

Modell for kjøremønsterrelaterte kostnader

Prosjektrapport

Arnt Ove Eggen



HydroCen

Forskningen i HydroCen (Norwegian Research Centre for Hydropower-Technology) skal bidra til å styrke Norges posisjon som en ledende vannkraftnasjon og sikre at norsk vannkraftsektor kan utnytte mulighetene i fremtidens fornybare energisystem. HydroCen har definert fire forskningsområder:

Vannkraftkonstruksjoner
Turbin og generatorer
Marked og tjenester
miljødesign

NTNU er vertsinstitusjon og hovedforskningspartner i HydroCen sammen med SINTEF Energi og Norsk institutt for naturforskning (NINA).

HydroCen har rundt 50 nasjonale og internasjonale partnere fra forskning, industri og forvaltning. HydroCen er et av sentrene i Forskningsrådets ordning med forskningssentre for miljøvennlig energi (FME).

Modell for kjøremønsterrelaterte kostnader

Prosjektrapport

Arnt Ove Eggen

Eggen, A.O, 2021. Modell for kjøremønsterrelaterte kostnader.
HydroCen rapport 24. Norwegian Research Centre for Hydropower Technology

Trondheim, desember 2021

ISSN: 2535-5392 (digital publikasjon, Pdf)

ISBN: 978-82-93602-25-5

© SINTEF 2021

Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

KVALITETSSIKRET AV

Eivind Solvang

FORSIDEBILDE

NØKKEWORD

Vannkraftverk, Start/stopp-kostnader

KONTAKTOPPLYSNINGER

HydroCen

Vannkraftlaboratoriet, NTNU

Alfred Getz vei 4

Gløshaugen,

Trondheim

www.HydroCen.no

Sammendrag

Eggen, A.O, 2021. Modell for kjøremønsterrelaterte kostnader.
HydroCen rapport 24. Norwegian Research Centre for Hydropower Technology.

Denne rapporten dokumenterer oppdateringer i den eksisterende modellen for beregning av gjennomsnittskostnad og marginalkostnad for start/stopp av pelton- og francisaggregater. Rapporten dokumenterer også videreutvikling av modellen med en mulighet til å inkludere varighet av stans samt anleggsdelenes tekniske tilstand ved beregning av marginalkostnader. Rapporten dokumenterer også en enkel videreutvikling av modellen for beregning av kostnader ifm. ramping, samt beregning av kostnader ved kjøring utenfor normalt driftsområde (dellast og overlast). Modellen er implementert i et Excel-regneark, der det også er gitt standardverdier som benyttes som utgangspunkt for beregningene. Det presiseres imidlertid at det ikke foreligger tilstrekkelig med empiriske data til å gi gode estimat på enkelte av disse standardverdiene. Det forutsettes derfor at Bruker selv vurderer om disse verdiene virker «rimelige» for det aktuelle anlegget.

Arnt Ove Eggen, Sem Sælands vei 11, 7034 Trondheim, arnt.o.eggen@sintef.no

Innhold

Sammendrag	3
1 Innledning	6
2 Overordnet kostnadsmodell	7
2.1 Symboler og indekser	7
2.2 Generelle kostnadselementer	8
2.2.1 Kalkulasjonsrente	8
2.2.2 Rehabiliteringskostnader	8
2.2.3 Driftskostnader	9
2.2.4 Optimalt rehabiliteringsintervall	9
2.3 Generelt om start/stopp-kostnader	10
2.3.1 Alternative tilnærminger	10
2.3.2 Driftstid	11
2.3.3 Designet total driftstid (<i>DTD</i>)	11
2.3.4 Konvertering av ekvivalent driftstid ΔD til redusert levetid ΔL (i kalendertid)	12
2.4 Gjennomsnittskostnad for en ekstra start/stopp	13
2.5 Marginalkostnad for en ekstra start/stopp	14
3 Kostnadselementer start/stopp	16
3.1 Komponentuavhengige kostnader	17
3.1.1 Kostnad for arbeid ifm. en normal start/stopp	17
3.1.2 Kostnad for vanntap ifm. en normal start/stopp	17
3.1.3 Kostnad pga. feil ifm. start/stopp	18
3.2 Kostnader knyttet til hovedstengeventil	19
3.2.1 Kostnad for forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil	19
3.2.2 Kostnad for levetidsreduksjon for hovedstengeventil	20
3.3 Kostnader knyttet til turbin	22
3.3.1 Kostnadsgrunnlag for turbin	22
3.3.2 Kostnad for forebyggende vedlikehold av turbin	23
3.3.3 Kostnad for rehabilitering av turbin	24
3.3.4 Kostnad for levetidsreduksjon for turbin	25
3.4 Kostnader knyttet til generator	26
3.4.1 Kostnad for forebyggende vedlikehold av generatorens mindre komponenter	26
3.4.2 Kostnad for overhaling (forebyggende vedlikehold) av generator	26
3.4.3 Kostnad for levetidsreduksjon for statorvikling	27
3.4.4 Kostnad for levetidsreduksjon for stator blikkpakke	28
3.4.5 Kostnad for levetidsreduksjon for polvikling	29
3.5 Kostnad knyttet til andre komponenter og eventuelle andre kostnader	30
3.6 Justering av ekvivalent driftstid avhengig av teknisk løsning	30
3.7 Justering av ekvivalent driftstid avhengig av varighet av stans	31
3.8 Justering av ekvivalent driftstid pga. registrert teknisk tilstand	33
4 Kostnader for kjøring utenfor normalt driftsområde	35
4.1 Levetidsreduksjon pga. store lastendringer (ramping)	35
4.2 Modellering av normallast, dellast og overlast	35
4.3 Levetidsreduksjon pga. en time kjøring på dellast	36
4.4 Levetidsreduksjon pga. en time kjøring på overlast	37
4.5 Marginalkostnader pga. en time kjøring på dellast eller overlast	37
5 Litteraturreferanser	38
A Vedlegg 1 Skjermbilder fra regnearket Kjøremønsterrelaterte kostnader	39

B Vedlegg 2 Grenseverdibetraktninger for kjøremønsterrelaterte kostnader 49

1 Innledning

Denne rapporten er utarbeidet i HydroCen WP3.2 *Remaining useful life, failure probability*.

Målet med denne aktiviteten er å utarbeide en modell for kjøremønsterrelaterte kostnader, og å implementere dette i et Excel-regneark. Kostnader som beregnes i regnearket kan i neste omgang benyttes ifm. produksjonsplanlegging.

En grunnleggende antakelse er at et kjøremønster som avviker fra designspesifikasjonen medfører økte påkjenninger og økt degradering (f.eks. økt slitasje) på produksjonsanlegget, noe som igjen kan medføre redusert levetid (fremskyndet rehabilitering¹), og dermed også økte rehabiliteringskostnader. Dette er kostnader som man ønsker å ta inn som en del av produksjonsplanleggingen slik at produksjonsplanlegger kan ta veloverveide valg der han veier inntekt i dag mot forventede kostnader i fremtiden.

Det teoretiske fundamentet for beregning av start/stopp-kostnader er beskrevet i [1]. I prosjektet "Start/stopp og teknisk-økonomiske konsekvenser" ble det i 2002 laget et regneark for beregning av start/stopp-kostnader for vannkraftaggregater. Som en del av prosjektet "Verdiskapende vedlikehold innen kraftproduksjon" ble dette regnearket i 2010 oppdatert og dokumentert i [2]. Modellen er laget for "et typisk norsk vannkraftverk" med hovedventil og pelton- eller francisturbin, og med typisk 50–200 start/stopp pr. år. Denne rapporten bygger videre på modellen som er beskrevet i [2]. Mange likninger i denne rapporten refererer til tilsvarende likninger i [1] og [2], men det presiseres at de ikke alltid er identiske.

Utgangspunktet for et anleggs *forventede levetid* er maksimalt utnyttbar driftstid gitt av bl.a. design, dvs. *designet total driftstid (DTD)*, eller kontinuerlig kjøring (uten driftstans) på tilnærmet optimalt driftspunkt. For beregning av gjennomsnittlig start/stopp-kostnad er det en forutsetning at anleggets *forventede levetid* justeres for forventet antall start/stopp, og at driftsstrategien (årlig kjøremønster) er uendret i anleggets *forventede levetid*. Det antas videre at kostnader knyttet til andre typer kjøremønster også kan håndteres på tilsvarende måte.

Det vises også til prosjektnotatet *Modell for teknisk-økonomisk analyse av kjørestategier basert på teknisk tilstand* (AN 19.12.37) for mer bakgrunnsinformasjon om aktuelle driftsområder/kjøremønster, skadetyper, levetidsmodellering, osv.

¹ Med *rehabilitering* menes i denne rapporten *forebyggende vedlikehold som utføres for å bringe en enhet tilbake til tilnærmet nytilstand*. Etter en rehabilitering antas anlegget derfor å være "som nytt".

2 Overordnet kostnadsmodell

2.1 Symboler og indekser

Følgende symboler (sammen med indekser for bl.a. anleggsdel/komponent) benyttes:

R	rehabiliteringskostnad [kroner]
V	kostnad for <u>forebyggende</u> vedlikehold [kroner]
K	annen kostnad [kroner]
M	marginalkostnad [kroner pr. start/stopp]
G	gjennomsnittskostnad [kroner pr. start/stopp]
D	driftstid (NB ikke kalendertid) [timer]
ΔD	ekvivalent driftstid pr. start/stopp (NB ikke kalendertid) [timer]
L	levetid (kalendertid) [år]
ΔL	ekvivalent levetidsreduksjon pr. start/stopp (kalendertid) [timer]
SS	start/stopp [-]

Følgende symboler inngår i mange av likningene, men er ofte utelatt i forklaringene:

r	kalkulasjonsrente ved årlig forretning [-]
r_k	kalkulasjonsrente ved kontinuerlig forretning [-]
i	kostnadsindeks [-]; 1,00 dersom analyseår er det samme som referanseår for kostnadselementet. I regnearket er flere inndata referert kostnadsåret 2000, noe som gir en estimert indeks på 1,5325 for analyseåret 2021 dersom KPI benyttes som indeks. I regnearket bør kostnadsgrunnlaget om mulig referere til analyseårets faktiske kostnader slik at i settes til 1,0. I regnearket er aktuelle celler markert med egen bakgrunnsfarge.
n	antall start/stopp pr. år [-]
P	turbineffekt [MW]
T_R	rehabiliteringsintervall (kalendertid) [år]

2.2 Generelle kostnadselementer

For mer detaljert utledning, samt diskusjon om følsomhet i underliggende kostnadselementer, vises det til [1] og [2]. Alle kostnadselementer antas å være kjente.

2.2.1 Kalkulasjonsrente

Vanligvis forholder man seg til en diskret, årlig rente der kostnader påløper ved slutten av året. I mye litteratur, inkl. [1], benyttes imidlertid kontinuerlig rente. For små verdier av kalkulasjonsrenten er faktorene tilnærmet like. For å oppnå nøyaktig samme beregningsresultat bør kalkulasjonsrente i likninger med kontinuerlig rente justeres iht. følgende sammenheng:

$$(1 + r)^T = e^{rkT} \Rightarrow r_k = \ln(1 + r) \quad (2.1)$$

der

T diskonteringsintervall (kalendertid) [år]

2.2.2 Rehabiliteringskostnader

Nåverdien (*present value*) av en enkelt fremtidig rehabiliteringskostnad er

$$PV(r, T, R) = R \cdot (1 + r)^{-T} = R \cdot e^{-rkT} \quad (2.2)$$

der

R rehabiliteringskostnad [kroner]

Hvis man antar en uendelig planhorisont med en uendelig rekke med fremtidige rehabiliteringer med intervall på T_R år inkl. en rehabilitering ved analysetidspunktet, er nåverdien av alle rehabiliteringskostnader summen av en uendelig geometrisk rekke.

$$PV(r, T_R, R) = \sum_{i=0}^{\infty} R \cdot (1 + r)^{-iT_R} = R \cdot \frac{1}{1 - (1+r)^{-T_R}} = R \cdot \frac{1}{1 - e^{-rkT_R}} \quad (2.3)$$

der

T_R rehabiliteringsintervall (kalendertid) [år]

Hvis man ikke regner med en rehabilitering ved analysetidspunktet, f.eks. ifm. Idriftsettelse, blir nåverdien

$$PV(r, T_R, R) = R \cdot \frac{1}{1 - (1+r)^{-T_R}} - R = R \cdot \frac{1}{(1+r)^{T_R} - 1} = R \cdot \frac{1}{1 - e^{-rkT_R}} - R = R \cdot \frac{1}{e^{rkT_R} - 1} \quad (2.4)$$

2.2.3 Driftskostnader

Nåverdien av faste årlige driftskostnader (som påløper ved slutten av året) i løpet av et rehabiliteringsintervall er gitt av

$$PV(r, T_R, K) = \sum_{i=1}^{T_R} K \cdot (1+r)^{-i} = K \cdot \frac{1-(1+r)^{-T_R}}{r} = K \cdot \frac{1-e^{-rkT_R}}{r} \quad (2.5)$$

Nåverdien av variable årlige driftskostnader i løpet av et rehabiliteringsintervall er på tilsvarende måte gitt av

$$PV(r, T_R, K(t)) = \int_{t=0}^{t=T_R} K(t) \cdot e^{-rkt} dt \quad [1] (3.3)$$

der

- $K(t)$ driftskostnad, inkl. faste kostnader, vanntap, vedlikeholdskostnader, forventede havarikostnader, kostnader pga. feilsituasjoner [kroner/år]
 t kalendertid (ikke driftstid) [år]

Nåverdien av variable årlige driftskostnader i løpet av alle fremtidige rehabiliteringsintervall er på tilsvarende måte gitt av

$$PV(r, T_R, K(t)) = \frac{1}{1-e^{-rkT_R}} \cdot \int_{t=0}^{t=T_R} K(t) \cdot e^{-rkt} dt \quad [1] (3.4)$$

2.2.4 Optimalt rehabiliteringsintervall

Dersom man antar at fremtidige inntekter er konstante, reduseres problemet til en kostnadsminimalisering der det optimale rehabiliteringsintervallet tilfredsstiller følgende likning:

$$PV(T_R^*) = \min[PV_R(T) + PV_K(T)] \quad (2.6)$$

der

- T_R^* optimalt rehabiliteringsintervall (kalendertid) [år]
 $PV(T_R^*)$ nåverdi av alle fremtidige rehabiliteringskostnader og driftskostnader for optimalt rehabiliteringsintervall [kroner]

2.3 Generelt om start/stopp-kostnader

2.3.1 Alternative tilnæringer

En grunnleggende antakelse er at en driftstilstand utenfor det normale driftsområdet medfører økte påkjenninger på anlegget, noe som igjen medfører økt degradering i en eller annen form.

De totale kostnadene for en gitt driftsstrategi med n start/stopp er i denne sammenhengen summen av tilhørende rehabiliteringskostnader R , vedlikeholdskostnader V og sviktkostnader S . Kostnaden for en ekstra start/stopp mer enn et referansekjøremønster kan i prinsippet beregnes med utgangspunkt i differansen mellom kostnader for de to driftsstrategiene dividert på differansen mellom antall start/stopp.

$$K = \frac{(R_i + V_i + S_i) - (R_0 + V_0 + S_0)}{n_i - n_0} = \frac{\Delta R + \Delta V + \Delta S}{\Delta n} \quad [2] \quad (2.5)$$

Dette gir følgende generelle sammenheng mellom differanse i rehabiliteringskostnader ΔR og differanse i sviktkostnader ΔS :

1. $\Delta R = 0, \Delta S > 0$: Uendret rehabilitering medfører økt sviktkostnad
2. $\Delta R > 0, \Delta S > 0$: Noe hyppigere rehabilitering kompenserer delvis for økt sviktkostnad
3. $\Delta R > 0, \Delta S = 0$: Hyppigere rehabilitering forhindrer økt sviktkostnad

Estimering av kjøremønsterrelaterte kostnader kan gjøres med utgangspunkt i to prinsipielt ulike tilnæringer:

1. **Kjøremønsteret medfører redusert levetid.** De ekstra påkjenningene medfører en reduksjon i forventet teknisk levetid (reinvesteringstid), med tilhørende hyppigere rehabilitering. Det forutsettes at denne levetidsreduksjonen ikke kompenseres med økt forebyggende vedlikehold. Utdfordringen er å gi fornuftige anslag på hvor mange timer ΔL hver ekstra påkjenning forkorter levetiden med.
2. **Kjøremønsteret medfører økt vedlikehold.** De ekstra påkjenningene kompenseres med hyppigere eller mer kostnadskrevede forebyggende vedlikehold for å opprettholde forventet teknisk levetid. Utdfordringen er å gi fornuftige anslag på kostnaden ΔV for dette ekstra vedlikeholdet.

Den etterfølgende modelleringen tar utgangspunkt i alternativ 1, dvs. en antakelse om at endret kjøremønster (fra det "normale") medfører redusert levetid og at $\Delta V = 0$, dvs. at normalt planlagt tilstandskontroll og vedlikehold ikke endres pga. et økt antall start/stopp.

2.3.2 Driftstid

Etter som et anlegg normalt ikke er i drift hele tiden, er det viktig å skille mellom driftstid og kalendertid. Ekvivalent driftstid ved tidspunkt t (med konstant start/stopp-intensitet) er gitt av

$$d(t|\alpha, n, \Delta D) = \alpha \cdot t + n \cdot \Delta D \cdot t = (\alpha + n \cdot \Delta D) \cdot t \quad [1] \text{ (V1.1)}$$

der

α	andel av kalendertid anlegget er i drift
t	kalendertid
n	antall start/stopp pr. tidsenhet (start/stopp-intensitet)
ΔD	ekvivalent driftstid pr. start/stopp [(drifts)timer]

En antakelse her er altså at påkjenningsene ved en start/stopp-sekvens tilsvarer en driftstid på ΔD timer, dvs. at en start/stopp-sekvens reduserer tilgjengelig driftstid med ΔD timer.

Ekvivalent driftstid for et gitt referansekjøremønster med et gitt rehabiliteringsintervall T_R er gitt av

$$d(T_R|\alpha_{ref}, n_{ref}, \Delta D) = \alpha_{ref} \cdot 24 \cdot 365 \cdot T_R + n_{ref} \cdot \Delta D \cdot T_R = (\alpha_{ref} \cdot 24 \cdot 365 + n_{ref} \cdot \Delta D) \cdot T_R \quad [\text{timer}] \text{ (2.7)}$$

der

α_{ref}	designet driftsandel pr. år [-]
T_R	rehabiliteringsintervall (kalendertid) [år]
n_{ref}	designet antall start/stopp pr. år [-]
ΔD	ekvivalent driftstid pr. start/stopp [(drifts)timer]

2.3.3 Designet total driftstid (DTD)

En enhets forventede totale driftstid (frem til rehabilitering) antas å være konstant og bestemt av enhetens design. Designet total driftstid (DTD) kan forstås som forventet tid til rehabilitering ved kontinuerlig kjøring (uten driftsstans) innenfor det normale driftsområdet. Det er her underforstått at DTD tar høyde for "normal slitasje".

Et aggregat kjøres normalt ikke kontinuerlig, men har en viss driftsandel i løpet av et kalenderår. I tillegg antas at start/stopp, ramping, samt kjøring utenfor det normale driftsområdet medfører ekstra påkjenninger med tilhørende degradering som reduserer den effektive driftstiden frem til rehabilitering. For et gitt design med en gitt DTD og et gitt kjøremønster (med en gitt driftsandel og antall start/stopp pr. år) får man følgende sammenheng mellom rehabiliteringsintervallet og DTD :

$$DTD = \alpha_{ref} \cdot 24 \cdot 365 \cdot T_R + n_{ref} \cdot \Delta D \cdot T_R = (\alpha_{ref} \cdot 24 \cdot 365 + n_{ref} \cdot \Delta D) \cdot T_R \quad [\text{timer}]$$

$$\Rightarrow T_R = \frac{DTD}{\alpha_{ref} \cdot 24 \cdot 365 + n_{ref} \cdot \Delta D} \quad [\text{år}] \quad (2.8)$$

2.3.4 Konvertering av ekvivalent driftstid ΔD til redusert levetid ΔL (i kalendertid)

Kostnader beregnes i kalendertid, og den ekvivalente driftstiden ΔD konverteres derfor til en ekvivalent redusert levetid ΔL i kalendertid.

$$\Delta L = \frac{\Delta D}{\alpha_0 \cdot 24 + n_0 \cdot \Delta D} \cdot 24 = \frac{\Delta D}{\frac{t_{drift}}{8760} \cdot 24 + \frac{n}{365} \cdot \Delta D} \cdot 24 \quad [\text{timer}] \quad [1] \quad (4.15)$$

der

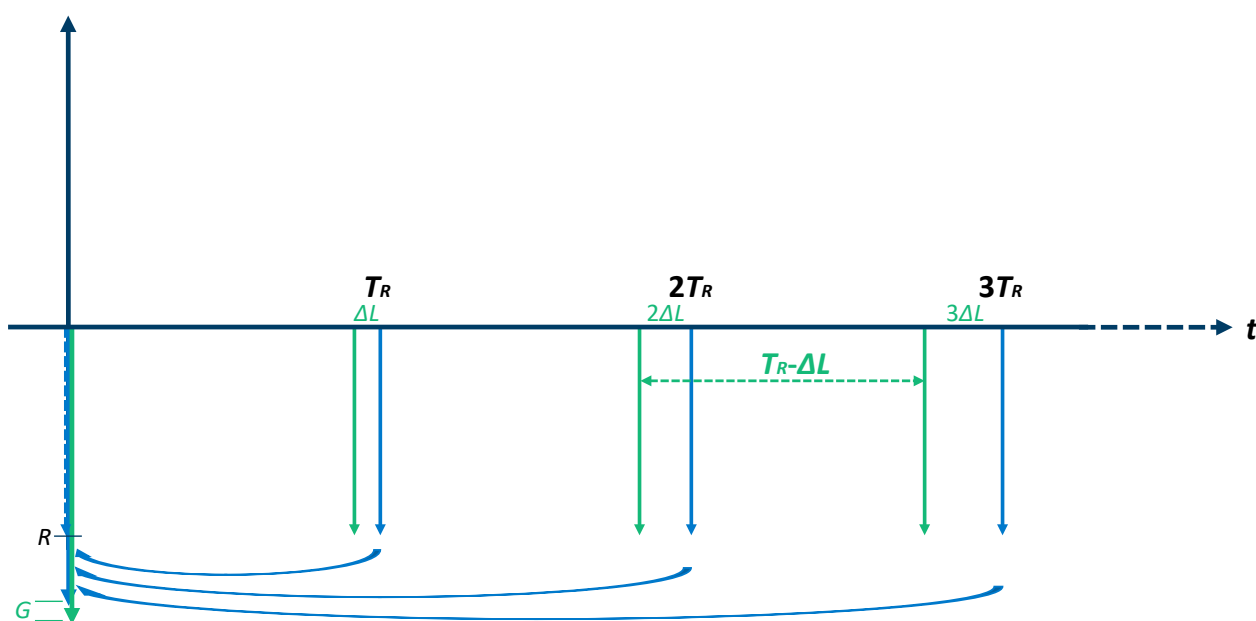
α_0	driftsandel pr. døgn [-]
n_0	antall start/stopp pr. døgn [-]
t_{drift}	antall driftstimer pr. år [timer]
n	antall start/stopp pr. år [-]

NB! Ved svært høy driftstid og/eller høyt antall start/stopp, eller dersom den ekvivalente driftstiden er høy, vil denne likningen gi en redusert levetid som er lavere enn den ekvivalente driftstiden. I slike tilfeller blir redusert levetid satt lik ekvivalent driftstid, dvs. at $\Delta L = \Delta D$.

