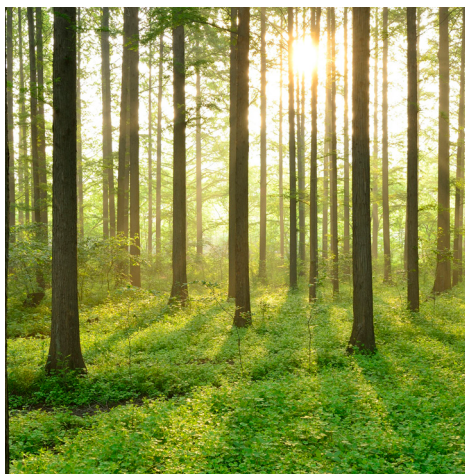


STRÖMNINGSIKINDUCERANDE PULSATIONER

RAPPORT 2021:779



 VATTENKRAFT

TILLÄMPAD VATTENKRAFTTEKNIK



Strömningsinducerande pulsationer

Axiella rörelser och metoder för kombineringsprov

MIKAEL SENDELIUS

ISBN 978-91-7673-779-8 | © Energiforsk juni 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Energiforsk har inom programmet "Tillämpad vattenkraftteknik" beviljat medel för att undersöka axiella vibrationer hos Kaplanaturbiner men även för att ta fram kompletterande metoder för att bestämma kombineringen av samma turbin.

Standarden IEC 20816-5:2018 "Mechanical Vibration – Measurement and Evaluation of Machine Vibration – Part 5: Machine Sets in Hydraulic Power Generating and Pump-Storage Plants" saknar riktlinjer för axiella vibrationer, syftet med studien har därför varit att ta fram underlag så att standarden IEC 20816 kan kompletteras med vibrationsdata så att skadliga driftförhållanden kan undvikas och risken för haveri och onödigt slitage likaså.

Den andra delen av arbetet har syftat till att ta fram alternativa kombineringsmetoder. Målsättningen var att dessa nya metoder skall vara mer kostnadseffektiva och kunna användas som komplement till de traditionella metoderna. Underlag och data till resultaten i denna rapport kommer från kombineringsprov som utförts på Bergeforsen aggregat 1, Gulsele aggregat 3 och Åsen. Omfattningen på proven utökades med extra mätning av sugrörstryck och av axiella vibrationer. Proven utfördes av Mikael Sendelius (SWEKO), Daniel Sjöberg (SWEKO) och Anna Rönnberg (SWEKO). FFT-analyser på vibrationsdata utfördes av Lars Gustafsson (SWEKO). Mikael Sendelius (SWEKO) har varit huvudansvarig för sammanställning av mätresultat och rapportskrivande. Peter Altzar (Fortum) har granskat resultaten och varit rådgivande samt ordnat med att prov kunde utföras på Åsen.

Projektets referensgrupp bestod av Peter Altzar (Fortum), Jan-Olov Aidanpää (LTU), Michel Cervantes (LTU), Åke Grahn (Vattenfall), Kai Lillemagi (Voith), Magnus Olofsson (SVAF), Magnus Nilsson (Vattenfall), Lars Svensson (Uniper), Tobias Svensson (Sweco) och Jörgen Tyrebo (Andritz).

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

Sammanfattning

Sweco Sverige AB (dåvarande Sweco Energy AB) har tillsammans med Fortum Sverige AB erhållit medel från Energiforsk för att undersöka sambandet mellan pulsationer i tryck, vridmoment, effekt, axialkraft samt turbinens axiella rörelser och vibrationer hos Kaplan aggregat.

Syftet med studien har dels varit att få fram data för att komplettera vibrationsstandarden IEC 20816-5 med acceptanskriterier för axiella vibrationer/rörelser, dels att ta fram förenklade metoder för att fastlägga kombineringsmetoden på Kaplanaggregat.

Studien baserades på data från kompletterande mätningar som utfördes samtidigt med traditionella kombineringsprov. De axiella rörelserna mättes med en B-givare monterad axiellt på axelsträngen och tryckpulsationerna mättes i sugrörskonan.

De aggregat som ingick i studien har varit Bergeforsen aggregat 1, Gulsele aggregat 3 och Åsen.

När ett aggregat går okombinerat uppstår virvlar under löphjulet som när de bryts sönder ger upphov till vibrationer. Genom att jämföra vibrationsnivåerna mellan kombinerat och okombinerat aggregat var tanken att bestämma vilka nivåer på de axiella vibrationerna som kan accepteras. Utöver detta har vibrationsnivåerna mellan aggregaten studerats för att ta reda på hur stora individuella skillnader det finns mellan aggregaten.

För de aggregat som ingick i studien uppmättes i princip ingen skillnad i vibrationsnivåer mellan kombinerat och okombinerat driftläge, därför kunde inte detta mått användas som utgångspunkt för acceptanskrav av axiella vibrationer.

Slutsatsen från analysen av de axiella vibrationerna var att det behövs mer data från fler aggregat och att bästa placering av B-givaren var på axelflänsen.

När det gäller att finna förenklade sätt att fastlägga kombineringsmetoden har denna studie funnit ett tydligt samband mellan låg standardavvikelse och bästa kombineringsmetod, både vad gäller tryckpulsationer och effektpulsationer. Studien visade att sambandet mellan effektpulsationer och optimal kombineringsmetod var tydligare jämfört med tryckpulsationerna. Att studera effektpulsationerna är mer praktiskt för denna signal är mer lättillgänglig och kan tas ut för alla aggregat medan en analys av tryckpulsationer kräver ett tryckuttag i sugrörskonan vilket sällan finns. Slutsatsen från studien var att effektpulsationer är att föredra som kombineringsmetod jämfört med tryckpulsationer.

Nyckelord

Kombineringsmetod, kombineringsprov, axiella vibrationer, Kaplanaggregat, sugrörstryck, effektpulsationer,

Summary

Sweco Sverige AB (then Sweco Energy AB) has together with Fortum Sweden AB received funding from Energiforsk (a Swedish research institute for energy research) to investigate the relationship between pulsations in pressure, torque, power, axial force as well as axial movements and vibrations of the Kaplan units.

The objective of the study has been to produce data to supplement the vibration standard IEC 20816-5 with acceptance criteria for axial vibrations/movements and to develop simplified methods for determine the on-cam settings.

To collect data additional measurements were performed in conjunction with traditional combination tests. The axial movements of the shaft were measured with a proximity sensor mounted axially on the shaft. Pressure pulsations were measured in the draft tube cone and the power pulsations were analyzed by examining each sample from the test points.

The units examined were Bergforsen unit 1, Gulsele unit 3 and Åsen.

To assess acceptable vibration levels, the starting point has been to compare the vibration levels when running on-cam to off-cam. During off-cam operation, vortex break down can occur under the runner which can generate higher levels of vibration. By comparing on-cam and off-cam vibration acceptable level criteria could be developed. In addition to this vibration levels between the units has been compared to see individual differences between the units.

The outcome of the measurements was, in principle, no difference in vibration levels was observed between on-cam and off-cam operating mode. The Peak to Peak value can therefore not be used as a starting point for acceptance requirements of axial vibrations.

The conclusion from the analysis of the axial vibrations was that additional data from more units is needed and that the best placement of the proximity sensor was on the shaft flange.

When it comes to find simplified ways to determine the on-cam settings, this study has found a clear correlation between low standard deviation and on-cam setting, both in terms of pressure pulsations and power pulsations. However, the best correlation to on-cam settings is for the power pulsation. Studying the power pulsations is more practical since this signal is available for all kind of units while an analysis of pressure pulsations requires a pressure tap in the draft tube cone which rarely exist. The conclusion made in this study was that power pulsations is a better method compared to pressure pulsations when determine the on-cam settings.

Innehåll

1	Bakgrund och syfte	8
2	Metodik	9
2.1	Generellt	9
2.2	Axiella rörelser	9
2.3	Kombinering	10
2.4	Använd mätutrustning	12
3	Testade aggregat	13
3.1	Bergeforsen aggregat 1	13
3.2	Gulsele aggregat 3	13
3.3	Åsen	14
4	Resultat - kombineringsmetoder	15
4.1	Kombinering utifrån effektpulsationer	15
4.1.1	Bakgrund	15
4.1.2	Kombinering Bergforsen	15
4.1.3	Kombinering Gulsele	16
4.1.4	Kombinering Åsen	17
4.2	Kombinering utifrån tryckpulsationer	18
4.2.1	Kombinering Bergforsen	18
4.2.2	Kombinering Gulsele	20
4.2.3	Kombinering Åsen	22
4.3	Kombinering utifrån verkningsgrad	23
4.3.1	Bakgrund	23
4.3.2	Kombinering Bergforsen	23
4.3.3	Kombinering Gulsele	24
4.3.4	Kombinering Åsen	25
4.4	Jämförelse mellan olika kombineringsmetoder	27
4.4.1	Bergeforsen	27
4.4.2	Gulsele	28
4.4.3	Åsen	29
5	Resultat - axiella vibrationer	31
5.1	Metodik	31
5.2	Resultat Bergforsen aggregat 1	31
5.2.1	Förutsättningar	31
5.2.2	Uppmätt Peak to Peak	32
5.2.3	FFT-analys under varvtalsfrekvensen	33
5.2.4	FFT-analys för frekvenser 0-25 Hz	35
5.2.5	Kommentarer - Bergforsen	37
5.3	Resultat Gulsele aggregat 3	37
5.3.1	Förutsättningar	37

5.3.2	Uppmätt Peak to Peak	38
5.3.3	FFT-analys under varvtalsfrekvensen	39
5.3.4	FFT-analys mellan 0 och 40 Hz	40
5.3.5	Kommentarer Gulsele aggregat 3	42
5.4	Resultat Åsen	42
5.4.1	Förutsättningar - Åsen	42
5.4.2	Uppmätt Peak to Peak	43
5.4.3	FFT-analys under varvtalsfrekvensen	44
5.4.4	FFT-analys mellan 0-40 Hz	47
5.5	Jämförelse mellan aggregatens Peak to Peak värde	50
5.6	Jämförelse mellan B-givares placering för Åsen	50
6	Slutsatser	52
6.1	Kombinering	52
6.2	Axiella rörelser eller vibrationer	52
7	Referenslista	54

1 Bakgrund och syfte

SWECO Sverige AB (dåvarande SWECO Energy AB) har tillsammans med Fortum Sverige fått medel från Energiforsk för att studera/kartlägga sambandet mellan tryckpulsationer, effekt och axiella rörelser hos Kaplanaggregat.

Det saknas riktvärde för axiella vibrationer i befintlig standard IEC 20816-5. Syftet med studien har därför varit att komplettera IEC 20816-5 med acceptanskriterier för axiella vibrationer.

För att köra ett Kaplanaggregat optimalt måste det mest gynnsamma pådraget ställas in i förhållande till löphjulsvinkel och fallhöjd. För att bestämma detta förhållande görs kombineringsprov. Dessa prov är kostsamma och i en del fall kan resultatet vara svårtolkat.

Det finns behov av att ta fram alternativa metoder för att bestämma kombineringsmetoden hos Kaplanaggregat. Dessa nya metoder skall helst vara billigare jämfört med traditionella metoder och kunna användas som komplement till traditionella metoder när dessa ger tvetydiga resultat. Genom att hitta kopplingar mellan pulsationer och kombineringspunkter kan detta vara en väg till att finna nya kombineringsmetoder.

Att få ner kostnaden är viktigt för att småskaliga anläggningar skall kunna bära kostnaden för ett kombineringsprov men också för större anläggningar då man kanske vill verifiera ett gammalt prov.

2 Metodik

2.1 GENERELLT

Mätningar av vibrationer och pulsationer har utförts i samband med traditionella kombineringsprov på tre aggregat: Bergforsen aggregat 1, Gulsele aggregat 3 samt Åsen.

För mätning av den axiella rörelsen har B-givare placerats på ytor där befintlig mätning sker av den axiella rörelsen alternativt axiellt på axelkopplingar.

Sugrörstrycket har mätts i sugrörskonan.

I övrigt har differenstrycket i ett tvärsnitt av spiralen (Winter-Kennedy), fallhöjden, generatorström, generatorspänning, pådrag och löphjulsläge mätts.

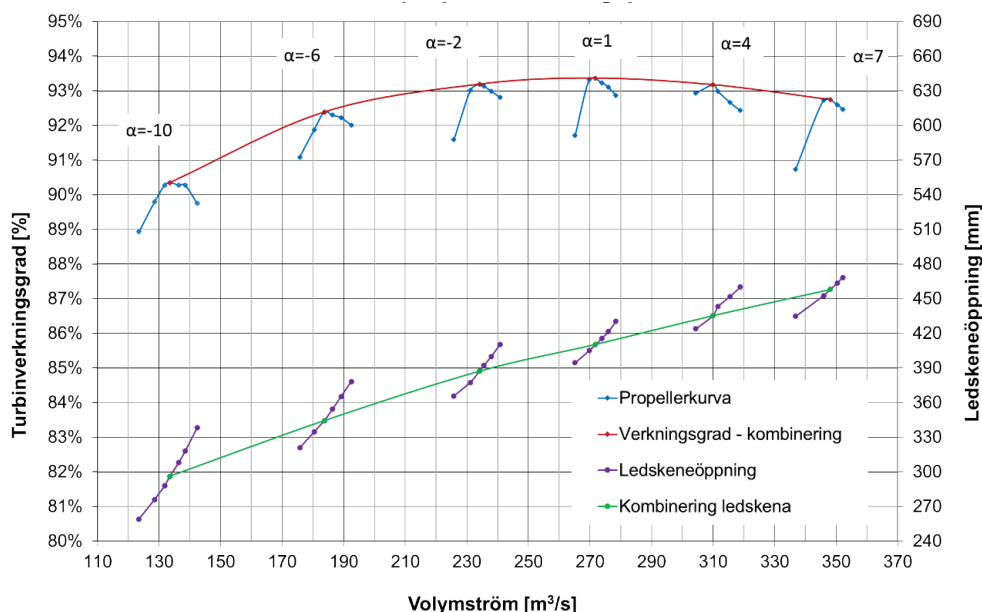
Signalen från de axiella rörelserna/vibrationerna, tryckpulsationerna i sugröret samt effektpulsationerna har analyserats med FFT.

Effekt- och tryckpulsationer i sugröret har också analyserats genom att beräkna standardavvikelsen. Standardavvikelsen på tryckpulsationerna har visat sig ha en korrelation med kombineringsgraden av aggregatet, ref 1.

2.2 AXIELLA RÖRELSE

Vid ett kombineringsprov testas normalt mellan 5-9 olika löphjulsvinklar. Proceduren är att löphjulsvinkeln ligger fast och sedan testas flera olika ledskeneöppningar. För varje inställning mäts fallhöjd, ström, spänning och flöde i form av diffstrycket i spiralen. Det finns andra metoder för att bestämma flödet som exempelvis flyglar (propellrar) eller akustiska metoder men den vanligaste metoden är den så kallade Winter-Kennedy metoden där diffstrycket i spiralen mäts. Pådrag och löphjulsläge loggas och/eller läses av okulärt på aggregatets fasta skalor.

Effekten beräknas utifrån ström och spänningssignalerna, därefter kan verkningsgraden beräknas. Plottas verkningsgraden som funktion av flöde för de olika pådragen för var och en av de olika löphjulsvinklarna framträder propellerkurvor, se Figur 1. I Figur 1 redovisas resultatet från ett kombineringsprov där 6 löphjulsvinklar mätts upp.



Figur 1 Ett exempel på kombineringsprov utfört på ett aggregat med 32 m nettofallhöjd och en volymström på 350 m³/s, ref 1.

Generellt bestäms optimal inställning mellan löphjulsinkel och pådrag av toppen på propellerkurvan, men för höga flöden kan en större öppning på ledkransen väljas detta för att bättre följa enveloppen/tangenten på propellerkurvan. Vid små löphjulsvinklar kan man ibland behöva välja en större öppning för att få ner vibrationerna. Observera också att kombineringsen ändras för olika fallhöjder. Resultatet från provet räknas om för olika fallhöjder och en fallhöjds kombinerings tas fram där det framgår hur löphjulet skall ställas in för olika fallhöjder.

Är pådraget mindre eller större än det optimala uppstår virvlar under löphjulet som bryts sönder. Denna process ger upphov till tryckpulsationer som i sin tur påverkar vridmomentet på axeln och vibrationer både axiellt och radiellt, ref 2,3. Dessa tryckpulsationer förväntas ge en ojämn gång som skapar vibrationer både axiellt och radiellt i axelsystemet, pulsationer i sugröret samt pulsationer i effekten.

För att bestämma nivåerna på de axiella vibrationerna monterades B-givare på axeln, se Figur 19, Figur 29, Figur 37 och Figur 38. Den axiella rörelsen loggades för varje driftpunkt under kombineringsprovet.

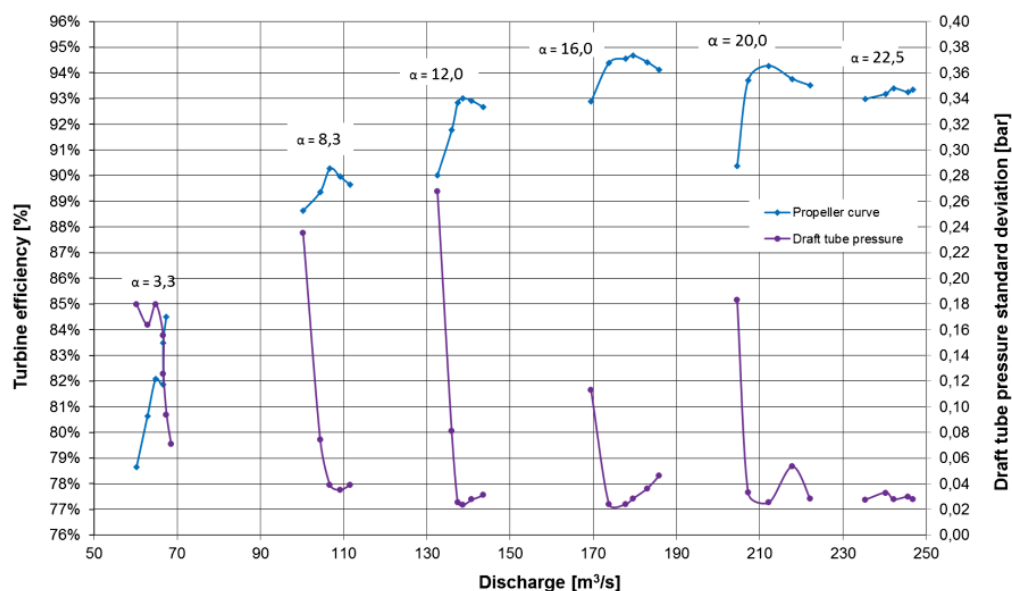
För vart och ett av de testade aggregaten har tre till fyra av propellerkurvorna valts ut och specialstuderats. Peak to Peak värdena för bästa kombineringspunkt har jämförts med övriga punkter på propellerkurvan.

FFT-analyser har utförts för att se de olika frekvensernas bidrag till vibrationsnivåerna och om det finns någon skillnad mellan okombinerat och kombinerat aggregat.

2.3 KOMBINERING

När aggregatet går utanför optimala inställningar ger detta upphov till tryckpulsationer. Genom att mäta tryckpulsationerna i sugrörskonan kan man

kvantifiera hur stora dessa pulsationer är och relatera detta till optimal kombinerings. Enligt ref 1 visar att låg standardavvikelse av tryckpulsationerna korrelerar väl med bästa kombinerings, se Figur 2.



Figur 2 Exempel på korrelation mellan låg standardavvikelse på tryckpulsationer i sugrörskonan och optimal kombinerings, ref 1 (fallhöjd 26,5 m)

På flera anläggningar saknas det tryckuttag i sugrörskonan, det är därför nödvändigt att gå vidare och titta på andra parametrar.

Den parameter som ligger närmast till hands att studera är effekten. Detta beroende på att effekten är lätt att mäta och finns tillgänglig på alla aggregat.

Metodiken i denna studie har varit att analysera effektsignalen från ett ordinarie kombineringsprov och likt tryckpulsationerna analysera standardavvikelsen av effekten.

I korthet är standardavvikelsen ett mått på hur mycket de olika samplingarnas värde avviker från ett medelvärde. Tanken är att orolig strömning i vattenvägen ger upphov till stor spridning i mätvärden och därmed stor standardavvikelse medan jämn och fin strömning ger låg standardavvikelse.

2.4 ANVÄND MÄTUTRUSTNING

Följande givare användes vid proven, se Tabell 1. För pådrag och löphjulsvinkel lästes de mekaniska skalorna av okulärt. Stationssignalen för pådrag och löphjulsvinkel registrerades också.

Tabell 1 Använda givare vid proven.

Givare	Signal	Mätområde	Fabrikat	Modell/serienr.
Dränkbar tryckgivare	4 - 20 mA	0 - 0,6 bar	Jumo	APT-26-242/44404635
Dränkbar tryckgivare	4 - 20 mA	0 - 7 mvp	Dryck	PTX-1830/10645051
Dränkbar tryckgivare	4 - 20 mA	0 - 1,0 bar	Jumo	APT-26-242/44044121
Difftryckgivare	4 - 20 mA	0-2600 mmvp	Rosemount	9591060
Tryckgivare (sugrörstryck)	4 - 20 mA	-1 till 2 bar	GE	UNIK 5000/10800049
B-givare (axiell rörelse)	4 - 20 mA	1 - 4 mm	Telemechanique	XS1M18AB120
B-givare (axiell rörelse)	4 - 20 mA	1 - 10 mm	Telemechanique	XS1M30AB120

Då fabrikat och modell var okända för de stationsgivarna som loggade pådrag och löphjulsvinkel har de inte tagits upp i Tabell 1.

