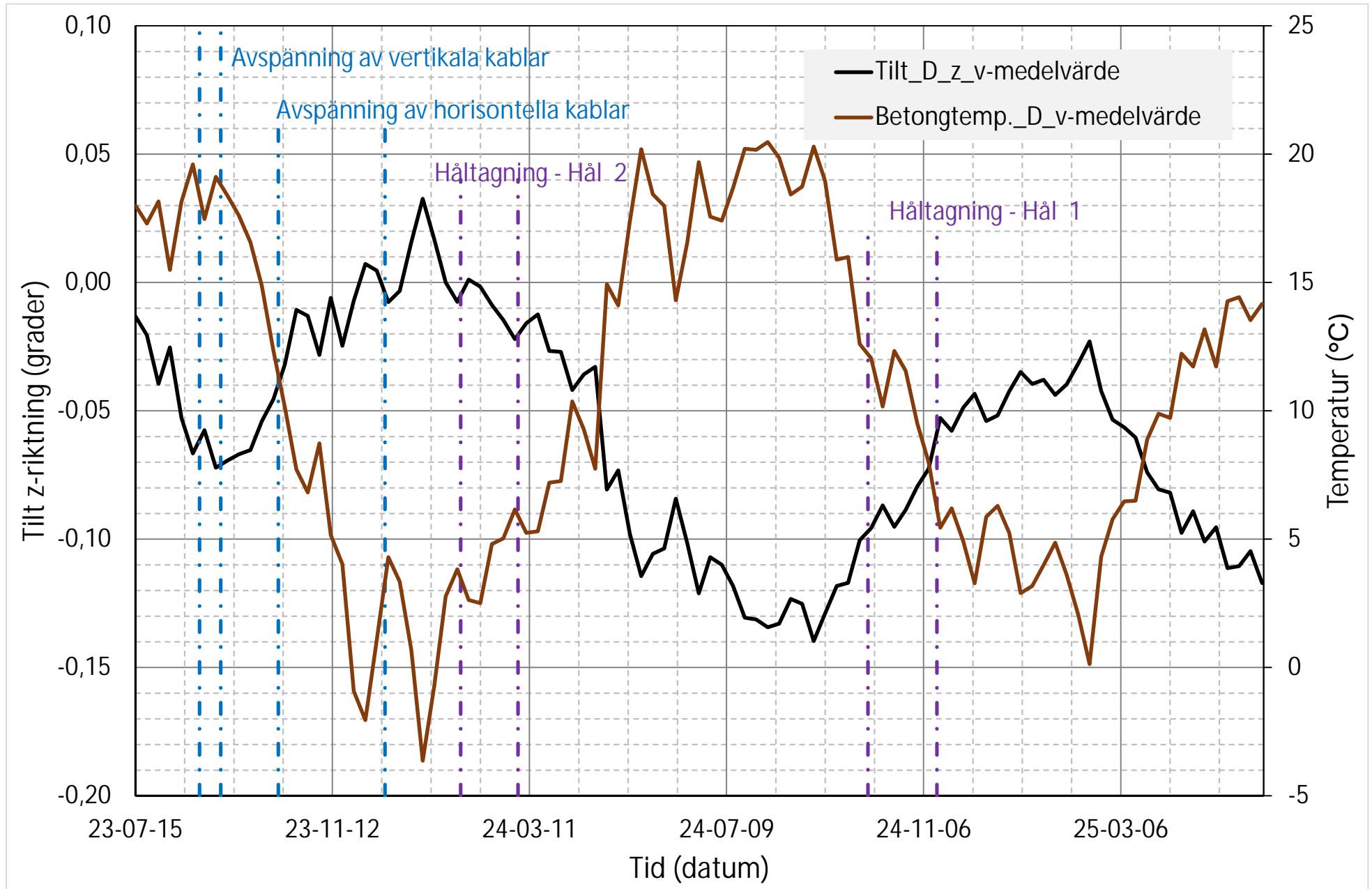


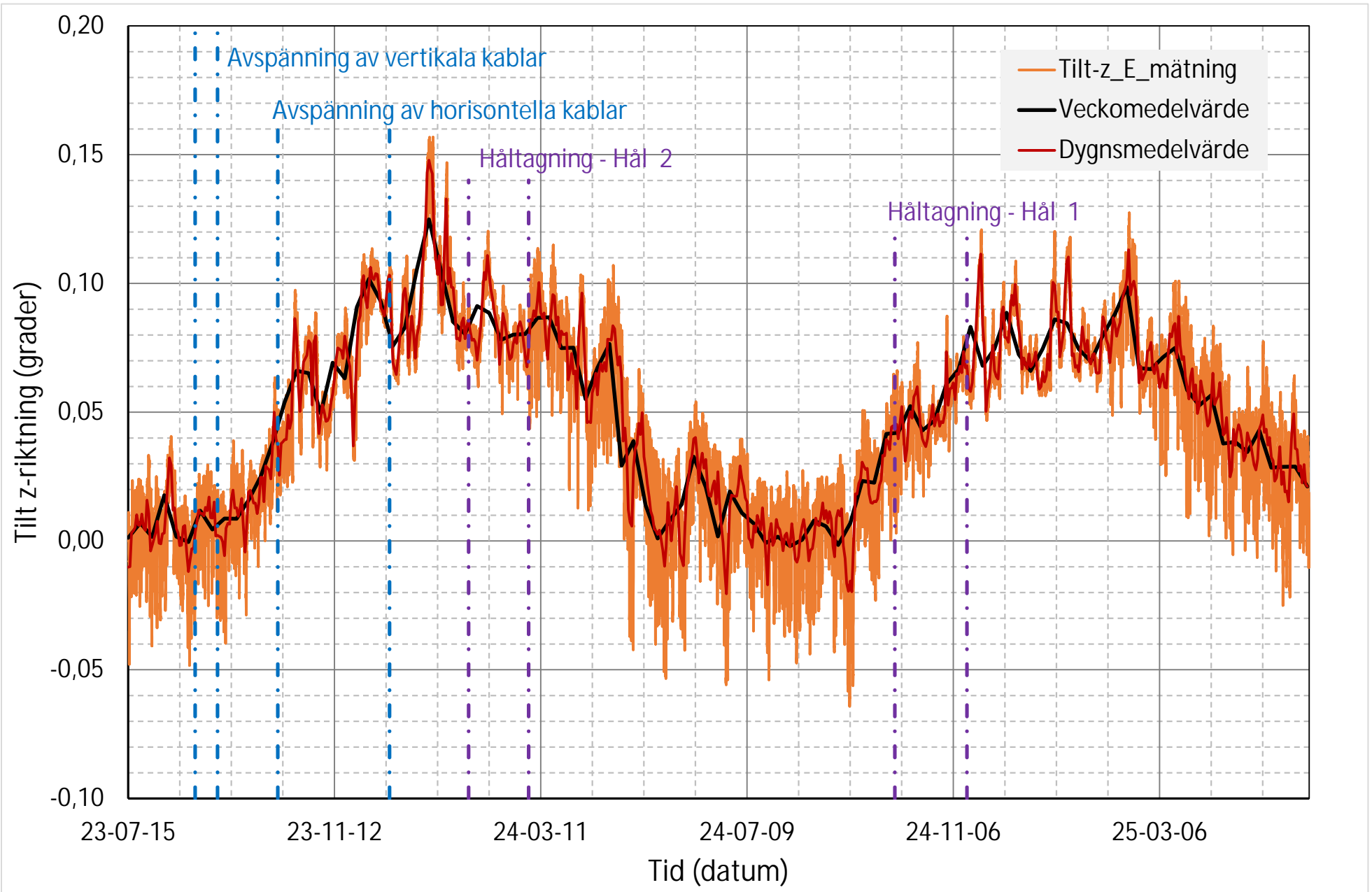
## Vertikal deformation

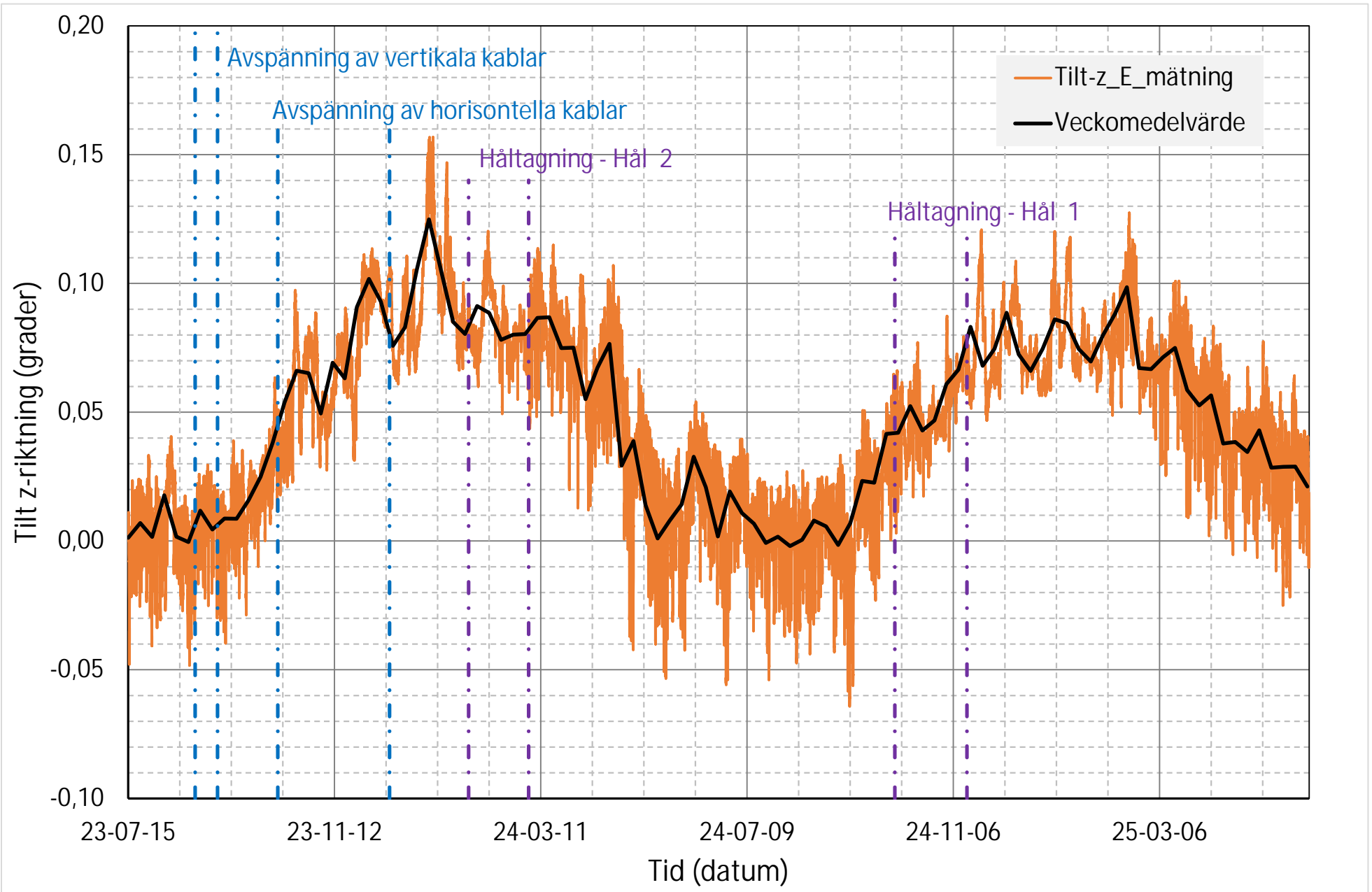
Mätställe C1 och C3 – vertikal deformation.