2.4 Gjennomsnittskostnad for en ekstra start/stopp

Gjennomsnittskostnader for en start/stopp er relevant å benytte dersom en ekstra start/stopp er en konsekvens av en varig endret kjørestrategi (som vil gjentas i alle fremtidige rehabiliteringsintervall). Dette er relevant ifm. investeringsanalyser og langsiktig produksjonsplanlegging.

Gjennomsnittskostnaden for en ekstra start/stopp er gitt av differansen mellom kapitaliserte kostnader med og uten den ekstra stansen, der også alle fremtidige rehabiliteringsintervall reduseres med ΔL , mens rehabiliteringstidspunkt fremskyndes med ΔL for hver rehabilitering.



Figur 1 Gjennomsnittskostnad for en ekstra start/stopp

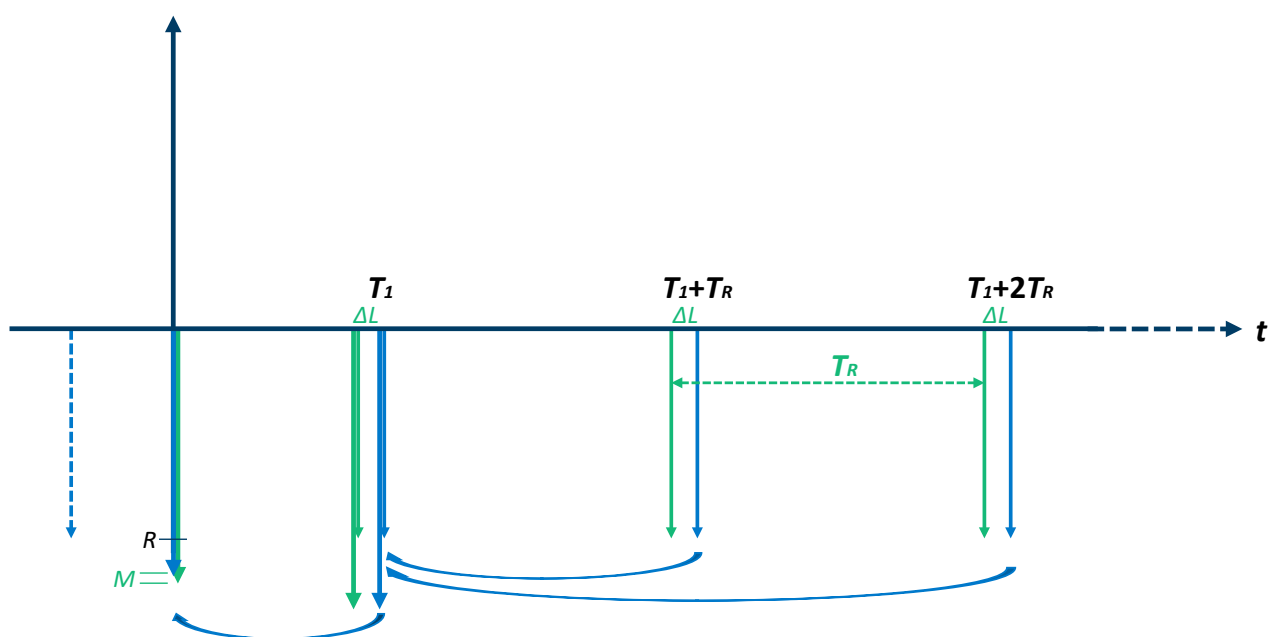
Gjennomsnittskostnad for en ekstra start/stopp er gitt av

$$G = R \cdot \frac{e^{-rk(T_R - \frac{\Delta L}{8760})} - e^{-rkT_R}}{(1 - e^{-rkT_R}) \cdot (1 - e^{-rk(T_R - \frac{\Delta L}{8760})})} \quad [1] (4.6)$$

2.5 Marginalkostnad for en ekstra start/stopp

Marginalkostnader for en start/stopp er relevant å benytte dersom en ekstra start/stopp er en konsekvens av en kortsiktig endring av kjørestregetgi (som ikke vil gjentas i alle fremtidige rehabiliteringsintervall), f.eks. for å beregne kostnadsdekning ifm. kortsiktig produksjonsplanlegging mot markeder som regulerkraftmarkedet.

Marginalkostnaden for en ekstra start/stopp er gitt av differansen mellom kapitaliserte kostnader med og uten den ekstra stansen, der alle fremtidige rehabiliteringsintervall forblir uendret, mens alle rehabiliteringstidspunkt fremskyndes med ΔL .



Figur 2 Marginalkostnad for en ekstra start/stopp

Marginalkostnad for en ekstra start/stopp er gitt av

$$M = R \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k T_R}} \cdot e^{-r_k \left(T_1 - \frac{\Delta L}{8760}\right)} - R \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k T_R}} \cdot e^{-r_k T_1}$$

$$M = R \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k T_R}} \cdot \left(e^{r_k \frac{\Delta L}{8760}} - 1 \right) \cdot e^{-r_k T_1} \quad [1] (4.11)$$

$$M = R \cdot \frac{1}{1 - (1+r)^{-T_R}} \cdot (1+r)^{-\left(T_1 - \frac{\Delta L}{8760}\right)} - R \cdot \frac{1}{1 - (1+r)^{-T_R}} \cdot (1+r)^{-T_1}$$

$$M = R \cdot \frac{1}{1 - (1+r)^{-T_R}} \cdot \left((1+r)^{-\frac{\Delta L}{8760}} - 1 \right) \cdot (1+r)^{-T_1}$$

der

T_1 tid til første/neste rehabilitering (kalendertid) [år]

I [1] er det benyttet at for små verdier av ΔL er $e^{-r_k \frac{\Delta L}{8760}} - 1 \approx r_k \cdot \frac{\Delta L}{8760}$, noe som gir

$$M = R \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k T_R}} \cdot r_k \cdot \frac{\Delta L}{8760} \cdot e^{-r_k T_1} \quad [1] (4.12), [2] (2.4)$$

Denne forenklingen er ikke benyttet i den oppdaterte modellen.

Nedre grense for marginalkostnad for en start/stopp er gitt av

$$M_{min} = EA \cdot \Delta D \cdot e^{-r_k T_1} = (PV_R + PV_C) \cdot r_k \cdot \Delta D \cdot e^{-r_k T_1} \quad [1] (3.8), [2] (2.3)$$

Udiskontert kostnad pr. start/stopp:

$$K_{st} = \frac{1}{\Delta n} \cdot \left(\frac{R}{T_{\Delta n}} - \frac{R}{T_0} \right) = \frac{R}{T_0} \cdot \frac{\Delta D}{DT_0} \quad [1] (4.1)$$

der

Δn antall ekstra start/stopp pr. år [-]

3 Kostnadselementer start/stopp

Start/stopp-modellen er laget med utgangspunkt i "et typisk norsk vannkraftverk" med hovedventil og pelton- eller francisturbin, med typisk 50–200 start/stopp pr. år, og omfatter følgende kostnadselementer:

1. Arbeid ifm. en normal start/stopp
2. Vanntap ifm. en normal start/stopp
3. Feil ifm. start/stopp
4. Forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil
5. Levetidsreduksjon for hovedstengeventil
6. Forebyggende vedlikehold av turbin
7. Rehabilitering av turbin
8. Levetidsreduksjon for turbin løpehjul
9. Forebyggende vedlikehold av generatorens mindre komponenter
10. Overhaling (forebyggende vedlikehold) av generator
11. Levetidsreduksjon for statorvikling
12. Levetidsreduksjon for stator blikkpakke
13. Levetidsreduksjon for polvikling
14. Brytere
15. Annet ifm. start/stopp

Den etterfølgende beskrivelsen av kostnadselementene tar utgangspunkt i tilsvarende beskrivelse i Vedlegg 1 i [2], og det vises til denne for nærmere forklaringer. Modellen forutsetter at kostnadselementene er enkeltkostnader eller faste årlige kostnader. Ved en fremtidig utvidelse kan man vurdere andre typer kostnadselementer som konstant økende årlige kostnader (konstant økning) og/eller prosentvis økende årlige kostnader (geometrisk økning).

Modellen håndterer at rehabilitering av generator-komponenter tas samtidig når aggregatet likevel er stanset. Levetiden for enkelte komponenter vil da ikke nødvendigvis bli fullt utnyttet. Økt sviktsannsynlighet pga. økt antall start/stopp er implisitt tatt hensyn til i estimatet for redusert levetid.

Modellen er implementert i et Excel regneark, og omfatter i utgangspunktet mange inndata. Som en støtte til en bruker er det for de fleste parametrene gitt standardverdier (både i rapporten og i regnearket). Som utgangspunkt for spesifisering av standardverdiene er det definert et "referanseanlegg" på 150 MW med en årlig driftstid på 5000 timer og med 150 start/stopp pr. år. Standardverdiene er bl.a. gitt i arket "Referanseanlegg" i regnearket (se også Vedlegg 1).

Det presiseres at disse standardverdiene er *foreslåtte*, og ikke nødvendigvis *anbefalte*, verdier, og at det er egne likninger som tilpasser disse standardverdiene til det aktuelle anlegget. Det er derfor viktig at foreslåtte standardverdier, eller avledede verdier, endres dersom man har tilgang til bedre data for det aktuelle anlegget. Dette gjelder spesielt for parametre knyttet til korreksjon for varighet av stans og teknisk tilstand, samt for beregning av kostnader knyttet til ramping og kjøring utenfor normalt driftsområde.

3.1 Komponentuavhengige kostnader

3.1.1 Kostnad for arbeid ifm. en normal start/stopp

Gjennomsnittlig antall arbeidstimer pr. start/stopp

$$t_{\text{arbeid}} = t_{\text{arbeid},150} \cdot \left(0,5 + 0,5 \cdot \frac{P}{150} \right) \quad [2] \text{ (V1.2)}$$

der

t_{arbeid} gjennomsnittlig antall arbeidstimer pr. start/stopp [timer]
 $t_{\text{arbeid},150}$ gjennomsnittlig antall arbeidstimer pr. start/stopp [timer]; standardverdi: 2 timer

Kostnad for arbeid ifm. en normal start/stopp

$$M_{\text{normal start}} = G_{\text{normal start}} = k_{\text{arbeidstime}} \cdot t_{\text{arbeid}} \quad [2] \text{ (V1.1)}$$

der

$M_{\text{normal start}}$ marginal arbeidskostnad for en normal start/stopp [kroner]
 $G_{\text{normal start}}$ gjennomsnittlig arbeidskostnad for en normal start/stopp [kroner]
 $k_{\text{arbeidstime}}$ kostnad for en arbeidstime [kroner/time]; standardverdi: 1000 kroner/time

3.1.2 Kostnad for vanntap ifm. en normal start/stopp

$$M_{\text{vanntap}} = G_{\text{vanntap}} = c_{\text{vanntap}} \cdot k_{\text{kraftpris}} \cdot P \quad [2] \text{ (V1.4)}$$

der

M_{vanntap} marginalkostnad for vanntap [kroner]
 G_{vanntap} gjennomsnittskostnad for vanntap [kroner]
 c_{vanntap} vanntapskonstant [-]
 pelton: $c_{\text{vanntap}} = 2,08 \text{ kWh/MW}$
 francis, høytrykk ($H > 150 \text{ m}$): $c_{\text{vanntap}} = 4,01 \text{ kWh/MW}$
 francis, lavtrykk ($H \leq 150 \text{ m}$): $c_{\text{vanntap}} = 7,00 \text{ kWh/MW}$
 $k_{\text{kraftpris}}$ kraftpris [kroner/kWh]; standardverdi: 0,50 kroner/kWh [3].

Som et alternativ finnes det også eksisterende regnearkverktøy som beregner vanntap ved start og stopp av en turbin utstyrt med hovedstengeventil.

Peltonturbin

Det vanntap som beregnes er:

- vanntap ifm. akselerasjon og innfasing av aggregatet.
- vanntap ifm. at aggregatet laster opp til det normale driftsområdet.
- vanntap ved stopp, når aggregatet laster ned fra det normale driftsområdet.

Det beregnes ikke vanntap for oppfylling eller tømning av noen deler av aggregatets vannveier, og det forutsettes at alle nåler er tette.

Francisturbin

Det vanntap som beregnes er:

- vanntap pga. lekkasje gjennom ledeapparatet fra og med hovedstengeventilen begynner å åpne frem til tidspunktet når ledeapparatet begynner å åpne.
- vanntap ifm. akselerasjon av aggregatet og innfasing.
- vanntap ifm. at aggregatet laster opp til det normale driftsområdet.
- vanntap ved stopp, når aggregatet laster ned fra det normale driftsområdet.
- vanntap pga. lekkasje gjennom ledeapparatet fra og med ledeapparatet er lukket til hovedstengeventilen er lukket.

Det beregnes ikke vanntap for oppfylling eller tømning av noen deler av aggregatets vannveier. Marginalkostnaden for vanntap kan ev. også beregnes av programvare for korttidsproduksjonsplanlegging.

3.1.3 Kostnad pga. feil ifm. start/stopp

$$M_{feil} = G_{feil} = p_{feil} \cdot K_{feil} = p_{feil} \cdot (K_{arbeid,feil} + K_{utilgjengelighet,feil} + K_{andre,feil} \cdot i)$$

$$= p_{feil} \cdot (t_{arbeid,feil} \cdot k_{arbeidstime} + t_{utilgjengelighet,feil} \cdot k_{utilgjengelighet,feil} \cdot P + K_{andre,feil} \cdot i) [2] (V1.3)$$

der

M_{feil}	marginalkostnad pga. feil ifm. start/stopp [kroner]
G_{feil}	gjennomsnittskostnad pga. feil ifm. start/stopp [kroner]
p_{feil}	sannsynlighet for feil ifm. start/stopp [-]; standardverdi: 0,01 (både francis og pelton)
K_{feil}	kostnad pga. én feil [kroner]
$K_{arbeid,feil}$	arbeidskostnad pga. én feil [kroner]
$K_{utilgjengelighet,feil}$	utilgjengelighetskostnad pga. én feil [kroner]
$K_{andre,feil}$	materiell- og reisekostnad for én feil [kroner]; standardverdi: 2000 kr (pr. 2000-01-01)
$t_{arbeid,feil}$	antall arbeidstimer for utbedring av én feil [timer]; standardverdi: 15 timer
$k_{arbeidstime}$	kostnad for en arbeidstime [kroner/time]; standardverdi: 1000 kroner/time
$t_{utilgjengelighet,feil}$	varighet av utilgjengelighet (forventet utetid pga. feil) [timer]; standardverdi: 30 timer
$k_{utilgjengelighet,feil}$	kostnad for én time utilgjengelighet pr. MW [kroner/time/MW]; standardverdi: 30 kroner/time/MW

3.2 Kostnader knyttet til hovedstengeventil

3.2.1 Kostnad for forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil

Årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil

$$k_{V,ventil} = k_{V,ventil,ref} \cdot f_{type} \cdot f_{styring} \cdot \frac{H}{H_{ref}} \cdot \frac{D}{D_{ref}} \cdot i \quad [2] \text{ (V1.11)}$$

der

$k_{V,ventil}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil [kroner]
$k_{V,ventil,ref}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold for en referanseventil (kuleventil med vannstyring med $H_{ref} = 600$ m og $D_{ref} = 1500$ mm) [kroner]; standardverdi: 38 000 kroner (pr. 2000-01-01)
f_{type}	faktor for ventiltipe [-]; kuleventil: $f_{type} = 1,0$; spjeld- og sluseventil: $f_{type} = 0,75$
$f_{styring}$	faktor for type ventilstyring [-]; vannstyring: $f_{styring} = 1,0$; oljehydraulisk styring: $f_{styring} = 0,85$
H	fallhøyde [m]
H_{ref}	fallhøyde for referanseventil [m]; $H_{ref} = 600$ m
D	diameter for ventil [mm]
D_{ref}	diameter for referanseventil [mm]; $D_{ref} = 1500$ mm

Kostnad for forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil pr. start/stopp

$$M_{V,ventil} = G_{V,ventil} = \frac{k_{V,ventil,SS}}{n} = \frac{k_{V,ventil} \cdot \alpha_{V,ventil,SS}}{n} \quad [2] \text{ (V1.10)}$$

der

$M_{V,ventil}$	marginalkostnad for forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil pga. en start/stopp [kroner]
$G_{V,ventil}$	gjennomsnittskostnad for forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil pga. en start/stopp [kroner]
$k_{V,ventil,SS}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil som er relatert til start/stopp [kroner]
n	antall start/stopp pr. år [-]
$k_{V,ventil}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av hovedstengeventil [kroner]
$\alpha_{V,ventil,SS}$	andel av vedlikeholdskostnad som er relatert til start/stopp [-]; standardverdi: 0,75

3.2.2 Kostnad for levetidsreduksjon for hovedstengeventil

Kostnad for rehabilitering av hovedstengeventil

$$R_{ventil} = R_{ventil,ref} \cdot f_{type} \cdot f_{styring} \cdot \frac{H}{H_{ref}} \cdot \frac{D}{D_{ref}} \cdot i \quad [2] \text{ (V1.17)}$$

der

R_{ventil}	kostnad for rehabilitering av hovedstengeventil [kroner]
$R_{ventil,ref}$	kostnad for rehabilitering av referanseventil (kuleventil med vannstyring med $H_{ref} = 600$ m og $D_{ref} = 1500$ mm) [kroner]; standardverdi: 1 400 000 kroner (pr. 2000-01-01)
f_{type}	faktor for ventiltipe [-]; kuleventil: $f_{type} = 1,0$; spjeld- og sluseventil: $f_{type} = 0,75$
$f_{styring}$	faktor for type ventilstyring [-]; vannstyring: $f_{styring} = 1,0$; oljehydraulisk styring: $f_{styring} = 0,85$
H	fallhøyde [m]
H_{ref}	fallhøyde for referanseventil [m]; $H_{ref} = 600$ m
D	diameter for ventil [mm]
D_{ref}	diameter for referanseventil [mm]; $D_{ref} = 1500$ mm

Kostnad for levetidsreduksjon for hovedstengeventil

Levetiden for hovedstengeventil antas avhengig av antall start/stopp, og uavhengig av driftstiden. Det antas likevel at rehabilitering er nødvendig etter et visst antall år uavhengig av antall start/stopp.

$$T_{ventil} = \min \left(T_{ventil,max}; \frac{N_{ventil}}{n} \right) \quad [2] \text{ (V1.18)}$$

der

T_{ventil}	rehabiliteringsintervall for hovedstengeventil (kalendertid) [år]
$T_{ventil,max}$	maksimalt rehabiliteringsintervall for hovedstengeventil pga. alder (kalendertid) [år]; standardverdi: 40 år
N_{ventil}	maksimalt antall start/stopp som en ventil "tåler" før det må gjøres en rehabilitering; standardverdi: kule- og spjeldventil: $N_{ventil} = 4000$; sluseventil: $N_{ventil} = 3000$
n	antall start/stopp pr. år [-]

Tidspunkt for første/neste rehabilitering er gitt av

$$t_{rehabilitering} = \min \left(t_{idriftsettelse} + 40 \text{ år}; t_{analyse} + \frac{N_{ventil} - (t_{analyse} - t_{idriftsettelse}) \cdot n_{før}}{n} \right) \quad [2] \text{ (V1.19)}$$

$$T_{ventil1} = t_{rehabilitering} - t_{idriftsettelse} \quad [2] \text{ (V1.20)}$$

der

$t_{rehabilitering}$	rehabiliteringsår
$t_{idriftsettelse}$	idriftsettelsesår (ev. år for siste rehabilitering)
$t_{analyse}$	analyseår
$n_{før}$	antall start/stopp pr. år fram til i dag [-]
n	antall (fremtidige) start/stopp pr. år [-]
$T_{ventil1}$	tid til første/neste rehabilitering (kalendertid) [år]

Dette innebærer at det er et visst antall "gratis" start/stopp for hovedstengeventil.

$$n_{gratis} = \frac{N_{ventil}}{T_{ventil,max}} \quad [2] \text{ (V1.13)}$$

Hvis antall start/stopp pr. år er mindre enn n_{gratis} vil en ekstra start/stopp altså ikke medføre økte kostnader.