Effekten mättes på aggregatets mät kärnor, omsättning på respektive aggregats mät kärnor finns redovisad i Tabell 2. Vid proven användes en effektmätare av typ Yokogawa modell WT230 som gav 1 Hz i samplingshastighet.

Tabell 2 Omsättning på mät kärnor för respektive aggregat.

Omsättning	Bergeforsen aggregat 1	Gulsele aggregat 3	Åsen
Ström	3200/2	1600/2	2500/1
Spänning	11000/110	11000/110	11000/110

Loggning skedde med utrustning från Damill. Mättiden var för varje provpunkt 5 minuter. Samplingsfrekvensen var 100 Hz för Bergforsen medan Gulsele och Åsen samplades med 150 Hz.

Trycket mättes i sugrörskonan. Under respektive avsnitt finns en ritning på var tryckuttaget satt i sugrörskonan för respektive aggregat.

3 Testade aggregat

3.1 BERGEFORSSEN AGGREGAT 1

Kombineringsprovet gjordes som ett jämförande prov efter löphjulsbytet. I denna mätning ingick även mätning av de radiella rörelserna som mättes vid turbinstyrlagret och kombilagret, dessa resultat redovisas dock inte i denna rapport eftersom de ingick i ett annat arbete åt Vattenfall.

Provet omfattade totalt 9 propellerkurvor.

I stationen finns sammanlagt 4 aggregat. Stationen ägs av Vattenfall.

Turbin

Tillverkare:	Voith.
Turbintyp:	Kaplan.
Tillverkningsår:	2019.

Fallhöjd:	22,75 m.
Flöde:	219 m ³ /s.
Turbineffekt:	45,7 MW.
Varvtal:	115,4 rpm.
Löphjulsdiameter:	5510 mm.
Löphjulsblad:	5 st.
Ledskenor:	24 st.

Generator

Tillverkare:	Končar.
Typ:	SB 8407-52.
Märkeffekt:	50 MVA.
Märkspänning:	9,6 kV.
Märkström:	2706 A.
Cos φ	0,9.
Varvtal	115,4 rpm.

3.2 GULSELE AGGREGAT 3

Utfört kombineringsprovet syftade till att kontrollera kombineringen efter ombyggnad av ledkransen. Provet omfattade 7 propellerkurvor. Aggregatet förnyades 2008.

I stationen finns totalt tre aggregat, stationen ägs av Sydkraft Hydropower.

Turbin

Tillverkare:	GE/Andritz.
Turbintyp:	Kaplan.
Tillverkningsår:	2008.
Fallhöjd:	27,5 m.

Flöde:	105 m ³ /s.
Turbineffekt:	26,2 MW.
Varvtal:	187,5 rpm.
Löphjulsdiameter:	3600 mm.
Löphjulsblad:	6 st.
Ledskenor:	24 st.

Generator

Tillverkare:	ASEA.
Typ:	SB 8407-52.
Märkeffekt:	32 MVA.
Märkspänning:	11 kV.
Märkström:	1680 A.
Cos φ	0,9.
Varvtal	187,5 rpm.

3.3 ÅSEN

Det ordinarie kombineringsprovet gjordes i syfte att kontrollera kombineringen efter förnyelse. Provet omfattade 7 propellerkurvor. Aggregatet förnyades 2019.

De axiella vibrationerna mättes under generatorm och vid axelkopplingen, se Figur 38 och Figur 39.

Det finns ett aggregat i stationen som ägs av Fortum.

Turbin

Tillverkare:	Andritz.
Turbintyp:	Kaplan.
Tillverkningsår:	2018.
Fallhöjd:	24 m.
Flöde:	130 m ³ /s.
Turbineffekt:	28,7 MW.
Varvtal:	150 rpm.
Löphjulsdiameter:	4050 mm.
Löphjulsblad:	5 st.
Ledskenor:	24 st.

Generator

Tillverkare:	Končar.
Typ:	SB 6007-40.
Märkeffekt:	32 MVA.
Märkspänning:	10,7 kV.
Märkström:	1680 A.
Cos φ	0,9.
Varvtal	150 rpm.

4 Resultat - kombinerings

4.1 KOMBINERING UTIFRÅN EFFEKTPULSATIONER

4.1.1 Bakgrund

Metoden bygger på att studera hur mycket effekten varierar mellan olika samplingar.

När maskinen/aggregatet går rätt kombinerat är strömningen under löphjulet lugnare jämfört med när det går felkombinerat. Vid fel inställning av aggregatet är det förväntade resultatet att det är stor spridning av effekten i förhållande till ett medelvärde – hög standardavvikelse, medan när aggregatet är rätt inställt är det förväntade resultatet låga pulsationer och därmed låg standardavvikelse.

Denna metod kallas i denna rapport för "Effektmetoden".

Generellt när kombineringsbestämningen med Effektmetoden har i första hand den punkt som hade lägsta standardavvikelse valts, därefter gjordes valet utifrån hur derivatan för pådraget ändras. I en del fall kan en "knyck" i pådragskurvan urskiljas då pådraget plottas mot effekten. Vid denna knyck eller strax efter hamnar verkningsgradstoppen. Som sista kriterie har även formen på kombinerings/pådragskurva, den gröna linjen i Figur 4, studerats - den skall helst löpa fint utan några oregelbundenheter.

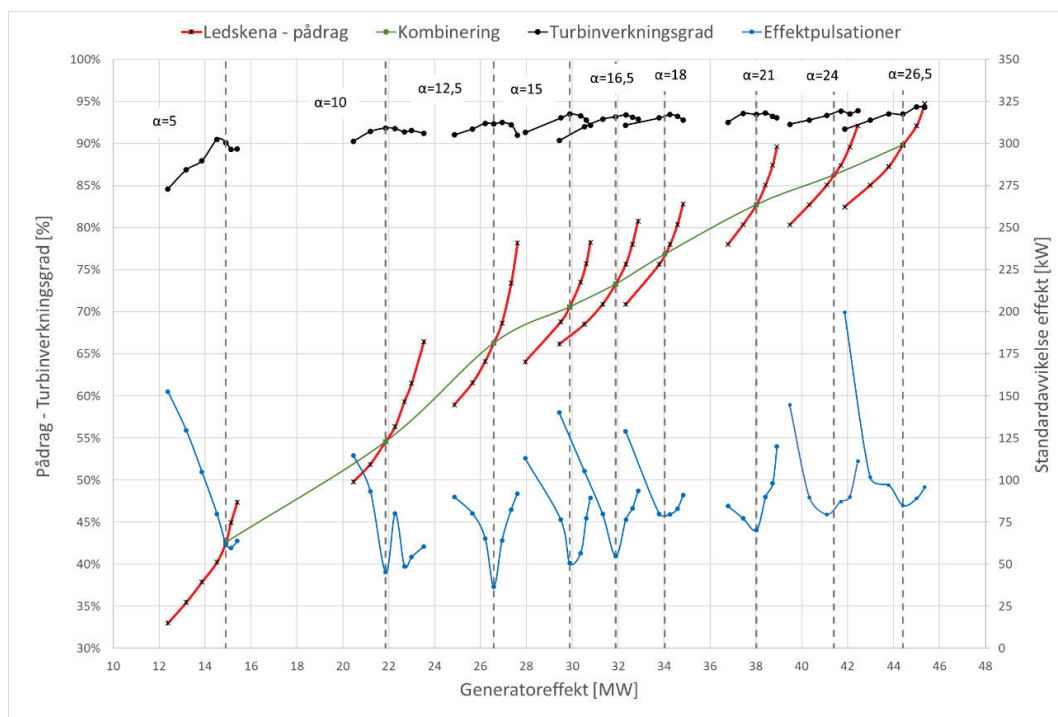
I de fall då kombineringsprov utförs endast med Effektmetoden har man inte verkningsgraden att snegla på när kombineringsvalet väljs. Viktigt att tänka på detta när jämförelsen görs mellan vald kombineringsmetod med Effektmetoden och var den uppmätta verkningsgradstoppen hamnar i förhållande till detta val.

4.1.2 Kombinerings Bergeforsen

I Figur 3 redovisas resultatet från kombineringsvalet gjord efter effektpulsationerna för aggregat 1 i Bergeforsen.

Vid 5 graders löphjuls vinkel har punkten innan den med lägsta standardavvikelse valts, detta beror på att den med lägsta standardavvikelse ligger två steg efter knycken vilket tyder på att verkningsgradstoppen har passerats. Anledningen till att standardavvikelsen är låg även då toppen på verkningsgraden passerats beror på fenomenet att överöppnad ledkrans ger låga vibrationer för låga flöden.

För löpskovelvinklarna 12,5; 15; 16,5; 18; 21 och 26,5 har punkten med lägsta standardavvikelse valts. För löphjuls vinkeln 18 grader har kombineringsvalet lagts mellan de två punkter med lägsta standardavvikelse, detta för att denna punkt dels passar bättre med tanke på knycken på pådragskurvan, dels flyter kurvan bättre.



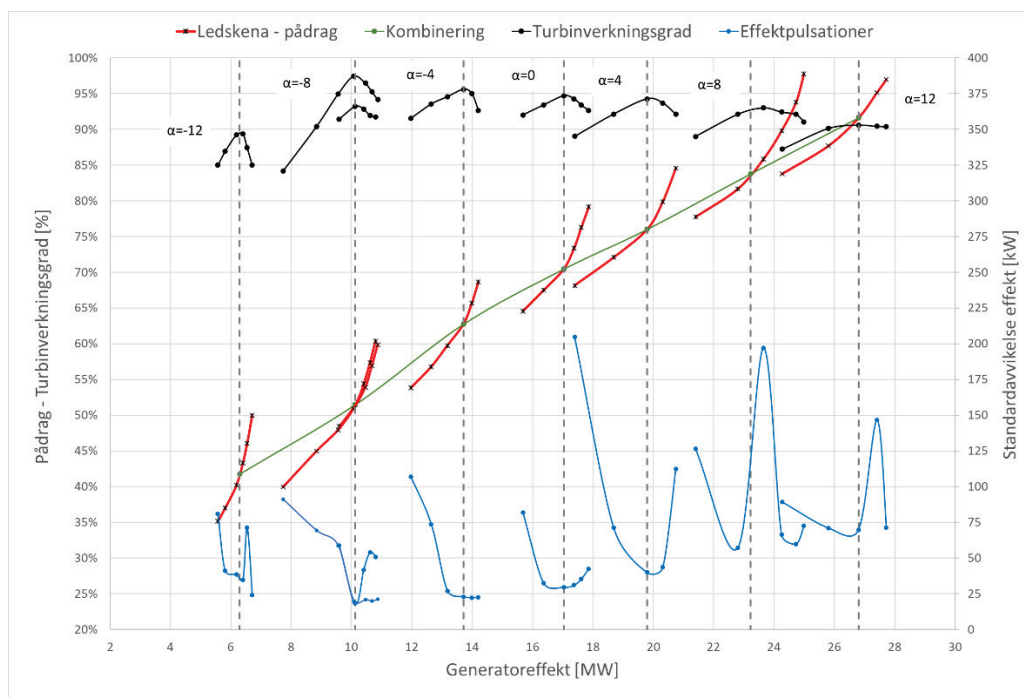
Figur 3 Kombineringsprov Bergforsen aggregat 1, kombineringsprov efter effektmotoden jämförs med turbinverkningsgraden för uppmätta propellerkurvor, fallhöjd 22,75 m.

4.1.3 Kombineringsprov Gulsele

I Figur 4 har kombineringsprovet framtagen med Effektmotoden plottats och jämförts med propellerkurvorna för turbinverkningsgraden för Gulsele aggregat 3.

Vid löphjulsinkel -12 grader har sista punkten på propellerkurvan en lägre standardavvikelse jämfört med den valda kombineringspunkten. Anledningen till att valet föll på punkten med näst lägst standardavvikelse var dels att näst sista punkten har en högre standardavvikelse, dels att derivatan för pådraget plottat mot effekten ändras efter den valda kombineringspunkten. Anledningen till att det ser ut så kan bero på mätfel men också på att vid låga effekter så tenderar Kaplanaggregat att gå jämnare om de överöppnas, det vill säga ha en större ledskeneöppning jämfört med den vid bästa verkningsgrad. Effektpulsationerna är ett indirekt mått på om maskinen går jämt. Av denna anledning kan man vid låga flöden/effekter få en låg standardavvikelse även om bästa verkningsgrad passerats.

Vid -8 graders löphjulsinkel mättes kombineringspunkten två gånger. Vid första mätningen blev verkningsgraden högre än förväntat. Av denna anledning upprepades mätningen vid -8 graders löphjulsinkel vid slutet av provet. Toppen på turbinverkningsgraden hamnar vid samma effekt för båda mätningarna vilket tyder på repeterbarhet. Punkten för lägsta standardavvikelse sammanfaller mellan de två mätningarna. Skillnaden är att vid första mätningen av -8 graders löphjulsinkel fås en distinktare minimum av standardavvikelsen jämfört med den andra mätningen.



Figur 4 Kombineringsprov för Gulsele aggregat 3, kombineringsprov efter effektmotoden jämförs med turbinverkningsgraden för uppmätta propellerkurvor, fallhöjd 27,5 m.

Vid -4, 0 och 4 graders löphjulsvinkel var överensstämmelsen god mellan låg standardavvikelse av effekten och bästa verkningsgrad. Notera knycken i den röda pådragskurvan när punkten för bästa verkningsgrad passerats för löpskovelvinklarna 0 och 4 grader.

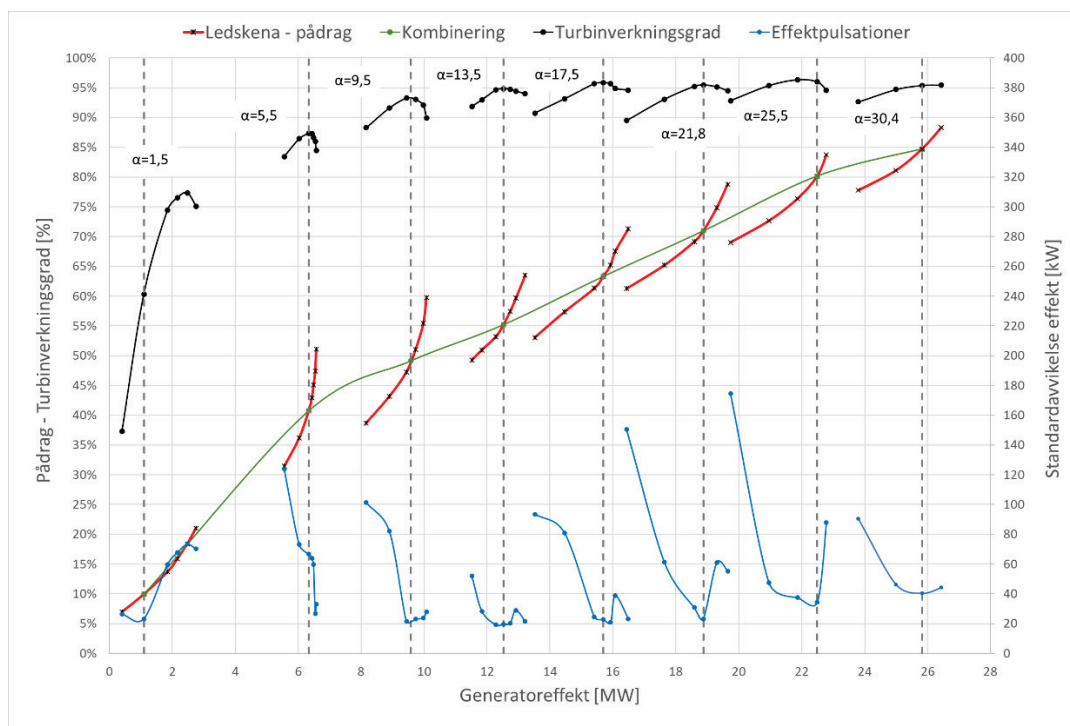
Vid 8 respektive 12 grader går standardavvikelsen ner efter en topp. Kombineringspunkten innan toppen valdes eftersom "knycken" på pådragskurvan passerats efter toppen på standardavvikelsen.

4.1.4 Kombineringsprov Åsen

I Figur 5 redovisas resultatet från kombineringsprovet då Effektmotoden använts för Åsen. De svarta propellerkurvorna skall ses som en referens. Vid ett prov endast med Effektmotoden har man inte möjlighet att snegla på verkningsgradskurvorna då verkningsgraden inte mäts.

De två första propellerkurvorna vid 1,5 och 5,5 graders löphjulsvinkel ger Effektmotoden ett otydligt svar var bästa kombineringspunkt ligger. Som tidigare nämnts är Effektmotoden osäker vid låga flöden, dels på grund av att strömningen är generellt stökig vid låga laster, dels på grund av fenomenet att överöppnad ledkrans ger lägre effektpulsationer. Utöver detta gick det inte att finna någon tydlig knäcka på pådragskurvan som kunde ge vägledning till valet av kombineringspunkt.

För övriga punkter hittas tydliga kombineringspunkter. Vid 9,5 och 17,5 graders löphjulsvinkel väljs dock en annan kombineringspunkt än den med lägst standardavvikelse och detta på grund av kombineringspunkten ligger mer rätt i förhållande till knycken på pådragskurvan.



Figur 5 Kombineringsprov Åsen, kombineringsgrad efter effektmotoden jämförs med turbinverkningsgraden för uppmätta propellerkurvor, 24 m fallhöjd.

4.2 KOMBINERING UTIFRÅN TRYCKPULSATIONER

Anledningen till att trycket i sugröret valts ut som en parameter att kombinera efter var att det i teorin uppstår ett så kallat "rotating vortex rope" (RVR) under löphjulet när ett Kaplanaggregat går okombinerat. För Francisaggregat är fenomenet med så kallade RVR vanligt vid dellast, men kan även uppstå för Kaplanaggregat om det körs okombinerat. Ref 3.

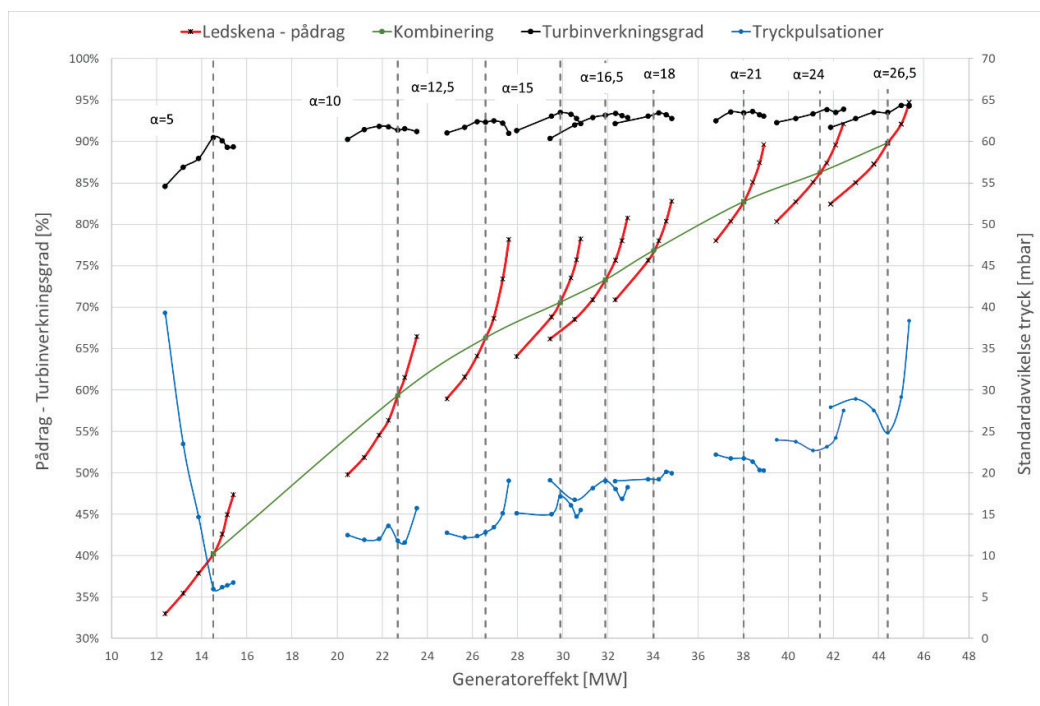
När RVR bryts sönder ger detta upphov till tryckpulsationer. Därför kan man förvänta sig större tryckpulsationer vid okombinerat aggregat jämfört med kombinerat. På samma sätt som för Effektmotoden analyserades tryckpulsationernas standardavvikelse. Denna metod kallas för "Tryckmetoden" i denna rapport.

4.2.1 Kombineringsgrad Bergeforsen

I Figur 6 redovisas resultatet från beräkningen av standardavvikelsen i sugrörstrycket och hur detta mått förhåller sig till bästa kombineringsgrad. För aggregat 1 i Bergeforsen är sambandet mellan låga tryckpulsationer och bästa kombineringsgrad tydlig, speciellt vid 15, 16,5, 18 och 21 grader finns inget samband alls.