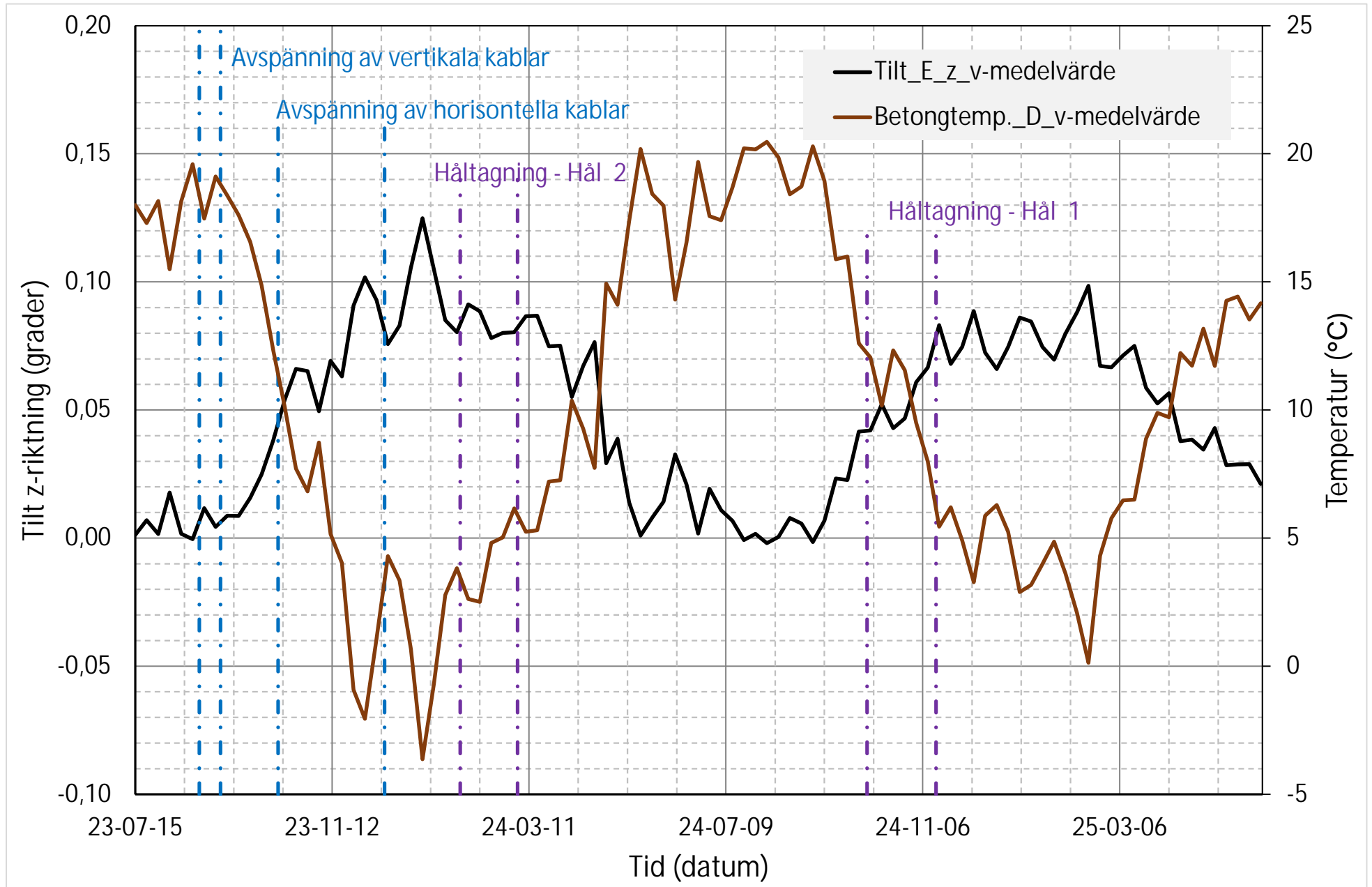


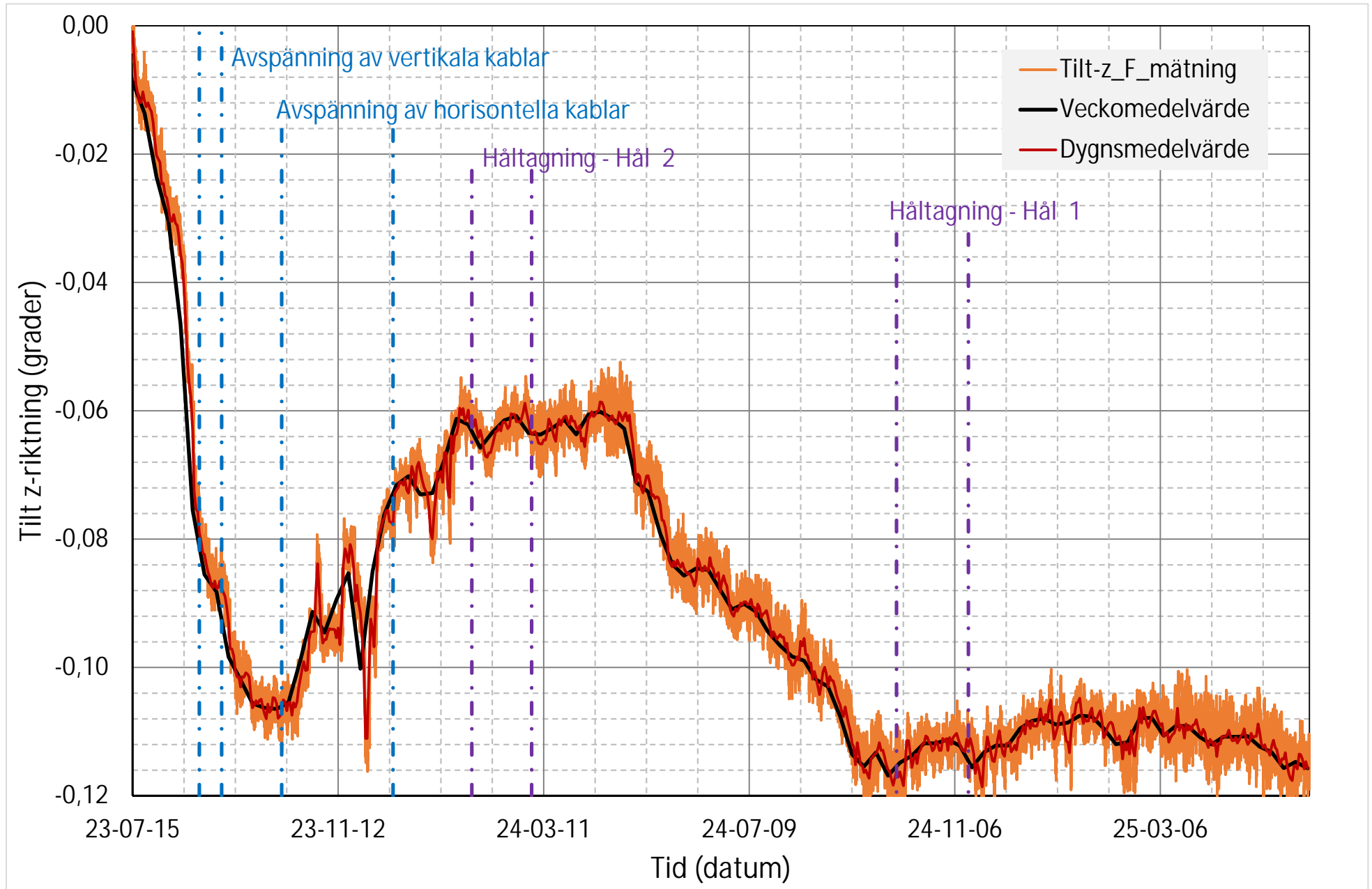


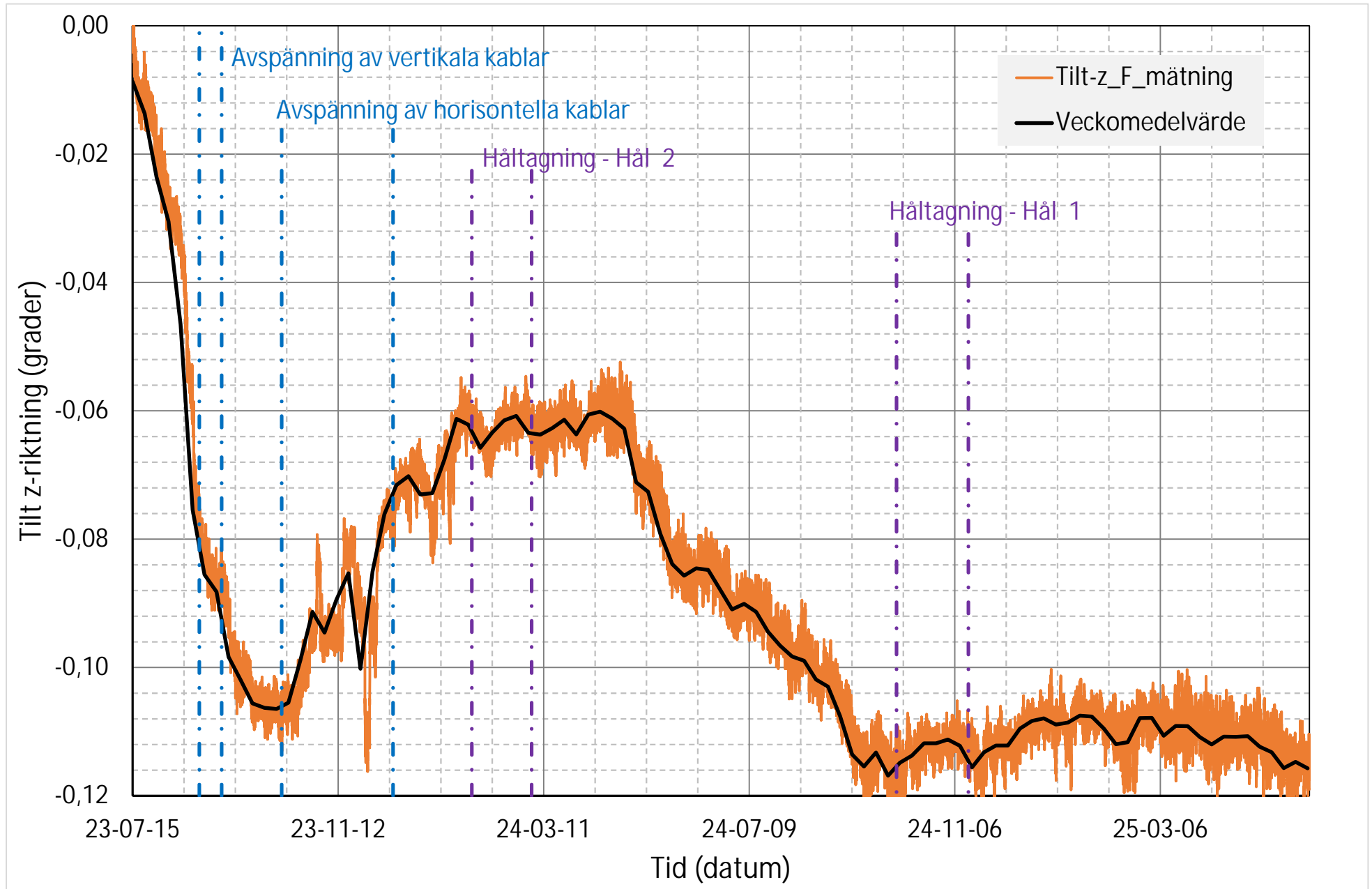


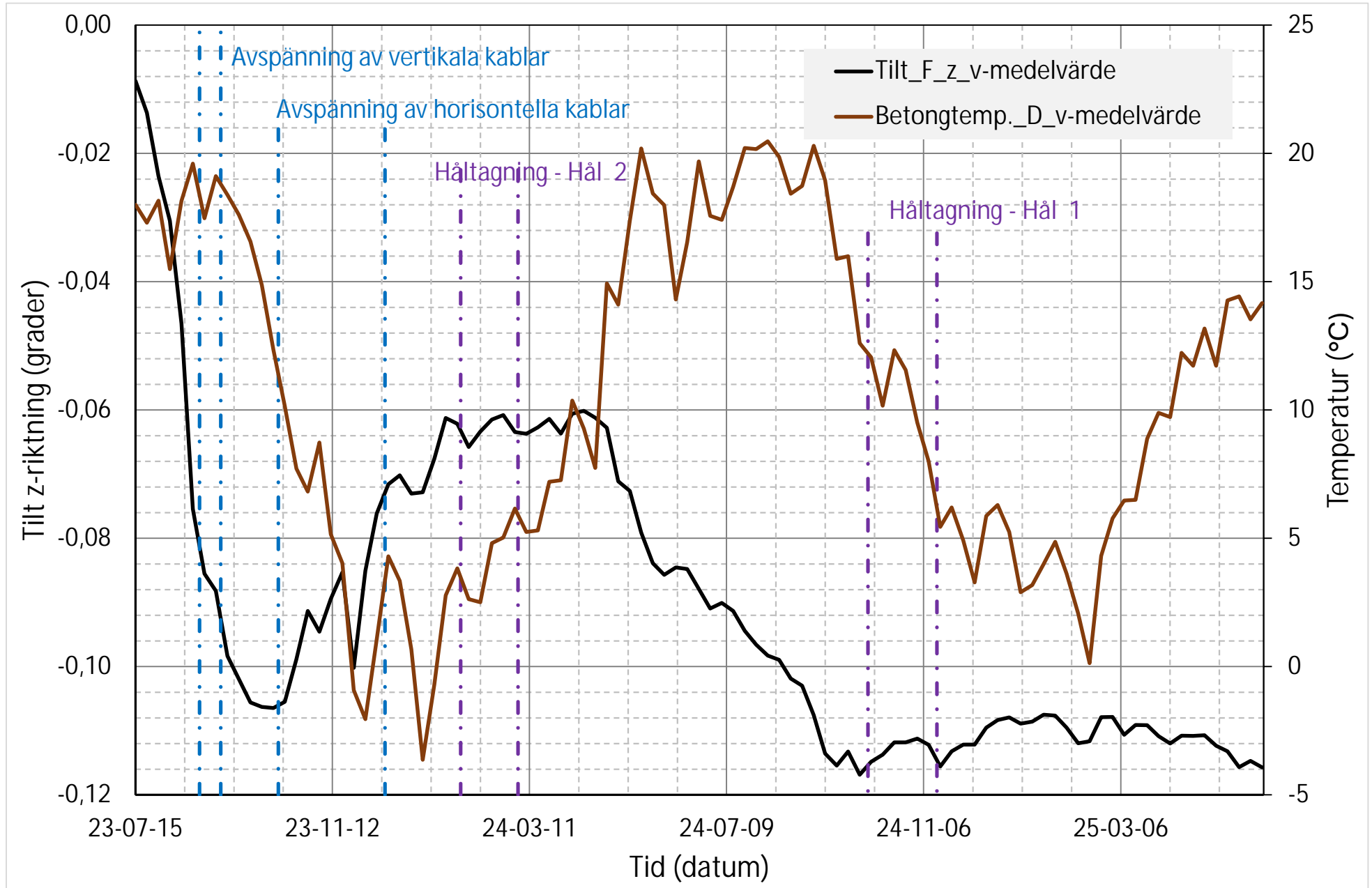


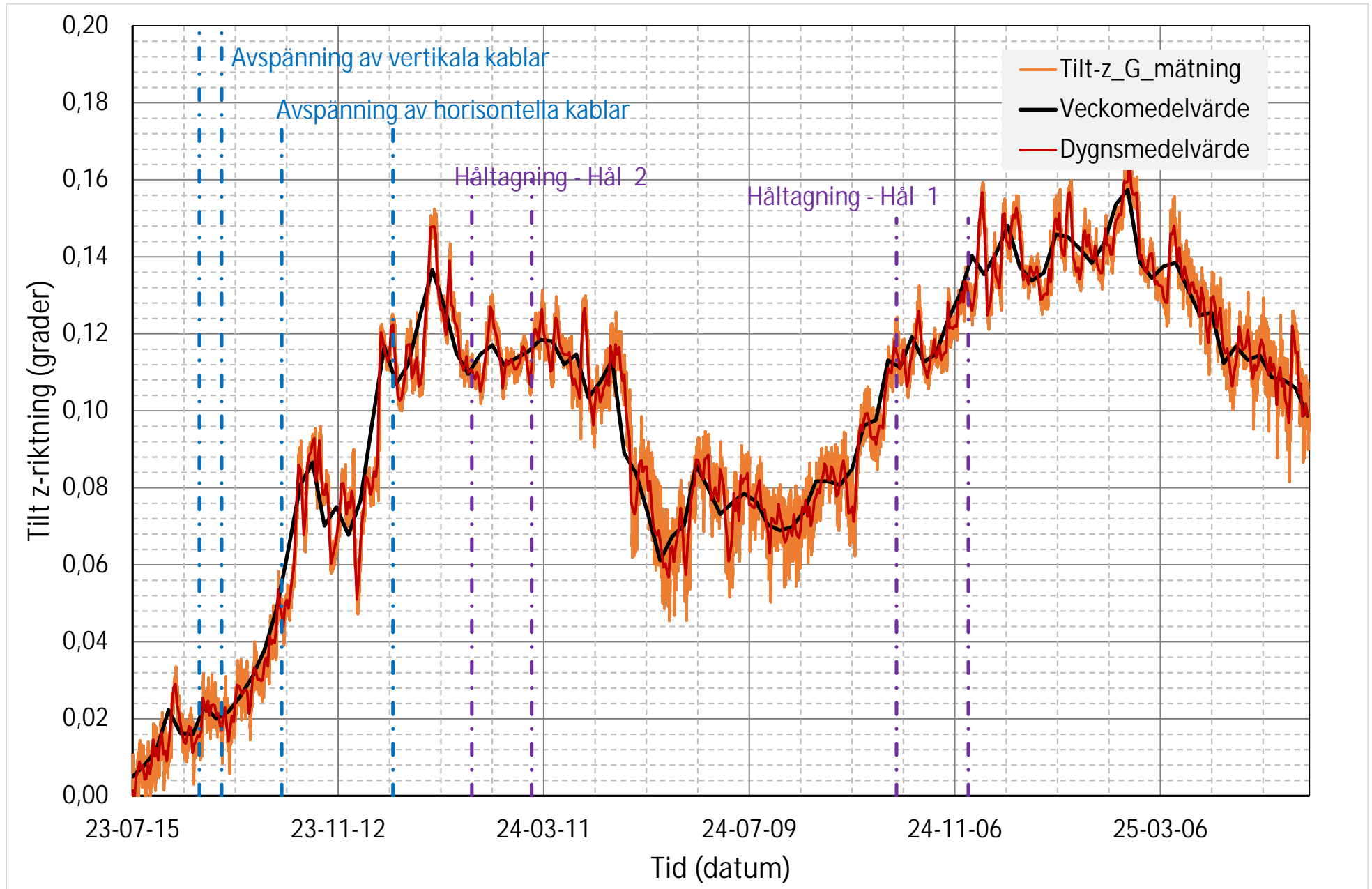


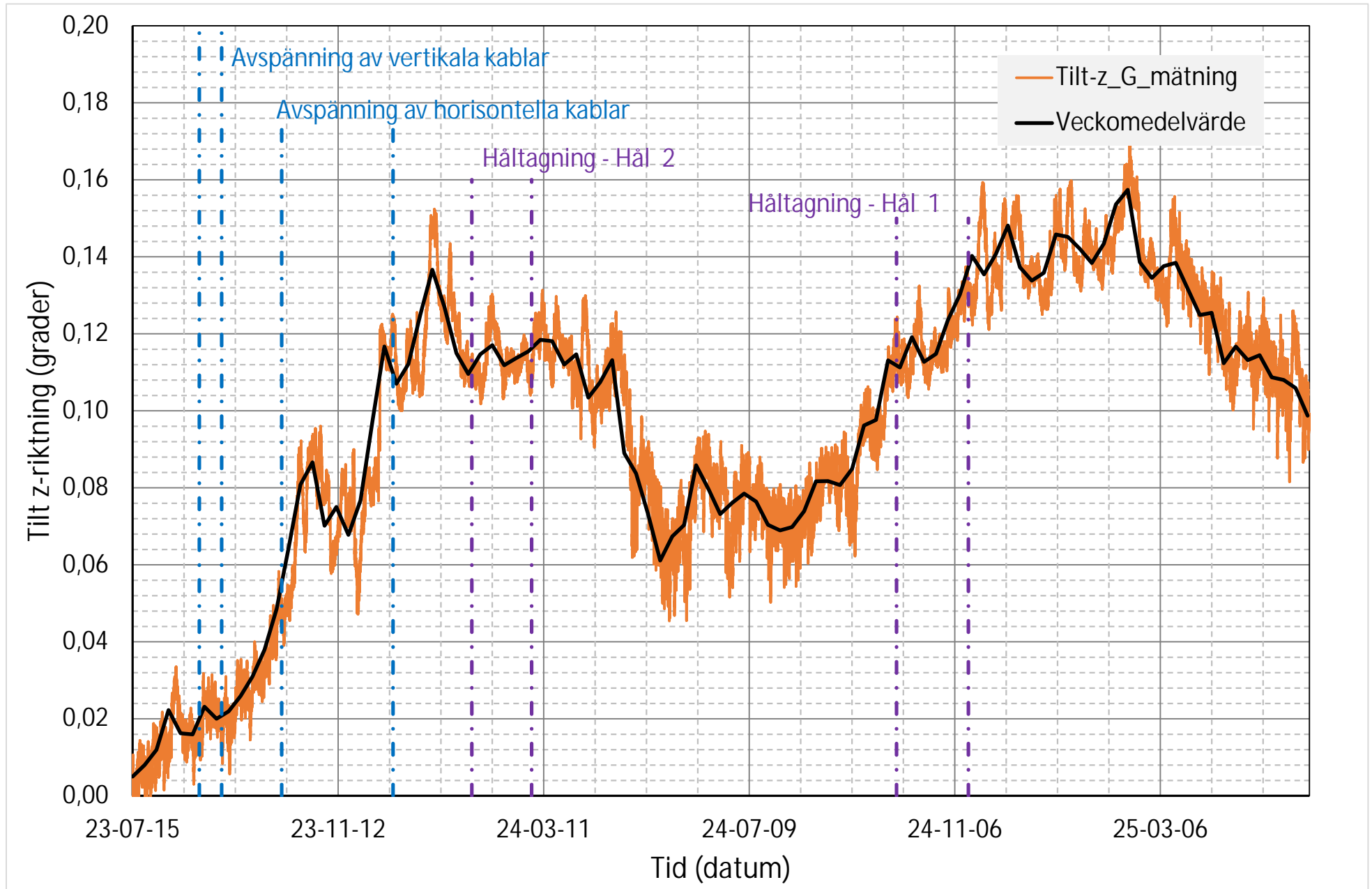


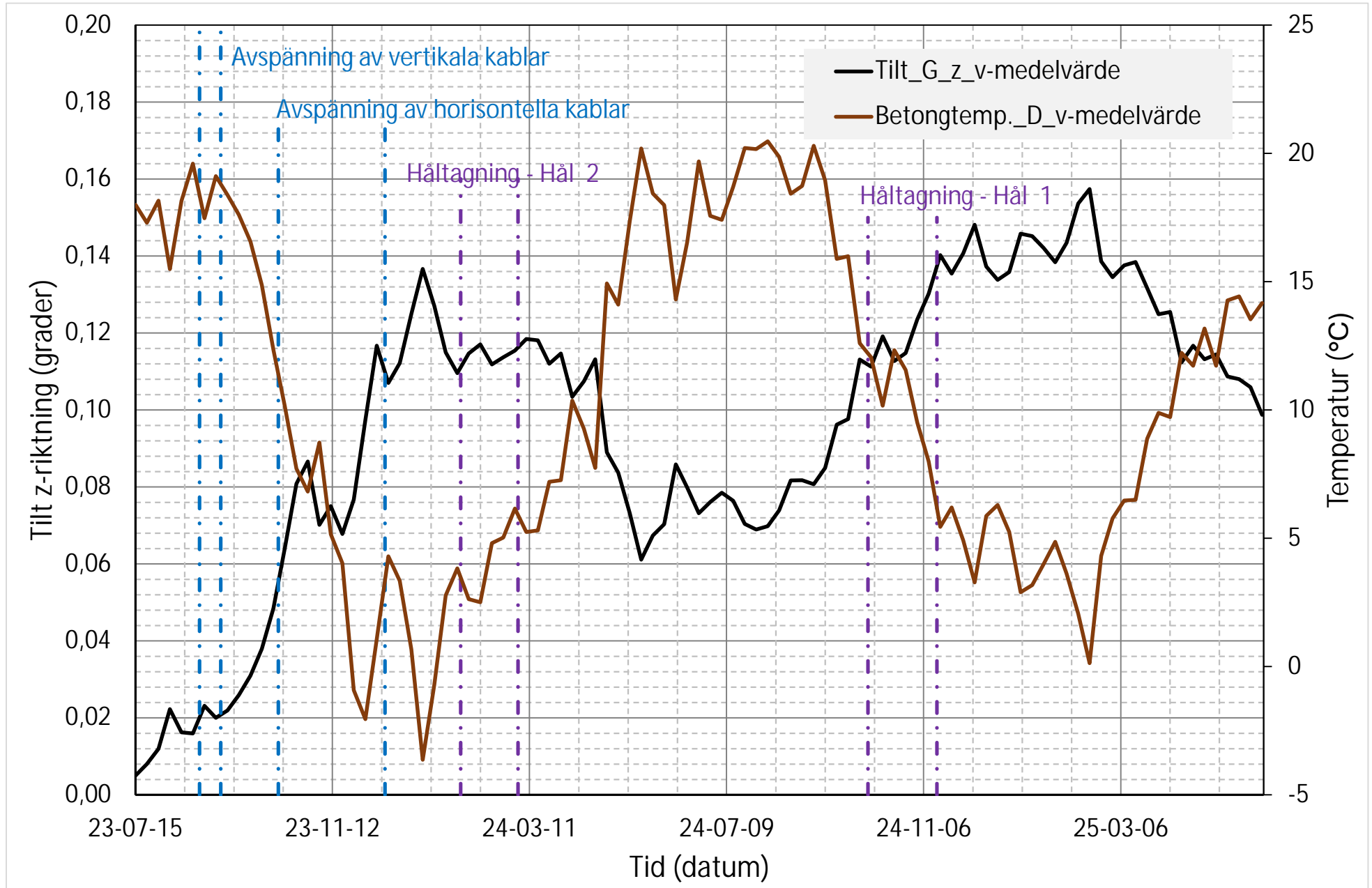


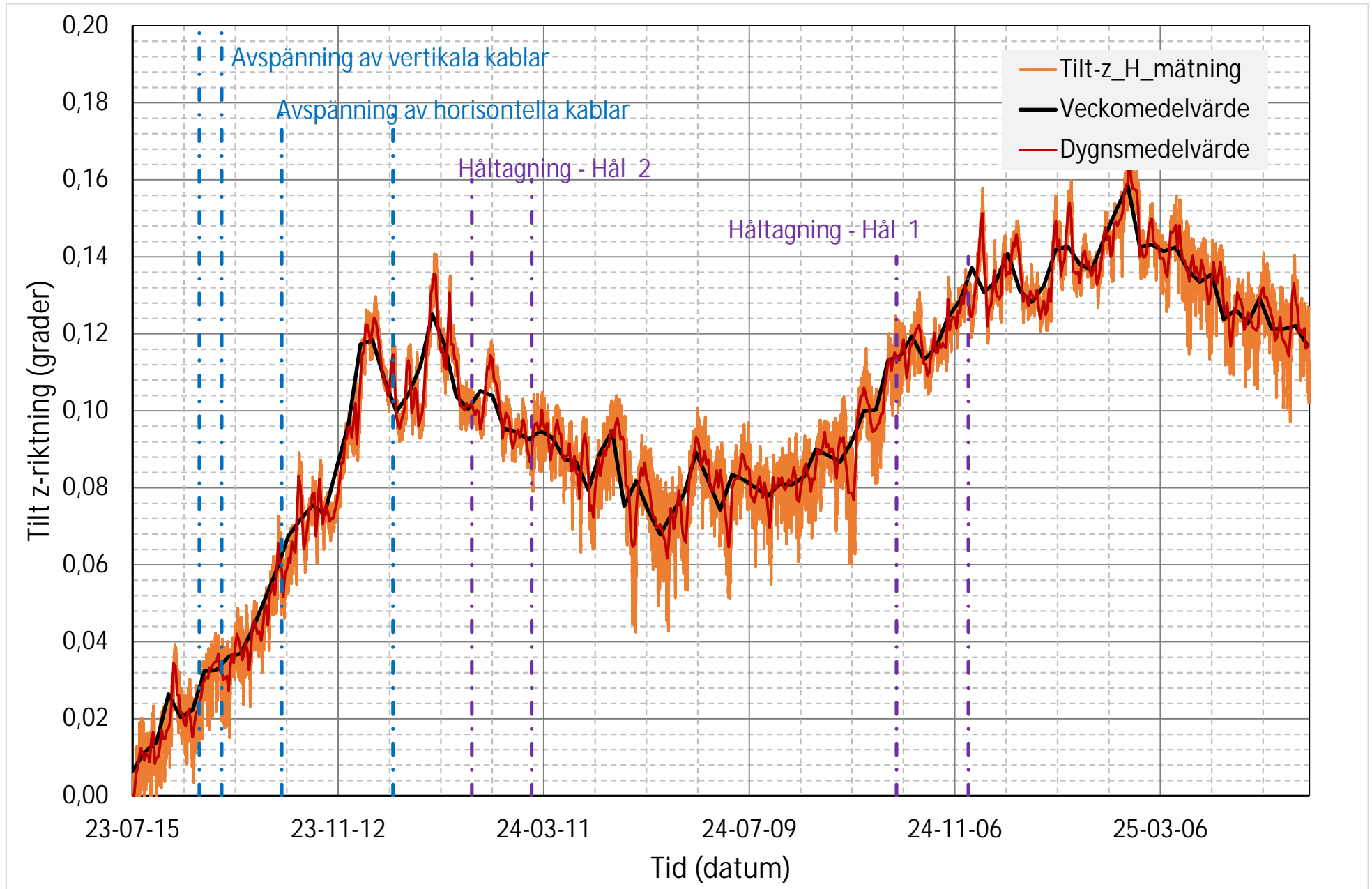