Hvis antall start/stopp pr. år er større enn n_{gratis} :

$$M_{\Delta L, ventil} = R_{ventil} \cdot \frac{1}{1 - e^{-rk \cdot T_{ventil}}} \cdot \left(e^{rk \frac{\Delta L_{ventil}}{8760}} - 1 \right) \cdot e^{-rk \cdot T_{ventil}} \quad [2] \text{ (V1.14)}$$

$$\Delta L_{ventil} = \frac{8760}{n} \quad [2] \text{ (V1.21)}$$

der

$M_{\Delta L, ventil}$	marginalkostnad for rehabilitering av hovedstengeventil pga. en start/stopp [kroner]
R_{ventil}	kostnad for rehabilitering av hovedstengeventil [kroner]
ΔL_{ventil}	reduisert levetid pga. en start/stopp [timer]
n	antall start/stopp pr. år [-]

$$k_{R, ventil, SS} = \text{Annuitet}(r; L_{ventil}; R_{ventil} \cdot \alpha_{R, ventil, SS}) \quad [2] \text{ (V1.15)}$$

$$G_{\Delta L, ventil} = \frac{k_{R, ventil, SS}}{n} = \frac{\text{Annuitet}(r; L_{ventil}; R_{ventil} \cdot \alpha_{R, ventil, SS})}{n} \quad [2] \text{ (V1.16)}$$

der

$G_{R, ventil}$	gjennomsnittskostnad for rehabilitering av hovedstengeventil pga. en start/stopp [kroner]
$k_{R, ventil, SS}$	årlig kostnad (annuitet over levetid) pga. rehabilitering av hovedstengeventil som er relatert til start/stopp [kroner]
n	antall start/stopp pr. år [-]
L_{ventil}	levetid for hovedstengeventil ifm. annuitet beregnet som N_{ventil}/n
$\alpha_{R, ventil, SS}$	andel av rehabiliteringskostnad som er relatert til start/stopp [-]; standardverdi: 0,75

3.3 Kostnader knyttet til turbin

3.3.1 Kostnadsgrunnlag for turbin

Kostnad for peltonturbin

$$K_{pelson,ny} = 8,13 \cdot H^{0,18} \cdot \eta^{-0,2} \cdot Q^{0,39} \cdot Z^{0,4} \quad [2] \text{ (V1.7), (V1.26)}$$

der

$K_{pelson,ny}$	kostnad for ny peltonturbin [Mkroner] (pr. 2000-01-01)
H	fallhøyde [m]
η	turtall [o/min]
Q	vannføring ved fullast [m ³ /s] (beregnes basert på informasjon om fallhøyde og turbin- ytelse under antakelse om at virkningsgraden er 0,9; $Q = 1000 \cdot P / (0,9 \cdot 9,81 \cdot H)$)
Z	antall stråler [-]

Vekt av francisturbin

$$V_{francis} = 2,82 \cdot H^{0,45} \cdot \Omega^{*-0,51} \cdot D_2^{2,04} \quad [2] \text{ (V1.9), (V1.28)}$$

der

$V_{francis}$	vekt av francisturbin [tonn]
H	fallhøyde [m]
Ω^*	fartstall (ved vannføring Q^* ved beste virkningsgrad)
D_2	løpehjulets avløpsdiameter [m]

$$\Omega^* = \frac{\eta \cdot \pi}{30 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \cdot \sqrt{\frac{Q^*}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}}} \quad (3.1)$$

der

η	turtall [o/min]
--------	-----------------

3.3.2 Kostnad for forebyggende vedlikehold av turbin

Årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av peltonturbin

$$k_{V,turbin} = k_{V,pelton} \cdot \left[(1 - x) + x \cdot \frac{K_{pelton,ny}}{K_{pelton,ref}} \right] \cdot i \quad [2] \text{ (V1.6)}$$

der

$k_{V,turbin}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av turbin [kroner]
$k_{V,pelton}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av peltonturbin [kroner]; standardverdi: 90 000 kroner (pr. 2000-01-01)
x	andel av vedlikeholdskostnad som er størrelsesavhengig [-]; standardverdi: 0,5
$K_{pelton,ny}$	kostnad for ny peltonturbin [Mkroner] (pr. 2000-01-01)
$K_{pelton,ref}$	kostnad for ny pelton referanseturbin (med 150 start/stopp pr. år) [Mkroner] standardverdi: 53,6 Mkroner (pr. 2000-01-01)

Årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av francisturbin

$$k_{V,turbin} = k_{V,francis} \cdot \left[(1 - x) + x \cdot \frac{V_{francis}}{V_{francis,ref}} \right] \cdot i \quad [2] \text{ (V1.8)}$$

der

$k_{V,turbin}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av turbin [kroner]
$k_{V,francis}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av francisturbin [kroner]; standardverdi: 80 000 kroner (pr. 2000-01-01)
x	del av vedlikeholdskostnader som er størrelsesavhengig [-]; standardverdi: 0,5
$V_{francis}$	vekt av francisturbin [tonn]
$V_{francis,ref}$	vekt av francis referanseturbin (med 150 start/stopp pr. år) [tonn]; standardverdi: 250 tonn

Kostnad for forebyggende vedlikehold av turbin pr. start/stopp

$$M_{V,turbin} = G_{V,turbin} = \frac{k_{V,turbin,SS}}{n} = \frac{k_{V,turbin} \cdot \alpha_{V,turbin,SS}}{n} \quad [2] \text{ (V1.5)}$$

der

$M_{V,turbin}$	marginalkostnad for forebyggende vedlikehold av turbin pga. en start/stopp [kroner]
$G_{V,turbin}$	gjennomsnittskostnad for forebyggende vedlikehold av turbin pga. en start/stopp [kroner]
$k_{V,turbin,SS}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av turbin relatert til start/stopp [kroner]
n	antall start/stopp pr. år [-]
$k_{V,turbin}$	årlig kostnad for forebyggende vedlikehold av turbin [kroner] (NB uavhengig av antall start/stopp)
$\alpha_{V,turbin,SS}$	kostnadsandel som kan relateres til start/stopp [-]; standardverdi: peltonturbin: 0,05, francisturbin: 0,10

3.3.3 Kostnad for rehabilitering av turbin

Kostnad for rehabilitering av peltonturbin

$$R_{pelton} = \left(R_{pelton,fast} + R_{pelton,variabel} \cdot \frac{K_{pelton,ny}}{K_{pelton,ref}} \right) \cdot i \quad [2] \text{ (V1.25)}$$

der

R_{pelton}	kostnad for rehabilitering av peltonturbin [kroner]
$R_{pelton,fast}$	kostnad for rehabilitering av pelton referanseturbin, fast andel [kroner]; standardverdi: 1 500 000 kroner (pr. 2000-01-01)
$R_{pelton,variabel}$	kostnad for rehabilitering av pelton referanseturbin, størrelsesavhengig andel [kr]; standardverdi: 3 000 000 kroner (pr. 2000-01-01)
$K_{pelton,ref}$	kostnad for ny pelton referanseturbin (med 150 start/stopp pr. år) [Mkroner]; standardverdi: 53,6 Mkroner (pr. 2000-01-01)

Kostnad for rehabilitering av francisturbin

$$R_{francis} = \left(R_{francis,fast} + R_{francis,variabel} \cdot \frac{V_{francis}}{V_{francis,ref}} \right) \cdot i \quad [2] \text{ (V1.27)}$$

der

$R_{francis}$	kostnad for rehabilitering av francisturbin [kroner]
$R_{francis,fast}$	kostnad for rehabilitering av francis referanseturbin, fast andel [kroner]; standardverdi: 1 500 000 kroner (pr. 2000-01-01)
$R_{francis,variabel}$	kostnad for rehabilitering av francis referanseturbin, størrelsesavhengig andel [kr]; standardverdi: 3 000 000 kroner (pr. 2000-01-01)
$V_{francis,ref}$	vekt av francis referanseturbin (med 150 start/stopp pr. år) [tonn]; standardverdi: 250 tonn

Årlig kostnad for rehabilitering av turbin (annuitet over levetid)

$$k_{R,turbin} = \text{Annuitet}(r; T_{turbin}; R_{turbin}) \quad [2] \text{ (V1.24)}$$

der

$k_{R,turbin}$	årlig kostnad for rehabilitering av turbin (annuitet over levetid) [kroner]
R_{turbin}	kostnad for rehabilitering av turbin [kroner]
T_{turbin}	rehabiliteringsintervall for turbin (kalendertid) [år]; standardverdi: 20 år (både pelton og francis)

Kostnad for rehabilitering av turbin pr. start/stopp

$$M_{R,turbin} = G_{R,turbin} = \frac{k_{R,turbin,SS}}{n} = \frac{k_{R,turbin} \cdot \alpha_{R,turbin,SS}}{n} \quad [2] \text{ (V1.22), (V1.23)}$$

der

$M_{R,turbin}$	marginalkostnad for rehabilitering av turbin pga. en start/stopp [kroner]
$G_{R,turbin}$	gjennomsnittskostnad for rehabilitering av turbin pga. en start/stopp [kroner]
$k_{R,turbin,SS}$	årlig kostnad for rehabilitering av turbin som er relatert til start/stopp [kroner]
n	antall start/stopp pr. år [-]
$k_{R,turbin}$	årlig kostnad for rehabilitering av turbin (annuitet over levetid) [kroner]
$\alpha_{R,turbin,SS}$	kostnadsandel som kan relateres til start/stopp [-]; standardverdi: peltonturbin: 0,05, francisturbin: 0,10

3.3.4 Kostnad for levetidsreduksjon for turbin

Redusert levetid justert for driftstid

$$\Delta L_{turbin} = \frac{\Delta D_{turbin}}{\frac{t_{drift} \cdot 24}{8760} + \frac{n}{365} \cdot \Delta D_{turbin}} \cdot 24 \quad (3.2)$$

der

ΔL_{turbin}	reduisert levetid pr. start/stopp justert for driftstid (kalendertid) [timer]
ΔD_{turbin}	ekvivalent driftstid pr. start/stopp (driftstimer) [timer]; standardverdi $\Delta D_{turbin,ref}$: 15 timer
t_{drift}	årlig driftstid (kalendertid) [timer]
n	antall start/stopp pr. år [-]

Kostnad for levetidsreduksjon for turbin

$$M_{\Delta L,turbin} = R_{turbin} \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k \cdot T_{turbin}}} \cdot \left(e^{r_k \frac{\Delta L_{turbin}}{8760}} - 1 \right) \cdot e^{-r_k \cdot T_{turbin1}} \quad (3.3)$$

der

$M_{\Delta L,turbin}$	marginalkostnad for levetidsreduksjon for turbin pga. en start/stopp [kroner]
R_{turbin}	kostnad for rehabilitering av turbin [kroner]
T_{turbin}	rehabiliteringsintervall for turbin på bakgrunn av forventet driftstid og antall start/stopp i fremtiden (kalendertid) [år]
ΔL_{turbin}	reduisert levetid pr. start/stopp justert for driftstid (kalendertid) [timer]
$T_{turbin1}$	tid til første/neste rehabilitering (kalendertid) [år]

$$G_{\Delta L,turbin} = \frac{\text{Annuitet}(r; T_{turbin}; R_{turbin})}{8760} \cdot \Delta L_{turbin} \quad (3.4)$$

der

$\hat{G}_{\Delta L,turbin}$	gjennomsnittskostnad for levetidsreduksjon for turbin pga. en start/stopp [kroner]
-----------------------------	--

3.4 Kostnader knyttet til generator

3.4.1 Kostnad for forebyggende vedlikehold av generatorens mindre komponenter

$$M_{V,generator} = G_{V,generator} = (K_{fast} + k_{størrelsesavhengig} \cdot S) \cdot i \quad [2] \text{ (V1.12)}$$

der

$M_{V,generator}$	marginalkostnad for forebyggende vedlikehold av generatorens mindre komponenter pga. en start/stopp [kroner]
$G_{V,generator}$	gjennomsnittskostnad for forebyggende vedlikehold av generatorens mindre komponenter pga. en start/stopp [kroner]
K_{fast}	fast andel av vedlikeholdskostnader [kroner]; standardverdi: 90 kroner pr. start/stopp (pr. 2000-01-01)
$k_{størrelsesavhengig}$	størrelsesavhengig andel av kostnader [kroner/MW]; standardverdi: 0,5 kroner/MW (pr. 2000-01-01)
S	generatorytelse [MVA]

3.4.2 Kostnad for overhaling (forebyggende vedlikehold) av generator

$$M_{overhaling} = R_{overhaling} \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k \cdot T_{overhaling}}} \cdot \left(e^{r_k \frac{\Delta L_{overhaling}}{8760}} - 1 \right) \cdot e^{-r_k \cdot T_{overhaling1}} \quad [2] \text{ (V1.34)}$$

der

$M_{overhaling}$	marginalkostnad for overhaling av generator pga. en start/stopp [kroner]
$R_{overhaling}$	kostnad for overhaling av generator [kroner] Hvis ikke virkelige kostnad angis estimeres kostnaden som $0,5 \cdot R_{statorvikling}$, se [2] (V1.32)
$\Delta L_{overhaling}$	redusert levetid pr. start/stopp justert for driftstid [timer]; $\Delta L_{overhaling} = \Delta L_{statorvikling}$
$T_{overhaling}$	overhalingsintervall (kalendertid) [år]; $T_{overhaling} = 0,5 \cdot T_{statorvikling}$
$T_{overhaling1}$	tid til første/neste overhaling (kalendertid) [år]

$$G_{overhaling} = \frac{\text{Annuitet}(r; T_{overhaling}; R_{overhaling})}{8760} \cdot \Delta L_{overhaling} \quad (3.5)$$

3.4.3 Kostnad for levetidsreduksjon for statorvikling

Kostnad for rehabilitering av statorvikling

$$R_{statorvikling} = 1000000 \cdot \left(10 \cdot \sqrt{\frac{S}{\eta}}\right) \cdot i \quad [2] \text{ (V1.32)}$$

der

$R_{statorvikling}$	kostnad for rehabilitering av statorvikling [kroner]
S	generatorytelse [MVA]
η	turtall [o/min]

Rehabiliteringsintervall

$$T_{statorvikling} = T_{statorvikling,ref} \cdot \frac{t_{design} + n_{design} \cdot \Delta D_{statorvikling,ref}}{t_{drift} + n \cdot \Delta D_{statorvikling}} \quad [2] \text{ (V1.31)}$$

der

$T_{statorvikling,ref}$	rehabiliteringsintervall for statorvikling (kalendertid) [år]; standardverdi: 40 år
t_{design}	design driftstid pr. år for generator [timer]; standardverdi: 5000 timer
n_{design}	design antall start/stopp pr. år for generator [-]; standardverdi: 150
$\Delta D_{statorvikling,ref}$	referanseverdi for ekvivalent driftstid pr. start/stopp [timer]; standardverdi: 10 timer
t_{drift}	årlig driftstid (kalendertid) [timer]
n	antall start/stopp pr. år [-]

Redusert levetid justert for driftstid

$$\Delta L_{statorvikling} = \frac{\Delta D_{statorvikling}}{\frac{t_{drift}}{8760} \cdot 24 + \frac{n}{365} \cdot \Delta D_{statorvikling}} \cdot 24 \quad [2] \text{ (V1.33)}$$

der

$\Delta L_{statorvikling}$	redusert levetid pr. start/stopp justert for driftstid (kalendertid) [timer]
$\Delta D_{statorvikling}$	ekvivalent driftstid pr. start/stopp (driftstimer) [timer]
t_{drift}	årlig driftstid (kalendertid) [timer]
n	antall start/stopp pr. år [-]

Kostnad for levetidsreduksjon for statorvikling

$$M_{\Delta L, \text{statorvikling}} = R_{\text{statorvikling}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k \cdot T_{\text{statorvikling}}}} \cdot \left(e^{r_k \frac{\Delta L_{\text{statorvikling}}}{8760}} - 1 \right) \cdot e^{-r_k \cdot T_{\text{statorvikling}1}} \quad [2] \text{ (V1.29)}$$

der

$M_{\Delta L, \text{statorvikling}}$	marginalkostnad for levetidsreduksjon for statorvikling pga. en start/stopp [kroner]
$R_{\text{statorvikling}}$	kostnad for rehabilitering av statorvikling [kroner]
$T_{\text{statorvikling}}$	rehabiliteringsintervall for statorvikling på bakgrunn av forventet driftstid og antall start/stopp i fremtiden (kalendertid) [år]
	I regnearket er det tatt hensyn til at rehabilitering av statorvikling samkjøres med eventuell rehabilitering av polvikling og stator blikkpakke.
$\Delta L_{\text{statorvikling}}$	redusert levetid pr. start/stopp justert for driftstid (kalendertid) [timer]
$T_{\text{statorvikling}1}$	tid til første/neste rehabilitering (kalendertid) [år]

$$G_{\Delta L, \text{statorvikling}} = \frac{\text{Annuitet}(r; T_{\text{statorvikling}}; R_{\text{statorvikling}})}{8760} \cdot \Delta L_{\text{statorvikling}} \quad [2] \text{ (V1.30)}$$

der

$G_{\Delta L, \text{statorvikling}}$	gjennomsnittskostnad for levetidsreduksjon for statorvikling pga. en start/stopp [kroner]
--------------------------------------	---

3.4.4 Kostnad for levetidsreduksjon for stator blikkpakke

Kostnad for rehabilitering av stator blikkpakke

$$R_{\text{blikk}} = f_{\text{blikk}} \cdot R_{\text{statorvikling}} \quad [2] \text{ (V1.37)}$$

der

R_{blikk}	kostnad for rehabilitering av stator blikkpakke [kroner]
f_{blikk}	kostnadsfaktor [-]; standardverdi: 0,50
$R_{\text{statorvikling}}$	kostnader for rehabilitering av statorvikling [kroner], se likning (V1.32)

Redusert levetid justert for driftstid

$$\Delta L_{\text{blikk}} = \frac{\Delta D_{\text{blikk}}}{\frac{t_{\text{drift}}}{8760} \cdot 24 + \frac{n}{365} \cdot \Delta D_{\text{blikk}}} \cdot 24 \quad [2] \text{ (V1.38)}$$

der

ΔL_{blikk}	redusert levetid pr. start/stopp justert for driftstid (kalendertid) [timer]
ΔD_{blikk}	ekvivalent driftstid pr. start/stopp (driftstimer) [timer]; standardverdi $\Delta D_{\text{blikk,ref}}$: 5 timer
t_{drift}	årlig driftstid (kalendertid) [timer]
n	antall start/stopp pr. år [-]

Kostnad for levetidsreduksjon for stator blikkpakke

$$M_{\Delta L, blikk} = R_{blikk} \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k T_{blikk}}} \cdot \left(e^{r_k \frac{\Delta L_{blikk}}{8760}} - 1 \right) \cdot e^{-r_k T_{blikk1}} \quad [2] \quad (V1.35)$$

der

$M_{\Delta L, blikk}$	marginalkostnad for levetidsreduksjon for stator blikkpakke pga. en start/stopp [kroner]
R_{blikk}	kostnad for rehabilitering av stator blikkpakke [kroner]
T_{blikk}	rehabiliteringsintervall for stator blikkpakke på bakgrunn av forventet driftstid og antall start/stopp i fremtiden (kalendertid) [år]. Vanlig rehabiliteringsintervall for stator blikkpakke er 40–80 år. Beregningen er analog med beregning av $T_{statorvikling}$, se likning [2] (V1.31), der standardverdi $T_{blikk, ref} = 80$ år. I regnearket er det tatt hensyn til at rehabilitering av stator blikkpakke samkjøres med eventuell rehabilitering av statorvikling og polvikling.
ΔL_{blikk}	redusert levetid pr. start/stopp justert for driftstid (kalendertid) [timer]
T_{blikk1}	tid til første/neste rehabilitering (kalendertid) [år]

$$G_{\Delta L, blikk} = \frac{\text{Annuitet}(r; T_{blikk}; K_{blikk})}{8760} \cdot \Delta L_{blikk} \quad [2] \quad (V1.36)$$

der

$G_{\Delta L, blikk}$	gjennomsnittskostnad for levetidsreduksjon for blikkpakke pga. en start/stopp [kroner]
-----------------------	--

3.4.5 Kostnad for levetidsreduksjon for polvikling

Kostnad for rehabilitering av polvikling

$$R_{polvikling} = f_{polvikling} \cdot R_{statorvikling} \quad [2] \quad (V1.41)$$

der

$R_{polvikling}$	kostnad for rehabilitering av polvikling [kroner]
$f_{polvikling}$	kostnadsfaktor [-]; standardverdi: 0,122
$R_{statorvikling}$	kostnad for rehabilitering av statorvikling, se likning (V1.32) [kroner]

Redusert levetid justert for driftstid

$$\Delta L_{polvikling} = \frac{\Delta D_{polvikling}}{\frac{t_{drift}}{8760} \cdot 24 + \frac{n}{365} \cdot \Delta D_{polvikling}} \cdot 24 \quad [2] \quad (V1.42)$$

der

$\Delta L_{polvikling}$	redusert levetid pr. start/stopp justert for driftstid (kalendertid) [timer]
$\Delta D_{polvikling}$	ekvivalent driftstid pr. start/stopp (driftstimer) [timer]; standardverdi $\Delta D_{polvikling, ref}$: 10 timer
t_{drift}	årlig driftstid (kalendertid) [timer]
n	antall start/stopp pr. år [-]

Kostnad for levetidsreduksjon for polvikling

$$M_{\Delta L, polvikling} = R_{polvikling} \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k \cdot T_{polvikling}}} \cdot \left(e^{r_k \frac{\Delta L_{polvikling}}{8760}} - 1 \right) \cdot e^{-r_k \cdot T_{polvikling1}} \quad [2] \quad (V1.39)$$

der

$M_{\Delta L, polvikling}$	marginalkostnad for levetidsreduksjon for polvikling pga. en start/stopp [kroner]
$R_{polvikling}$	kostnad for rehabilitering av polvikling [kroner]
$T_{polvikling}$	rehabiliteringsintervall for polvikling på bakgrunn av forventet driftstid og antall start/stopp i fremtiden (kalendertid) [år]. Vanlig rehabiliteringsintervall for polvikling er 40–80 år. Beregningen er analog med beregning av $T_{statorvikling}$, se likning [2] (V1.31), der standardverdi $T_{polvikling, ref} = 40$ år. I regnearket er det tatt hensyn til at rehabilitering av polvikling samkjøres med eventuell rehabilitering av statorvikling og stator blikkpakke.
$\Delta L_{polvikling}$	redusert levetid pr. start/stopp justert for driftstid [timer]
$T_{polvikling1}$	tid til første/neste rehabilitering (kalendertid) [år]

$$G_{\Delta L, polvikling} = \frac{\text{Annuitet}(r; T_{polvikling}; R_{polvikling})}{8760} \cdot \Delta L_{polvikling} \quad [2] \quad (V1.40)$$

der

$G_{\Delta L, polvikling}$	gjennomsnittskostnad for levetidsreduksjon for polvikling pga. en start/stopp [kroner]
----------------------------	--

3.5 Kostnad knyttet til andre komponenter og eventuelle andre kostnader

Kostnader knyttet til eventuell levetidsreduksjon for vannvei/tunnel/rørgate/trykksjakt, krafttransformator, bryter/koblingsanlegg og eventuelle andre komponenter, samt eventuelle andre kostnader (f.eks. kostnad (fremtidige tap) pga. redusert virkningsgrad som følge av slitasje), gis inn som en direktekostnad.