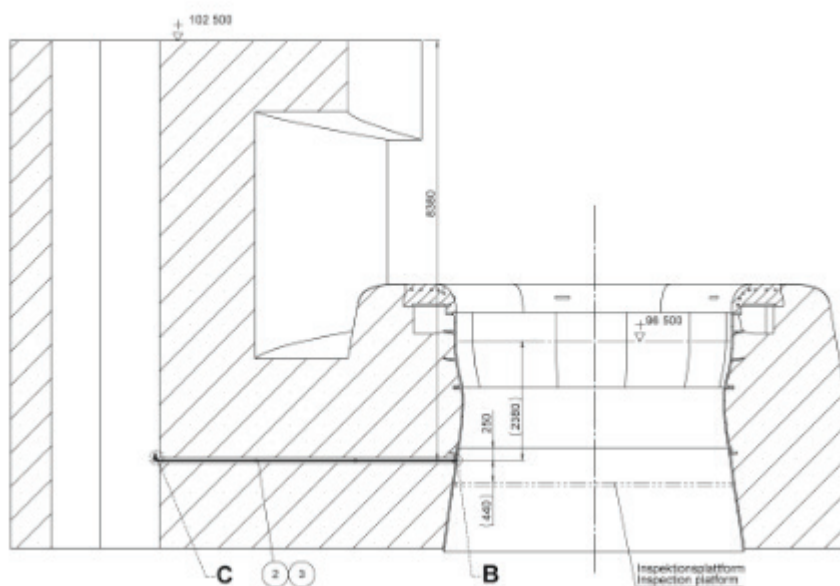
Orsaken till denna dåliga korrelation kan bero att luft kommit in i rören till tryckmätningen som inte upptäcktes under provet.

I Figur 7 redovisas placering av tryckuttaget i Bergeforsen aggregat 1.



Figur 6 Kombineringsprov Bergforsen aggregat 1 med hjälp av pulsationer i sugröret, jämförelse med verkningsgradskurvor, 22,75 m fallhöjd.

Slutsatsen från mätningen i Bergforsen visar att mätning av sugrörstrycket kan ge svårtolkade resultat.



Figur 7 Tryckkuttar för Bergforsen aggregat 1.

4.2.2 Kombinerig Gulsele

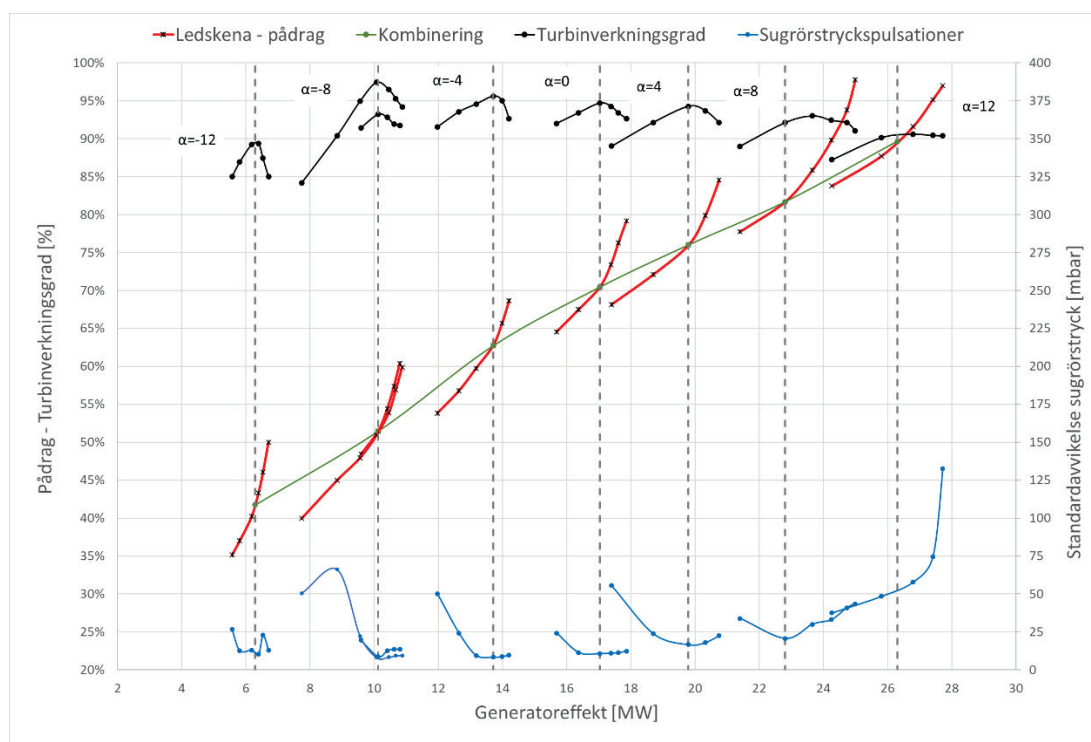
Analysen av sugrörstryckets standardavvikelse gav en betydligt bättre korrelation med bästa kombinerig för aggregat 3 i Gulsele jämfört med aggregat 1 i Bergforsen, se Figur 8.

Tryckmetoden ger endast dålig överensstämmelse för den sista löpskovelvinkeln vid 12 grader där den lägsta standardavvikelse för sugrörstrycket inte hamnar vid optimal kombineringspunkt.

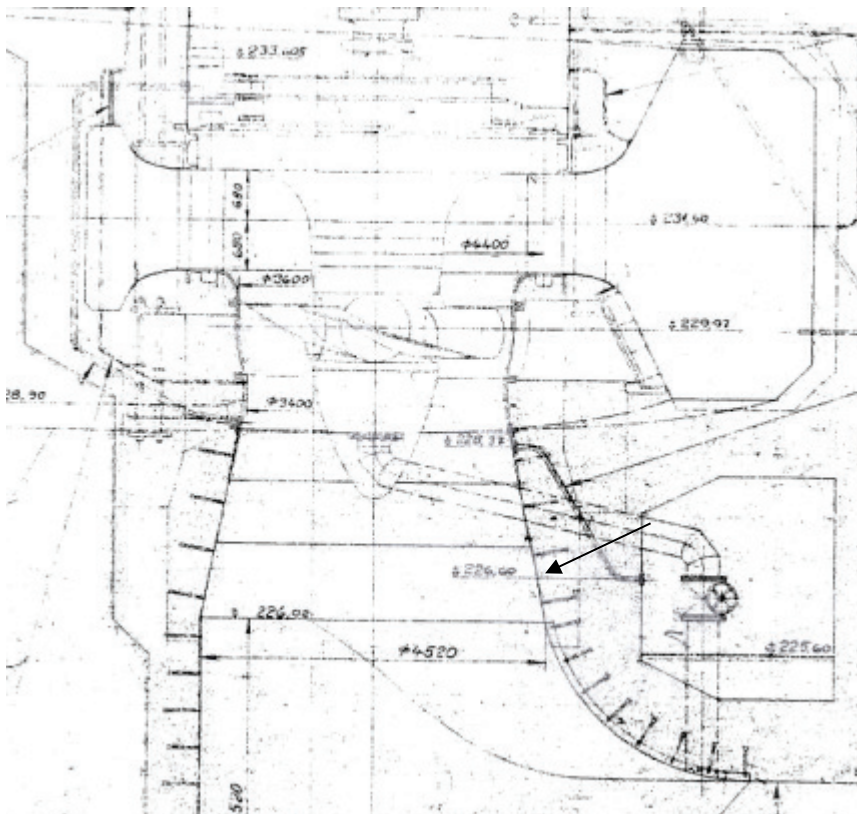
När kombinerigen valts har endast tryckpulsationerna och derivataändringen beaktats, verkningsgradskurvorna visas som referens.

För propellekurvorna vid -12, -8, -4, 0, 4 och 8 grader har kombineringspunkten för lägsta tryckpulsation/standardavvikelse valts, vid 12 graders löphjulsinkel hittades ingen rimlig kombineringspunkt med denna metod. I detta fall har kombineringspunkten valts efter derivataändringen av pådraget.

I Figur 9 och Figur 10 visas var tryckkuttaget i sugrörskonan satt på aggregat 3 i Gulsele.



Figur 8 Kombineringsprov Gulsele aggregat 3 med hjälp av pulsationer i sugröret, jämförelse med verkningsgradskurvor, 27 m fallhöjd.



Figur 9 Placering av tryckmätning för Gulsele aggregat 3.



Figur 10 Montage av tryckgivare för sugrörstrycket, Gulsele aggregat 3.

4.2.3 Kombineringsprov Åsen

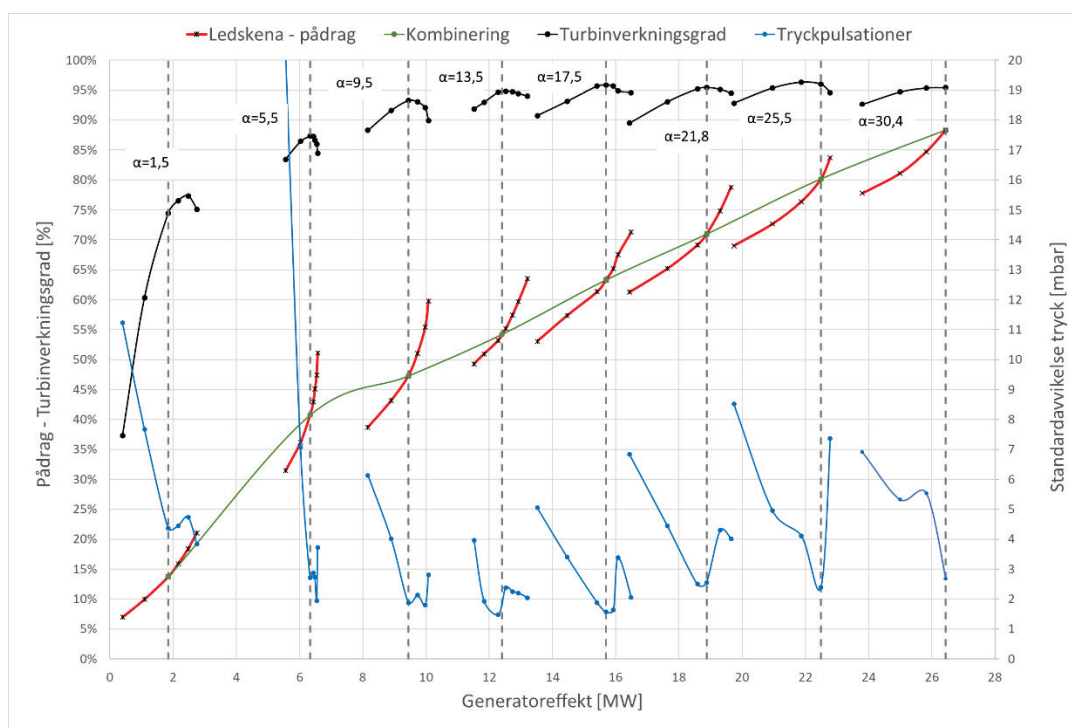
För aggregatet i Åsen visar Tryckmetoden, som för Gulsele, god korrelation mellan låga nivåer på sugrörstryckets standardavvikelse och optimal kombinerings, se Figur 11. Valet av kombineringspunkt har gjorts i första hand efter lägst standardavvikelse, i de fall då den lägsta punkten hamnade på en "orimlig" kombineringspunkt har derivatan på ledskeneöppningen beaktats.

För den första (1,5 grader) och tredje propellerkurvan (9,5 grader) har ett lokalt minimum på sugrörstryckets standardavvikelse valts istället för den med absolut lägst värde på standardavvikelsen.

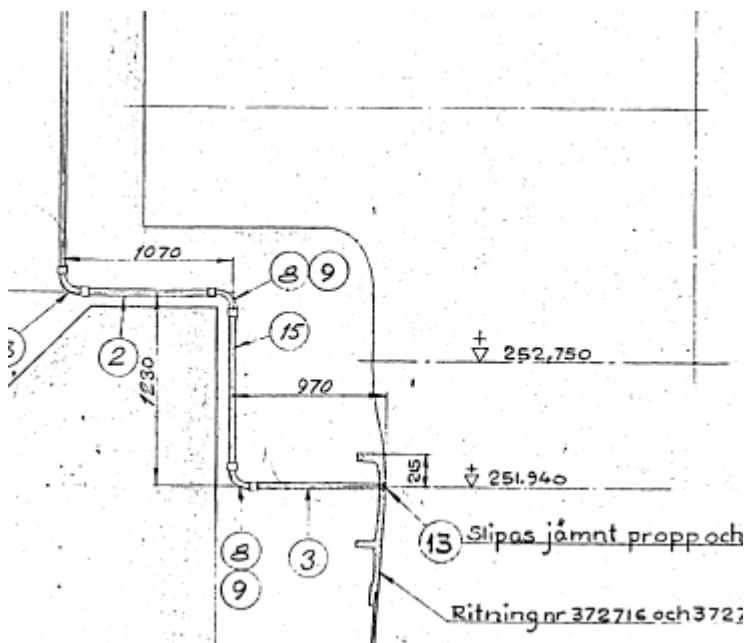
För den andra propellerkurvan (5,5 grader) var det svårt att hitta någon bra punkt. I princip kan 5 punkter väljs, utom den första och sista som visar tydligt höga värden på standardavvikelsen av trycket jämfört med övriga punkter.

Detta fenomen ses också för Effektmotoden, se Figur 5 där effektens standardavvikelse inte når något minimum för den uppmätta propellerkurvan medan verkningsgradstoppen tydligt passerats.

I Åsen fanns ritning på var tryckkuttaget i sugrörskonan satt placerad, se Figur 12. Det enda problemet med utformningen i Åsen är att tryckröret dragits upp och därmed ökar risken för att luft kommer in i röret och försämrar kvalitén på mätningen.



Figur 11 Kombineringsprov Åsen 1 med hjälp av pulsationer i sugröret, jämförelse med verkningsgradskurvor, 24 m fallhöjd.



Figur 12 Placering av tryckuttag i sugröret för Åsen.

4.3 KOMBINERING UTIFRÅN VERKNINGSGRAD

4.3.1 Bakgrund

Traditionellt har bästa kombineringsgrad bestämts genom att låsa löpskovelvinkeln och mäta verkningsgraden vid flera ledskenöppningar. Den ledskenöppning som ger den högsta verkningsgraden betraktas som kombineringspunkt för den testade löpskovelvinkel.

Vanligtvis uppskattas flödet genom att mäta diffstrycket i spiralen (Winter-Kennedymetoden), men flödet kan även uppskattas genom andra metoder som exempelvis flyglar eller ultraljud.

Fördelen med denna metod är att en uppskattning av verkningsgraden kommer ut som ett resultat från provet. Varken Effektmetermetoden eller Tryckmetoden ger verkningsgraden utan dessa metoder ger endast svar på vilken kombineringsgrad som är den bästa.

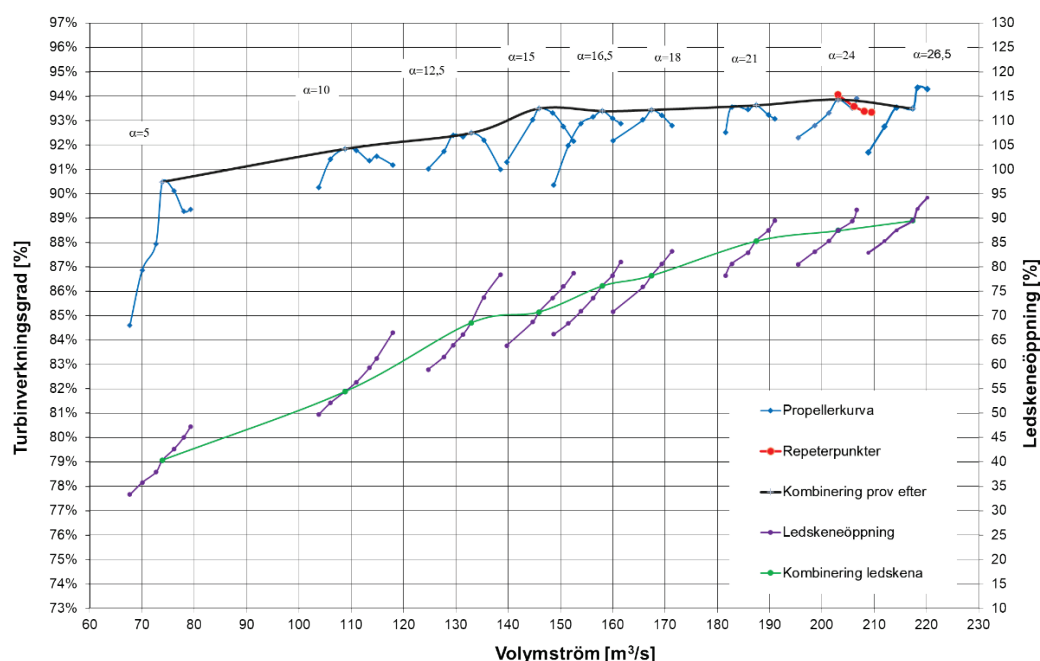
I detta avsnitt redovisas resultatet från de olika kombineringsprov med Winter-Kennedymetoden i syfte att ha som jämförelse mellan Effektmetermetoden och Tryckmetoden.

4.3.2 Kombineringsgrad Bergeforsen

I Figur 13 redovisas provet som utfördes på aggregat 1 i Bergeforsen. I diagrammet redovisas verkningsgraden utan någon statistisk behandling av mätdata som är fallet för Gulsele samt Åsen som redovisas i avsnitt 4.3.3 och 4.3.4. Detta för att illustrera hur propellerkurvorna faktiskt ser ut i de fall då resultatet från Winter-Kennedymetoden används utan någon efterbehandling.

Exempelvis vid löphjulsvinklarna 24 och 26,5 grader uppmättes en högre verkningsgrad på slutet av propellerkurvan jämfört med den valda kombineringspunkten. Avsteg från principen att välja högsta verkningsgrad på propellerkurvan gjordes för att det var uppenbart att ett mätfel kommit med i flödesmätningen. Som kontroll repeterades kurvan vid 24 graders löphjulsvinkel, se röd kurva i Figur 13. I detta fall sjönk verkningsgraden efter att toppen på verkningsgradskurvan passerats, vilket stärker teorin på ett mätfel.

Provet i Bergforsen visar att det inte är helt entydigt vilken kombineringspunkt som skall väljas om valet ensidigt görs utifrån bästa verkningsgrad. Detta exempel visar att det är en fördel om det finns kompletterande metoder tillgängliga för att bestämma kombineringspunkt.

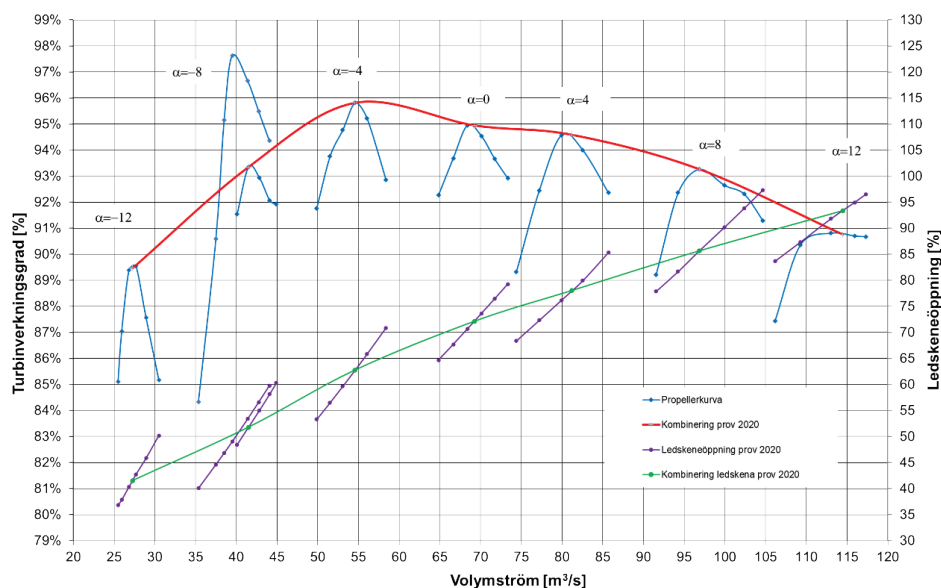


Figur 13 Kombineringsprov för Bergforsen aggregat 1 vid 22,75 m fallhöjd.

4.3.3 Kombinerig Gulsele

Resultatet från kombineringsprovet i Gulsele redovisas i Figur 14. I detta fall har kombineringen valts att ligga på toppen av de uppmätta propellerkurvorna. Observera att verkningsgraden har i detta fall behandlats med en statistisk metod. En kort beskrivning av metoden finns i avsnitt 4.3.4.

Två mätningar gjordes vid -8 graders löphjulsvinkel detta för att den ena kurvan visade för hög verkningsgrad. I stort sett sammanfaller kombineringspunkten vilket tyder på bra repeterbarhet i mätningen.



Figur 14 Resultat från kombineringsprovet för Gulsele aggregat 3 där flödet uppskattats med Winter-Kennedy metoden.

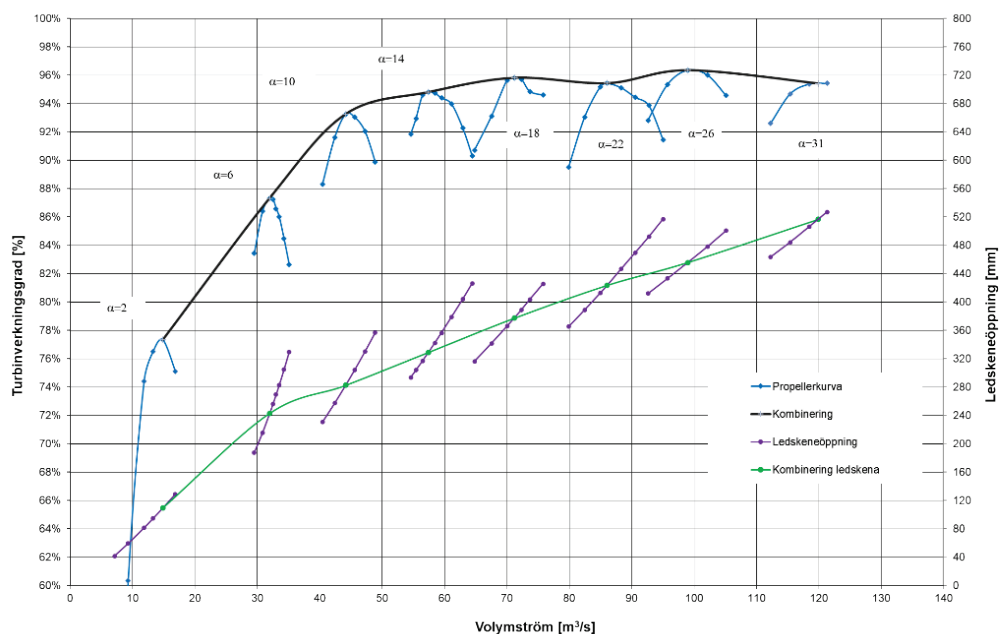
4.3.4 Kombinerig Åsen

I Figur 15 redovisas resultatet från det kombineringsprov som utfördes på Åsen där flödet mättes/uppskattades med Winter-Kennedy metoden. Observera att flödet här har behandlats med en statistisk metod.