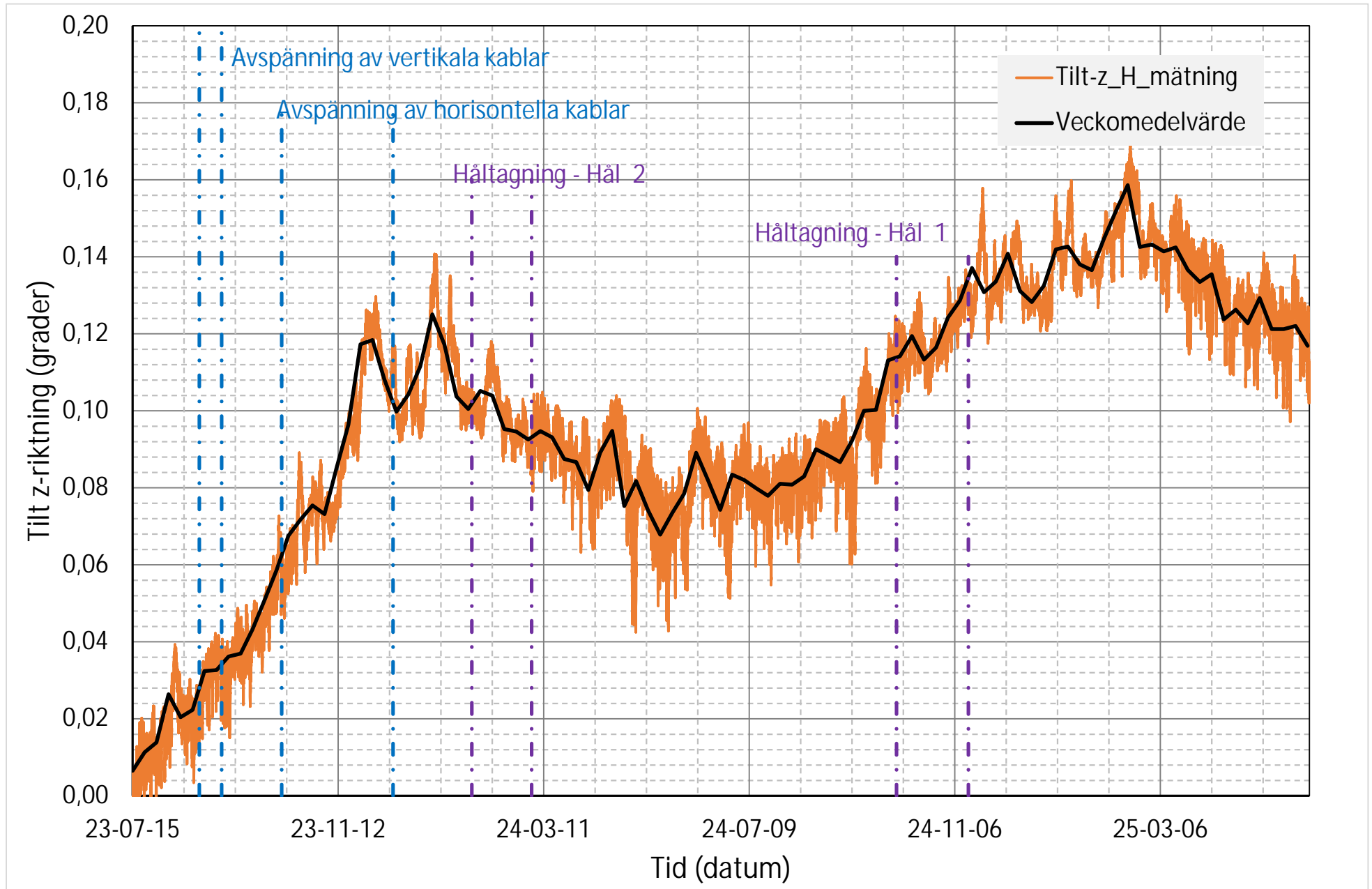


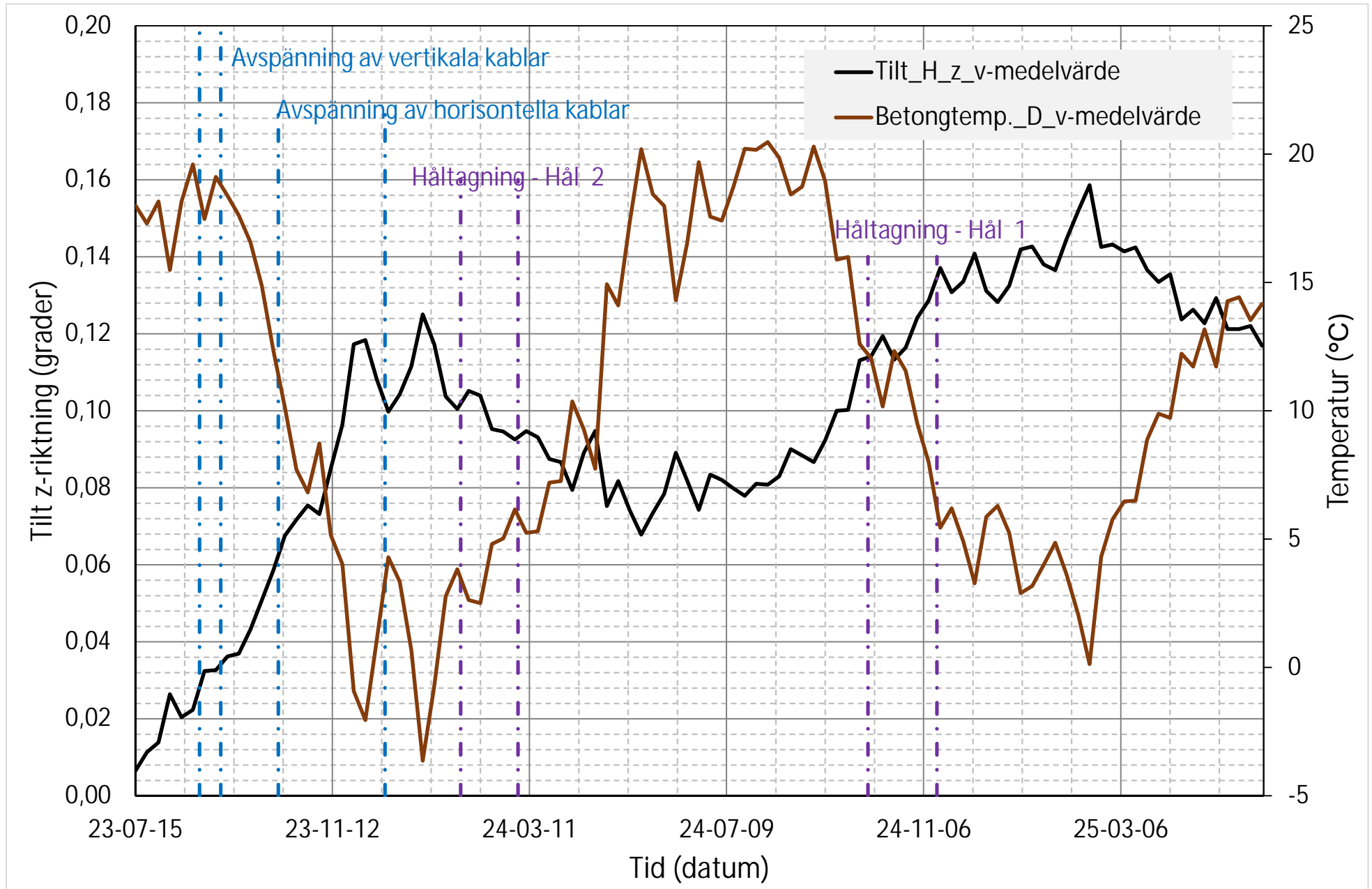


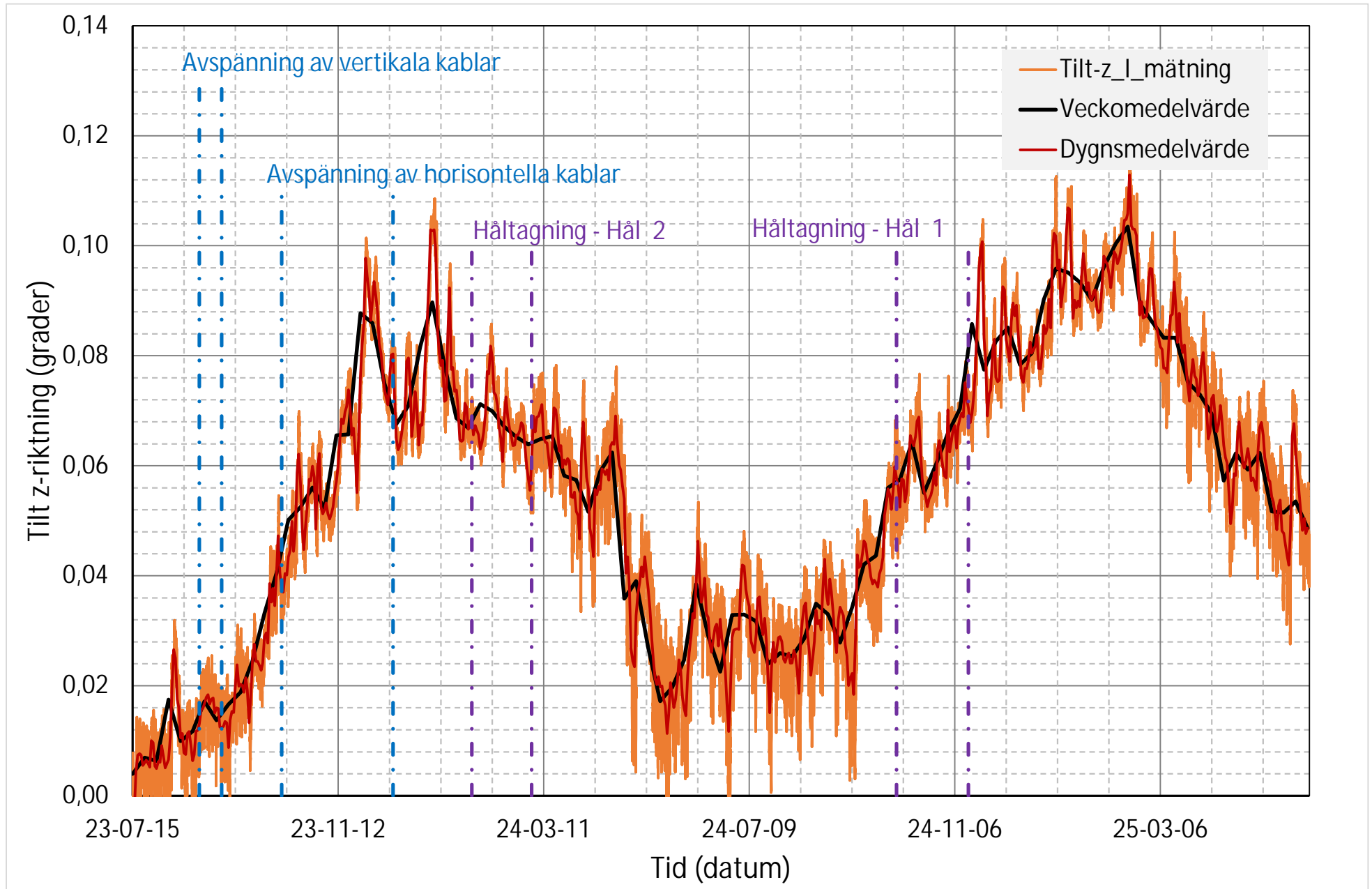


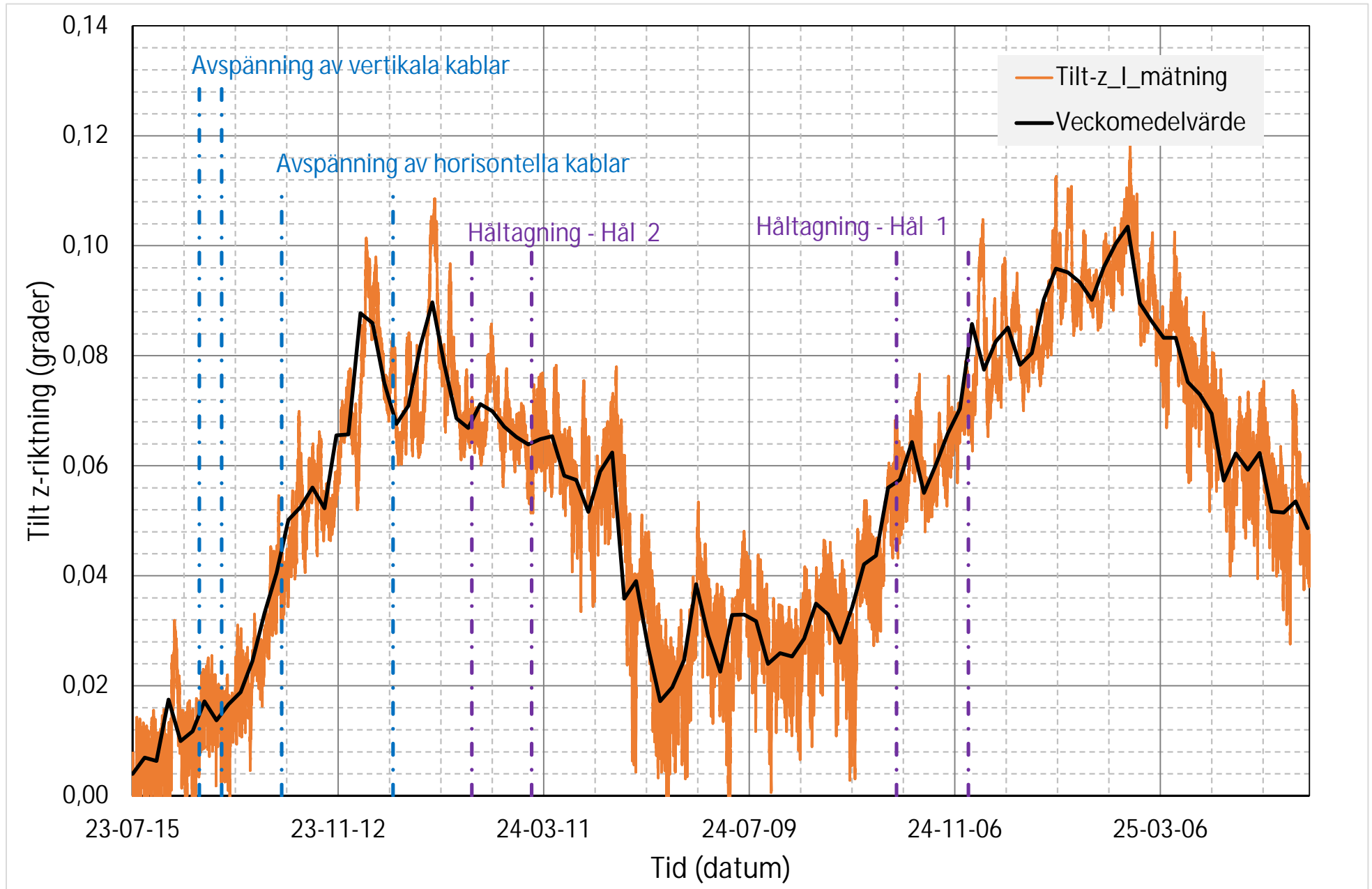


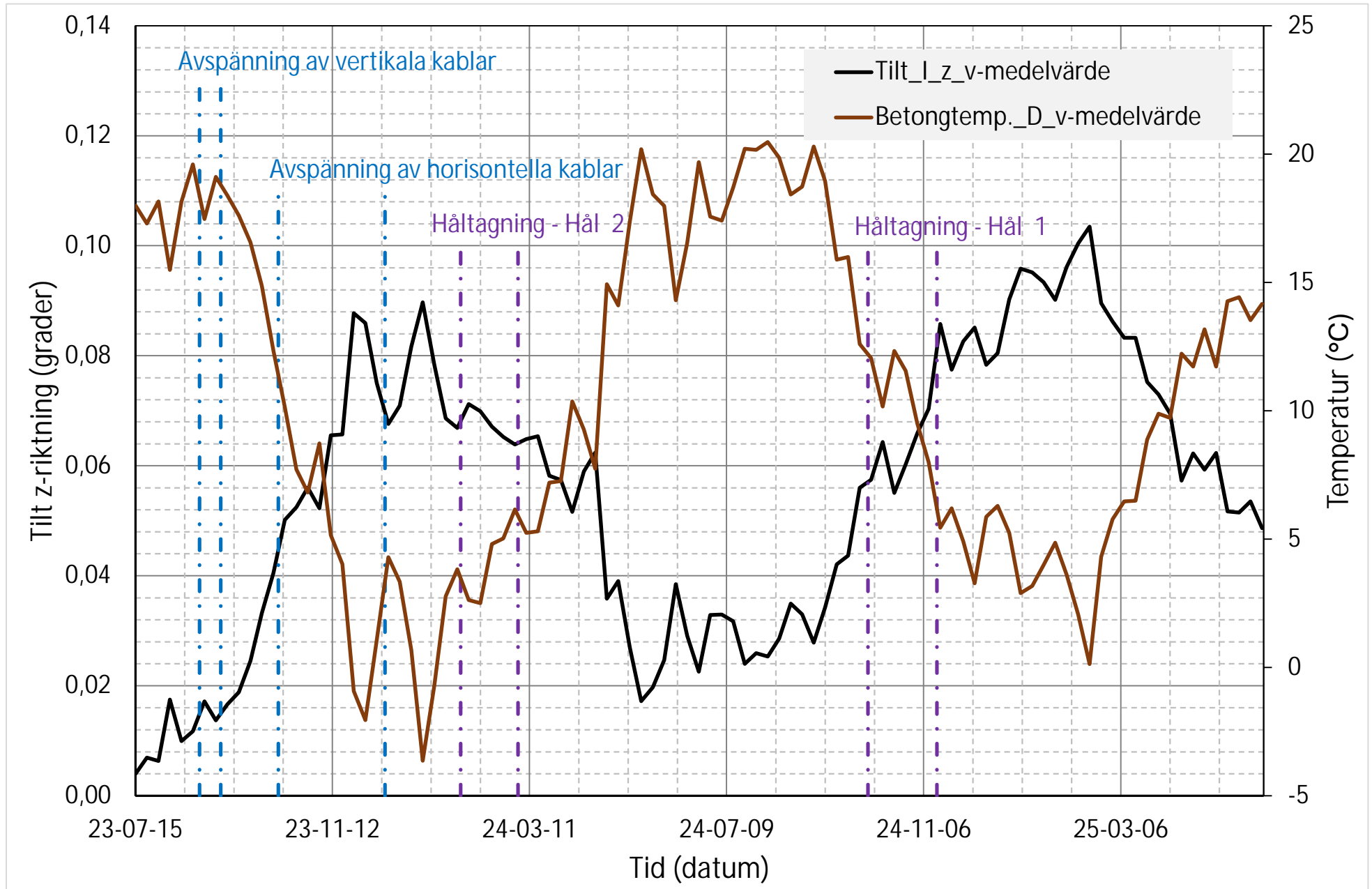


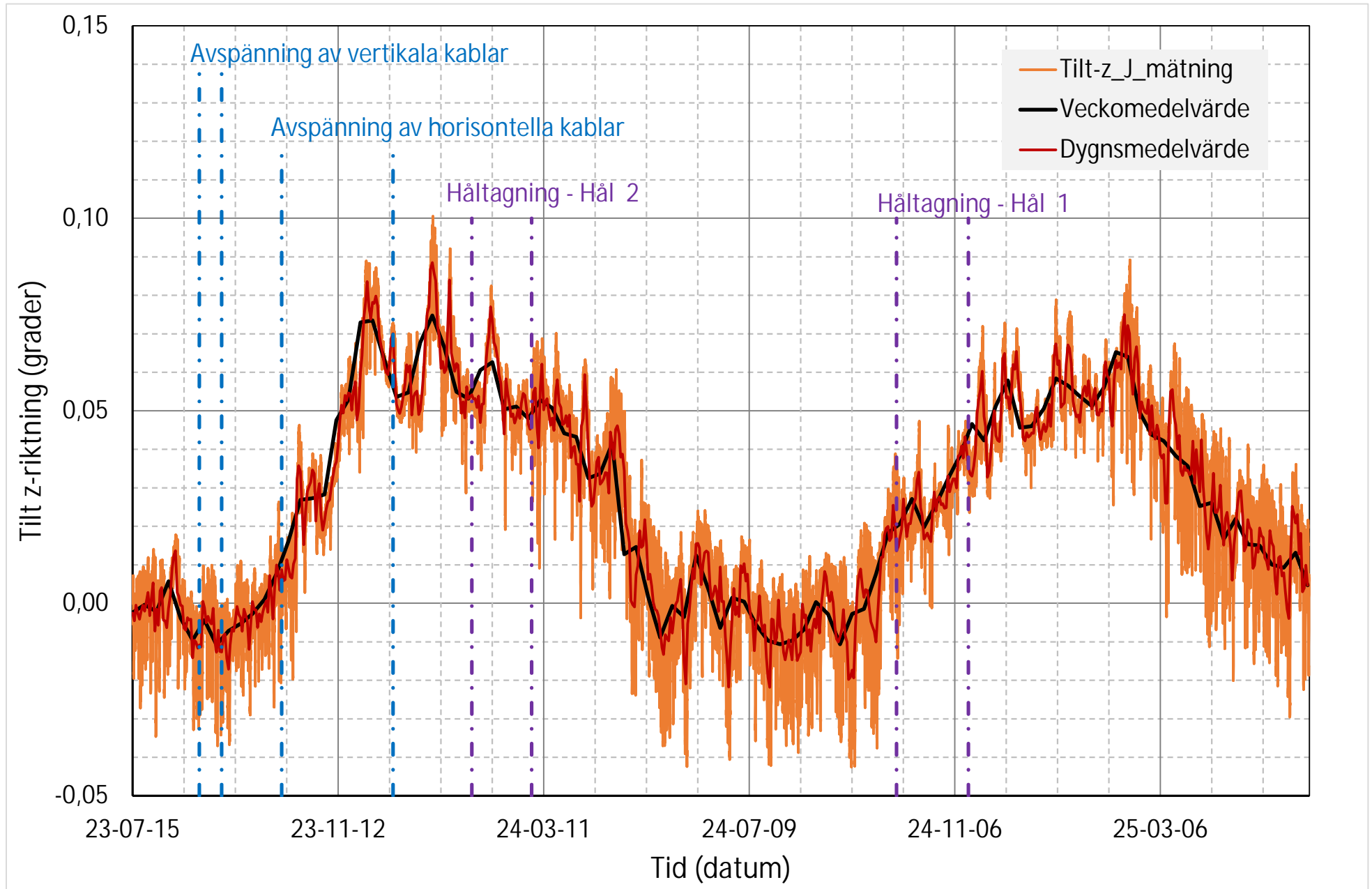


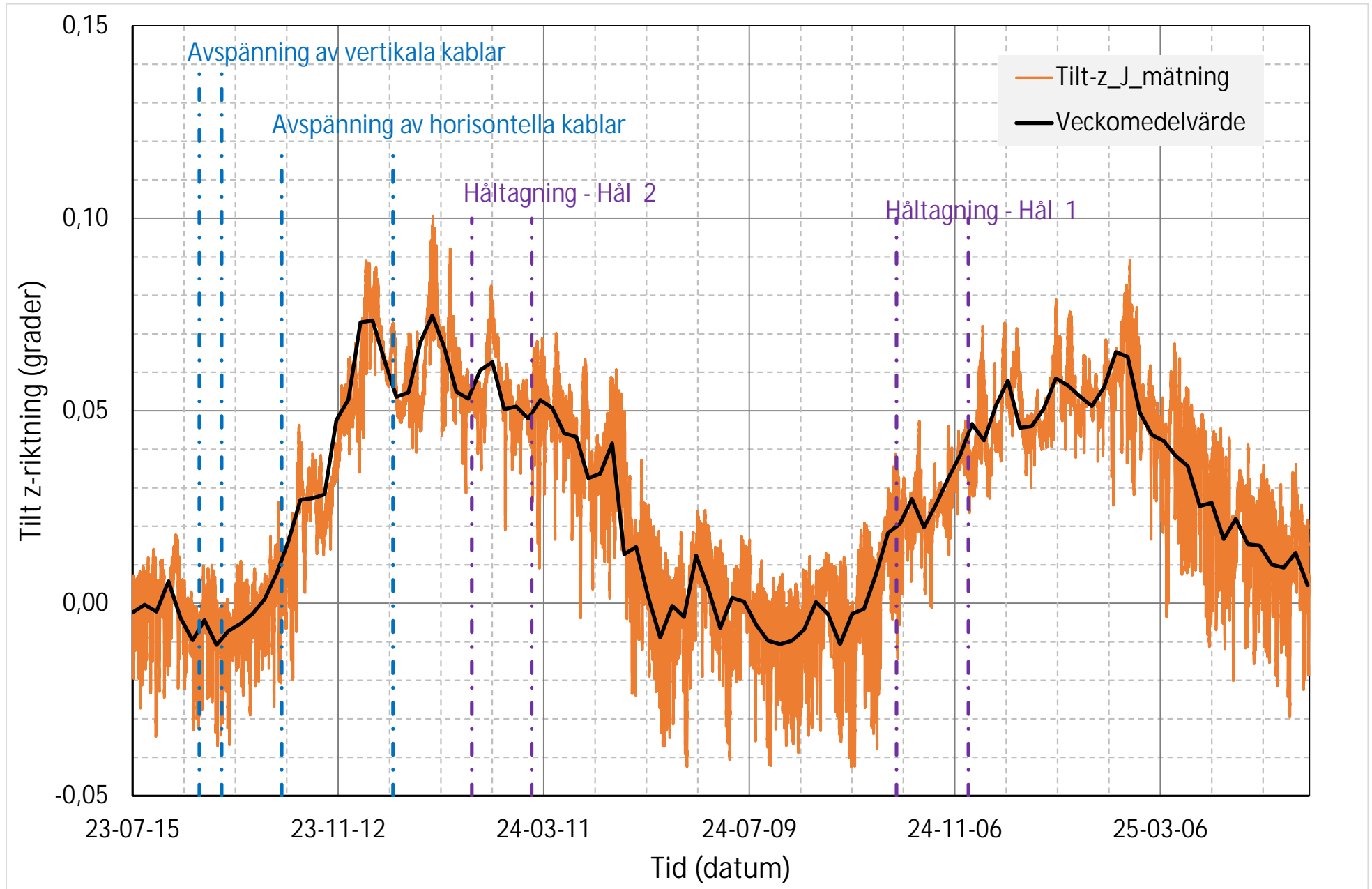


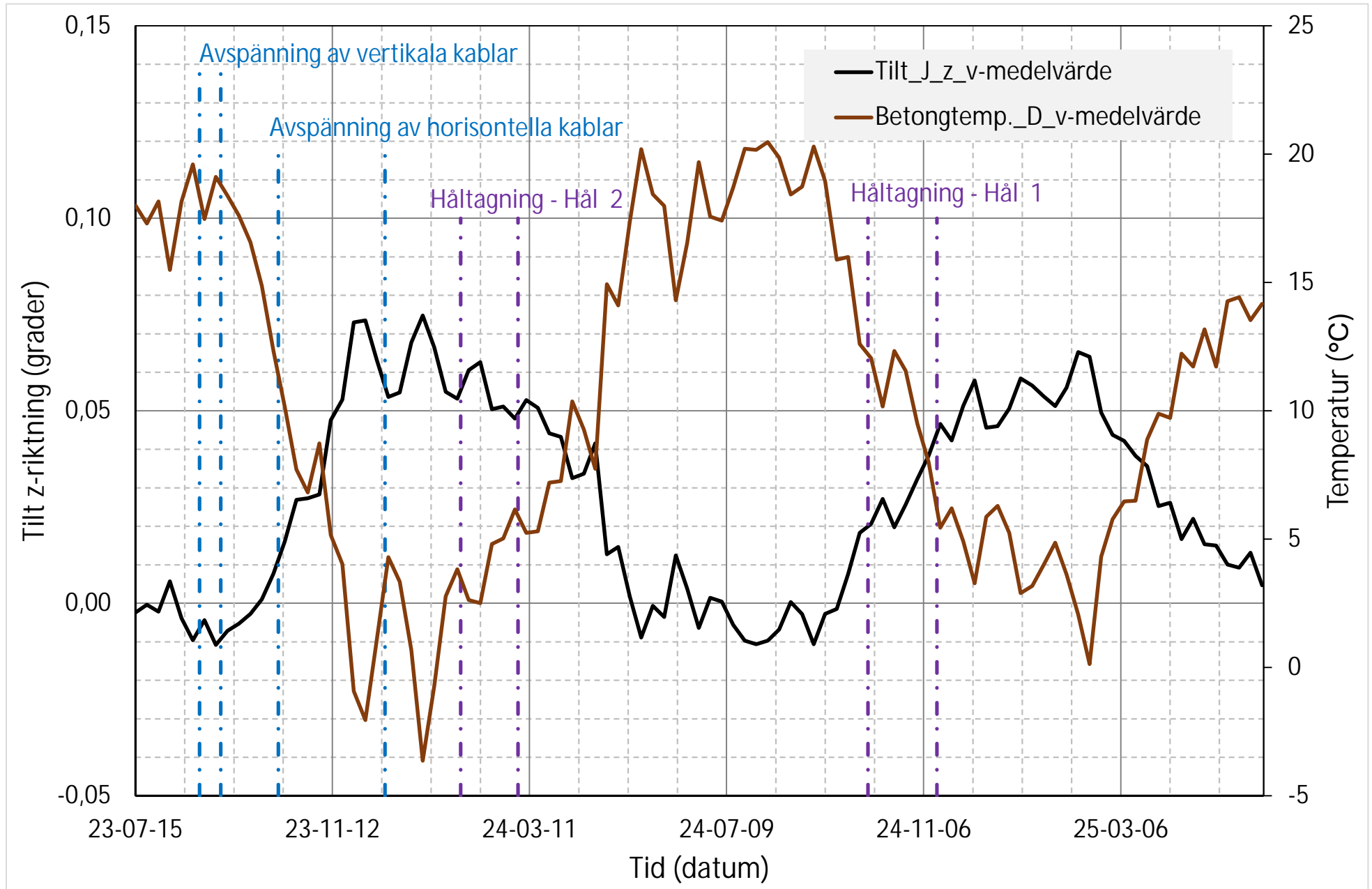