Dersom det viser deg at noen av disse kostnadselementene vil kunne ha en vesentlig påvirkning på totalkostnaden for en start/stopp, bør det, ved en fremtidig utvidelse av modellen, vurderes om det aktuelle kostnadselementet bør inkluderes på samme måte som de andre komponentene.

3.6 Justering av ekvivalent driftstid avhengig av teknisk løsning

For generator er det lagt inn en mulighet til å justere ekvivalent driftstid for en start/stopp ved å beregne et fratrekk eller et tillegg avhengig av om den aktuelle tekniske løsningen (*kvalitetsfaktoren*) er bedre eller dårligere enn referanseanlegget ("gjennomsnittet").

$$\Delta D_{korreksjon} = \Delta D \left(\frac{\text{karakter}_{ref} - \text{karakter}}{\text{karakter}_{ref}} \cdot \text{vektall} \right) \quad (3.6)$$

3.7 Justering av ekvivalent driftstid avhengig av varighet av stans

I utgangspunktet antas det at hver driftsstans medfører en så langvarig stans at hver start kan betraktes som en "kaldstart". For statorvikling beregnes det da full start/stopp-kostnad (Alternativ 0).

Forventet levetidsreduksjon pga. start/stopp for en statorvikling er primært knyttet til termisk sykling. Ved kortvarig stans ("varmstart") vil ikke viklingstemperaturen endres så mye at det gir termisk sykling, noe som gjør at statorviklingen ikke påkjennes så mye. Kostnadene knyttet til en kortvarig stans er derfor lavere enn ved en langvarig stans. Hvor langvarig en stans må være for at det skal regnes som en "kaldstart" vil avhenge av bl.a. generatordesign, utformingen av generatorrommet, og kjølesystemet.

Det finnes flere alternative prinsipper for å estimere den justerte ekvivalente driftstiden for en kortvarig stans.

Alternativ 1 – Ingen ekvivalent driftstid ved kortvarig stans

Dersom en driftsstans er kortere enn en spesifisert grenseverdi antas det at dette ikke vil gi noen ekvivalent driftstid:

$$\text{For } T_{stans} < T_{grense}: \quad \Delta d = 0$$

$$\text{For } T_{stans} \geq T_{grense}: \quad \Delta d = \Delta D$$

Alternativ 2 – Lineær sammenheng mellom varighet av stans og ekvivalent driftstid

Dersom en driftsstans er kortere enn en spesifisert grenseverdi antas det en lineær sammenheng mellom varighet av stans og ekvivalent driftstid:

$$\text{For } T_{stans} < T_{grense}: \quad \Delta d = \frac{\Delta D}{T_{grense}} \cdot T_{stans}$$

$$\text{For } T_{stans} \geq T_{grense}: \quad \Delta d = \Delta D$$

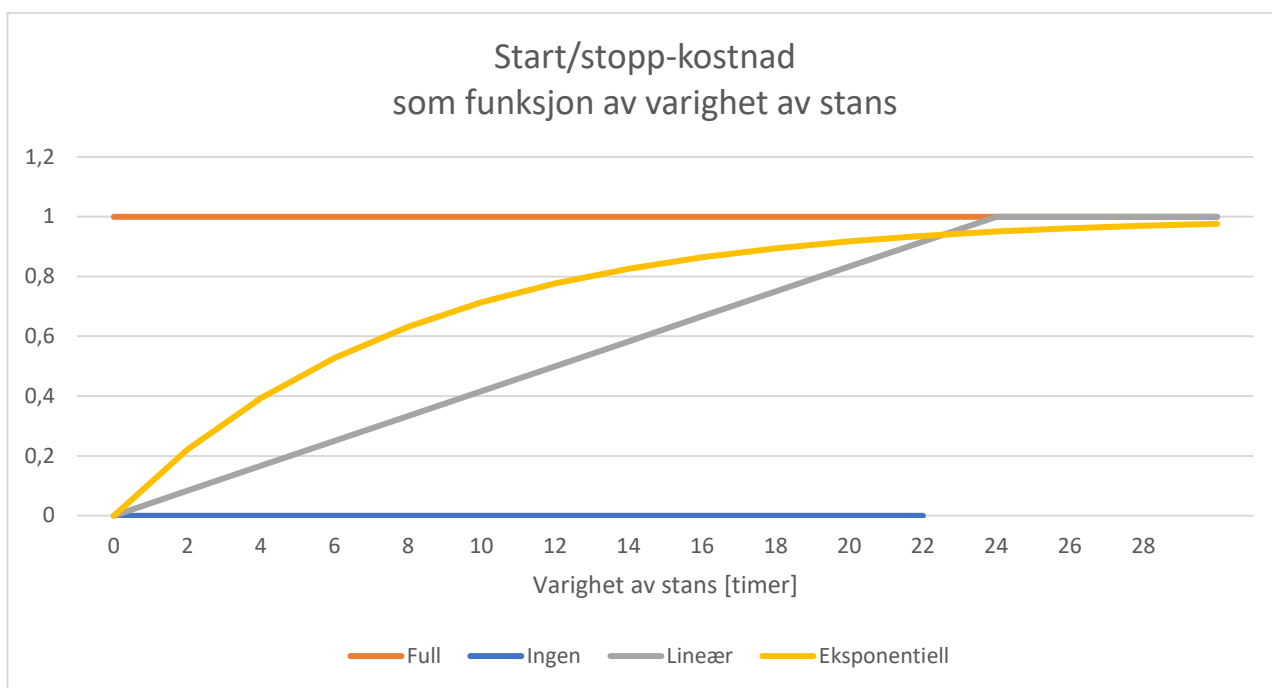
Alternativ 3 – Eksponentiell sammenheng mellom varighet av stans og ekvivalent driftstid

Dersom en driftsstans er kortere enn en spesifisert grenseverdi antas det en eksponentiell sammenheng mellom varighet av stans og ekvivalent driftstid:

$$\text{For } T_{stans} < T_{grense}: \quad \Delta d = \Delta D \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{T_{stans}}{\tau}}} \right) \quad \text{der } \tau \approx \frac{1}{4} T_{grense}$$

$$\text{For } T_{stans} \geq T_{grense}: \quad \Delta d = \Delta D$$

Denne modellen er mer fleksibel, og kan tilpasses slik at den stemmer godt med faktisk målte viklingstemperaturer. Ulempen er at den også er mer komplisert.

Sammenlikning av alternativer

Figur 3 Start/stopp-kostnad som funksjon av varighet av stans

Det er imidlertid ikke gitt at degradering pga. termisk sykling kun er avhengig av temperaturdifferansen, men kanskje også av høyeste og laveste temperatur i hver syklus, varighet av syklus, osv. Det er derfor heller ikke gitt at start/stopp-kostnaden er direkte proporsjonal med temperaturendringen. I modellen benyttes derfor Alternativ 2 (lineær sammenheng).

Det har vært antatt at varighet av stans primært knyttes til statorvikling, dvs. at andre kostnadselementer ikke er avhengig av varigheten av stans. I [4] vises det imidlertid til en spørreundersøkelse der det konkluderes med at også stator blikkpakke og rotor påvirkes av økt intermitterende drift, der det typisk er sporkiler og pressfingre som har vist en økt tendens til å løse pga. termisk sykling. En tilsvarende justering av ekvivalent driftstid avhengig av varighet av stans er derfor også implementert for stator blikkpakke og rotor.

3.8 Justering av ekvivalent driftstid pga. registrert teknisk tilstand

Det kan argumenteres for at den ekstra påkjenningen aggregatet utsettes for ifm. en start/stopp-sekvens har større konsekvenser jo eldre og mer degradert aggregatet er. Det kan derfor argumenteres for at ekvivalent driftstid Δd [timer] for en start/stopp er driftstidsavhengig, og i [1] er det modellert med følgende likning:

$$\Delta d = \Delta D + \delta \cdot d \quad [1] (3.7)$$

der

- ΔD ekvivalent driftstid pr. start/stopp [(drifts)timer]
- δ proporsjonalitetsfaktor [-]
- d effektiv driftstid ved start/stopp-tidspunktet [(drifts)timer]

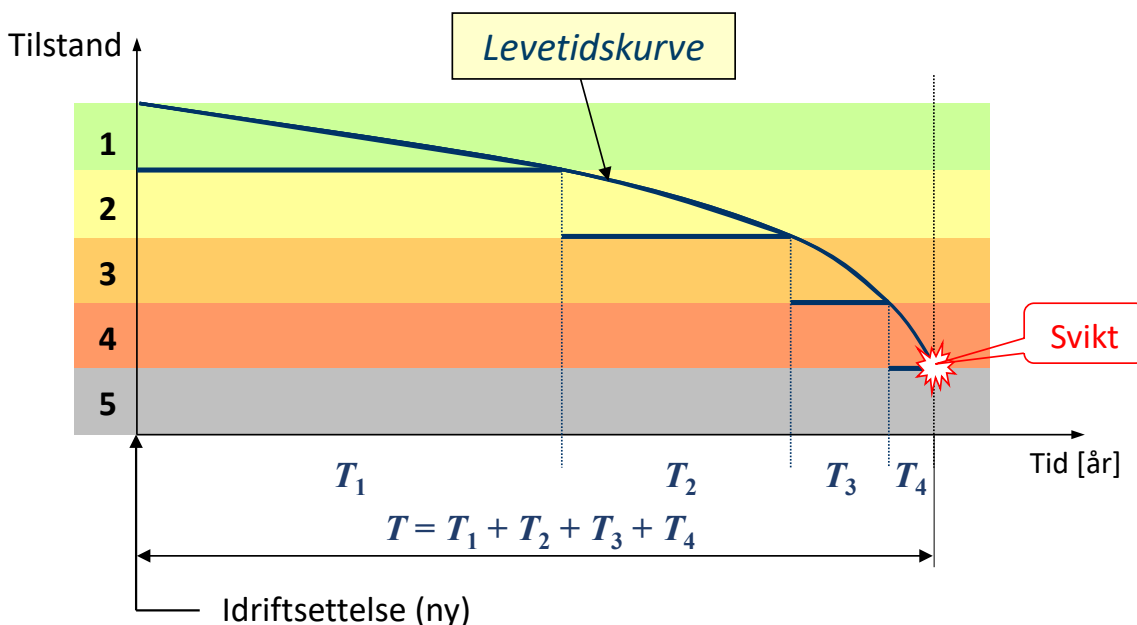
Dersom $\delta = 0$ blir ekvivalent driftstid pr. start/stopp konstant og uavhengig av effektiv driftstid (alder). En ulempe med denne modellen (når $\delta > 0$) er at ΔD er laveste verdi, og ikke en gjennomsnittsverdi over levetiden.

En alternativ tilnærming er å modellere at ekvivalent driftstid er tilstandsavhengig, dvs. avhengig av enhetens observerte/registrerte tekniske tilstand gitt av en tilstandskarakter 1–4 hentet fra tilstandskontrollhåndbøkene for vannkraftverk [5].

$$\Delta d = \Delta D \cdot f_{\text{teknisktilstand}} \quad (3.7)$$

der

- $f_{\text{teknisktilstand}}$ faktor som modifierer ekvivalent driftstid avhengig av enhetens tekniske tilstand [-]
- Anbefalte verdiområder: $f_{\text{teknisktilstand}=1} < 1$
- $f_{\text{teknisktilstand}=2} = 1$
- $f_{\text{teknisktilstand}=3} > 1$
- $f_{\text{teknisktilstand}=4} \gg 1$



Figur 4 Levetidskurve

En levetidskurve kan etableres basert på en statistisk behandling av sekvenser med registrerte tilstandskarakterer over levetiden til et utvalg av komponenter, og vil i prinsippet kunne beskrives som vist i Figur 4. Etablering av slik levetidskurver er beskrevet i f.eks. [6].

Reduksjon av levetid blir da gitt av

$$\Delta L = \frac{\Delta D \cdot f_{\text{teknisktilstand}}}{\alpha_0 \cdot 24 + n_0 \cdot \Delta D \cdot f_{\text{teknisktilstand}}} \cdot 24 = \frac{\Delta D \cdot f_{\text{teknisktilstand}}}{\frac{t_{\text{drift}}}{8760} \cdot 24 + \frac{n}{365} \cdot \Delta D \cdot f_{\text{teknisktilstand}}} \cdot 24 \quad [\text{timer}] \quad (3.8)$$

Det antas at enheten fra idriftsettelse til rehabilitering gjennomløper de tekniske tilstandene 1–3 (i praksis, for å redusere sannsynligheten for havari, gjennomføres rehabilitering før man kommer til tilstand 4), og at ekvivalent driftstid ΔD er en gjennomsnittsverdi over levetiden. Faktorene $f_{\text{teknisktilstand}}$ bør derfor tilpasses slik at den totale ekvivalente driftstiden over enhetens forventede levetid blir den samme som om man benytter en "gjennomsnittsverdi" uavhengig av alder/tilstand. Dette medfører at faktorene bør tilfredsstillende likningen

$$\sum_{i=1}^{T_R} \Delta d = T_R \cdot n \cdot \Delta D = \sum_{i=1}^3 T_i \cdot n \cdot \Delta D \cdot f_i \Rightarrow \sum_{i=1}^3 T_i \cdot f_i = T_R$$

der

$$T_R = \sum_{i=1}^3 T_i$$

der

T_i varighet av intervallet der enheten er i tilstand i (kalendertid, forutsettes kjent) [år]

Dersom det videre antas at ekvivalent driftstid i tilstand 2 (som er "normaltilstanden") tilsvarer den "gjennomsnittlig ekvivalente driftstiden" (dvs. $f_{\text{teknisktilstand}=2} = 1$), og samtidig forutsettes at "oppholdstiden" i hver tilstand er kjent, fås følgende sammenheng mellom $f_{\text{teknisktilstand}=1}$ og $f_{\text{teknisktilstand}=3}$:

$$f_{\text{teknisktilstand}=3} = \frac{T_R - T_2 - T_1 \cdot f_{\text{teknisktilstand}=1}}{T_3} \quad (3.9)$$

Ettersom ΔD er en gjennomsnittsverdi, skal denne brukes ved beregning av gjennomsnittlige kostnader. Dette medfører også at justering av ekvivalent driftstid for registrert teknisk tilstand kun er relevant å bruke ved beregning av marginale kostnader.

4 Kostnader for kjøring utenfor normalt driftsområde

4.1 Levetidsreduksjon pga. store lastendringer (ramping)

I denne sammenhengen defineres ramping som en lastendring på minst 25 % av turbinens nominelle effekt i løpet av ett minutt. Ramping er en konkret hendelse, og svært forenklet kan man anta at ekvivalent driftstid pga. ramping er en faktor k (< 1) multiplisert med ekvivalent driftstid for en start/stopp for komponenten.

$$\Delta D_{ramping} = k \cdot \Delta D_{startstopp} \quad (4.1)$$

Modellering av kostnader følger derfor samme prinsipp som for start/stopp-kostnader, og marginalkostnaden for en ramping er gitt av samme type likning som start/stopp, dvs. [1] (4.11), der ΔL er gitt av komponentens levetidsreduksjon pga. en ramping.

$$M = R \cdot \frac{1}{1 - e^{-r_k T_R}} \cdot \left(e^{r_k \frac{\Delta L}{8760}} - 1 \right) \cdot e^{-r_k T_F} \quad [1] \quad (4.11)$$

Det antas at det primært er turbinen, mer spesifikt løpehjulet, som påkjennes ifm. ramping.

4.2 Modellering av normallast, dellast og overlast

Modellen kan utvides ved at driftsandelen splittes opp i egne andeler for ulike driftsområder. I første omgang antas driftsområdene *normallast*, *dellast* og *overlast*. NB! Med dellast og overlast menes her kjøring utenfor anleggets normale driftsområde. I tillegg modelleres en faktor β som angir hvor mye driftstidsreduksjon ("slitasje") driftsområdet medfører. Effektiv driftstid ved tidspunkt t (med konstant start/stopp-intensitet) er da gitt av

$$\begin{aligned} d(t | \alpha_{normallast}, \alpha_{dellast}, \beta_{dellast}, \alpha_{overlast}, \beta_{overlast}, n, \Delta D_{startstopp}) \\ = \alpha_{normallast} \cdot t + \alpha_{dellast} \cdot \beta_{dellast} \cdot t + \alpha_{overlast} \cdot \beta_{overlast} \cdot t + n \cdot \Delta D_{startstopp} \cdot t \\ = (\alpha_{normallast} + \alpha_{dellast} \cdot \beta_{dellast} + \alpha_{overlast} \cdot \beta_{overlast} + n \cdot \Delta D_{startstopp}) \cdot t \quad (4.2) \end{aligned}$$

der

$\alpha_{normallast}, \alpha_{dellast}, \alpha_{overlast}$	andel av kalendertid med drift innenfor hhv. normallast, dellast og overlast [-]
$(\beta_{normallast} = 1), \beta_{dellast}, \beta_{overlast}$	faktor for "ekvivalent driftstid" pga. ekstra "slitasje" innenfor hhv. normallast, dellast og overlast [-]
t	kalendertid
n	antall start/stopp pr. tidsenhet [-]
$\Delta D_{startstopp}$	ekvivalent driftstid pr. start/stopp [(drifts)timer]

og der

$$\alpha_{normallast} + \alpha_{dellast} + \alpha_{overlast} = \alpha \leq 1 \quad (4.3)$$

For et gitt design er den totale effektive driftstiden gitt av DTD . Dette gir følgende sammenheng mellom et rehabiliteringsintervall tilpasset DTD og et kjøremønster (med en gitt konstant andel normallast, dellast, overlast og et konstant antall start/stopp pr. år)

$$T_R = \frac{DTD}{(\alpha_{normallast} + \alpha_{dellast} \cdot \beta_{dellast} + \alpha_{overlast} \cdot \beta_{overlast}) \cdot 24 \cdot 365 + n \cdot \Delta D_{startstopp}} \quad [\text{år}] \quad (4.4)$$

4.3 Levetidsreduksjon pga. en time kjøring på dellast

Kjøring på dellast kan være aktuelt f.eks. ifm. bud i reservemarkedet. Med en driftstime på dellast (med økt "slitasje") vil rehabiliteringstidspunktet fremskyndes til $T_{R,dellast}$. Designet total driftstid er imidlertid konstant, slik at

$$DTD = (\alpha_{normallast} + \alpha_{dellast} \cdot \beta_{dellast} + \alpha_{overlast} \cdot \beta_{overlast} + n \cdot \Delta D_{startstopp}) \cdot T_{R,dellast} + 1 \cdot \beta_{dellast} \quad (4.5)$$

$$T_{R,dellast} = \frac{DTD - 1 \cdot \beta_{dellast}}{(\alpha_{normallast} + \alpha_{dellast} \cdot \beta_{dellast} + \alpha_{overlast} \cdot \beta_{overlast}) \cdot 24 \cdot 365 + n \cdot \Delta D_{startstopp}}$$

Enhetens reduserte levetid (kalendertid) pga. en driftstime på dellast er da gitt av

$$\begin{aligned} \Delta L_{dellast} &= (T_R - T_{R,dellast}) \cdot 24 \cdot 365 \quad [\text{timer}] \\ &= \frac{DTD - (DTD - \beta_{dellast} \cdot 1 \text{ time})}{(\alpha_{normallast} + \alpha_{dellast} \cdot \beta_{dellast} + \alpha_{overlast} \cdot \beta_{overlast}) \cdot 24 \cdot 365 + n \cdot \Delta D_{startstopp}} \cdot 24 \cdot 365 \\ &= \frac{\beta_{dellast}}{(\alpha_{normallast} + \alpha_{dellast} \cdot \beta_{dellast} + \alpha_{overlast} \cdot \beta_{overlast}) \cdot 24 \cdot 365 + n \cdot \Delta D_{startstopp}} \cdot 24 \cdot 365 \quad [\text{timer}] \quad (4.6) \end{aligned}$$

4.4 Levetidsreduksjon pga. en time kjøring på overlast

Med en driftstime på overlast vil rehabiliteringstidspunktet på tilsvarende måte fremskyndes til $T_{R,overlast}$. Enhetens reduserte levetid (kalendertid) pga. en driftstime på overlast er da gitt av

$$\Delta L_{overlast} = \frac{\beta_{overlast}}{(\alpha_{normallast} + \alpha_{dellast} \cdot \beta_{dellast} + \alpha_{overlast} \cdot \beta_{overlast}) \cdot 24 \cdot 365 + n \cdot \Delta D_{startstopp}} \cdot 24 \cdot 365 \quad [\text{timer}] \quad (4.7)$$

4.5 Marginalkostnader pga. en time kjøring på dellast eller overlast

Overgangen mellom normallast og dellast, og mellom normallast og overlast, omfattes ikke av en start/stopp. Det skal derfor ikke beregnes spesifikke kostnader knyttet til start/stopp-feil. Det er ikke vanntap knyttet til overgangen mellom normallast og dellast eller overlast, og det skal derfor ikke beregnes spesifikke kostnader knyttet til vanntap.