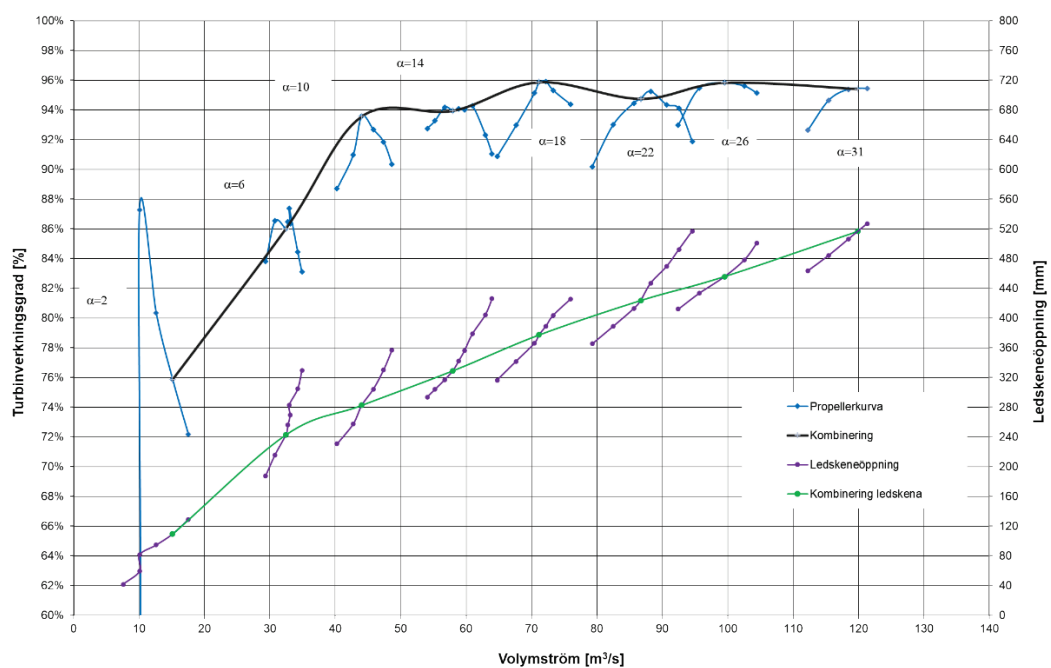
Metoden går ut på att utifrån ledskeneöppning och uppmätt flöde skapa en anpassad kurva där flödet är en funktion av ledskeneöppningen. En ekvation togs fram för var och en av propellerkurvorna. Det är sedan denna ekvation som användes för att beräkna flödet. Metoden används för att minska inverkan av enstaka mätfel. Winter-Kennedy metoden är känslig för inströmningsförhållanden ref 2 och kan därför ge upphov till mätfel.

Propellerkurvornas form eller utseende då flödet endast uppskattas med Winter-Kennedy metoden redovisas i Figur 16. För löphjulsinklarna 2, 6, 14 och 22 grader skulle en annan kombinerig valts ifall att flödet endast bestäms utifrån Winter-Kennedy metoden jämfört med då den statistiska metoden används, se Figur 15.

Utseendet på propellerkurvorna i Figur 16 visar också på den osäkerhet som finns att ta fram kombineringen då flödet uppskattas med Winter-Kennedy metoden och behovet av att ha tillgång till kompletterande metoder för att bestämma optimal kombinerig.



Figur 15 Kombinerig - Åsen vid 24 m nettofallhöjd, flödet uppskattat med en statistisk metod tillsammans med Winter-Kennedy metoden.



Figur 16 Kombinerig – Åsen vid 24 m nettofallhöjd, flödet uppskattat endast med Winter-Kennedy metoden.

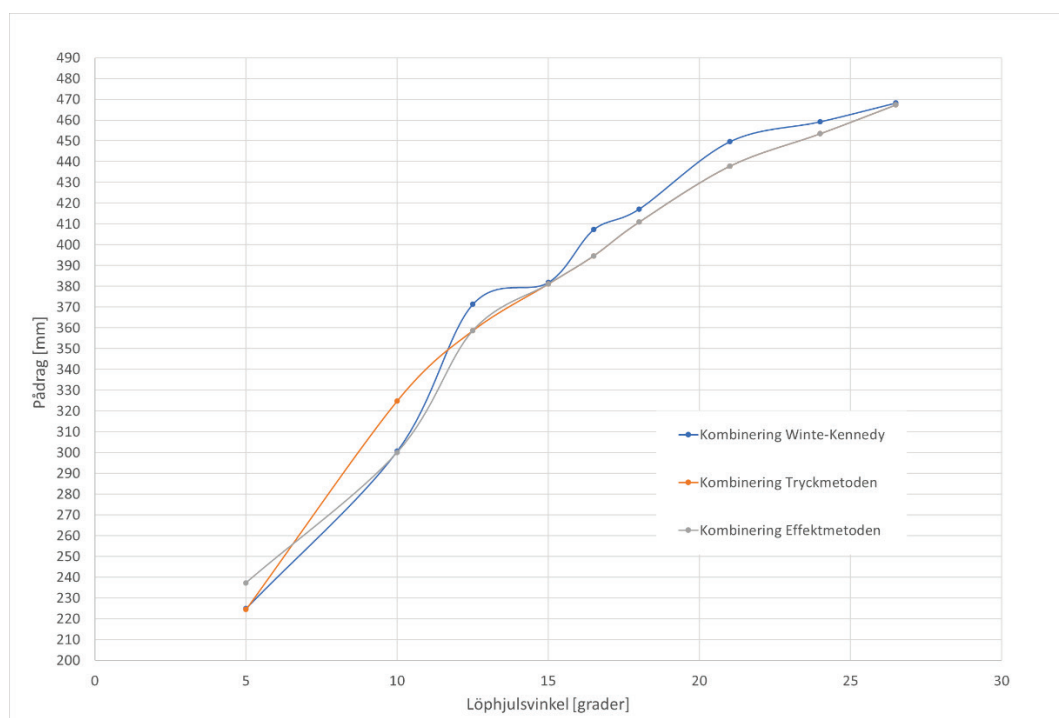
4.4 JÄMFÖRELSE MELLAN OLIKA KOMBINERINGSMETODER

4.4.1 Bergeforsen

I det fall då kombineringsmetoden väljs strikt efter bästa verkningsgrad, fås den blå kurvan i Figur 17. Kurvan för pådraget är ojämn vilket indikerar att kombineringsmetoden är fel. I de fall då kombineringskurvan ser ut som den blå kurvan i Figur 17 så finns det behov av kompletterande metoder för att bestämma kombineringsmetoden.

Den orange och grå kurvan, där kombineringsmetoden bestämts med Tryckmetoden respektive Effektmetermetoden sammanfaller vid löphjulsvinklar större än 12 grader. Vid 5 respektive 10 graders löphjulsvinkel finns en skillnad mellan de båda metodernas val av kombineringsmetod.

Vid 5 graders löphjulsvinkel ger Effektmetermetoden en större öppning jämfört med de övriga två metoderna. Öppningen skulle egentligen varit ännu större, se Figur 3, valet att stänga ledkranen ett snäpp kom från att kombineringspunkten skulle annars hamnat fel i förhållande till ändringen på derivatan eller knycken för pådragskurvan. Det rätta valet för 5 graders löphjulsvinkel är med största sannolikhet det som Winter-Kennedy metoden och Tryckmetoden visade.



Figur 17 Jämförelse mellan vald kombineringsmetod utifrån tre metoder, effektpulsationer, tryckpulsationer och Winter-Kennedy metoden för aggregatet 1 i Bergeforsens kraftstation.

Kombineringspunkten vid 10 graders löphjulsvinkel sammanfaller för Winter-Kennedy metoden och Effektmetermetoden, medan Tryckmetoden vill öppna mer. Studeras kurvan för Effektmetermetoden i Figur 3 kan man se att standardavvikelsen för effekten gör ett hopp och ökar för att sedan falla tillbaka. Förmodligen är detta ett tillfälligt mätfel och kombineringspunkten skulle förmodligen givits ett snäpp

större ledskeneöppning. I detta fall är det svårt att identifiera en knyck på verkningsgradskurvan.

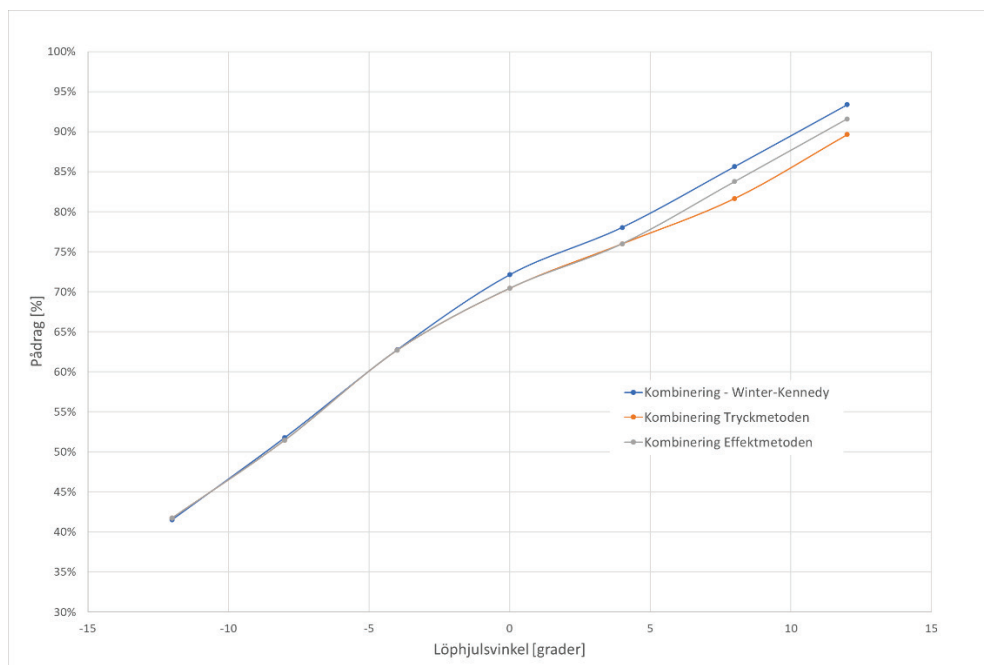
Valet av kombineringspunkt med Winter-Kennedymetoden komplicerades av att två punkter på kombineringskurvan hade i stort sett samma verkningsgrad. I detta fall kan mätnoggrannheten ha haft en inverkan på valet av kombineringspunkt.

Vid 10 graders löphjulsinkel var den mest korrekta kombineringspunkten mellan Tryckmetoden och Effektmetermetoden.

I Bergeforsen var det mycket otydligt att kombinera efter Tryckmetoden. För denna metod gjordes valet av kombineringspunkt i stor utsträckning efter knycken på pådragskurvan.

4.4.2 Gulsele

För Gulsele sammanföll vald kombineringspunkt för de tre metoderna vid löphjulsinklarna -12, -8 samt -4 grader. Vid större löphjulsinklar ger Winter-Kennedy metoden en större öppning på ledskena jämfört med Effektmetermetoden och Tryckmetoden. Skillnaderna var relativt små under 3% och Effektmetermetoden skulle sammanfalla mer med Winter-Kennedymetoden om större vikt hade lagts vid att studera knycken på pådragskurvan. Vid exempelvis 8 graders löphjulsinkel ökade standardavvikelsen omotiverat mycket för att sedan falla tillbaka, se Figur 4. Detta kan förklara att Effektmetermetoden för denna löpskovelinkel ger en mer stängd ledkrans jämfört med Winter-Kennedymetoden.



Figur 18 Jämförelse mellan vald kombineringspunkt utifrån tre metoder, effektpulsationer, tryckpulsationer och Winter-Kennedymetoden för aggregatet 3 i Gulsele kraftstation.

4.4.3 Åsen

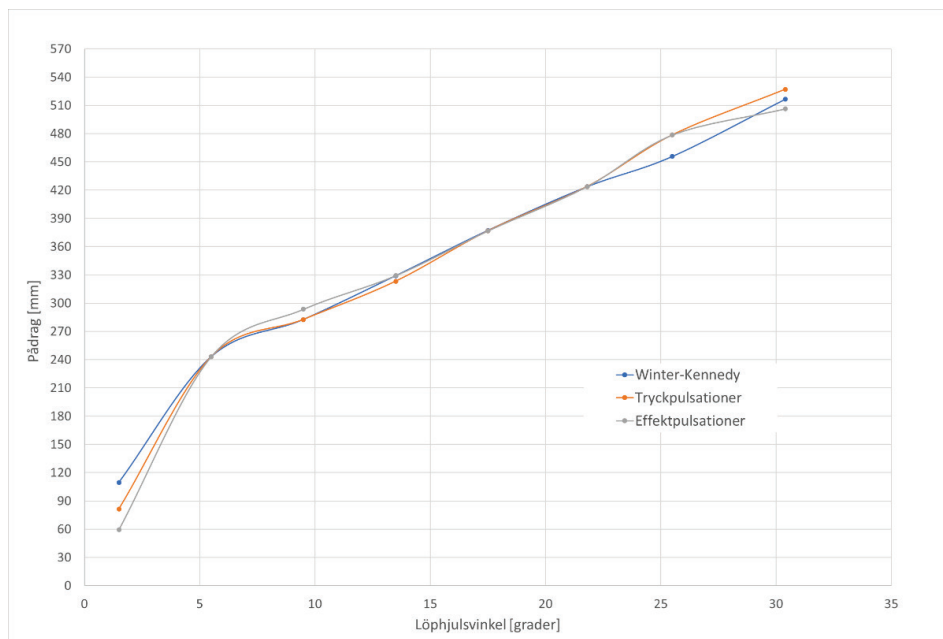
I Figur 19 jämförs de tre metoderna att välja kombineringspunkt med varandra. Jämförelsen visade att det var vid 2 graders löphjulsvinkeln som valet av kombineringspunkt avviker som mest från varandra. En avvikelse finns även för de två sista löphjulsvinklarna 26 och 31 grader.

Vid 2 graders löphjulsvinkel beror avvikelsen på att det var svårt att mäta på grund av orolig strömning vid låga flöden. Vid flöden under 20% av den nominella är generellt alla metoder osäkra och ger olika svar. För att välja rätt behövs en sammanvägd bedömning från olika metoder.

Vid 26 grader löphjulsvinkel är avvikelsen mellan metoderna 30 mm eller cirka 5% av full öppning. Effektmeter och Tryckmeter sammanfaller medan Winter-Kennedymeter visade att ledkransen skall stängas med cirka 5% jämfört med de två övriga metoderna. En av orsakerna till detta är att det skiljer 0,16% i turbinverkningsgrad mellan den sista och näst sista provpunkten på denna propellerkurva. Små mätfel av turbinverkningsgraden kan därför påverka hur kombineringspunkt väljs.

Givet att strömningen kring tryckkuttagen inte påverkar flödeskonstanten är mätfelet generellt cirka 0,3-0,4% för Winter-Kennedyprov. Detta innebär att den näst sista punkten kan mycket väl ha en högre verkningsgrad jämfört med den valda punkten på grund av noggrannheten i mätningen. Tittar man på skillnaden i standardavvikelsen för tryck och effekt är skillnaden 200% för tryckpulsationerna och cirka 160% för effektpulsationerna mellan den valda punkten och den sista punkten. Skillnaden för punkten vid lägre flöde, var skillnaden 78% respektive 18%. Sammanfattningsvis var skillnaden 2 till 3 tiopotenser i känslighet vilket gör Effektmeter eller Tryckmeter tydligare jämfört med att välja kombineringspunkt efter verkningsgrad.

Utöver felmarginalen på 0,3 – 0,4% på mätsystemet i Winter-Kennedymätningen tillkommer även osäkerheter i den flödeskonstant som används för att beräkna flödet vilket gör att osäkerheten i beräkningen av verkningsgraden ökar ytterligare. Med detta i beaktande är bedömningen att tryckpulsationerna och/eller effektpulsationerna ger en tydligare indikation på vilken kombineringspunkt som är mest lämplig.



Figur 19 Jämförelse mellan vald kombinerad utifrån tre metoder, effektpulsationer, tryckpulsationer och Winter-Kennedymetoden för aggregatet i Åsens kraftstation, kombinerad gäller för 24 m fallhöjd.

5 Resultat - axiella vibrationer

5.1 METODIK

Ett av syftena med denna studie var att få fram underlag till en komplettering av vibrationsstandarden IEC 20816-5 med acceptanskriterier för axiella vibrationer.

I första hand var tanken att relatera acceptanskravet för den axiella rörelsen till skillnaden i vibrationer och rörelser mellan när aggregatet går kombinerat jämfört med okombinerat.

Peak to Peak värdet har beräknats för olika driftpunkter på propellerkurvorna. Det har även gjorts en frekvensanalys (FFT) för att separera inverkan av olika frekvenser. Enligt ref 3,4 så uppstår ett så kallat RVR när aggregatet går okombinerat. När det så kallade RVR bryts sönder uppstår tryckpulsationer som påverka både moment och axiallasten. I teorin borde det vara möjligt att detektera axiella vibrationer som har samma frekvens som detta RVR. Enligt ref 3 kan RVR få frekvenser som är lägre än 0,175 gånger varvtalet. Ref 4 uppmätte RVR för frekvenserna 0,2 och 0,8 gånger varvtalsfrekvensen. FFT-analysen har därför omfattat en studie av frekvenser lägre än varvtalet.

FFT-analysen har även omfattat en jämförelse mellan de aggregat som ingått i studien, detta för att se hur mycket vibrationsnivåerna skiljer inbördes mellan aggregaten.

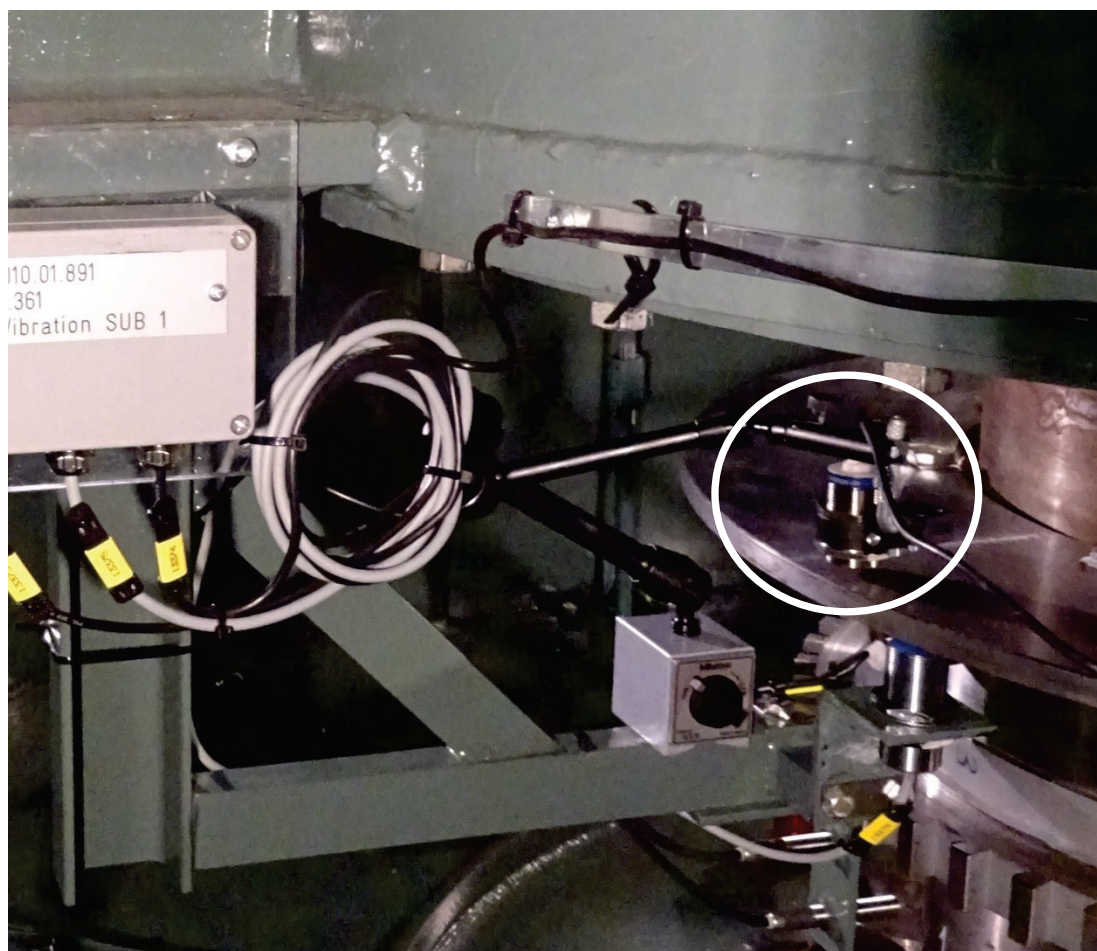
5.2 RESULTAT BERGEFORSSEN AGGREGAT 1

5.2.1 Förutsättningar

I Bergforsen mättes den axiella rörelsen/vibrationerna på en skiva som satt på toppaxeln, se Figur 20. Stationens egen mätning av den axiella rörelsen gjordes på samma skiva/mät punkt.