# DEFORMATIONER OCH TÖJNINGAR RESULTERANDE AV HÅLTAGNING I REAKTORINNESLUTNING PÅ RINGHALS 2

Två öppningar skapades i Ringhals 2:s reaktorinneslutning för att ta ut utrustning. I samband med arbetet avspändes spännkablar. Arbetet övervakades genom mätningar med trådlösa sensorer som visade att avspänningen, särskilt av horisontella kablar, hade stor påverkan på uppmätta töjningar som även varierade med temperaturförändringar. Vertikala deformationer följde temperaturvariationer, medan radiella deformationer visade en stark korrelation med temperaturförändringar. Ytterligare numeriska analyser rekommenderas för att särskilja effekterna av temperatur och avspänning.

Vertikala deformationer följde överlag temperaturvariationer, men avspänningen av de vertikala kablarna visade en omedelbar ökning av deformationerna. Avspänningens av de horisontella kablarna påverkade dock inte deformationerna lika tydligt, vilket kan ha överskuggats av den samtidiga temperatursänkningen.

Radiella deformationer mättes med tiltsensorer, som visade stark korrelation med temperaturförändringar. Förskjutningar mellan två nivåer på reaktorinneslutningens yttre betongvägg kunde kvantifieras, och både avspänning och håltagningar hade en märkbar inverkan. Emellertid krävs mer detaljerade numeriska analyser för att särskilja effekterna än enbart temperatur.

Sammanfattningsvis är temperaturens inverkan på konstruktionens respons avgörande. För framtida uppdrag rekommenderas mätningar på flera djup, samt en kombination av praktiska mätningar och teoretiska analyser för att optimera resultatens tillförlitlighet och helhetstäckning.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på [energiforsk.se](http://energiforsk.se).