Opp- og nedregulering skjer kun med turbinen, slik at hovedstengeventilen er ikke involvert. Det skal derfor ikke beregnes kostnader knyttet til hovedstengeventilen. Det samme gjelder effektbrytere. Generator og transformator påvirkes heller ikke av overgangen til dellastområdet. Dersom man i tillegg ser bort fra langvarig kjøring med vesentlig overlast skal det heller ikke beregnes kostnader knyttet til disse enhetene.

Den enheten som primært påkjennes ved drift i områdene dellast og overlast er turbinen.

Verdier for å eksemplifisere funksjonaliteten

$\beta_{normallast}$	1	faktor for "ekvivalent driftstid" pga. en driftstime i området normallast [-]
$\beta_{dellast}$	3	faktor for "ekvivalent driftstid" pga. en driftstime i området dellast [-]
$\beta_{overlast}$	4	faktor for "ekvivalent driftstid" pga. en driftstime i området overlast [-]

Marginalkostnaden for en driftstime på dellast eller overlast er gitt av samme likning som start/stopp, dvs. [1] (4.11), der ΔL er gitt av likningene over.

5 Litteraturreferanser

1. B. H. Bakken, T. Bjørkvoll, M. M. Belsnes, P. E. Skåre
Start/stopp-kostnader for vannkraftverk
TR A5351, 2001-02-02, SINTEF Energiforskning AS, Trondheim
2. Thomas Welte, Lars Eliasson
Start/stopp-kostnader for vannkraftverk: Beregningsverktøy og brukerveiledning
(TR A6949, 2011-09-23, SINTEF Energi AS, Trondheim)
Publikasjon nr. 322-2011, Energi Norge, Oslo
3. NVE, *Langsiktig kraftmarkedsanalyse 2021-2040*, Rapport nr. 29/2021
4. Lars-Erik Kämpe, Johan Amundsen, Bertram Müller
Intermittent Operation – Experience with Hydrogenerators
CIGRE WG A1.06 Report, Electra No 248, 2010
5. Energi Norge, *Håndbøker for tilstandskontroll av vannkraftanlegg, 1992–2005*
6. Arnt Ove Eggen, Thomas Welte, Dejan Susa
Methodology for establishing life curves based on condition monitoring data and expert judgments
TR A6925, 2010-04-23, SINTEF Energi AS, Trondheim
7. Thomas Welte, Lars Eliasson
Start/stopp-kostnader for vannkraftverk: Status og videreutvikling
Arbeidsnotat AN 08.12.73, SINTEF Energiforskning AS, 2009
8. Eivind Solvang, Thomas Welte, Jørn Heggset
Sviktmmodell for vannkraftverk: Modellbeskrivelse og anvendelse
(TR A7015, 2011-12-21, SINTEF Energi AS, Trondheim)
Publikasjon nr. 324-2011, ISBN 978-82-432-0652-6, Energi Norge, Oslo
9. Thomas Welte, Jørn Heggset, Eivind Solvang
Sviktmmodell for vannkraftverk: Skadetyper og tilstandskriterier
(TR A7016, 2011-08-29, SINTEF Energi AS, Trondheim)
Publikasjon nr. 323-2011, ISBN 978-82-432-0651-9, Energi Norge, Oslo
10. Thomas Welte, Eivind Solvang
Endring av kjøremønster i norske vannkraftverk
(TR A6847, 2011-09-26, SINTEF Energi AS Trondheim)
Publikasjon nr. 320-2011, ISBN 978-82-432-0648-9, Energi Norge, Oslo
11. Eivind Solvang, Jørn Heggset, Thomas Welte
Sviktmmodell for komponenter i vannkraftverk
(TR A6231, 2006-03-10, SINTEF Energiforskning AS, Trondheim)
Publikasjon nr. 199-2006, ISBN 82-436-0534-7, Energi Norge, Oslo

A Vedlegg 1 Skjermbilder fra regnearket Kjøremønsterrelaterte kostnader

Vedlegg 1 viser skjermbilder fra regnearket *Kjøremønsterrelaterte kostnader* der modell for kjøremønsterrelaterte kostnader er realisert. Regnearket viser samtidig et eksempel på beregninger for et francis-aggregat med en turbinytelse på 100 MW.

Inndata

Forklaring til farger		
Grønne felt <u>må</u> fylles ut (anleggsspesifikke data).		
Blåe felt <u>bør</u> fylles ut.		
Gule felt <u>kan</u> fylles ut (disse har begrenset innflytelse på resultatet).		
Oransje felt har kostnader referert et referanseår (som blir indeksjustert).		
Lyse oransje felt har verdier for referanseanlegget, og <u>bør</u> ikke endres.		
Lyse gråe felter har formler med beregnede standardverdier som kan overskrives.		
Gråe felter har formler (med mellomresultat), og <u>bør</u> ikke endres.		
Mørke gråe felter har formler (med resultat) som ikke <u>bør</u> endres.		
NB! Røde tall er negative verdier.		
GENERELT		
Økonomiske data		
Analyseår		2021 [årstall]
Kalkulasjonsrente (diskret)		6,00 % [%]
Kontinuerlig kalkulasjonsrente		5,83 % [%]
Kraftpris		0,50 [kroner/kWh]
Arbeidskostnad, timepris		1 000 [kroner/time]
Kostnadsindeks (default referanseår er 2000 med KPI = 75,5)		1,5325 [-]
AGGREGAT		
Kjøremønster		
Driftstid pr. år (totalt inkl. ev. dellast og overlast)		5 000 [timer/år]
Driftstid i dellast pr. år		0 [timer/år]
Driftstid i overlast pr. år		0 [timer/år]
Antall start/stopp pr. år etter idriftsettelse/rehabilitering		150 [-]
Antall start/stopp pr. år (forventet i fremtiden)		150 [-]
Kostnad pga. feil ifm. start/stopp		
Antall arbeidstimer for utbedring av en feil		15 [timer]
Varighet av utilgjengelighet (forventet utetid pga. feil)		30 [timer]
Kostnad for en time utilgjengelighet pr. MW		30 [kroner/time/MW]
Gjennomsnittlig materiell- og reisekostnad for feil (referanse)		2 000 [kroner]
Sannsynlighet for feil ifm. start/stopp		0,01 [-]
HOVEDSTENGEVENTIL		
Har anlegget ventil?		ja [ja , nei]
Ventiltype		kule [kule, spjeld, sluse]
Ventilstyring		vann [vann, olje]
Diameter (dimensjon)		2000 [mm]
Ventil idriftsatt/rehabiliteret		1990 [årstall]
TURBIN		
Turbintype		francis [pelton, francis]
Fallhøyde (netto, fratrukket falltap)		300 [m]
Turtall		375 [o/min]
Antall stråler (pelton)		[-]
Løpehjulets avløpsdiameter (francis)		1,911 [m]
Effekt (effektfaktor * generatorytelse)		99 [MW]
År for førstkommende rehabilitering		2030 [årstall]
Teknisk tilstand (tilstandskarakter - påvirker kun marginalkostnader)		
Løpehjul		2 [-]

GENERATOR		
Merkeytelse	110 [MVA]	
År for førstkomende rehabilitering av statorvikling	2030 [årstall]	
Merkespenning	12 [kV]	
Kostnadsfaktorer		
Generatoroverhaling	0,5 [-]	
Stator blikkpakke (rehabiliteringskostnad stator blikkpakke +	0,5 [-]	
Polvikling (rehabiliteringskostnad polvikling / rehabiliteringsk	0,122 [-]	
Tekniske data		
Effektfaktor	0,9 [-]	
Storboring	4000 [mm]	
Jernlengde	2300 [mm]	
Kvalitetsfaktorer		
Sporkiling	5 [-]	
Kjølemetode	1 [-]	
Pressanordning	5 [-]	
Statorinnfesting	5 [-]	
Friksjon pol-polhatt	5 [-]	
Fleksibilitet, polviklingsforbindelser	5 [-]	
Teknisk tilstand (tilstandskarakter - påvirker kun marginalkostnader)		
Statorvikling	2 [-]	
Stator blikkpakke	2 [-]	
Polvikling	2 [-]	
Varighet av stans (påvirker kun marginalkostnader)		
Kortvarig stans (TRUE) / langvarig stans (FALSE)	FALSE	[TRUE, FALSE]
Hvis kortvarig (TRUE): varighet av stans	8,0	[timer]
Hvis kortvarig (TRUE): tid til "kald start"	24,0	[timer]
VANNVEI/TUNNEL/TRYKKSJAKT		
Kostnader pr. start/stopp		[kroner]
BRYTER		
Kostnader pr. start/stopp		[kroner]
KRAFTTRANSFORMATOR		
Kostnader pr. start/stopp		[kroner]
ANNET		
Kostnader pr. start/stopp		[kroner]

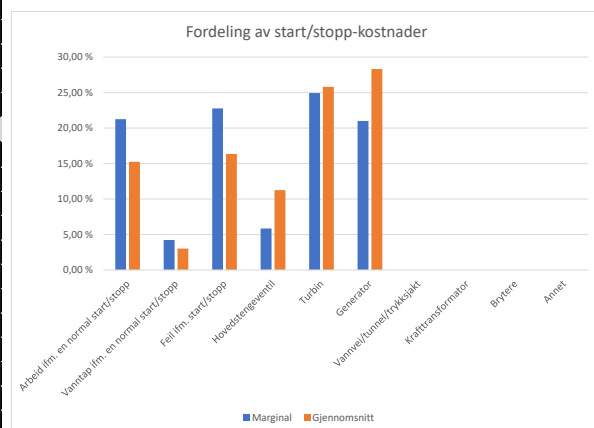
Resultat

OPPSUMMERING start/stopp-kostnader	
Kostnader som forfaller nær i tid (inngår i både gjennomsnitt og marginal)	
Arbeid ifm. en normal start/stopp	1 000 [kroner]
Vanntap ifm. en normal start/stopp	198 [kroner]
Feil ifm. start/stopp	1 072 [kroner]
Vedlikehold hovedstengeventil	194 [kroner]
Vedlikehold turbin	80 [kroner]
Vedlikehold generator	222 [kroner]
Vannvei/tunnel/trykksjakt	0 [kroner]
Bryter	0 [kroner]
Krafttransformator	0 [kroner]
Annet	0 [kroner]
Sum	2 767 [kroner]

Kostnader som forfaller ved fremtidige rehabiliteringer beregnet som gjennomsnittskostn	
Levetidsreduksjon hovedstengeventil	544 [kroner]
Rehabilitering turbin	393 [kroner]
Levetidsreduksjon turbin	1 219 [kroner]
Overhaling generator	439 [kroner]
Levetidsreduksjon statorvikling	877 [kroner]
Levetidsreduksjon stator blikkpakke	211 [kroner]
Levetidsreduksjon polvikling	109 [kroner]
Annet	[kroner]
Gjennomsnittskostnad pr. start/stopp	6 558 [kroner]
Spesifikk start/stopp-kostnad	66,24 [kroner/MW]

Kostnader som forfaller ved fremtidige rehabiliteringer diskonterte til tidspunktet for star	
Levetidsreduksjon hovedstengeventil	81 [kroner]
Rehabilitering turbin	393 [kroner]
Levetidsreduksjon turbin	701 [kroner]
Overhaling generator	79 [kroner]
Levetidsreduksjon statorvikling	504 [kroner]
Levetidsreduksjon stator blikkpakke	121 [kroner]
Levetidsreduksjon polvikling	62 [kroner]
Annet	[kroner]
Marginalkostnad pr. start/stopp	4 708 [kroner]
Spesifikk start/stopp-kostnad	47,56 [kroner/MW]

Fordeling av start/stopp-kostnader	Marginalt	Gjennomsnitt
Arbeid ifm. en normal start/stopp	21,24 %	15,25 %
Vanntap ifm. en normal start/stopp	4,22 %	3,03 %
Feil ifm. start/stopp	22,76 %	16,34 %
Hovedstengeventil	5,85 %	11,26 %
Turbin	24,93 %	25,80 %
Generator	21,00 %	28,32 %
Vannvei/tunnel/trykksjakt	0,00 %	0,00 %
Krafttransformator	0,00 %	0,00 %
Brytere	0,00 %	0,00 %
Annet	0,00 %	0,00 %
Sum	100,00 %	100,00 %



OPPSUMMERING rampingkostnader	
Kostnader pga. levetidsreduksjon løpehjul	
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	222 [kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	128 [kroner]

OPPSUMMERING kostnader pr. time kjøring på dellast	
Kostnader pga. levetidsreduksjon løpehjul	
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	244 [kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	140 [kroner]

OPPSUMMERING kostnader pr. time kjøring på overlast	
Kostnader pga. levetidsreduksjon løpehjul	
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	244 [kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	140 [kroner]

Beregninger

AGGREGAT		
Kostnad for arbeid ifm. en normal start/stopp		
Gjennomsnittlig antall arbeidstimer pr. start/stopp	1,00	[timer]
Kostnad for arbeid ifm. en normal start/stopp	1 000,00	[kroner]
Kostnad pga. feil ifm. start/stopp		
Gjennomsnittlig kostnad pr. feil	107 165	[kroner/feil]
Kostnad pga. feil ifm. start/stopp	1 071,65	[kroner]
HOVEDSTENGEVENTIL		
Beregning av gjenværende levetid, levetidsreduksjon osv. for hovedstengeventil		
Antall start/stopp mellom rehabiliteringer	4 000	[-]
Antall start/stopp etter installasjon/rehabilitering	4 650	[-]
Gjenværende antall start/stopp før rehabilitering	650	[-]
Beregnet eventuell tidligelegging av rehabilitering pga. en s	58	[timer]
Rehabiliteringstidspunkt pga. alder	2030	[årstall]
Rehabiliteringstidspunkt pga. start/stopp	2022	[årstall]
Start/stopp dimensjonerende for ventil?	ja	[ja, nei]
Kostnader relatert til start/stopp		
Årlig vedlikeholdskostnad ventil	38 822	[kroner]
Årlig vedlikeholdskostnad knyttet til start/stopp	29 117	[kroner]
Gjennomsnittskostnad pr. start/stopp pga. vedlikehold	194,11	[kroner]
Rehabiliteringskostnad	1 430 287	[kroner]
Rehabiliteringskostnad knyttet til start/stopp	1 072 715	[kroner]
Rehabiliteringsintervall	27	[år]
Gjennomsnittskostnad pr. start/stopp pga. levetidsreduksjo	544,14	[kroner]
Marginalkostnad pr. start/stopp pga. levetidsreduksjon	81,34	[kroner]
TURBIN		
Skalering av turbin		
Turbinpris (pelton, referanseår)	--	[Mkroner]
Fartstall Ω^* (francis)	0,33	[-]
Turbinvekt (francis)	242,44	[tonn]
Referanseverdier for aktuell turbin		
Vanntapskonstant	4,01	[kWh/MW]
Rehabiliteringskostnad	6 757 057	[kroner]
Rehabiliteringsintervall (for teknisk løsning og kjørestrategi)	20	[år]
Rehabiliteringskostnad pr. år (annuitet)	589 111	[kroner/år]
Rehabiliteringskostnad pr. år knyttet til start/stopp	58 911	[kroner/år]
Vedlikeholdskostnad pr. år	120 743	[kroner/år]
Vedlikeholdskostnad pr. år knyttet til start/stopp	12 074	[kroner/år]
Beregnet designet total driftstid (DTD)	145 000	[timer]

Levetidsreduksjon pr. start/stopp		
Løpehjul		
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning)	15,00	[timer]
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning og tilstand)	15,00	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for aktuell driftstid)	18,12	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for driftstid og teknisk tilstand)	18,12	[timer]
Levetidsreduksjon pr. ramping		
Løpehjul		
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning)	2,00	[timer]
Ekvivalent driftstid (korrigert for aktuell teknisk tilstand)	2,00	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for aktuell driftstid)	3,31	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for driftstid og teknisk tilstand)	3,31	[timer]
Levetidsreduksjon pr. time kjøring på dellast		
Løpehjul		
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning)	3,00	[timer]
Ekvivalent driftstid (korrigert for aktuell teknisk tilstand)	3,00	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for aktuell driftstid)	3,62	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for driftstid og teknisk tilstand)	3,62	[timer]
Levetidsreduksjon pr. time kjøring på overlast		
Løpehjul		
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning)	3,00	[timer]
Ekvivalent driftstid (korrigert for aktuell teknisk tilstand)	3,00	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for aktuell driftstid)	3,62	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for driftstid og teknisk tilstand)	3,62	[timer]
Kostnad for vanntap ifm. en normal start/stopp	198,50	[kroner]
Kostnader pr. start/stopp		
Gjennomsnittlig kostnadsbidrag pga. vedlikehold	80,50	[kroner]
Gjennomsnittlig kostnadsbidrag pga. rehabilitering	392,74	[kroner]
Kostnader pga. levetidsreduksjon løpehjul		
Gjennomsnittskostnad (udiskontert)	699,01	[kroner]
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	1 218,85	[kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	700,66	[kroner]
Kostnader pr. ramping		
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	222,31	[kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	127,79	[kroner]
Kostnader pr. time kjøring på dellast		
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	243,77	[kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	140,13	[kroner]
Kostnader pr. time kjøring på overlast		
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	243,77	[kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	140,13	[kroner]

GENERATOR		
Levetidsreduksjon pr. start/stopp		
Statorvikling		
Ekvivalent driftstid pr. start/stopp	10,00	[timer]
Spenning	0,09	[timer]
Jernlengde	0,30	[timer]
Sporkiling	0,00	[timer]
Kjølemetode	0,00	[timer]
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning)	10,39	[timer]
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning og tilstand)	10,39	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for aktuell driftstid)	13,88	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for driftstid og teknisk tilstand)	13,88	[timer]
Stator blikkpakke		
Ekvivalent driftstid pr. start/stopp	5,00	[timer]
Boringsdiameter	0,20	[timer]
Pressanordning	0,00	[timer]
Statorinnfesting	0,00	[timer]
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning)	4,80	[timer]
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning og tilstand)	4,80	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for aktuell driftstid)	7,35	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for driftstid og teknisk tilstand)	7,35	[timer]
Polvikling		
Ekvivalent driftstid pr. start/stopp	10,00	[timer]
Jernlengde	0,60	[timer]
Friksjon pol-polhatt	0,00	[timer]
Fleksibilitet	0,00	[timer]
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning)	10,60	[timer]
Ekvivalent driftstid (for aktuell teknisk løsning og tilstand)	10,60	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for aktuell driftstid)	14,09	[timer]
Levetidsreduksjon (korrigert for driftstid og teknisk tilstand)	14,09	[timer]

Rehabiliteringskostnader/-intervall		
Generatoroverhaling		
Generatoroverhaling	4 150 000	[kroner]
År for førstkomende generatoroverhaling	2050	[årstall]
Statorvikling		
Rehabiliteringskostnad	8 300 000	[kroner]
Rehabiliteringsintervall (for teknisk løsning og kjørestregeri)	40	[år]
Rehabiliteringsintervall (koordinert for generator)	39	[år]
Beregnet designet total driftstid (DTD)	260 000	[timer]
År for førstkomende rehabilitering	2030	[årstall]
Stator blikkpakke		
Rehabiliteringskostnad	4 150 000	[kroner]
Rehabiliteringsintervall (for teknisk løsning og kjørestregeri)	80	[år]
Rehabiliteringsintervall (koordinert for generator)	79	[år]
År for førstkomende rehabilitering	2030	[årstall]
Polvikling		
Rehabiliteringskostnad	1 012 600	[kroner]
Rehabiliteringsintervall (for teknisk løsning og kjørestregeri)	39	[år]
Rehabiliteringsintervall (koordinert for generator)	39	[år]
År for førstkomende rehabilitering	2030	[årstall]
Kostnader pr. start/stopp		
Generatorens mindre komponenter		
Kostnad for forebyggende vedlikehold	222,21	[kroner]
Generatoroverhaling i tiden mellom utskifting av statorviklinger		
Gjennomsnittskostnad (udiskontert)	166,65	[kroner]
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	438,50	[kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	78,60	[kroner]
Levetidsreduksjon statorvikling		
Gjennomsnittskostnad (udiskontert)	333,30	[kroner]
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	877,01	[kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	504,15	[kroner]
Levetidsreduksjon stator blikkpakke		
Gjennomsnittskostnad (udiskontert)	44,13	[kroner]
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	211,08	[kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	121,33	[kroner]
Levetidsreduksjon polvikling		
Gjennomsnittskostnad (udiskontert)	41,28	[kroner]
Gjennomsnittskostnad (annuitet)	108,63	[kroner]
Marginalkostnad (diskontert)	62,44	[kroner]