För Bergforsen har vibrationerna för propellerkurvorna vid 10; 16,5; 24 och 26,5 graders löphjulsvinkel studerats.

Varvtalet för Bergforsen var 115,4 rpm vilket motsvarar 1,9 Hz. Mättiden för provpunkterna var 300 sekunder och samplingsfrekvensen var 100 Hz. De första 20 sekunderna har analyserats med FFT, vilket innebär 38 varv. Frekvenser under 25 Hz har beaktats.



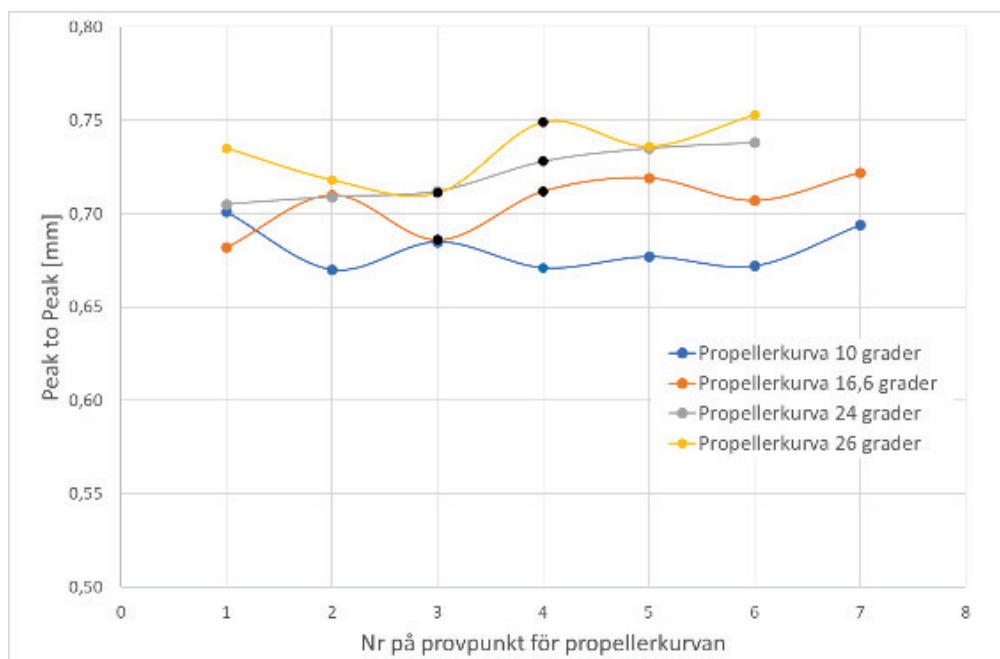
Figur 20 Placering av B-givare för mätning av de axiella rörelserna för Bergforsen aggregat 1.

5.2.2 Uppmätt Peak to Peak

I Figur 21 redovisas Peak to Peak värdena för driftpunkter vid 4 löphjulsvinklar. I diagrammet har vald kombineringspunkt efter Effektmotoden markerats med en svart punkt, vid 24 graders löphjulsvinkel finns två punkter och detta betyder att kombineringen valdes att ligga mellan dessa två punkter.

Tanken var att Peak to Peak värdet skulle vara lägre i kombineringspunkten jämfört med övriga punkter. Mätningen i Bergforsen visar att detta inte var fallet. Den axiella rörelsen var lika stor oberoende av om aggregatet kördes kombinerat eller inte.

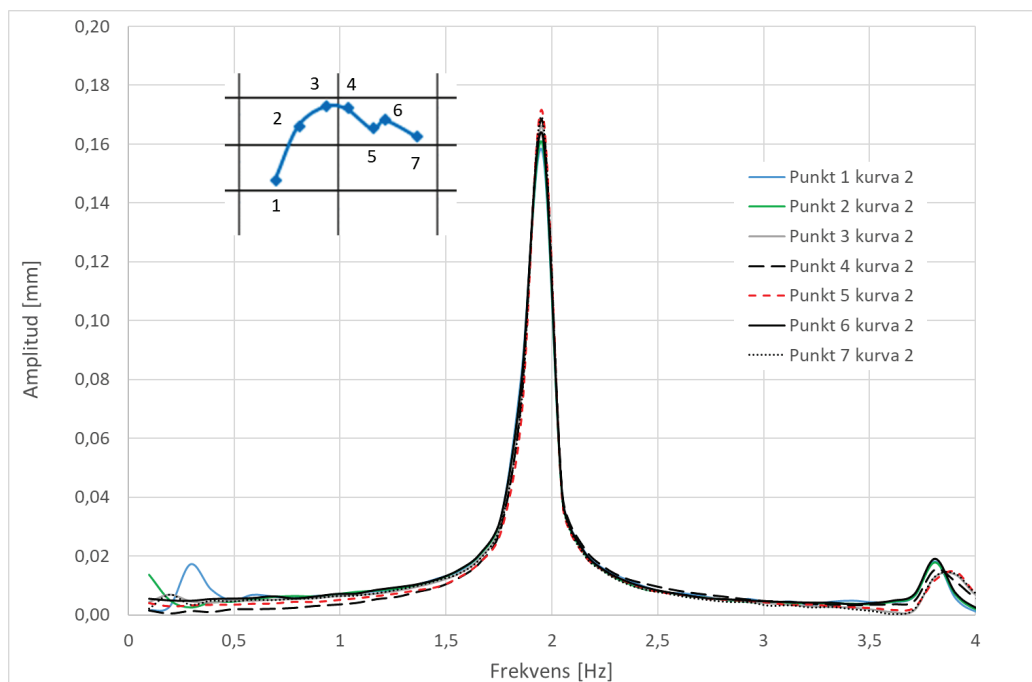
För Bergforsen har det därför inte varit möjligt att hitta ett acceptanskrav på de axiella vibrationerna/rörelsen baserat på kombinerad eller okombinerat aggregat.



Figur 21 "Peak to Peak" värden för Bergforsen aggregat 1 för 4 löphjuls vinklar.

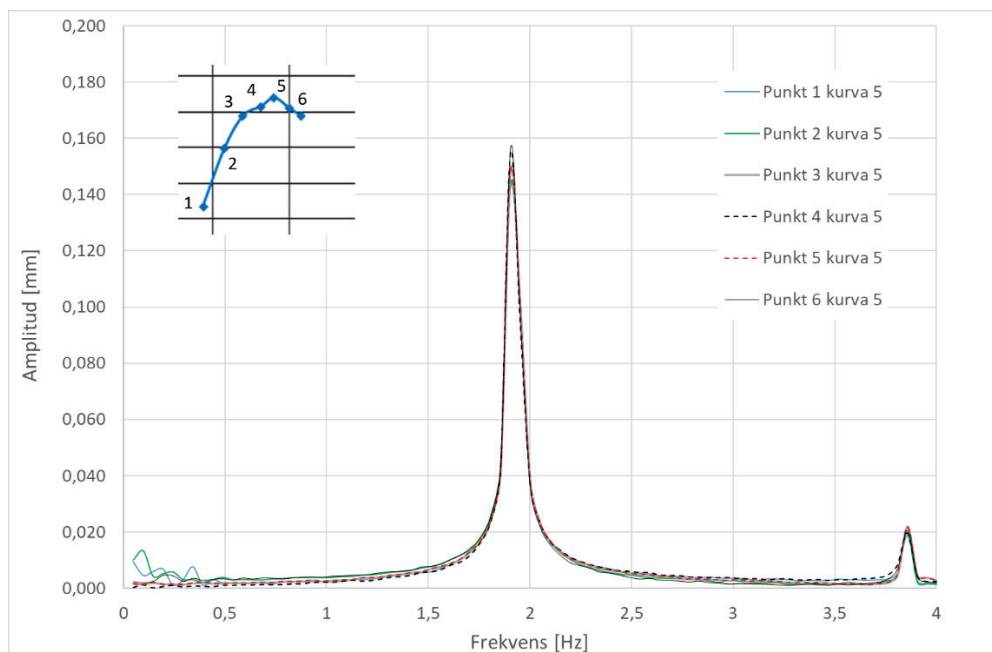
5.2.3 FFT-analys under varvtalsfrekvensen

I Figur 22 till Figur 25 redovisas frekvenser under 4 Hz för de analyserade löphjuls vinklarna. Vid 10 graders löphjuls vinkel noterades en störning vid 0,25 Hz vid underöppnad ledkrans, punkt 1 (blå linje). Detta kan vara en inverkan av RVR.

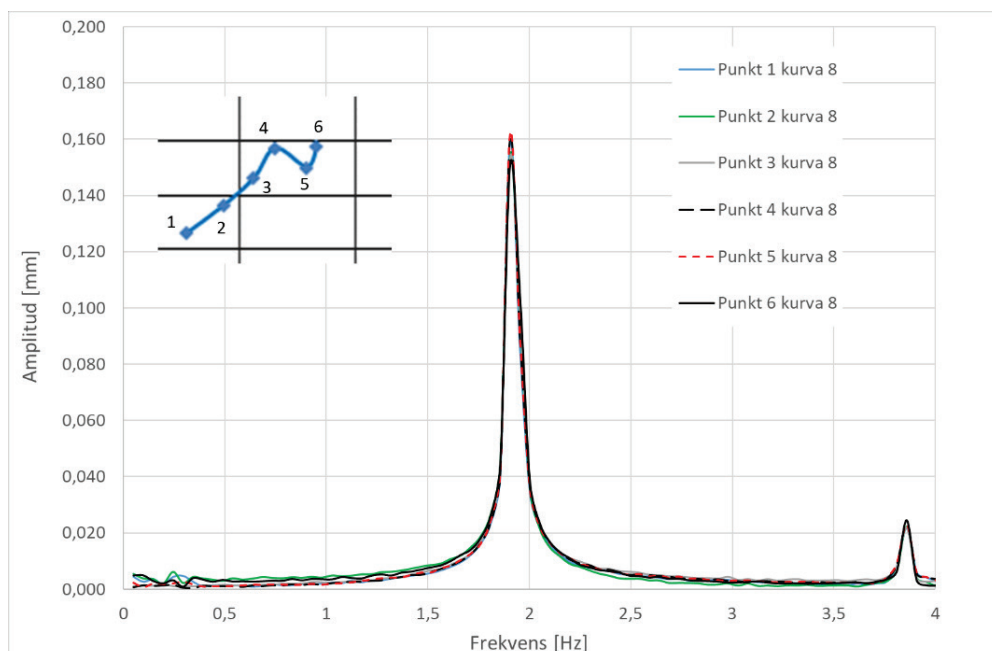


Figur 22 Frekvensanalys (0-4 Hz) för Bergforsen aggregat 1 vid 10 graders löphjuls vinkel

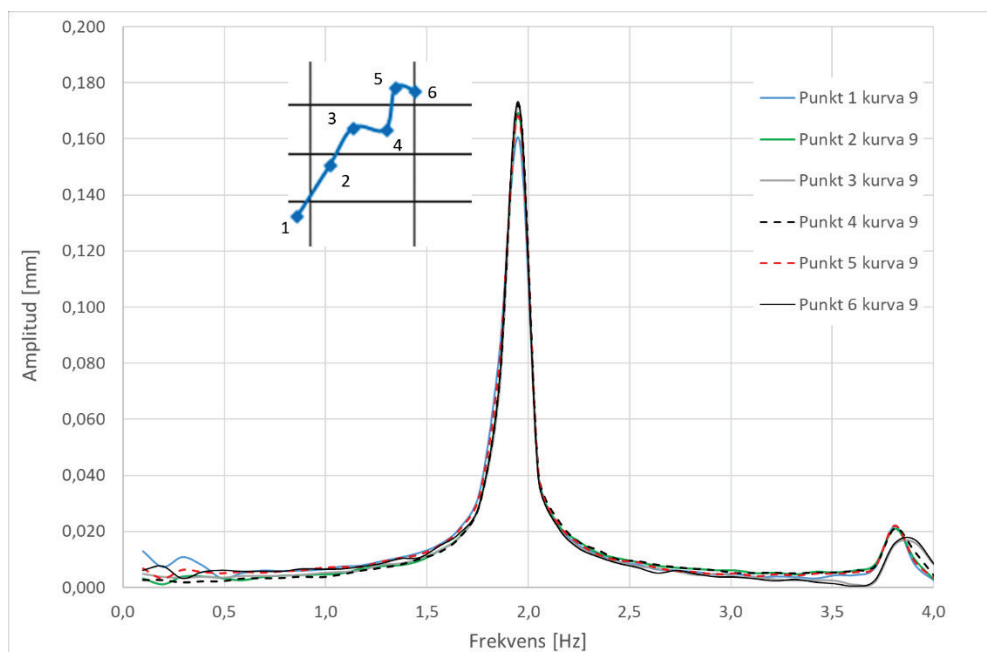
Inverkan av RVR var till synes mindre för de övriga löphjulsvinklar som undersöktes, se Figur 23 till Figur 25. Utöver detta uppmättes, för samtliga undersökta propellerkurvor, ett tydligt bidrag vid 1,9 Hz (varvtalsfrekvensen). Observera att punkt 7 inte analyserats för 16,5 graders löphjulsvinkel.



Figur 23 Frekvensanalys (0-4 Hz) för Bergforsen aggregat 1 vid 16,5 graders löphjulsvinkel.



Figur 24 Frekvensanalys (0-4 Hz) för Bergforsen aggregat 1 vid 24 graders löphjulsvinkel.

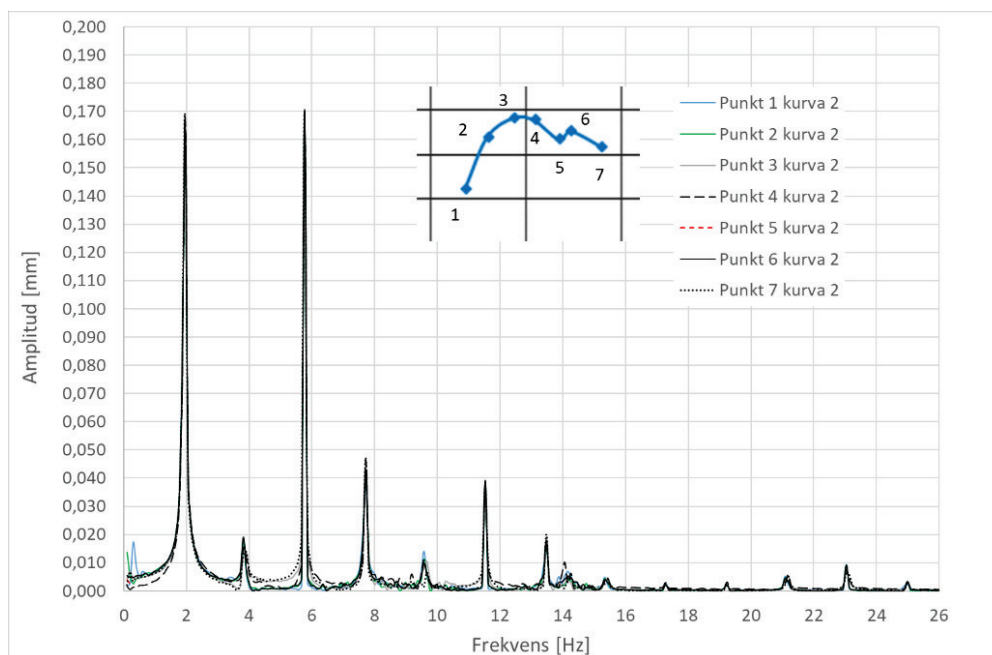


Figur 25 Frekvensanalys (0-4 Hz) för Bergforsen aggregat 1 vid 26,5 graders löphjuls vinkel.

5.2.4 FFT-analys för frekvenser 0-25 Hz

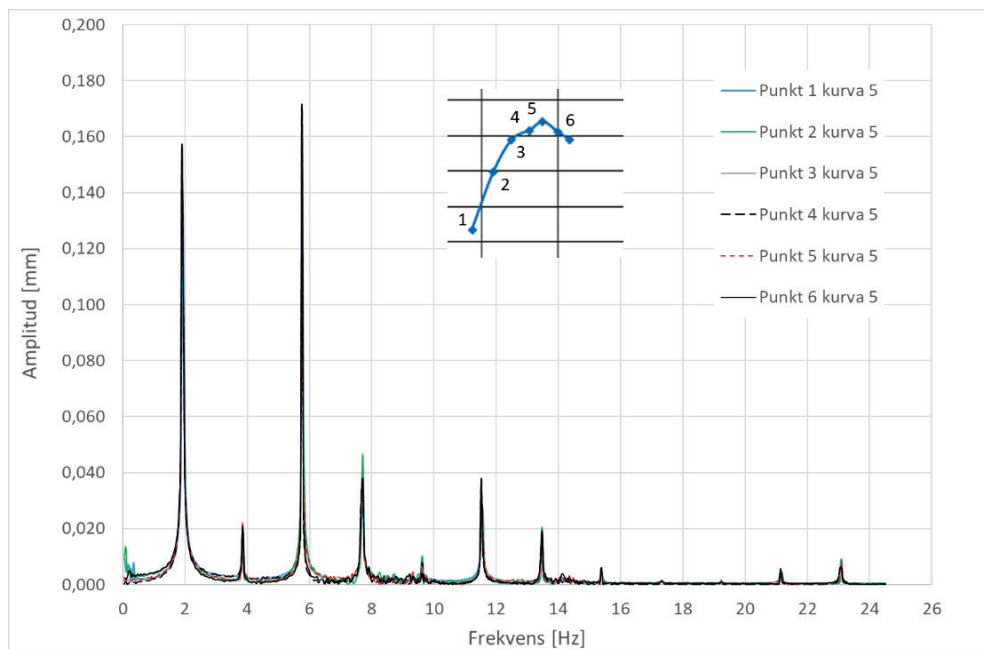
I Figur 26 redovisas FFT-analysen för propellerkurvan vid 10 graders löphjuls vinkel. Bidraget till den axiella rörelsen kommer främst från varvtalsfrekvensen och multiplar av denna.

För denna löphjuls vinkel kan man utifrån FFT-analysen se att det inte finns någon frekvens som sticker ut och ökar den axiella rörelsen även om aggregatet ligger felkombinerat.



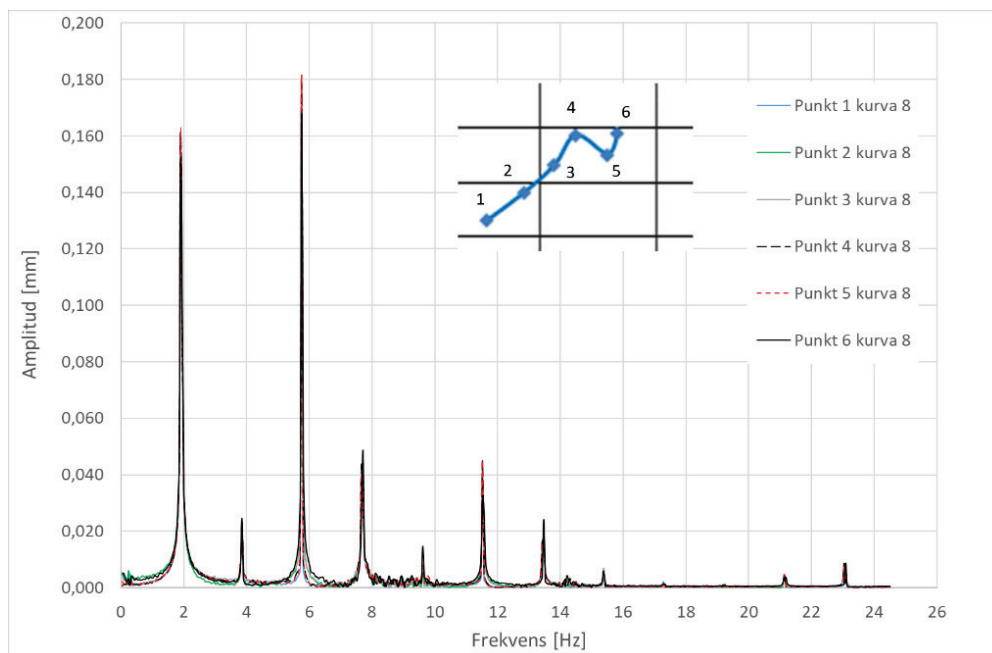
Figur 26 Frekvensanalys (0-25 Hz) för Bergforsen aggregat 1 vid 10 graders löphjuls vinkel.

I Figur 27 redovisas FFT-analysen för 16,6 graders löphjulsvinkel. Även för denna löphjulsvinkel var amplituden av de frekvenser som bidrar till den axiella rörelsen lika stor oberoende av kombineringspunkt.



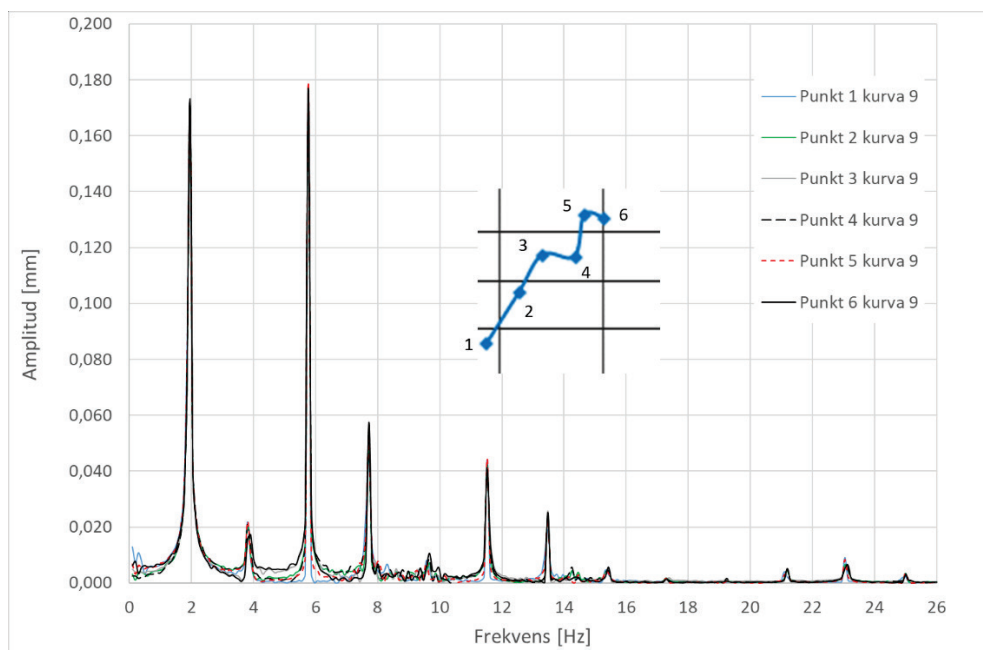
Figur 27 Frekvensanalys (0-25 Hz) för Bergforsen aggregat 1 vid 16,5 graders löphjulsvinkel.

I Figur 28 redovisas resultatet från FFT-analysen vid 24 graders löphjulsvinkel. Resultatet från denna analys var som för vinklarna 10 och 16,5 grader – ingen skillnad mellan kombinerat och okombinerat aggregat.



Figur 28 Frekvensanalys (0-25 Hz) för Bergforsen aggregat 1 vid 24 graders löphjulsvinkel.

I Figur 29 redovisas resultatet från FFT-analysen vid 26,5 graders löphjulsvinkel. Detta resultat överensstämmer med de övriga analyserna för detta aggregat.



Figur 29 Frekvensanalys (0-25 Hz) för Bergforsen aggregat 1 vid 26,5 graders löphjulsvinkel.

5.2.5 Kommentarer - Bergforsen

Signalen från B-givaren som monterades enligt Figur 20 kan tolkas fel i fall indikeringsskivan inte var helt horisontell utan vobblar. Då kommer amplitudbidraget från varvtalsfrekvensen att överskattas.

Vid mättillfället noterades aldrig om indikeringsskivan var två eller tredelad. Varje skarv ger upphov till en störning som detekteras av B-givaren. Därför kan frekvenser 2 eller 3 gånger varvtalet bli förstärkta av detta.

Signalen kan också påverkas av att konsolen som B-givaren satt monterad på fjädrar eller på annat sätt rör sig och då mäts en relativ axiell rörelse i förhållande till B-givaren och inte en absolut rörelse.

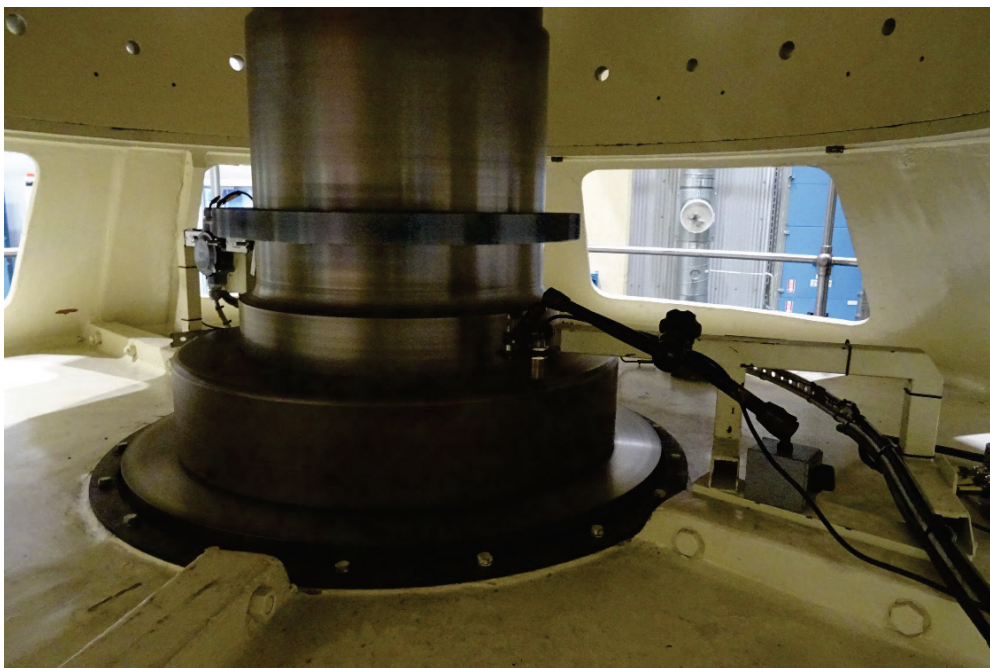
5.3 RESULTAT GULSELE AGGREGAT 3

5.3.1 Förutsättningar

I Gulsele mättes den axiella rörelsen/vibrationerna med B-givare placerad på generatortoppen, se Figur 30.

Vibrationerna för propellerkurvorna vid -12, -4 och 8 grader har studerats.

Varvtalsfrekvensen för Gulsele var 187,5 rpm vilket motsvarar 3,1 Hz. Mättiden var 300 sekunder för provpunkterna och de första 13,6 sekunderna har analyserats med FFT, vilket innebär att drygt 42 varv analyserats. Frekvenser under 75 Hz har beaktats.

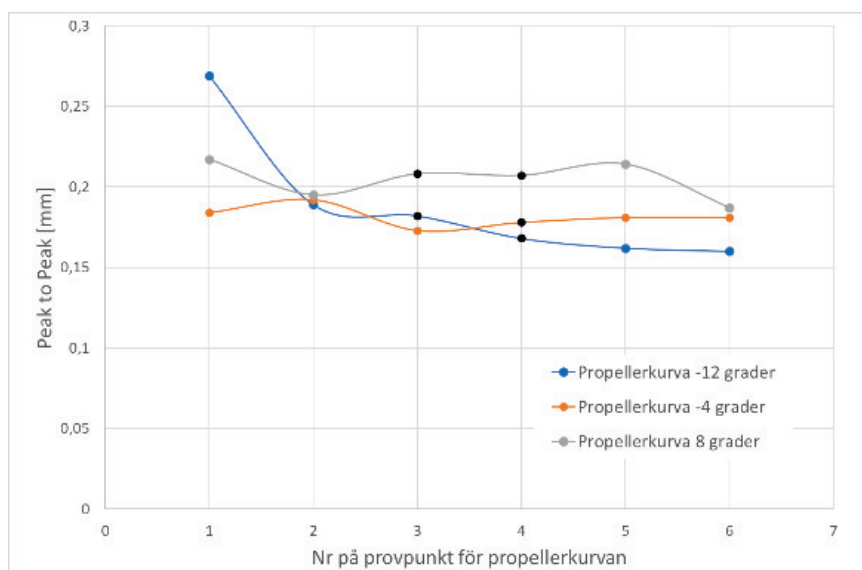


Figur 30 Montage av B-givare för aggregat 3 i Gulsele.

5.3.2 Uppmätt Peak to Peak

I Figur 31 redovisas Peak to Peak värdena för driftpunkter vid 3 löphjuls vinklar. I diagrammet har vald kombineringspunkt efter Effektmetoden markerats med en svart punkt, vid -12 graders löphjuls vinkel finns två punkter och detta betyder att kombineringen valdes att ligga mellan dessa två punkter.

Tanken var att Peak to Peak värdet skulle vara lågt i kombineringspunkten i förhållande till de punkter som ligger okombinerat. För Gulsele har det inte gått att finna utifrån Peak to Peak värdet någon skillnad mellan kombinerat eller okombinerat aggregat.



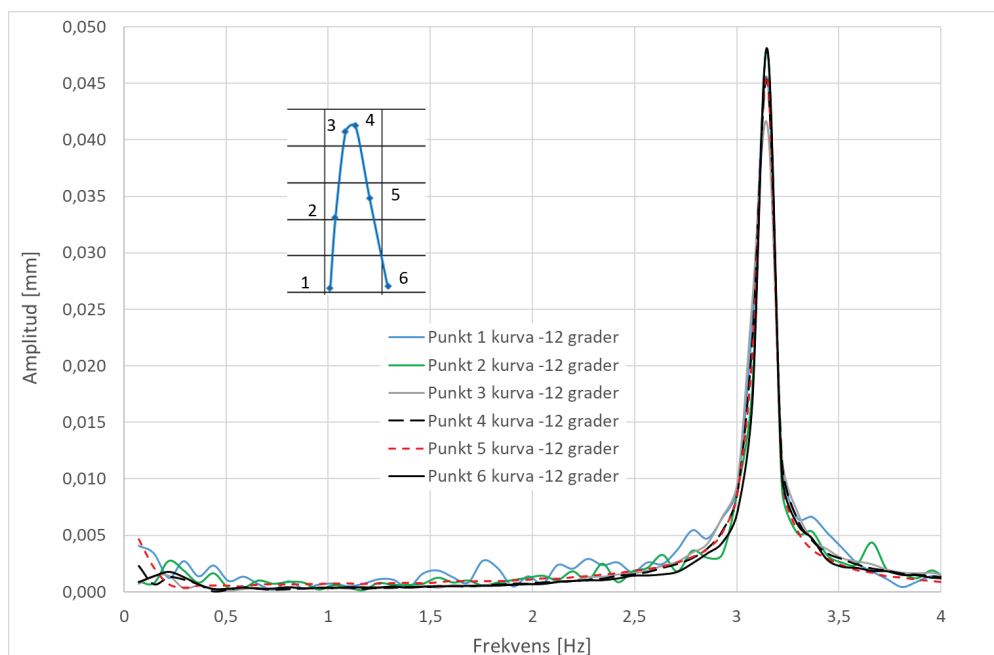
Figur 31 "Peak to Peak" värden för Gulsele aggregat 3 för 3 löphjuls vinklar.

5.3.3 FFT-analys under varvtalsfrekvensen

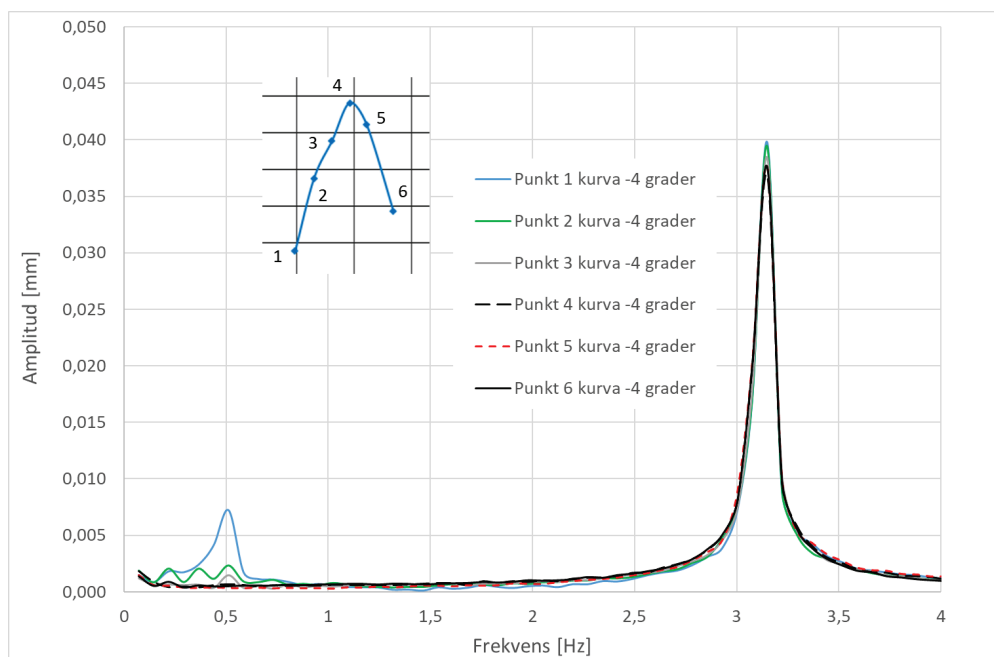
I Figur 32 till Figur 34 redovisas bidraget till axelstängens amplitud för frekvenser under varvtalsfrekvensen (3,1 Hz).

FFT-analysen vid -4 graders löphjulsinkel, Figur 33, gav en liten topp vid 0,5 Hz vid underöppnad ledkrans. Ledkransen var då öppnad till 53% medan bästa kombinerings låg vid cirka 63% öppning. I övrigt uppmättes inte något bidrag från instabiliteter under löphjulet för frekvenser under varvtalsfrekvensen för denna löphjulsinkel.

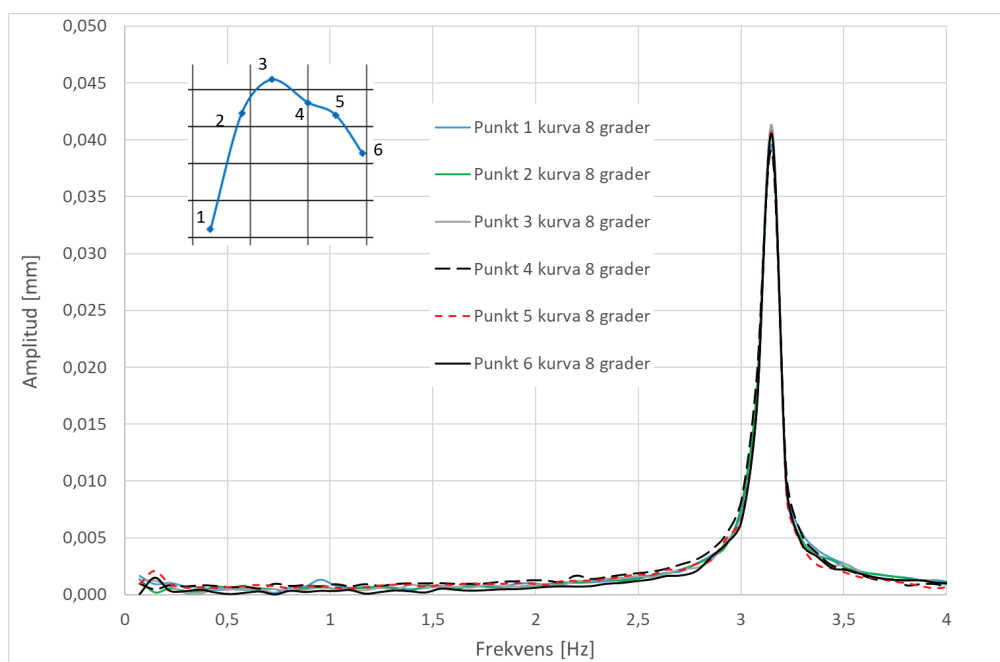
För övriga löphjulsinklar noterades endast bidraget från varvtalsfrekvensen.



Figur 32 Frekvensanalys (0-4 Hz) för Gulsele aggregat 3 vid -12 graders löphjulsinkel



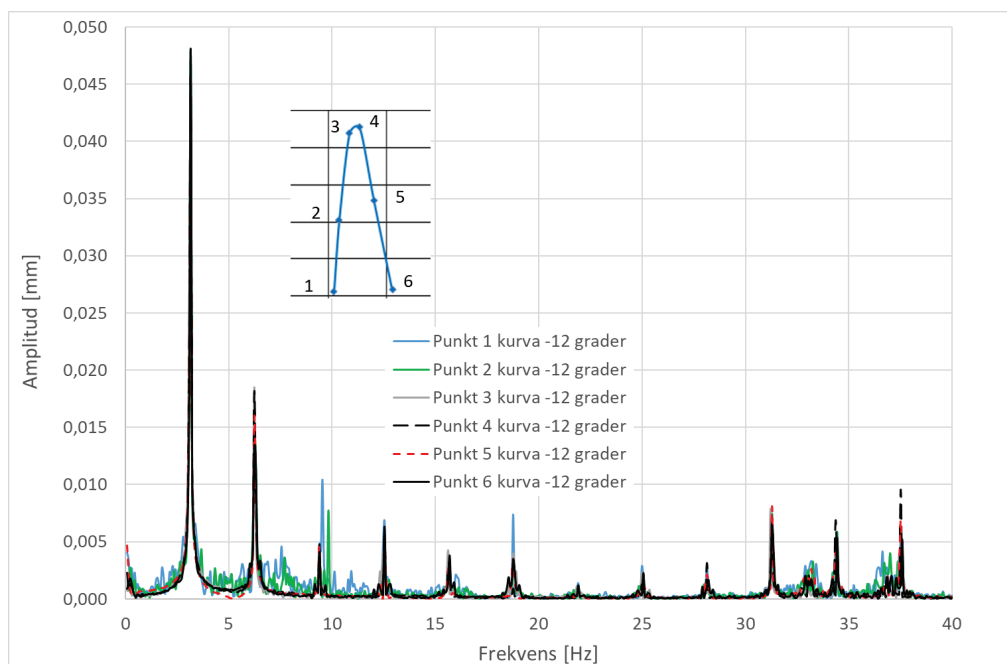
Figur 33 Frekvensanalys (0-4 Hz) för Gulsele aggregat 3, vid -4 graders löphjulsinkel



Figur 34 Frekvensanalys (0-4 Hz) för Gulsele aggregat 3, vid 8 graders löphjulsinkel

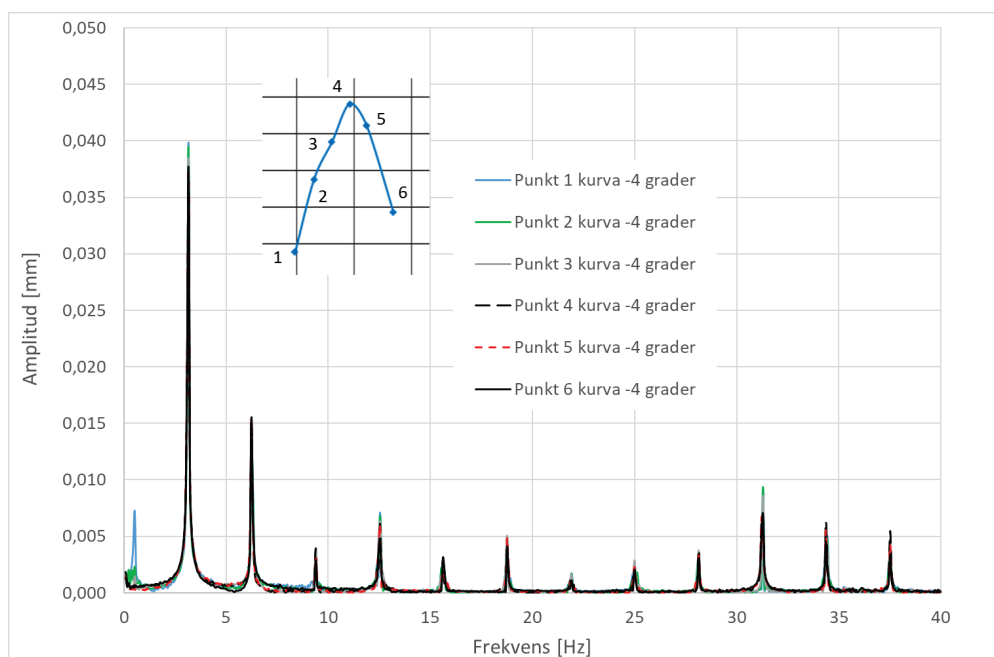
5.3.4 FFT-analys mellan 0 och 40 Hz

Studeras den axiella rörelsen för frekvenser upp till 40 Hz ser man bidraget av multipler av varvtalsfrekvensen. Vid -12 graders löphjulsinkel uppstod små oroligheter i rörelsen för underöppnat aggregat i frekvensområdet 0-12 Hz och 30-37 Hz, i övrigt inga större störningar.



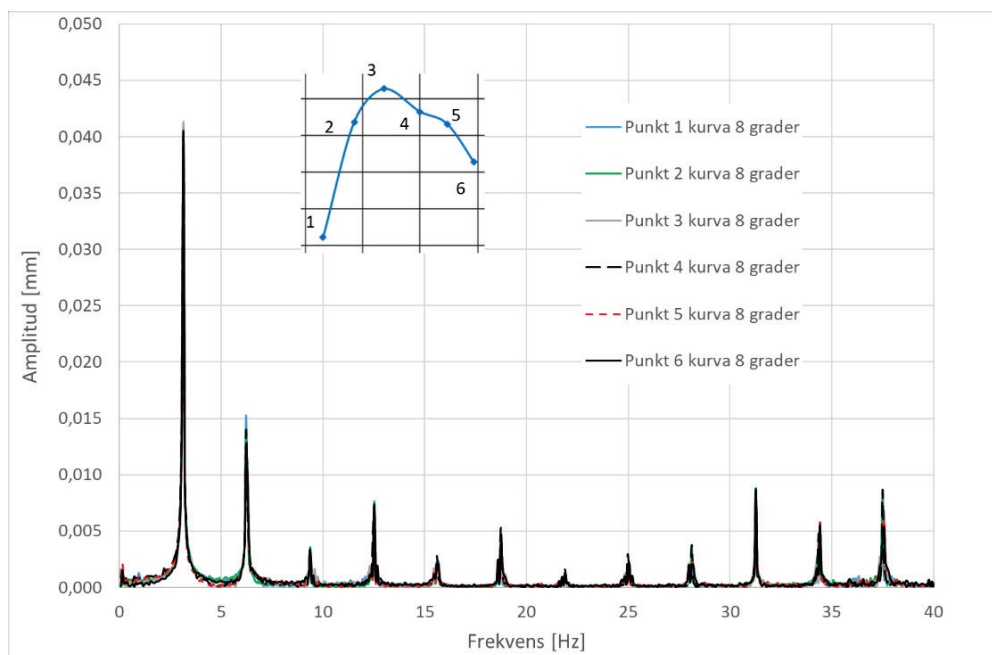
Figur 35 Frekvensanalys (0-40 Hz) för Gulsele aggregat 3, vid -12 graders löphjulsinkel.