Referanseanlegg

AGGREGAT	
Referanseaggregat	
Merkeytelse	150 [MW]
Driftstid pr. år (totalt inkl. ev. dellast og overlast)	5 000 [timer/år]
Driftstid i dellast pr. år	0 [-]
Driftstid i overlast pr. år	0 [-]
Antall start/stopp pr. år	150 [-]
Arbeid pga. en normal start/stopp	2,0 [timer]
Referansefaktorer for justering av ekvivalent driftstid pga. teknisk tilstand	
Tilstandskarakter = 1	0,5 [-]
Tilstandskarakter = 2	1,0 [-]
Tilstandskarakter = 3	2,5 [-]
Tilstandskarakter = 4	10,0 [-]
HOVEDSTENGEVENTIL	
Referanse hovedstengeventil (DN 1500 kuleventil)	
Diameter (dimensjon)	1 500,00 [mm]
Fallhøyde (trykk)	600,00 [mVS]
Faktor for spjeld- og sluseventiler	0,75 [-]
Faktor for oljehydraulisk pådrag	0,85 [-]
Rehabiliteringskostnad (referanseår)	1 400 000 [kroner]
Årlig vedlikeholdskostnad for kuleventil (referanseår)	38 000 [kroner/år]
Andel av årlig vedlikehold som er relatert til start/stopp	0,75 [-]
Rehabiliteringsintervall, tidsstyrt vedlikehold	40 [år]
Rehabiliteringsintervall kuleventil, frekvensstyrt vedlikehold	4 000 [start/stopp]
Rehabiliteringsintervall spjeldventil, frekvensstyrt vedlikehold	4 000 [start/stopp]
Rehabiliteringsintervall sluseventil, frekvensstyrt vedlikehold	3 000 [start/stopp]
TURBIN	
Pelton referanseturbin (150 MW)	
Vanntapskonstant	2,08 [kWh/MW]
Kostnad (nypris referanseår)	53,60 [Mkroner]
Rehabiliteringskostnad, fast andel	1 500 000 [kroner]
Rehabiliteringskostnad, størrelseavhengig andel	3 000 000 [kroner]
Vedlikeholdskostnad pr. år	90 000 [kroner/år]
Andel av årlig vedlikehold som er størrelseavhengig	0,50 [-]
Andel av årlig vedlikehold som er relatert til start/stopp	0,05 [-]
Rehabiliteringsintervall	20 [år]
Ekvivalent driftstid pr. start/stopp	15,0 [timer]
Ekvivalent driftstid pr. ramping	2,0 [timer]
Ekvivalent driftstid pr. time dellastkjøring	3,0 [timer]
Ekvivalent driftstid pr. time overlastkjøring	3,0 [timer]
Beregnet designet total driftstid (DTD)	145 000 [timer]

Francis referanseturbin (150 MW)		
Vanntapskonstant lavtrykks francis (h < 150 m)		7,00 [kWh/MW]
Vanntapskonstant høytrykks francis (h > 150 m)		4,01 [kWh/MW]
Rehabiliteringskostnad, fast andel		1 500 000 [kroner]
Rehabiliteringskostnad, størrelseavhengig andel		3 000 000 [kroner]
Vekt		250 [tonn]
Vedlikeholdskostnad pr. år		80 000 [kroner/år]
Andel av årlig vedlikehold som er størrelseavhengig		0,50 [-]
Andel av årlig vedlikehold som er relatert til start/stopp		0,10 [-]
Rehabiliteringsintervall		20 [år]
Ekvivalent driftstid pr. start/stopp		15,0 [timer]
Ekvivalent driftstid pr. ramping		2,0 [timer]
Ekvivalent driftstid pr. time dellastkjøring		3,0 [timer]
Ekvivalent driftstid pr. time overlastkjøring		3,0 [timer]
Beregnet designet total driftstid (DTD)		145 000 [timer]
GENERATOR		
Referanse statorvikling		
Rehabiliteringsintervall		40 [år]
Ekvivalent driftstid pr. start/stopp		10,0 [timer]
Spenning		11,0 [kV]
Vekttall for innflytelse av spenning		0,1 [-]
Jernlengde		2,0 [m]
Vekttall for innflytelse av jernlengde		0,2 [-]
Karakter for sporkiling		5 [-]
Vekttall for innflytelse av sporkiling		0,2 [-]
Karakter for kjølemetode		1 [-]
Vekttall for innflytelse av kjølemetode		0,3 [-]
Beregnet designet total driftstid (DTD)		260 000 [timer]
Referanse stator blikkpakke		
Rehabiliteringsintervall		80 [år]
Ekvivalent driftstid pr. start/stopp		5,0 [timer]
Boringsdiameter		5,0 [m]
Vekttall for innflytelse av boringsdiameter		0,2 [-]
Karakter for pressanordning		5 [-]
Vekttall for innflytelse av pressanordning		0,3 [-]
Karakter for statorinnfesting		5 [-]
Vekttall for innflytelse av statorinnfesting		0,3 [-]
Referanse polvikling		
Rehabiliteringsintervall		40 [år]
Ekvivalent driftstid pr. start/stopp		10 [timer]
Lengde		2,0 [m]
Vekttall for innflytelse av lengde		0,4 [-]
Karakter for friksjon pol-polhatt		5 [-]
Vekttall for innflytelse av friksjon pol-polhatt		0,2 [-]
Karakter for fleksibilitet, polviklingsforbindelser		5 [-]
Vekttall for innflytelse av fleksibilitet, polviklingsforbindelser		0,2 [-]
Referanse andre generatorkomponenter		
Vedlikeholdskostnad mindre komponenter, fast andel (referanse)		90,00 [kroner/start]
Vedlikeholdskostnad mindre komponenter, størrelsesavhengig		0,50 [kroner/MW]

B Vedlegg 2 Grenseverdibetraktninger for kjøremønsterrelaterte kostnader

Vedlegg 2 inneholder prosjektnotatet AN 21.12.48 - *Grenseverdibetraktninger for kjøremønsterrelaterte kostnader.*



SINTEF Energi AS
Postadresse:
Postboks 4761 Torgarden
7465 Trondheim
Sentralbord: 45456000
energy.research@sintef.no

Foretaksregister:
NO 939 350 675 MVA

Prosjektnotat

Grenseverdibetraktninger for kjøremønsterrelaterte kostnader

VERSJON 1.0	DATO 2021-11-04
FORFATTER(E) Arnt Ove Eggen	
OPPDRAGSGIVER(E) HydroCen	OPPDRAGSGIVERS REFERANSE
PROSJEKTNUMMER 502001433-6	ANTALL SIDER OG VEDLEGG: 19

Sammendrag

Dette prosjektnotatet dokumenterer en modell som med utgangspunkt i en gitt vannverdi og gitte (stiliserte) markedspriser beregner inntekter fra tre alternative produksjonsstrategier:

- kjøring på bestpunkt uansett markedspris
- kjøring på lav dellast ved markedspriser lavere enn vannverdien
- stans ved markedspriser lavere enn vannverdien.

Hensikten med modellen er å beregne grenseverdier for start/stopp-kostnaden som funksjon av differanse mellom vannverdi og markedspris og varigheten av tidsperioden med lav pris, samt beregne grenseverdier for varighet av tidsperioden med lav pris som funksjon av differanse mellom vannverdi og markedspris og start/stopp-kostnad. Disse grenseverdiene angir altså hvor lav start/stopp-kostnaden må være, eller hvor lang lavprisperioden må være, før det er riktig å stanse aggregatet med en gitt vannverdi og markedspris. Modellen omfatter også en straffekostnad for kjøring på lav dellast, samt muligheter til inntekter fra reservekraftmarkedet.



UTARBEIDET AV Arnt Ove Eggen	SIGNATUR <i>Arnt Ove Eggen</i> <small>Arnt Ove Eggen (Nov 9, 2021 11:35 GMT+1)</small>
GODKJENT AV Eivind Solvang	SIGNATUR <i>Eivind Solvang</i> <small>Eivind Solvang (Nov 9, 2021 13:00 GMT+1)</small>
PROSJEKTNOTAT NR AN 21.12.48	GRADERING Åpen

Innholdsfortegnelse

1	Innledning	3
2	Grunnleggende likninger	4
3	Alternative produksjonsstrategier	6
3.1	Alternativ 1: Produsere med høy vannføring i tidsperioden med lav pris.....	6
3.2	Alternativ 2: Produsere med lav vannføring i tidsperioden med lav pris	7
3.3	Alternativ 3: Stanse produksjonen i tidsperioden med lav pris.....	8
4	Grenseverdibetraktninger	9
4.1	Grenseverdier for Alternativ 1 og Alternativ 2	9
4.2	Grenseverdier for Alternativ 1 og Alternativ 3	10
4.3	Grenseverdier for Alternativ 2 og Alternativ 3	11
5	Regnearkmodell	12
5.1	Innledning	12
5.2	Inndata brukt i eksemplet	12
5.3	Eksempel på bruk av regnearket.....	14

1 Innledning

Dette prosjektnotatet er utarbeidet i HydroCen WP3.2 *Remaining useful life, failure probability*. Målet med denne aktiviteten er å utarbeide en modell for kjøremønsterrelaterte kostnader som kan realiseres i et regneark (se egen teknisk rapport "*Modell for kjøremønsterrelaterte kostnader*"). Kostnader som beregnes i regnearket kan i neste omgang benyttes ifm. produksjonsplanlegging.

En grunnleggende antakelse er at et kjøremønster som avviker fra designspesifikasjonen medfører økte påkjenninger og økt degradering (f.eks. økt slitasje) på produksjonsanlegget. Denne økte slitasjen kan bidra til å redusere komponenters levetid, noe som kan medføre at rehabilitering/utskifting må gjennomføres tidligere enn opprinnelig forventet, og som dermed også kan medføre økt nåverdi av fremtidige rehabiliterings-/utskiftingskostnader. Dette er kostnader som man ønsker å ta inn som en del av produksjonsplanleggingen slik at produksjonsplanlegger kan veie inntekt i dag mot forventede kostnader i fremtiden.

Modellen for å beregne kjøremønsterrelaterte kostnader, inkl. start/stopp-kostnader og kostnader for kjøring utenfor normalområdet, består av mange kostnadselementer, og omfatter mange komponenter og mange inndata. Noen helt grunnleggende inndata er antall driftstimer som en start/stopp tilsvarer. Forutsetningen er altså at slitasjen ved en enkelt start/stopp tilsvarer slitasjen ved et gitt antall timer med normal drift, eller sagt på en annen måte: med hvor mange timer reduserer en start/stopp de enkelte komponenters levetid. Tilsvarende, hvor mange normale driftstimer tilsvarer de økte påkjenningene med en time kjøring på lav dellast. Det finnes lite litteratur på dette, slik at disse (fundamentale) estimatene er beheftet med stor usikkerhet. Denne usikkerheten medfører også stor usikkerhet i de beregnede start/stopp-kostnadene, med påfølgende usikkerhet knyttet til optimal produksjonsstrategi.

Hensikten med dette prosjektnotatet er å snu problemstillingen. Spørsmålet er da hvor stor må differansen mellom vannverdi og markedspris være før man bør redusere produksjonen fra det normale driftsområde til lav dellast (man sparer da noe vann, men taper på dårligere virkningsgrad og økt slitasje), eller hvor lav må start/stopp-kostnaden være, og/eller hvor langt må tidsperioden med lav pris være, før man bør stanse produksjonen helt (man sparer da alt vannet, men pådrar seg en start/stopp-kostnad).

Hensikten med prosjektnotatet og modellen er å bidra til økt innsikt i hvilken størrelsesorden parametre som start/stopp-kostnad og straffekostnad på dellastkjøring må ha før det bør medføre en endring i produksjonsstrategi. Regnearket er derfor et verktøy som kan benyttes som støtte og underlag for å legge en produksjonsstrategi.

2 Grunnleggende likninger

Produksjon

Effekten fra et vannkraftaggregat er gitt av

$$P(H, Q) = \eta_{transformator} \cdot \eta_{generator}(P_{turbin}) \cdot \eta_{turbin}(H, Q) \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot 10^{-6} \quad [\text{MW}] \quad (1)$$

der

$P(H, Q)$	produksjon ved gitt fallhøyde og vannføring [MW]
$\eta_{transformator}$	virkningsgrad transformator ($\approx 1,0$, og antatt uavhengig av produksjonen) [-]
$\eta_{generator}$	virkningsgrad generator (som funksjon av mekanisk effekt fra turbinen) [-]
η_{turbin}	virkningsgrad turbin (som funksjon av fallhøyde og vannføring) [-]
ρ	masse tetthet til vann (antatt verdi: 1000 kg/m^3)
g	tyngdeakselerasjon (antatt verdi: $9,81 \text{ m/s}^2$)
H	netto fallhøyde (ekskl. falltap) [m] (antatt konstant i hele tidsperioden)
Q	vannføring (antatt konstant innenfor en gitt tidsperiode) [m^3/s]

Brutto inntekt

Brutto inntekt i en tidsperiode (med konstant vannføring/produksjon) er gitt av

$$I = P(H, Q) \cdot t \cdot p \quad (= P(H, Q) \cdot \int^T p(t) dt) \quad [\text{euro}] \quad (2)$$

der

I	inntekt i tidsperioden med produksjon [euro]
t	varighet av tidsperiode med produksjon [timer]
p	markedspris i tidsperioden med produksjon (antatt konstant i tidsperioden) [euro/MWh]

Vannforbruk

Vannforbruk V (med konstant vannføring/produksjon) er gitt av

$$V = 3600 \cdot Q \cdot t \quad [\text{m}^3] \quad (3)$$

Restverdi i magasinet

Restverdi i magasinet etter en tidsperiode med produksjon er gitt av

$$I_R = V_R \cdot \frac{e}{1000} \cdot p_{\text{vannverdi}} \quad [\text{euro}] \quad (4)$$

der

I_R	"restverdi" av vann i magasinet [euro]
V_R	"restvolum" av vann i magasinet [m^3]
e	energiekvivalent [kWh/m^3]
$p_{\text{vannverdi}}$	vannverdi [euro/MWh]

3 Alternative produksjonsstrategier

For å kunne illustrere de mer prinsipielle forholdene forutsettes det en forenklet produksjonsstrategi – dvs. enten produksjon ved høy vannføring (egentlig optimal vannføring), produksjon ved lav vannføring (egentlig lavere enn "normalområdet") eller ingen produksjon (dvs. stans).

3.1 Alternativ 1: Produsere med høy vannføring i tidsperioden med lav pris

Brutto inntekt ved å produsere med høy vannføring i tidsperioden med høy pris er gitt av

$$I_{høy\ pris} = P(H, Q_{høy}) \cdot t_{høy} \cdot p_{høy} \quad (= P(H, Q) \cdot \int^{T_{høy}} p(t) dt) \quad [\text{euro}] \quad (5)$$

der

$I_{høy\ pris}$	inntekt ved produksjon til høy pris [euro]
$P(H, Q_{høy})$	produksjon ved gitt fallhøyde og (høy, konstant) vannføring [MW]
$t_{høy}$	varighet av tidsperiode med høy pris [timer]
$p_{høy}$	pris i tidsperiode med høy pris [euro/MWh]

Brutto inntekt ved å produsere med høy vannføring i tidsperioden med lav pris er gitt av

$$I_{lav\ pris,1} = P(H, Q_{høy}) \cdot t_{lav} \cdot p_{lav} \quad [\text{euro}] \quad (6)$$

der

$I_{lav\ pris,1}$	inntekt ved produksjon til lav pris [euro]
t_{lav}	varighet av tidsperiode med lav pris [timer]
p_{lav}	pris i tidsperiode med lav pris [euro/MWh]

Vannforbruk

$$V_1 = 3600 \cdot Q_{høy} \cdot t_{høy} + 3600 \cdot Q_{høy} \cdot t_{lav} = 3600 \cdot Q_{høy} \cdot (t_{høy} + t_{lav}) \quad [\text{m}^3] \quad (7)$$

Restverdi i magasinet I_{R1} settes (i denne forenklede sammenligningsanalysen) lik 0 etter at det er produsert for fullt i hele tidsperioden.

Inntekt I_1 ved å produsere med høy (konstant) vannføring i hele tidsperioden er gitt av

$$I_1 = I_{høy\ pris} + I_{lav\ pris,1} = P(H, Q_{høy}) \cdot (t_{høy} \cdot p_{høy} + t_{lav} \cdot p_{lav}) \quad [\text{euro}] \quad (8)$$

3.2 Alternativ 2: Produsere med lav vannføring i tidsperioden med lav pris

Brutto inntekt ved å produsere med lav vannføring i tidsperioden med lav pris er gitt av

$$I_{høy\ pris} + I_{lav\ pris,2} = P(H, Q_{høy}) \cdot t_{høy} \cdot p_{høy} + P(H, Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot p_{lav} \quad [\text{euro}] \quad (9)$$

der

$P(H, Q_{lav})$ produksjon ved gitt fallhøyde og (lav, konstant) vannføring [MW]
inkl. redusert virkningsgrad for turbin (som funksjon av fallhøyde og vannføring) [-]
og generator (som funksjon av mekanisk effekt fra turbinen) [-]

Inntekt fra eventuelt reservekraftmarked er (forenklet) gitt av

$$I_{RK} = P_{RK} \cdot p_{RK} \cdot t_{lav} = \left(P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav}) \right) \cdot p_{RK} \cdot t_{lav} \quad [\text{euro}] \quad (10)$$

der

P_{RK} tilbudt effekt i reservekraftmarkedet [MW]
(forenklet til differansen mellom høy og lav produksjon)
 p_{RK} pris i reservekraftmarkedet [euro/MW/time] (forenklet til samme pris alle timer)

Vannforbruk

$$V_2 = 3600 \cdot Q_{høy} \cdot t_{høy} + 3600 \cdot Q_{lav} \cdot t_{lav} = 3600 \cdot (Q_{høy} \cdot t_{høy} + Q_{lav} \cdot t_{lav}) \quad [\text{m}^3] \quad (11)$$

Restverdi i magasinet I_{R2} (i forhold til høy vannføring i hele tidsperioden)

$$\begin{aligned} I_{R2} &= V_{R2} \cdot \frac{e}{1000} \cdot p_{vannverdi} = (V_1 - V_2) \cdot \frac{e}{1000} \cdot p_{vannverdi} \\ &= 3,6 \cdot (Q_{høy} - Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} \quad [\text{euro}] \end{aligned} \quad (12)$$

Inntekt I_2 ved å produsere med lav vannføring i tidsperioden med lav pris hensyntatt inntekt fra reservekraftmarkedet, restverdi i magasinet og en straffekostnad for dellastkjøring er gitt av

$$\begin{aligned} I_2 &= P(H, Q_{høy}) \cdot t_{høy} \cdot p_{høy} + P(H, Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot p_{lav} + \left(P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav}) \right) \cdot p_{RK} \cdot t_{lav} \\ &\quad + 3,6 \cdot (Q_{høy} - Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - k_{lav}(Q_{lav}) \cdot t_{lav} \quad [\text{euro}] \end{aligned} \quad (13)$$

der

$k_{lav}(Q_{lav})$ straffekostnad for dellastkjøring som funksjon av (lav konstant) vannføring [euro/time]

3.3 Alternativ 3: Stanse produksjonen i tidsperioden med lav pris

Brutto inntekt ved å stanse produksjonen i tidsperioden med lav pris er gitt av

$$I_{h\text{ø}y\text{ pris}} = P(H, Q_{h\text{ø}y}) \cdot t_{h\text{ø}y} \cdot p_{h\text{ø}y} \quad [\text{euro}] \quad (5)$$

Vannforbruk

$$V_3 = 3600 \cdot Q_{h\text{ø}y} \cdot t_{h\text{ø}y} \quad [\text{m}^3] \quad (14)$$

Restverdi i magasinet I_{R3} (i forhold til høy vannføring i hele tidsperioden)

$$\begin{aligned} I_{R3} &= V_{R3} \cdot \frac{e}{1000} \cdot p_{vannverdi} = (V_1 - V_3) \cdot \frac{e}{1000} \cdot p_{vannverdi} \\ &= 3,6 \cdot Q_{h\text{ø}y} \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} \quad [\text{euro}] \end{aligned} \quad (15)$$

Inntekt I_3 hensyntatt restverdi i magasinet og kostnad for en start/stopp i tidsperioden er gitt av

$$I_3 = P(H, Q_{h\text{ø}y}) \cdot t_{h\text{ø}y} \cdot p_{h\text{ø}y} + 3,6 \cdot Q_{h\text{ø}y} \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - K_{ss} \quad [\text{euro}] \quad (16)$$

der

K_{ss} kostnad for start/stopp [euro]

4 Grenseverdibetraktninger

4.1 Grenseverdier for Alternativ 1 og Alternativ 2

Grenseverdier finnes når inntekten er den samme for begge alternativene, dvs. når $I_1 = I_2$.

$$\begin{aligned}
 I_1 = I_2 &\Leftrightarrow P(H, Q_{høy}) \cdot (t_{høy} \cdot p_{høy} + t_{lav} \cdot p_{lav}) \\
 &= P(H, Q_{høy}) \cdot t_{høy} \cdot p_{høy} + P(H, Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot p_{lav} + (P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav})) \cdot p_{RK} \cdot t_{lav} \\
 &\quad + 3,6 \cdot (Q_{høy} - Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - k_{lav}(Q_{lav}) \cdot t_{lav} \quad [\text{euro}] \quad (17)
 \end{aligned}$$

Brutto inntekt i tidsperioden med høy pris er den samme i begge alternativene, og trekkes derfor ut fra likningen. Varigheten av tidsperioden med lav pris inngår i alle de resterende leddene, og forkortes derfor bort i likningen. Varigheten av tidsperioden med lav pris har altså ingen betydning for valgt produksjonsstrategi – det er endring i virkningsgrad sammen med prisdifferansen som bestemmer beste produksjonsstrategi.

$$\begin{aligned}
 P(H, Q_{høy}) \cdot p_{lav} &= P(H, Q_{lav}) \cdot p_{lav} + (P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav})) \cdot p_{RK} \\
 &\quad + 3,6 \cdot (Q_{høy} - Q_{lav}) \cdot e \cdot p_{vannverdi} - k_{lav}(Q_{lav}) \quad [\text{euro}] \quad (18)
 \end{aligned}$$

For en gitt markedspris i tidsperioden med lav pris er straffekostnaden for dellastkjøring som gjør de to alternativene like gitt av

$$\begin{aligned}
 k_{lav}(Q_{lav})_{grense} &= (P(H, Q_{lav}) - P(H, Q_{høy})) \cdot p_{lav} + (P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav})) \cdot p_{RK} \\
 &\quad + 3,6 \cdot (Q_{høy} - Q_{lav}) \cdot e \cdot p_{vannverdi} \quad [\text{euro/time}] \quad (19)
 \end{aligned}$$

For en gitt straffekostnad er markedsprisen i tidsperioden med lav pris som gjør de to alternativene like gitt av

$$p_{lav,grense} = \frac{(P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav})) \cdot p_{RK} + 3,6 \cdot (Q_{høy} - Q_{lav}) \cdot e \cdot p_{vannverdi} - k_{lav}(Q_{lav})}{P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav})} \quad [\text{euro/MWh}] \quad (20)$$

4.2 Grenseverdier for Alternativ 1 og Alternativ 3

Grenseverdier finnes når inntekten er den samme for begge alternativene, dvs. når $I_1 = I_3$.