I Figur 36 kan en störning noteras vid underöppnad ledkrans för löphjulsvinkeln -4 grader. Detta är samma störning som ses i Figur 33.



Figur 36 Frekvensanalys (0-40 Hz) för Gulsele aggregat 3, vid -4 graders löphjulsinkel.

I Figur 37 redovisas resultatet från propellerkurvan för 8 graders löphjulsinkel. Inga större skillnader mellan okombinerat och kombinerat aggregat.



Figur 37 Frekvensanalys (0-40 Hz) för Gulsele aggregat 3, vid 8 graders löphjulsvinkel.

5.3.5 Kommentarer Gulsele aggregat 3

I Gulsele aggregat 3 noterades inte några tydliga samband mellan nivån på de axiella rörelserna för kombinerat respektive okombinerat aggregat.

Det är intressant att notera ökad axiell rörelse för löphjulsvinkeln -4 grader, Figur 33 och Figur 36 vid cirka 0,5 Hz när pådraget är underöppnat i förhållande till kombineringspunkten. Möjligtvis kan detta förklaras av RVR.

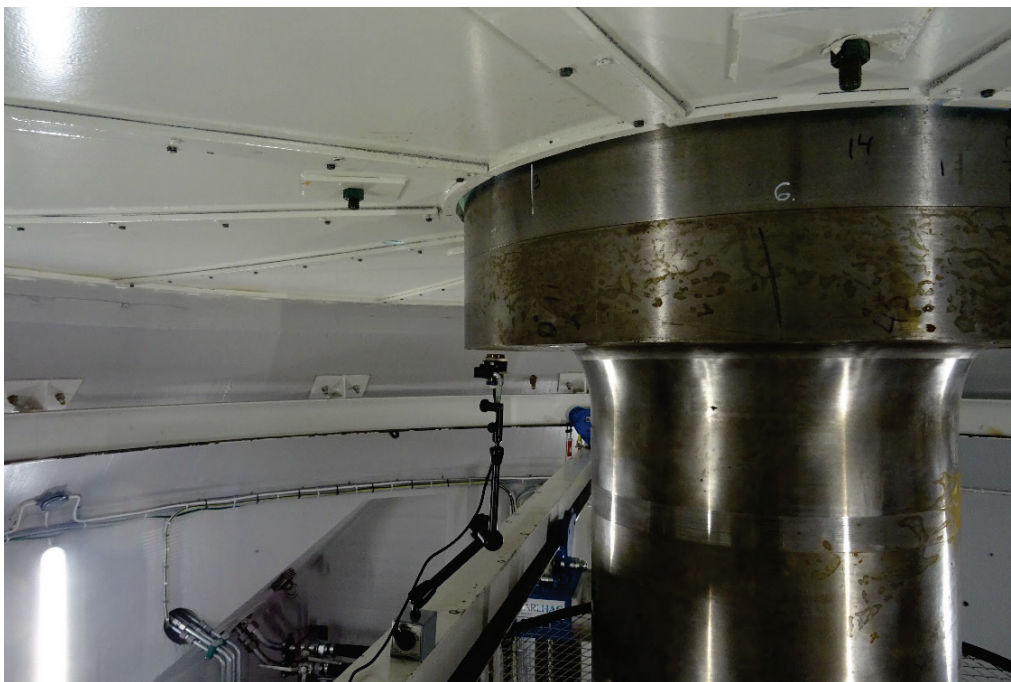
5.4 RESULTAT ÅSEN

5.4.1 Förutsättningar - Åsen

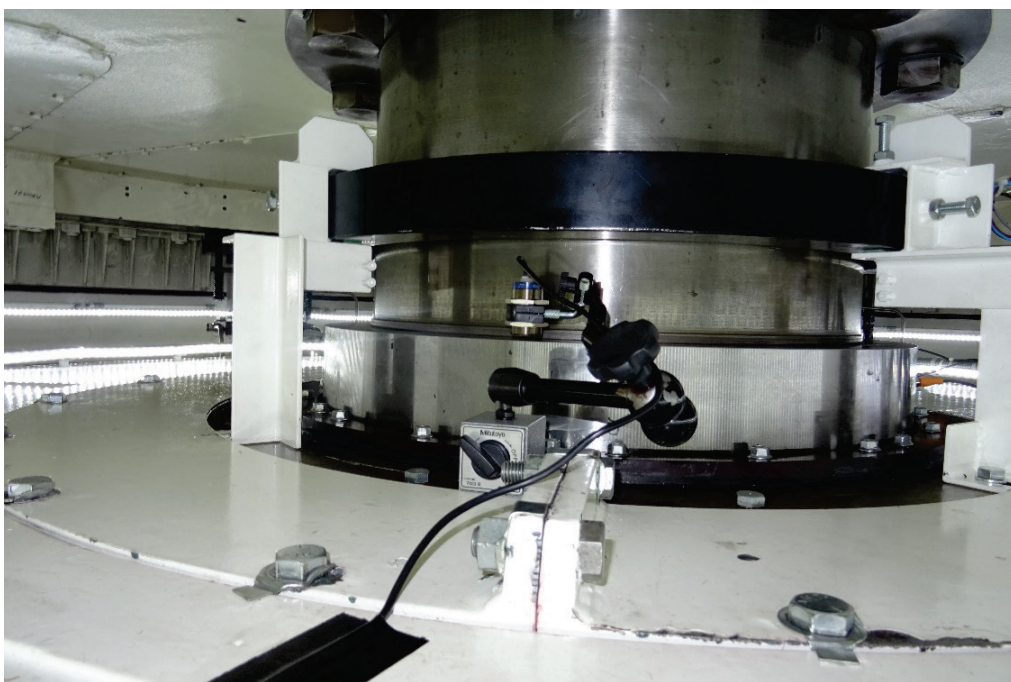
För Åsen mättes de axiella rörelserna på två ställen, dels på flänsen i axelkopplingen i turbinkammaren se Figur 38, dels under generatoren se Figur 39.

Dubbla mätningar gjordes för redundans och för att se om placeringen av B-givare har betydelse för resultatet. B-givaren i Figur 38 monterades på telferbalken och borde inte påverkas om armkorset sviktar, denna placering antogs därför ge det mest korrekta värdet på axelsträngens rörelse. Mätresultatet från denna givare har av denna anledning använts för analysen i denna rapport.

Varvtalsfrekvensen för Åsen var 150 rpm vilket motsvarar 2,5 Hz. Mättiden var 300 sekunder och de första 12 sekunderna har analyserats med FFT. Det innebär att cirka 30 varv analyserats. Studien omfattade 4 propellerkurvor: 2, 6, 14 och 22 graders löphjulsvinkel, se Figur 15.



Figur 38 Mätning av axiella vibrationer vid axelfläns turbinkammaren, Åsen



Figur 39 Placering av B-givare för kompletterande mätning av axiell rörelse, Åsen.

5.4.2 Uppmätt Peak to Peak

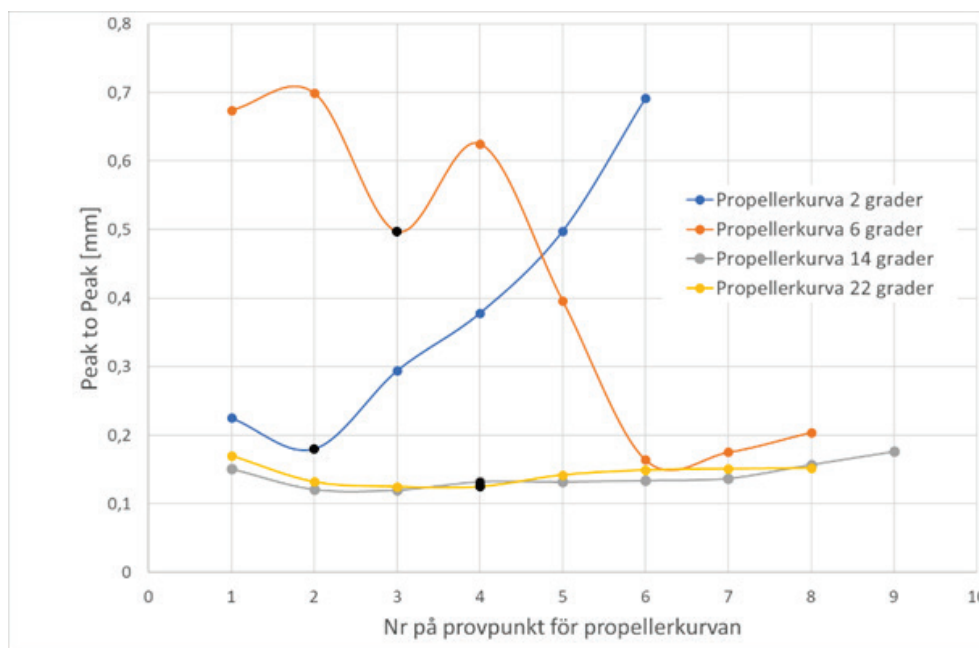
I Figur 40 redovisas Peak to Peak värdena för driftpunkter vid 4 löphjuls vinklar. I diagrammet har vald kombineringspunkt efter Effektmotoden markerats med en svart punkt.

Tanken var att Peak to Peak värdet skulle vara lågt i kombineringspunkten i förhållande till de punkter som ligger "off-cam". Samma resultat erhöles för Åsen som för Bergeforsen och Gulsele, det saknas tydligt samband mellan låga Peak to Peak värden och kombineringspunkt.

För Åsen avviker kurvorna för 2 och 6 graders löpskovelvinkel med övriga uppmätta kurvor för Åsen. För 2 graders löphjulsvinkel ökade Peak to Peak värdet i takt med att ledkransen öppnades medan för 6 graders löphjulsvinkel var trenden det motsatta, det vill säga Peak to Peak värdet minskade vid överöppnad ledkrans.

Det som är märkligt var att vid 2 graders löphjulsvinkel ökade Peak to Peak värdet medan amplitudnivåerna enligt Figur 41 och Figur 45 minskar vid överöppnad ledkrans. Punkterna 5 och 6 på denna propellerkurva motsvarar överöppnad ledkrans.

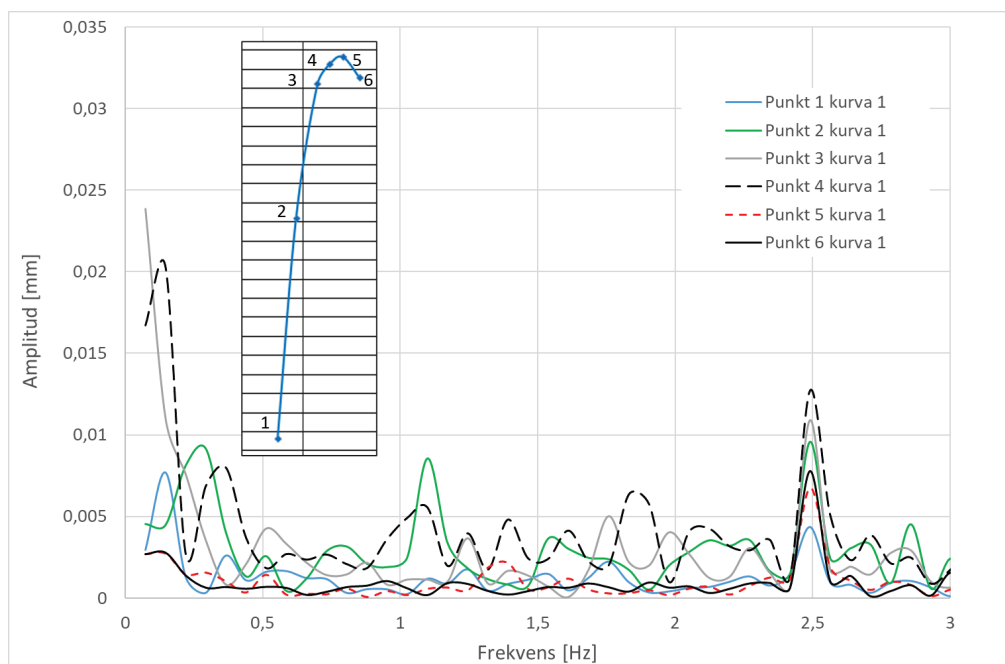
För 6 graders löphjulsvinkel råder samstämmighet mellan resultaten, det vill säga att höga Peak to Peak värden korrelerar med stora amplituder i FFT analysen.



Figur 40 Peak to Peak värden för Åsen

5.4.3 FFT-analys under varvtalsfrekvensen

För att se bidraget från ett eventuellt RVR till de axiella rörelserna har varvtalsfrekvenser under 2,5 Hz studerats för Åsen. I Figur 41 redovisas bidraget till rörelsen för frekvenser under 3 Hz.



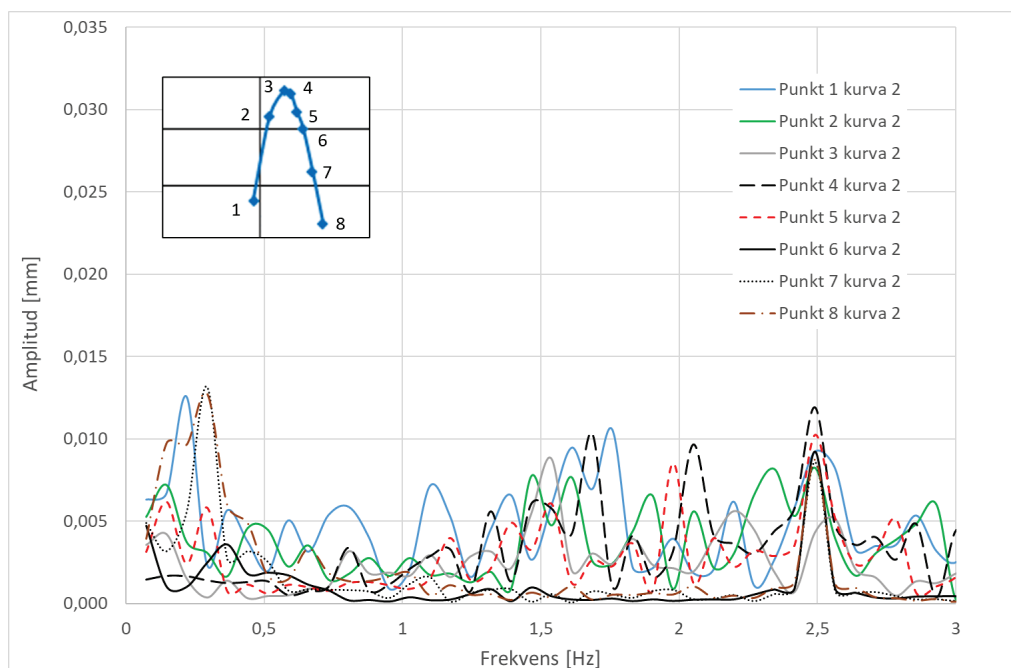
Figur 41 Frekvensanalys för Åsen, vid 2 graders löphjulsinkel

Punkterna 5 och 6 på propellerkurvan vid 2 graders löphjulsinkel ger lägst amplituder jämfört med övriga punkter. Punkt 6 motsvarade överöppnat aggregat. Varvtalsfrekvensen ger ett tydligt genomslag för alla punkter.

I Figur 42 redovisas resultatet från FFT-analysen för 6 graders löphjulsinkel, den andra kurvan för kombineringsprovet, se Figur 15 och Figur 16. Vid 6 graders löphjulsinkel var det som lugnast för punkterna 6 till 8. Vid punkt 7 och 8 kom dock en topp vid frekvensen 0,25 Hz men för resten av frekvenserna upp till 3 Hz var det relativt lugnt.

För punkterna 1 till 4 var det relativt oroligt och ingen av frekvenserna utmärker sig för att ge ett större bidrag till amplituden.

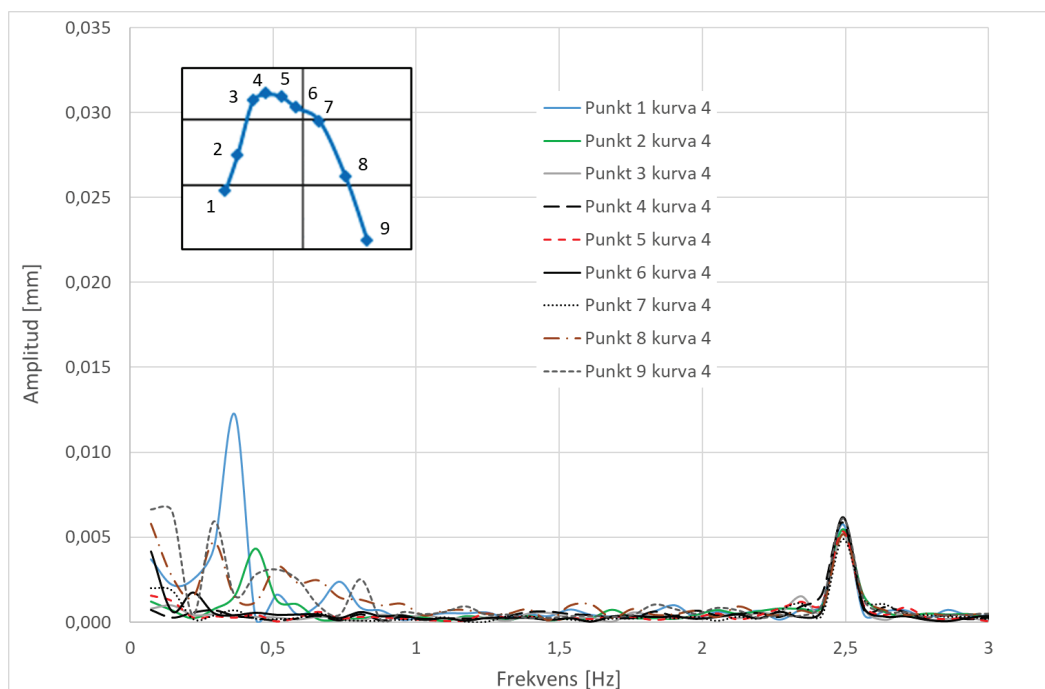
Mätningen visar att det var stökigt vid underöppnat aggregat och vid bästa verkningsgrad medan för överöppnat aggregat lugnar det ner sig betydligt. Vilket förklarar varför leverantören valt att kombinera för ett överöppnat aggregat vid denna löphjulsinkel.



Figur 42 Frekvensanalys för Åsen, vid 6 graders löphjulsinkel

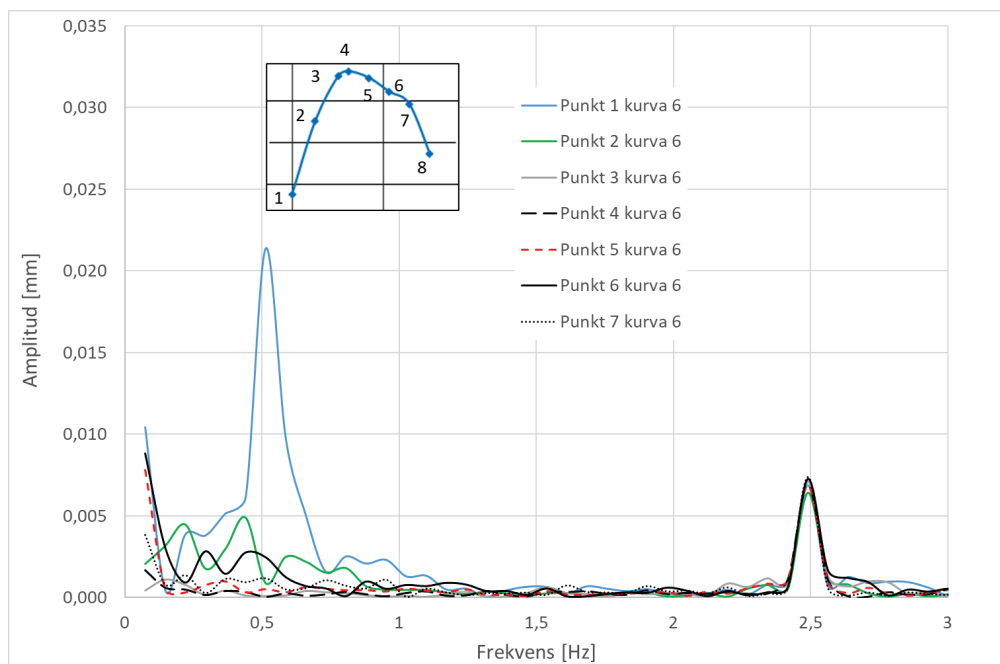
I Figur 43 redovisas FFT-analysen för de 4:e propellerkurvan (14 graders löphjulsinkel) se Figur 15 och Figur 16. För denna kurva var vibrationsnivåerna betydligt lägre jämfört med propellerkurvorna vid 2 respektive 6 graders löphjulsinkel. Kring bästa verkningsgrad, det vill säga punkterna 3-6 var det låga amplitudnivåer undantaget varvtalsfrekvensen.

Första punkten, den blå kurvan, uppmättes en tydlig topp vid 0,3 Hz, troligtvis orsakat av ett RVR.



Figur 43 Frekvensanalys för Åsen, vid 14 graders löphjulsinkel

I Figur 44 för den 6:e propellerkurvan (22 graders löphjulsinkel) se Figur 15 och Figur 16. För denna kurva var vibrationsnivåerna betydligt lägre jämfört med propellerkurvorna vid 2 respektive 6 graders löphjulsinkel. Kring bästa verkningsgrad, det vill säga punkterna 3-5 är det låga amplitudnivåer undantaget varvtalsfrekvensen.