Brutto inntekt i tidsperioden med høy pris er den samme i begge alternativene, og inngår derfor ikke i likningen.

$$I_1 = I_3 \Leftrightarrow P(H, Q_{høy}) \cdot t_{lav} \cdot p_{lav} = 3,6 \cdot Q_{høy} \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - K_{ss} \quad [\text{euro}] \quad (21)$$

For en gitt tidsperiode med en gitt lav markedspris er start/stopp-kostnaden som gjør de to alternativene like gitt av

$$\begin{aligned} K_{ss,grense} &= 3,6 \cdot Q_{høy} \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - P(H, Q_{høy}) \cdot t_{lav} \cdot p_{lav} \\ &= (3,6 \cdot Q_{høy} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - P(H, Q_{høy}) \cdot p_{lav}) \cdot t_{lav} \quad [\text{euro}] \end{aligned} \quad (22)$$

For en gitt start/stopp-kostnad og markedspris er varigheten av tidsperioden med lav markedspris (varighet av stans) som gjør de to alternativene like gitt av

$$t_{lav,grense} = \frac{K_{ss}}{3,6 \cdot Q_{høy} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - P(H, Q_{høy}) \cdot p_{lav}} \quad [\text{timer}] \quad (23)$$

For en gitt start/stopp-kostnad og tidsperiode med lav pris er markedsprisen som gjør de to alternativene like gitt av

$$p_{lav,grense} = \frac{3,6 \cdot Q_{høy} \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - K_{ss}}{P(H, Q_{høy}) \cdot t_{lav}} \quad [\text{euro/MWh}] \quad (24)$$

4.3 Grenseverdier for Alternativ 2 og Alternativ 3

Grenseverdier finnes når inntekten er den samme for begge alternativene, dvs. når $I_2 = I_3$.

Brutto inntekt i tidsperioden med høy pris er den samme i begge alternativene, og inngår derfor ikke i likningen.

$$\begin{aligned}
 I_2 = I_3 &\Leftrightarrow P(H, Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot p_{lav} + \left(P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav}) \right) \cdot p_{RK} \cdot t_{lav} \\
 &\quad + 3,6 \cdot (Q_{høy} - Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - k_{lav}(Q_{lav}) \cdot t_{lav} \\
 &\quad = 3,6 \cdot Q_{høy} \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - K_{SS} \quad [\text{euro}] \\
 &\Leftrightarrow 3,6 \cdot Q_{lav} \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - P(H, Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot p_{lav} \\
 &\quad - \left(P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav}) \right) \cdot p_{RK} \cdot t_{lav} + k_{lav}(Q_{lav}) \cdot t_{lav} = K_{SS} \quad [\text{euro}] \quad (25)
 \end{aligned}$$

For en gitt tidsperiode med en gitt lav markedspris er start/stopp-kostnaden som gjør de to alternativene like gitt av

$$\begin{aligned}
 K_{SS, \text{grense}} &= 3,6 \cdot Q_{lav} \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - P(H, Q_{lav}) \cdot t_{lav} \cdot p_{lav} \\
 &\quad - \left(P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav}) \right) \cdot p_{RK} \cdot t_{lav} + k_{lav}(Q_{lav}) \cdot t_{lav} \\
 &= \left(3,6 \cdot Q_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - P(H, Q_{lav}) \cdot p_{lav} - \left(P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav}) \right) \cdot p_{RK} + k_{lav}(Q_{lav}) \right) \cdot t_{lav} \quad [\text{euro}] \quad (26)
 \end{aligned}$$

For en gitt start/stopp-kostnad og markedspris er varigheten av tidsperioden med lav markedspris (varighet av stans) som gjør de to alternativene like gitt av

$$t_{lav, \text{grense}} = \frac{K_{SS}}{3,6 \cdot Q_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - P(H, Q_{lav}) \cdot p_{lav} - \left(P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav}) \right) \cdot p_{RK} + k_{lav}(Q_{lav})} \quad [\text{timer}] \quad (27)$$

For en gitt start/stopp-kostnad og tidsperiode med lav markedspris (varighet av stans) er markedspris som gjør de to alternativene like gitt av

$$p_{lav, \text{grense}} = \frac{3,6 \cdot Q_{lav} \cdot t_{lav} \cdot e \cdot p_{vannverdi} - \left(P(H, Q_{høy}) - P(H, Q_{lav}) \right) \cdot p_{RK} \cdot t_{lav} + k_{lav}(Q_{lav}) \cdot t_{lav} - K_{SS}}{P(H, Q_{lav}) \cdot t_{lav}} \quad [\text{euro/MWh}] \quad (28)$$

5 Regnearkmodell

5.1 Innledning

Det er laget et eget regneark (se Kap. 5.3) som eksemplifiserer modellen som er beskrevet i dette notatet.

Regnearket beregner totale inntekter for seks ulike markedspriser lavere enn vannverdien og for fem ulike varigheter av hver lav markedspris for de tre alternative produksjonsstrategiene som er beskrevet i Kap. 3. Den beste produksjonsstrategien (dvs. den med den høyeste inntekten) for de ulike kombinasjonene av markedspris og varighet markeres med grønn bakgrunnsfarge. (NB! Dette er ingen optimalisering, men beregninger gitt forutsetningene.)

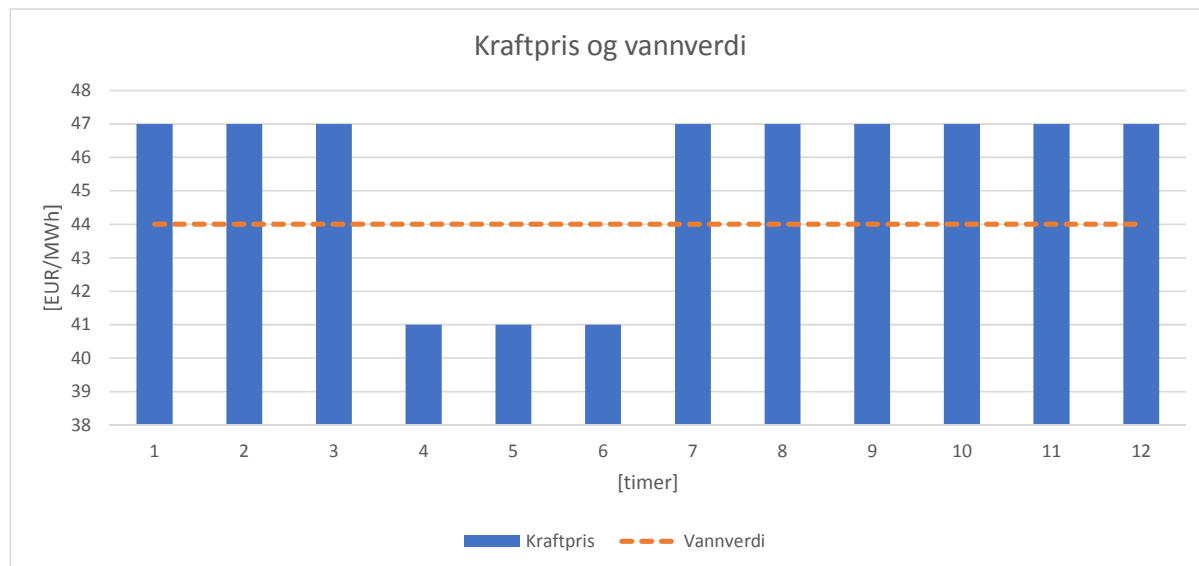
5.2 Inndata brukt i eksemplet

Vannverdi

Vannverdien i produksjonssystemet er satt til 44 EUR/MWh.

Markedspris

I en 12 timers tidsperiode er markedsprisen 47 EUR/MWh (dvs. høyere enn vannverdien) de første 3 timene. Deretter er prisen lavere enn vannverdien (44 EUR/MWh) i et antall timer, før prisen igjen går opp til 47 EUR/MWh. Figur 1 viser et eksempel der markedsprisen er 41 EUR/MWh i 3 timer.



Figur 1 Kraftpris og vannverdi

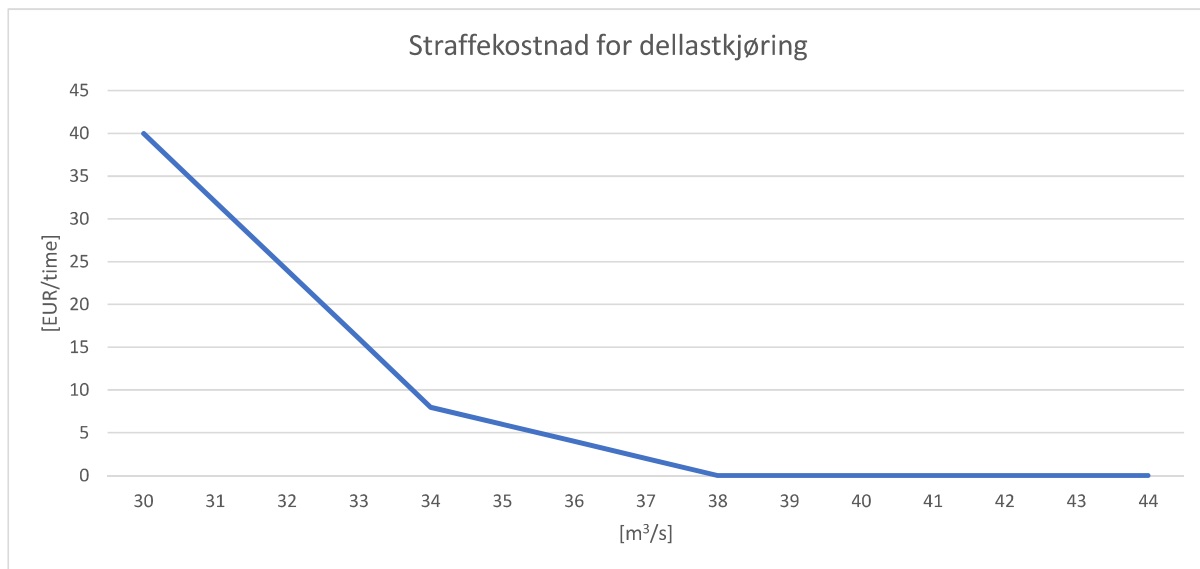
Start/stopp-kostnad

Med utgangspunkt i regnearket for kjøremønsterrelaterte kostnader er kostnaden for en start/stopp for dette eksempel-aggregatet beregnet til 678 euro.

Etter som det kan være en del usikkerhet i estimatet på start/stopp-kostnaden, samt for å illustrere virkningen av ulike start/stopp-kostnader, beregnes det også inntekter for 0 %, 50 %, 75 %, 150 % og 200 % av denne opprinnelig beregnede start/stopp-kostnaden.

Straffekostnad for dellastkjøring

Det er ingen straffekostnad for kjøring innenfor et "normalt" driftsområde, men jo lavere vannføringen blir, jo høyere blir straffekostnaden (under antakelse om økende påkjenning/slitasje med økende avstand fra bestpunkt).

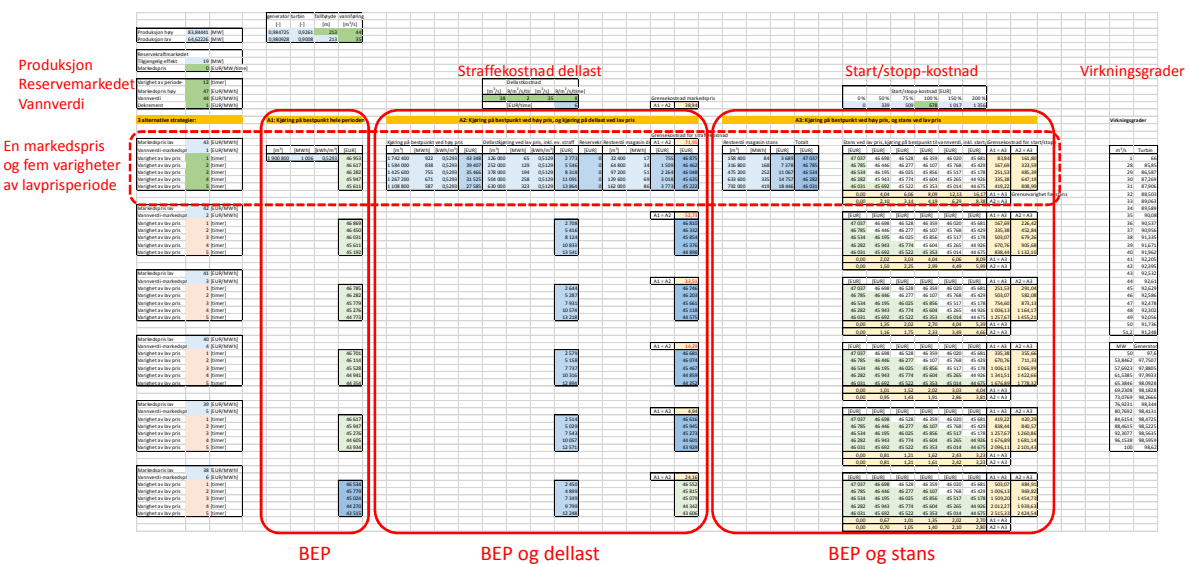


Figur 2 Straffekostnad for dellastkjøring

5.3 Eksempel på bruk av regnearket

Etterfølgende figur viser en oversikt over inndata og beregningsdelen av regnearket. De mørkegrønne feltene er for inndata fra Bruker, mens verdiene i de blå feltene beregnes av egne formler.

Bruker gir inn fallhøyde og vannføring i øverste del av regnearket, samt virkningsgrader (gitt helt til høyre), og regnearket beregner deretter produksjonen. Bruker gir også inn vannverdi, pris i høy-pris-perioden, og pris i reservemarkedet, samt estimert straffekostnad for dellastkjøring og estimert start/stopp-kostnad.



Figur 3 Oversikt over regnearket

Regnearket beregner deretter inntekter fra tre alternative produksjonsstrategier (markert med heltrukne røde rektangler):

- kjøring på bestpunkt uansett markedspris (BEP)
- kjøring på lav dellast ved markedspriser lavere enn vannverdien (BEP og dellast)
- stans ved markedspriser lavere enn vannverdien (BEP og stans).

For hver av de tre produksjonsstrategiene beregnes inntekter for seks ulike markedspriser der prisen i en periode er lavere enn vannverdien (området for en markedspris er markert med et stiplede rødt rektangel). Ved å endre verdien "Dekrement" endres spranget i markedspris mellom de ulike blokkene (vertikalt).

Innenfor hver markedspris beregnes inntekter for fem ulike varigheter av lavprisperioden. Disse varighetene kan også endres ved å endre verdiene i de mørkegrønne feltene i blokken for første markedspris (varigheter i alle blokker endres samtidig).

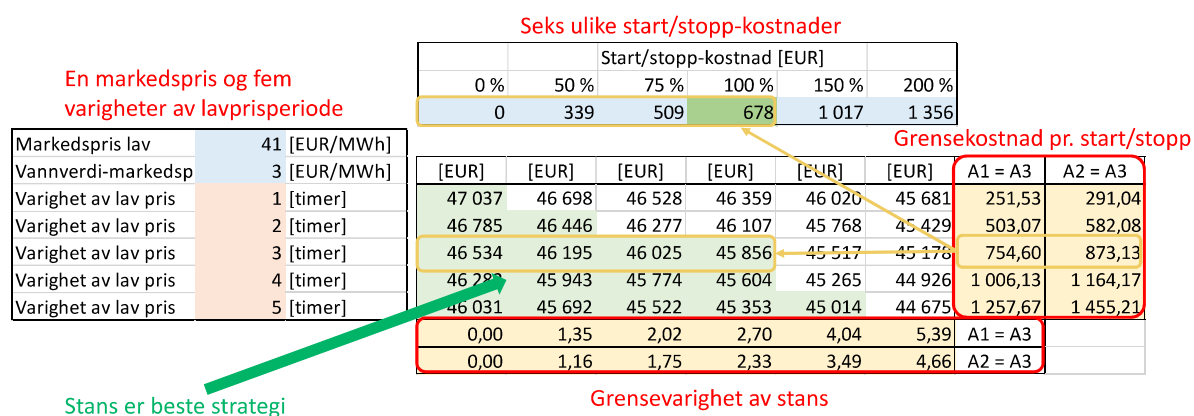
		generator	turbin	fallhøyde	vannføring																	
		[-]	[-]	[m]	[m ³ /s]																	
Produksjon høy	83,84441 [MW]	0,984725	0,9261	213	44																	
Produksjon lav	64,62226 [MW]	0,980928	0,9008	213	35																	
Reservkraftmarkedet																						
Tilgjengelig effekt	19 [MW]																					
Markedspris	0 [EUR/MW/time]																					
Varighet av periode																						
Markedspris høy	47 [EUR/MWh]																					
Vannverdi	44 [EUR/MWh]																					
Dekrement	1 [EUR/MWh]																					
3 alternative strategier:																						
A1: Kjøring på bestpunkt hele perioden						A2: Kjøring på bestpunkt ved høy pris, og kjøring på dellast ved lav pris																
												Dellastkostnad										
												[m ³ /s]	R/m ³ /s/tir	[m ³ /s]	IR/m ³ /s/time							
												38	2	35	8							
												[EUR/time]				Grensekostnad mark						
												6				A1 = A2		38,94				
												Grensekostnad for st										
												A1 = A2										71,95
Markedspris lav	43 [EUR/MWh]	[m ³]	[MWh]	[kWh/m ³]	[EUR]	[m ³]	[MWh]	[kWh/m ³]	[EUR]	[m ³]	[MWh]	[kWh/m ³]	[EUR]	[m ³]	[MWh]	[EUR]	[EUR]					
Vannverdi-markedspr	1 [EUR/MWh]	1 900 800	1 006	0,529	46 953	1 742 400	922	0,5293	43 348	126 000	65	0,5129	2 773	0	32 400	17	755	46 875				
Varighet av lav pris	1 [timer]				46 617	1 584 000	838	0,5293	39 407	252 000	129	0,5129	5 546	0	64 800	34	1 509	46 462				
Varighet av lav pris	2 [timer]				46 282	1 425 600	755	0,5293	35 466	378 000	194	0,5129	8 318	0	97 200	51	2 264	46 048				
Varighet av lav pris	3 [timer]				45 947	1 267 200	671	0,5293	31 525	504 000	258	0,5129	11 091	0	129 600	69	3 018	45 635				
Varighet av lav pris	4 [timer]				45 611	1 108 800	587	0,5293	27 585	630 000	323	0,5129	13 864	0	162 000	86	3 773	45 222				
Varighet av lav pris	5 [timer]																					
Markedspris lav	42 [EUR/MWh]											A1 = A2		52,73								
Vannverdi-markedspr	2 [EUR/MWh]																					
Varighet av lav pris	1 [timer]													2 708	46 810							
Varighet av lav pris	2 [timer]													5 416	46 332							
Varighet av lav pris	3 [timer]													8 124	45 854							
Varighet av lav pris	4 [timer]													10 833	45 376							
Varighet av lav pris	5 [timer]													13 541	44 898							
Markedspris lav	41 [EUR/MWh]											A1 = A2		33,51								
Vannverdi-markedspr	3 [EUR/MWh]																					
Varighet av lav pris	1 [timer]													2 644	46 746							
Varighet av lav pris	2 [timer]													5 287	46 209							
Varighet av lav pris	3 [timer]													7 931	45 661							
Varighet av lav pris	4 [timer]													10 574	45 118							
Varighet av lav pris	5 [timer]													13 218	44 575							
Markedspris lav	40 [EUR/MWh]											A1 = A2		14,29								
Vannverdi-markedspr	4 [EUR/MWh]																					
Varighet av lav pris	1 [timer]													2 579	46 681							
Varighet av lav pris	2 [timer]													5 158	46 074							
Varighet av lav pris	3 [timer]													7 737	45 467							
Varighet av lav pris	4 [timer]													10 316	44 859							
Varighet av lav pris	5 [timer]													12 894	44 252							
Markedspris lav	37 [EUR/MWh]											A1 = A2		4,94								
Vannverdi-markedspr	5 [EUR/MWh]																					
Varighet av lav pris	1 [timer]													2 514	46 616							
Varighet av lav pris	2 [timer]													5 029	45 945							
Varighet av lav pris	3 [timer]													7 543	45 273							
Varighet av lav pris	4 [timer]													10 057	44 601							
Varighet av lav pris	5 [timer]													12 571	43 929							
Markedspris lav	38 [EUR/MWh]											A1 = A2		24,16								
Vannverdi-markedspr	6 [EUR/MWh]																					
Varighet av lav pris	1 [timer]													2 450	46 552							
Varighet av lav pris	2 [timer]													4 899	45 815							
Varighet av lav pris	3 [timer]													7 349	45 079							
Varighet av lav pris	4 [timer]													9 799	44 342							
Varighet av lav pris	5 [timer]													12 248	43 606							

Figur 4 Inntekt for kontinuerlig kjøring på bestpunkt, og inntekt for dellastkjøring ved lav pris, for ulike markedspriser og varigheter av lavprisperioden.