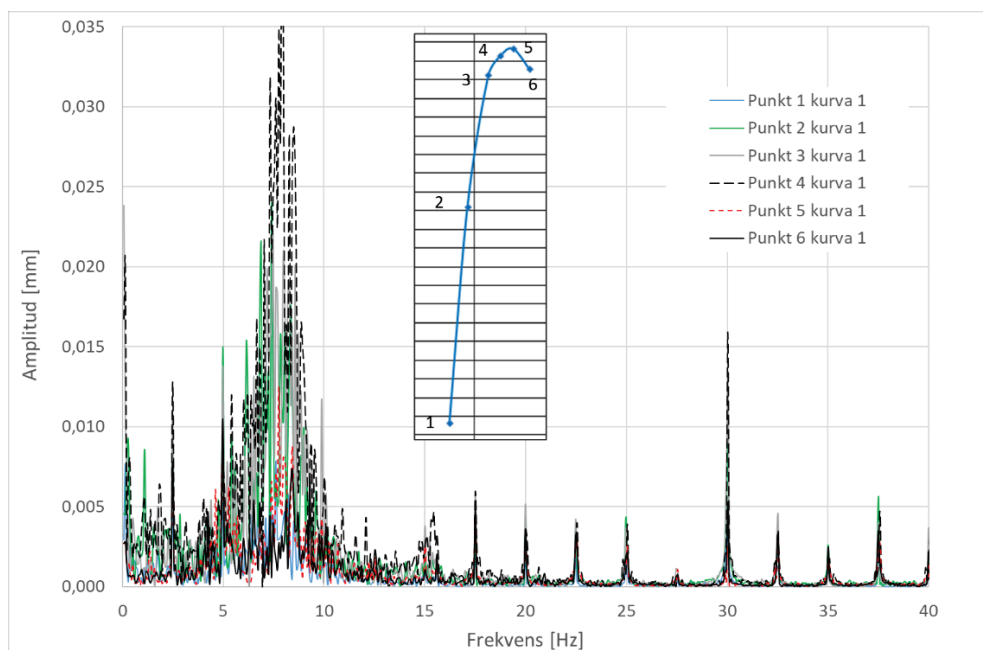
Figur 44 Frekvensanalys för Åsen, vid 22 graders löphjulsinkel

Första provpunkten, den blå kurvan, uppmättes en tydlig topp vid 0,5 Hz, troligtvis orsakat av ett RVR. Den 8:e punkten analyserades inte.

5.4.4 FFT-analys mellan 0-40 Hz

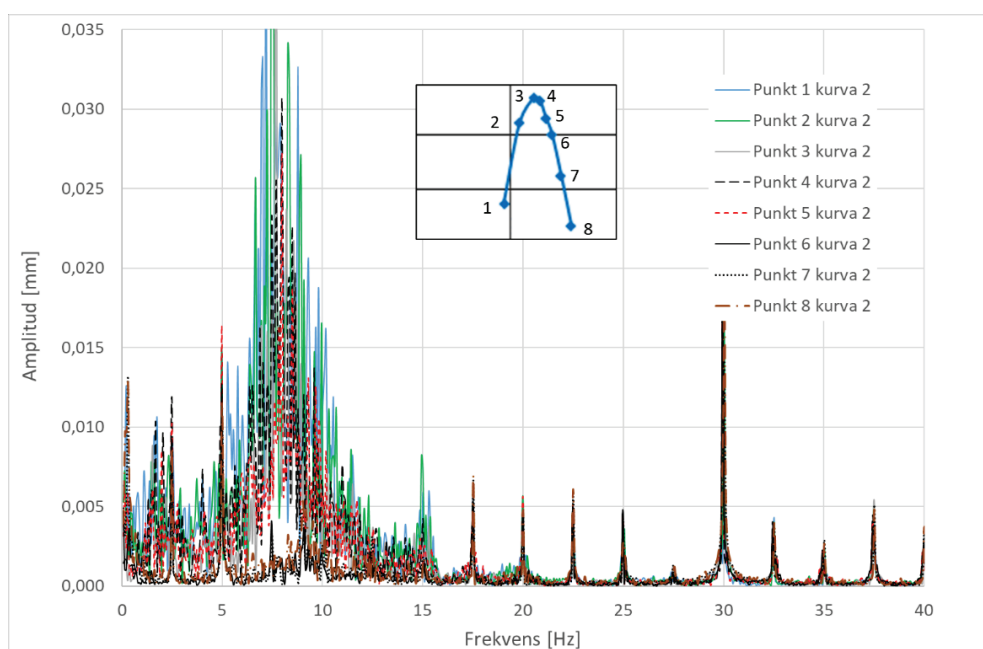
I Figur 45 till Figur 48 redovisas uppmätta nivåer för frekvenser upp till 40 Hz.

Första kurvan vid 2 graders löphjulsinkel var amplituderna höga för frekvenser mellan 5 och 10 Hz, speciellt vid bästa verkningsgrad punkt 4 och 5. Medan nivåerna sjönk för punkt 6, den heldragna svarta linjen.



Figur 45 Frekvensanalys (0-40 Hz) för Åsen, vid 2 graders löphjulsvinkel.

I Figur 46 redovisas resultatet för 2:a propellerkurvan med 6 graders löphjulsvinkel. Höga amplitudnivåer uppmättes för frekvenser mellan 0 och 15 Hz.

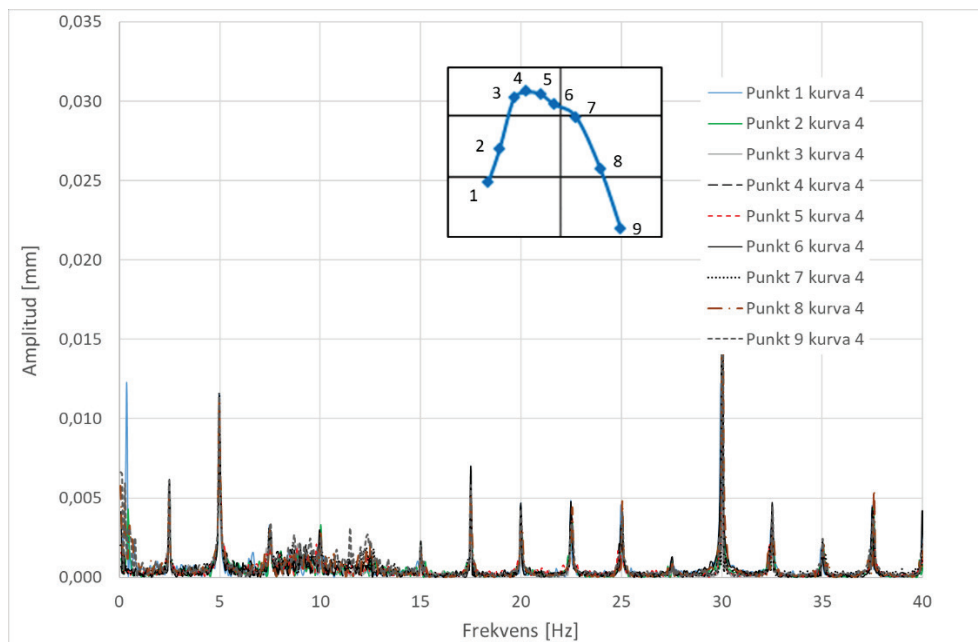


Figur 46 Frekvensanalys (0-40 Hz) för Åsen, vid 6 graders löphjulsvinkel.

För 6 graders löphjulsvinkel var det tydligt att överöppnat aggregat gav en lugnare gång. Provpunkterna 6-8 låg klart under övriga i området 0 till 15 Hz.

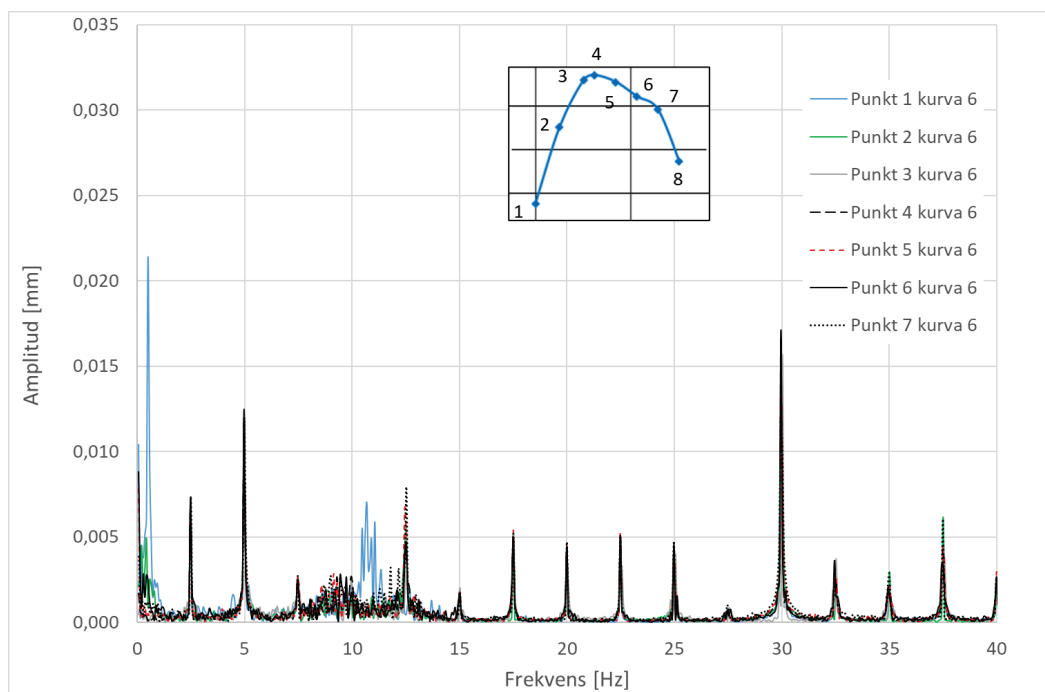
I Figur 47 redovisas FFT-analysen för 4:e propellerkurvan vid 14 graders löphjulsvinkel. Vid denna löphjulsvinkel motsvarar volymflödet cirka 60 m³/s och ligger i ett område där aggregatet normalt körs. Mest noterbart var att

amplitudnivåerna vid de olika frekvenserna var generellt lägre för denna vinkel jämfört med 2 och 6 graders löphjuls vinkel.



Figur 47 Frekvensanalys (0-40 Hz) för Åsen, vid 14 graders löphjuls vinkel.

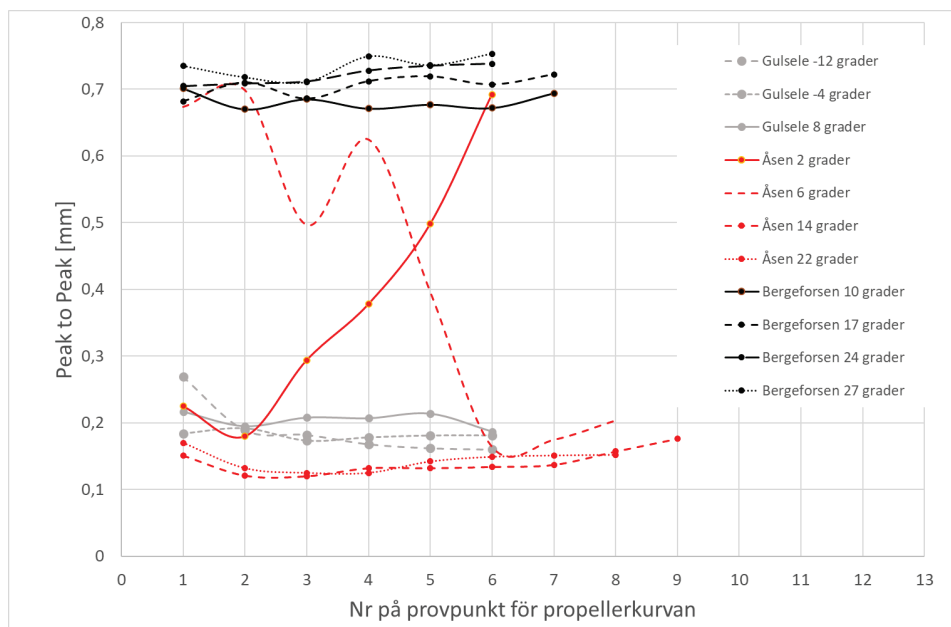
I Figur 48 redovisas FFT-analysen för frekvenser upp till 40 Hz för 22 graders löphjuls vinkel. Vid denna vinkel är flödet cirka 85 m³/s. Resultatet liknar det som uppmättes för 14 graders löphjuls vinkel. Vid underöppnat punkt 1 uppstår en störning mellan varvtalsfrekvenserna 10 och 12,5 Hz vilket motsvarar 4 ggr respektive 5 ggr varvtalet. Punkten 8 på denna propellerkurva analyserades inte.



Figur 48 Frekvensanalys (0-40 Hz) för Åsen, vid 22 graders löphjuls vinkel.

5.5 JÄMFÖRELSE MELLAN AGGREGATENS PEAK TO PEAK VÄRDE

I Figur 49 jämförs Peak to Peak värdet för de aggregat som ingick i studien. För Bergeforsen uppmättes ett klart högre Peak to Peak värde jämfört med de två övriga aggregaten. En förklaring kan vara B-givarens placering.

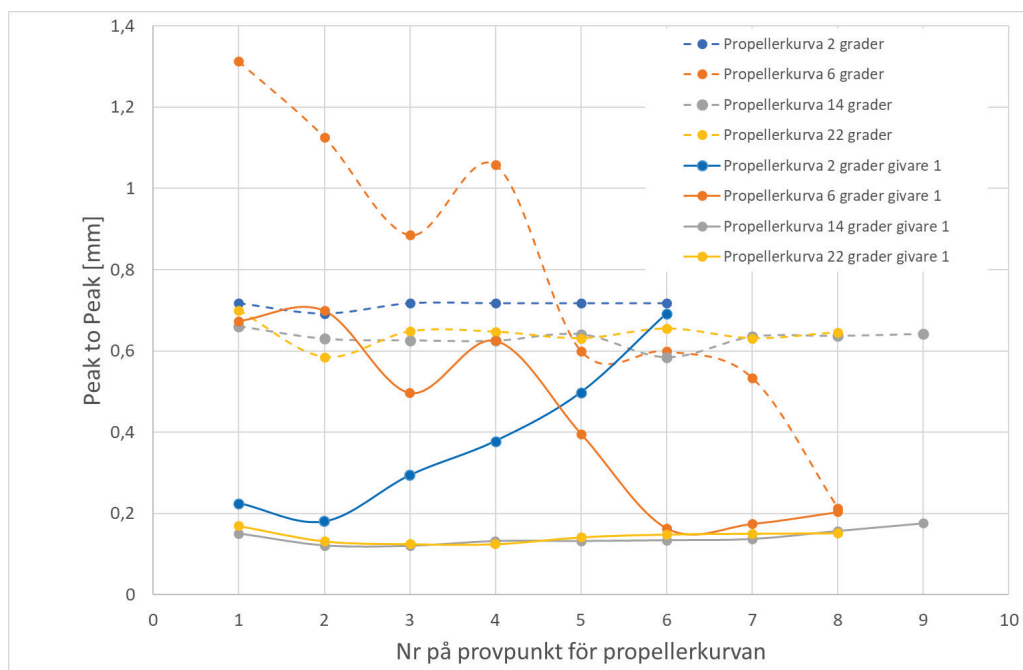


Figur 49 Jämförelse mellan aggregatens Peak to Peak värde.

5.6 JÄMFÖRELSE MELLAN B-GIVARES PLACERING FÖR ÅSEN

I Figur 38 och Figur 39 ses två olika placeringar av B-givare för Åsen. Figur 38 visar placeringen av den givare som använts i huvuddelen av den analys som redovisas i denna rapport.

I Figur 50 redovisas Peak to Peak värdena för Åsen som uppmättes av givare i Figur 39. Denna givare registrerar en betydligt större axiell rörelse jämfört med den i Figur 38. Intressant att notera är också att trenden på rörelsen för 2 graders löphjulsvinkel skiljer sig åt, givare 1 i Figur 38 uppmätte en ökad nivå på Peak to Peak värde i takt med att ledskenorna öppnades medan givare 2, den i Figur 39, har ett konstant värde. Trenden för övriga kurvor är densamma. Varför givarna uppmätte denna skillnad för 2 graders löphjulsvinkel har inte gått att utreda inom ramen för denna studie.



Figur 50

Jämförelse av Peak to Peak värde för Åsen vid olika placering av B-givare.

6 Slutsatser

6.1 KOMBINERING

Studien har visat att standardavvikelsen av effekten kan användas som mått för att hitta rätt kombineringspunkt. För de flesta av propellerkurvorna sammanföll punkten för lägsta standardavvikelse med rätt kombineringspunkt. I de fall där sambandet är otydligt kan metoden att studera var kurvan för pådrag som funktion av effekt har en ”knyck” vara till hjälp.

Effektmetoden har flera fördelar, effekten är lätt att mäta och finns tillgänglig på alla aggregat. Metoden kan användas i efterhand under förutsättning att alla samplade värden sparats och ge stöd i valet av kombineringspunkt då Winter-Kennedy metoden inte ger en tydlig indikering. Mättiden kan kortas ner jämfört med Winter-Kennedy metoden. När Effektmetoden används behöver endast effekten och fallhöjden mätas (i vissa fall räcker det endast med effekten) medan med Winter-Kennedy metoden måste även flödet mätas. För att detektera verkningsgradstoppen måste Winter-Kennedy metoden ha en noggrannhet på 0,5%, gärna bättre. Skillnaden i standardavvikelse mellan punkterna kring bästa verkningsgrad ligger på 10-300% för Effektmetoden vilket gör att denna metod inte behöver vara lika noggrann för att hitta kombineringspunkt.

Nackdelen är att metoden inte ger svar på hur verkningsgradskurvan ser ut då flödet inte mäts eller uppskattas.

Tryckmetoden ger generellt en något otydligare bild av var kombineringspunkt skall ligga jämfört med Effektmetoden. Tryckmetoden kan användas med gott resultat i flera fall, nackdelen är dock att det för många aggregat saknas tryckuttag i sugrörskonan.

Observera att denna studie har gjorts på Kaplanaggregat, hur väl Effektmetoden och Tryckmetoden fungerar på bulb eller S-turbiner är osäkert. När Effektmetoden används måste man försäkra sig om att effektsignalen inte är dämpad vilket kan vara fallet i vissa fall.

6.2 AXIELLA RÖRELSE RÖRELSELLER VIBRATIONER

Det har inte gått att finna ett samband mellan kombineringspunkt och låga vibrationer eller Peak to Peak rörelser. Utifrån utförda prov går det därför inte att ta fram underlag till en komplettering av IEC 20816-5. Analysen behöver utökas med fler aggregat.

Jämförs Peak to Peak nivåerna mellan aggregaten visade mätningarna att nivåerna i Bergforsen ligger klart över aggregaten i Gulsele och Åsen. Peak to Peak nivåerna låg för Bergforsen på 0,7 mm medan för Gulsele och Åsen låg Peak to Peak rörelsen på 0,2 mm. Möjligtvis skulle denna skillnad kunna användas för att ta fram acceptansnivåer till IEC 20816-5. Men osäkerhet kring den motyta som användes i Bergforsen för den axiella rörelsen gör att man skall vara försiktig med att dra slutsatser. Mer mätdata från fler aggregat måste studeras.

I övrigt har denna studie funnit att det är svårt att bedöma kvalitén på B-givarens motyta, dessutom är det komplicerat att fästa en givare utan att få med rörelser från andra delar av aggregatet exempelvis armkorsets rörelser.

För Åsen jämfördes Peak to Peak värden för två olika givare. Resultatet skilde sig åt, för den ena givaren låg amplitudnivån – Peak to Peak värdet – på 0,2 mm medan för den andra givaren visade en nivå på drygt 0,6 mm för de två större löphjulsvinklarna.

Erfarenheten från denna studie var att valet av motyta och placering av B-givare måste göras med omsorg. Bedömningen är dock att axelflänsen är att föredra som motyta till B-givaren.

7 Referenslista

- 1 **Anders Pettersson, Michel J. Cervantes and Mikael Sendelius** *"On the Use of Pressure Pulsations in Draft Tube to Determine the cam Curves on Kaplan Turbines"* Conference paper Hydro 2018.
- 2 **B Baidar, J Nicolle, B K Gandhi, M J Cervantes** *"Sensitivity of the Winter-Kennedy method to inlet and runner blade angle change on a Kaplan Turbine"* 29th IAHR Symp. On Hydraulic Machinery and System, 2018, Kyoto.
- 3 **Berhanu Mulu** Doctoral Thesis *"An Experimental and Numerical Investigation of a Kaplan Turbine Model"* Luleå University of Technology.
- 4 **A Soltani, F Engström, J-O Aidanpää and M Cervantes** *"An Indirect Measurement Methodology to Identify Load Fluctuations on Axial Turbine runner blades"* Journal Instruments & Instrumentation, (Sensors) December 2020.

STRÖMNINGSINDUCERANDE PULSATIONER

Forskarna har här undersökt axiella vibrationer hos Kaplanaturbiner och tagit fram kompletterande metoder för att bestämma kombineringsen av samma turbin.

Det viktigaste resultatet är att standardavvikelsen av effektpulsationerna kan användas som alternativ metod till traditionella sätt att ta fram kombineringsen på Kaplanaggregat.

Den här metoden innebär att provet kan förenklas och göras billigare vilket är attraktivt för mindre anläggningar. Det gör också att kombineringsen på stor-skaliga aggregat kan verifieras oftare. Metoden skulle kunna användas tillsammans med artificiell intelligens för att skapa algoritmer som kan styra kombineringsen av Kaplanaggregat adaptivt utan att behöva mäta fallhöjden eller ta fram en fallhöjdskombineringsen.

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



Energiforsk