I regnearket markeres beste produksjonsstrategi (høyeste inntekt) med grønn bakgrunnsfarge. Med de gitte forutsetningene er det altså riktig å produsere ved bestpunkt dersom differansen mellom markedspris og vannverdi ikke er mer enn 5 EUR/MWh. Selv om det forbrukes mer vann til en lavere pris oppveies dette av en høyere virkningsgrad ved bestpunkt. Dersom differansen mellom markedspris og vannverdi er mer enn 5 EUR/MWh er det imidlertid riktig å produsere ved lav dellast (utenfor normalområdet). Verdien av det "sparte" vannet er altså større enn det man taper på redusert virkningsgrad og straffekostnaden for dellastkjøring.

De gule feltene viser grenseverdien for markedsprisen (for gitt straffekostnad for dellastkjøring) og grenseverdiene for straffekostnaden for dellastkjøring for de ulike markedsprisene som gjør alternativ 1 (kjøring på bestpunkt) og alternativ 2 (kjøring på lav dellast) like.

Regnearket beregner også totale inntekter for seks ulike start/stopp-kostnader, hhv. for 0 %, 50 %, 75 %, 100 %, 150 % og 200 % av den opprinnelig beregnede start/stopp-kostnaden. Dersom den beste produksjonsstrategien (høyeste inntekt) er å stanse produksjonen (heller enn å produsere på bestpunkt eller ved lav dellast) markeres dette med grønn bakgrunnsfarge.



Figur 5 Inntekt, samt grenseverdier for start/stopp-kostnad og varighet av stans, for en gitt markedspris

De gule feltene viser grenseverdiene for start/stopp-kostnaden og grenseverdiene for varighet av lav pris.

Grenseverdien for start/stopp-kostnaden er verdien som gjør alternativ 1 (kjøring på bestpunkt) og 3 (stans) (A1 = A3) eller alternativ 2 (kjøring på lav dellast) og 3 (stans) (A2 = A3) like for en gitt markedspris (41 EUR/MWh i eksemplet over) og for en gitt varighet av lavprisperioden (det er fem ulike varigheter i figuren over).

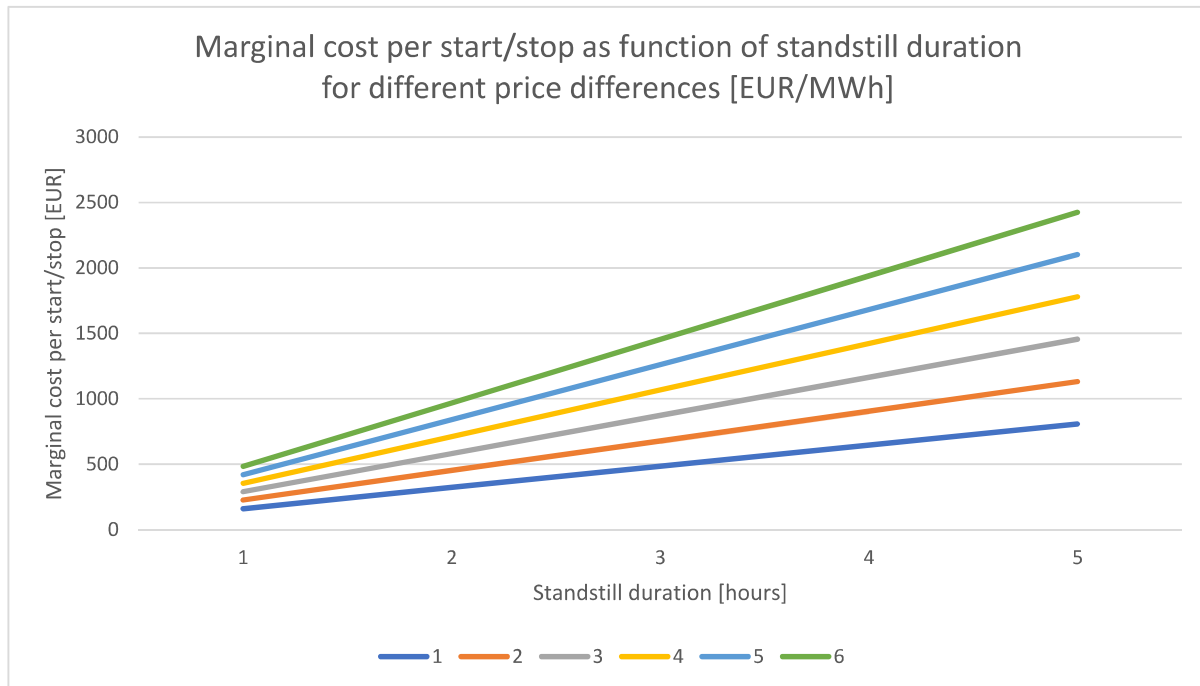
Figuren viser at for en markedspris som er 3 EUR/MWh lavere enn vannverdien og med en varighet på lavprisperioden på 3 timer, er grensekostnadene for start/stopp hhv. 755 kroner og 873 kroner. Inntektene i kolonner med start/stopp-kostnader lavere enn 755 kroner er derfor også markert med grønn bakgrunnsfarge.

Tilsvarende vises grenseverdien for varighet av lav pris som gjør alternativ 1 (kjøring på bestpunkt) og 3 (stans) (A1 = A3) eller alternativ 2 (kjøring på lav dellast) og 3 (stans) (A2 = A3) like for en gitt markedspris (41 EUR/MWh i eksemplet over) og for en gitt start/stopp-kostnad (det er seks ulike start/stopp-kostnader i figuren over). Dersom den faktiske start/stopp-kostnaden er 75 % av den estimerte verdien er grensevarighet av stans 2,02 timer dersom alternativene er kjøring på bestpunkt og stans.

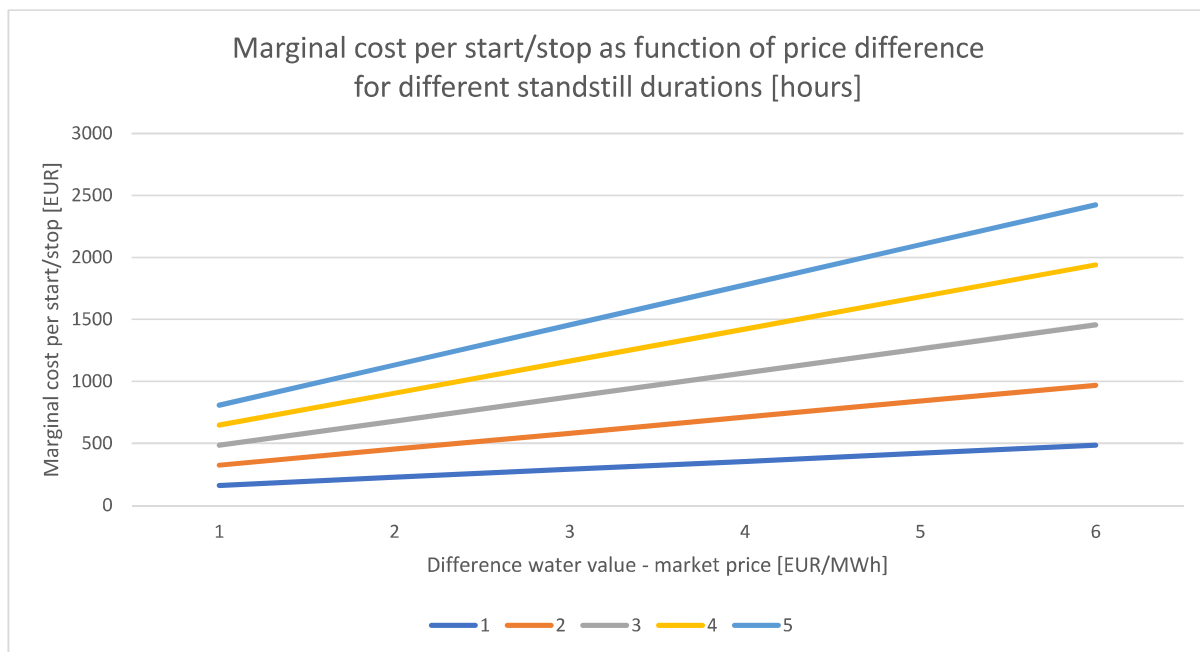
Figur 7 - Figur 10 viser en grafisk presentasjon av disse grenseverdiene.

				Start/stopp-kostnad [EUR]								
				0 %	50 %	75 %	100 %	150 %	200 %			
				0	339	509	678	1 017	1 356			
A3: Kjøring på bestpunkt ved høy pris, og stans ved lav pris												
Restverdi magasin stans			Totalt		Stans ved lav pris, kjøring på bestpunkt til vannverdi, inkl. start/						Grensekostnad for start/stopp	
[m ³]	[MWh]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	A1 = A3	A2 = A3
158 400	84	3 689	47 037	47 037	46 698	46 528	46 359	46 020	45 681	45 681	83,84	161,80
316 800	168	7 378	46 785	46 785	46 446	46 277	46 107	45 768	45 429	45 429	167,69	323,59
475 200	252	11 067	46 534	46 534	46 195	46 025	45 856	45 517	45 178	45 178	251,53	485,39
633 600	335	14 757	46 282	46 282	45 943	45 774	45 604	45 265	44 926	44 926	335,38	647,19
792 000	419	18 446	46 031	46 031	45 692	45 522	45 353	45 014	44 675	44 675	419,22	808,99
				0,00	4,04	6,06	8,09	12,13	16,17	16,17	A1 = A3	Grensevarighet for sta
				0,00	2,10	3,14	4,19	6,29	8,38	8,38	A2 = A3	
				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	A1 = A3	A2 = A3
				47 037	46 698	46 528	46 359	46 020	45 681	45 681	167,69	226,42
				46 785	46 446	46 277	46 107	45 768	45 429	45 429	335,38	452,84
				46 534	46 195	46 025	45 856	45 517	45 178	45 178	503,07	679,26
				46 282	45 943	45 774	45 604	45 265	44 926	44 926	670,76	905,68
				46 031	45 692	45 522	45 353	45 014	44 675	44 675	838,44	1 132,10
				0,00	2,02	3,03	4,04	6,06	8,09	8,09	A1 = A3	
				0,00	1,50	2,25	2,99	4,49	5,99	5,99	A2 = A3	
				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	A1 = A3	A2 = A3
				47 037	46 698	46 528	46 359	46 020	45 681	45 681	251,53	291,04
				46 785	46 446	46 277	46 107	45 768	45 429	45 429	503,07	582,08
				46 534	46 195	46 025	45 856	45 517	45 178	45 178	754,60	873,13
				46 282	45 943	45 774	45 604	45 265	44 926	44 926	1 006,13	1 164,17
				46 031	45 692	45 522	45 353	45 014	44 675	44 675	1 257,67	1 455,21
				0,00	1,35	2,02	2,70	4,04	5,39	5,39	A1 = A3	
				0,00	1,16	1,75	2,33	3,49	4,66	4,66	A2 = A3	
				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	A1 = A3	A2 = A3
				47 037	46 698	46 528	46 359	46 020	45 681	45 681	335,38	355,66
				46 785	46 446	46 277	46 107	45 768	45 429	45 429	670,76	711,33
				46 534	46 195	46 025	45 856	45 517	45 178	45 178	1 006,13	1 066,99
				46 282	45 943	45 774	45 604	45 265	44 926	44 926	1 341,51	1 422,66
				46 031	45 692	45 522	45 353	45 014	44 675	44 675	1 676,89	1 778,32
				0,00	1,01	1,52	2,02	3,03	4,04	4,04	A1 = A3	
				0,00	0,95	1,43	1,91	2,86	3,81	3,81	A2 = A3	
				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	A1 = A3	A2 = A3
				47 037	46 698	46 528	46 359	46 020	45 681	45 681	419,22	420,29
				46 785	46 446	46 277	46 107	45 768	45 429	45 429	838,44	840,57
				46 534	46 195	46 025	45 856	45 517	45 178	45 178	1 257,67	1 260,86
				46 282	45 943	45 774	45 604	45 265	44 926	44 926	1 676,89	1 681,14
				46 031	45 692	45 522	45 353	45 014	44 675	44 675	2 096,11	2 101,43
				0,00	0,81	1,21	1,62	2,43	3,23	3,23	A1 = A3	
				0,00	0,81	1,21	1,61	2,42	3,23	3,23	A2 = A3	
				[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	A1 = A3	A2 = A3
				47 037	46 698	46 528	46 359	46 020	45 681	45 681	503,07	484,91
				46 785	46 446	46 277	46 107	45 768	45 429	45 429	1 006,13	969,82
				46 534	46 195	46 025	45 856	45 517	45 178	45 178	1 509,20	1 454,73
				46 282	45 943	45 774	45 604	45 265	44 926	44 926	2 012,27	1 939,63
				46 031	45 692	45 522	45 353	45 014	44 675	44 675	2 515,33	2 424,54
				0,00	0,67	1,01	1,35	2,02	2,70	2,70	A1 = A3	
				0,00	0,70	1,05	1,40	2,10	2,80	2,80	A2 = A3	

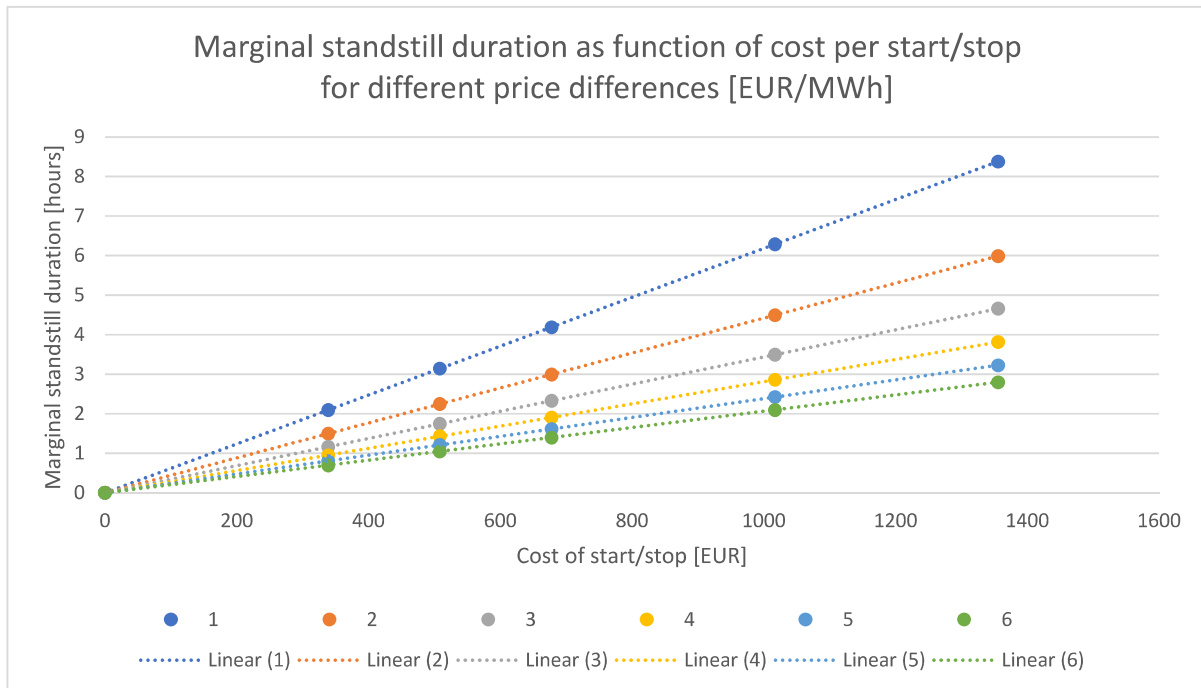
Figur 6 Inntekt, samt grenseverdier for start/stopp-kostnad og varighet av stans, for ulike prisdifferanser



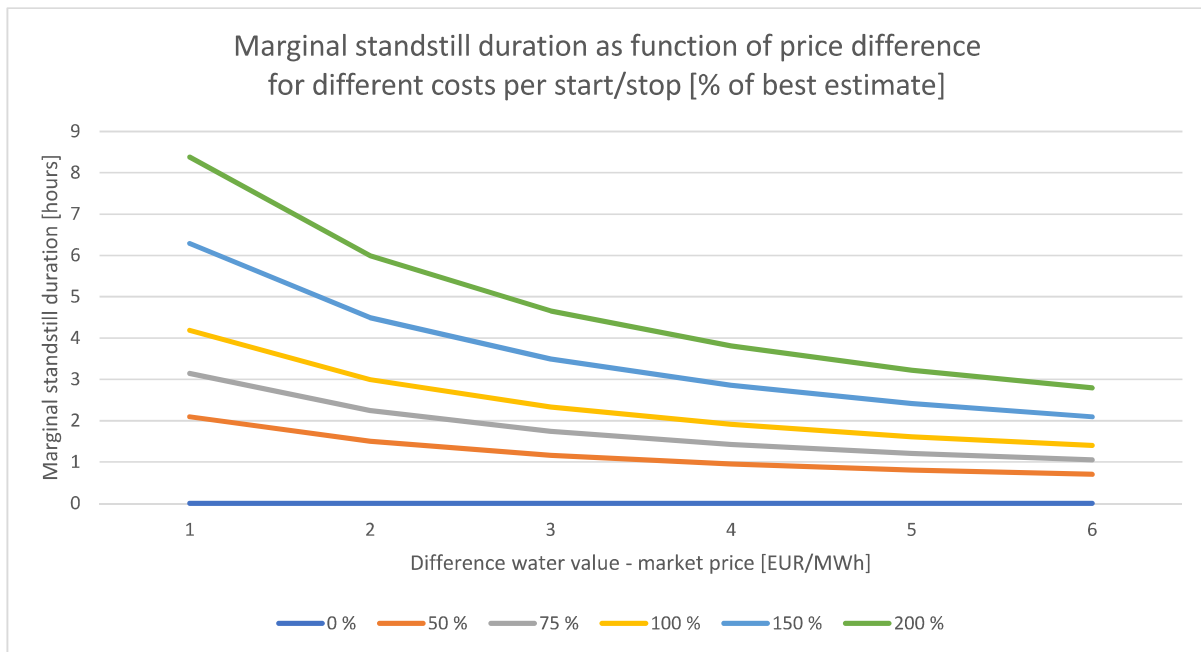
Figur 7 Grensekostnad pr. start/stopp som funksjon av varighet av stans for ulike prisdifferanser



Figur 8 Grensekostnad pr. start/stopp som funksjon av prisdifferanse for ulike varigheter av stans



Figur 9 Grensevarighet av stans som funksjon av start/stopp-kostnad for ulike prisdifferanser



Figur 10 Grensevarighet av stans som funksjon av prisdifferanse for ulike start/stopp-kostnader

www.hydrocen.no



Forskningssenteret HydroCen (Norwegian Research Centre for Hydropower Technology) skal bidra til å styrke Norges posisjon som en ledende vannkraftnasjon og sikre at norsk vannkraftsektor kan utnytte mulighetene i fremtidens fornybare energisystem.

NTNU er vertsinstusjon og hovedforskingspartner i HydroCen sammen med SINTEF Energi og Norsk institutt for naturforskning (NINA).

HydroCen har rundt 50 nasjonale og internasjonale partnere fra forskning, industri og forvaltning. Norsk Vannkraftsenter (NVKS) samler sin aktivitet i HydroCen i perioden 2017-2024.

HydroCen er et av sentrene i Forskningsrådets ordning med forskningssentre for miljøvennlig energi (FME). HydroCen har et budsjett på nærmere 400 millioner kroner fordelt på åtte år.

ISSN:2535-5392

ISBN: 978-82-93602-25-5



HydroCen
v/ Vannkraftlaboratoriet, NTNU
Alfred Getz vei 4,
Gløshaugen, Trondheim

www.hydrocen.no

 HydroCen

 @FMEHydroCen