

Innovative og egnede nyere sensorer for kraftverksovervåkning

En veileder ved valg og implementasjon av
sensortechnologi i vannkraftverk: Del 2 av 2

Marius Hauki, Glitre Energi, Truls Ditlefsen, Skagerak Energi,
Ørjan Elvatun Sikveland, NTE Energi, Tina Sørvik, Hafslund Eco
og Hans Christian Bolstad, SINTEF Energi



Rapport

Innovative og egnede nyere sensorer for kraftverksovervåking – målestrategier og formål

En veileder ved valg og implementasjon av sensorteknologi i vannkraftverk: Del 2 av 2

VERSJON

1.0

DATO

2021-09-30

FORFATTER(E)

Marius Hauki | Glitre Energi,
Truls Ditlefsen | Skagerak Energi,
Ørjan Elvatun Sikveland | NTE Energi,
Tina Sørvik | Hafslund Eco,
Hans Christian Bolstad | SINTEF Energi

PROSJEKT

SmartKraft

ISBN

978-82-693129-5-9

OM RAPPORTEN:

Denne rapporten har som formål å gi en kortfattet introduksjon samt være en håndbok og oversikt over noen utvalgte målestrategier og metoder i vannkraftverk.

Den omhandler tema som standarder, datamengde, båndbredde, oppløsning på data, sampling intervall, tidsnøyaktighet, nytteverdi og avdrift. Den omtaler typiske protokoller og metoder for transport av data, både trådløst og trådbunden i kraftverkene. Rapporten er koblet til rapport 1 som omhandler ulike fysiske sensorprinsipper.

Håndboken har vært utarbeidet av prosjektet SmartKraft som er et prosjekt støttet av Enova og ledet av Smartgridsenteret. Bidragsytere har vært deltakende bedrifter med prosessstøtte fra SINTEF.

Rapporten er ment som en praktisk veileder og skrevet med basis i erfaring og kunnskap hos de enkelte bidragsytere fra deltakende bedrifter.

KREDITERING FORSIDEBILDE:

Bildet er Skagerak Energis eiendom og kan ikke kopieres eller brukes videre uten tillatelse.

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon	5
2	Målebehov og målemetodikk	7
2.1	Hva er det faktiske målebehovet?	7
2.2	Tidsserie eller ikke tidsserie	8
2.3	Tidsoppløsning og tidsnøyaktighet	9
2.4	Frekvensinnhold og samplerate	10
2.5	Datamengde og frekvens	11
2.6	Aggregering / interpolering av data	11
2.7	Dødbånd	13
3	Måletekniske behov i vannkraftanlegg	15
3.1	Case 1 Luke	16
3.2	Case 2 Vibrasjonsvern	17
3.3	Case 3 Vannstand i magasin	18
3.4	Case 4 Meldingsdata	20
3.5	Case 5 Bildedata	20
3.6	Case 5 Videodata	21
3.7	Case 6 Måledata til Digital Tvilling	23
4	Krav til datatransport basert på måletekniske behov	25
4.1	Trådløs overføring	26
4.2	Trådbasert overføring	29
5	Aktuelle protokoller og teknologier for datatransport	29
5.1	Ulike protokoller / kommunikasjonsbærere	29
5.1.1	IEC 104	30
5.1.2	MQTT	31
5.1.3	AMQP	32
5.1.4	OPC UA	32
5.1.5	Ethernet-baserte protokoller	32
5.1.6	RS232, RS485 og SDI-12	33
5.1.7	Seriell baserte protokoller som Profibus, Modbus	34
5.2	Trådløse kommunikasjonsteknologier og -protokoller	34
5.2.1	2G og 3G	35
5.2.2	LTE, 4G og 5G	35
5.2.3	NB- IoT	36

5.2.4	Lora	36
5.2.5	Wi-Fi.....	37
6	IKT-sikkerhet knyttet til sensorinstallasjoner	38
6.1	Sikkerhetsaspekter (forriglingskontroll og arbeid på anlegg i drift)	38
6.2	Datadioder	39
6.3	Integritet i målinger og krav til nøyaktighet	40
7	Andre aspekter ved sensor- og dataløsninger	41
7.1	Inngrep i anleggene ved sensorinstallasjoner.....	41
7.2	Kantprosessering.....	42
7.3	Kompetansebehov	42
8	Referanser	43

Terminologi og forkortelser

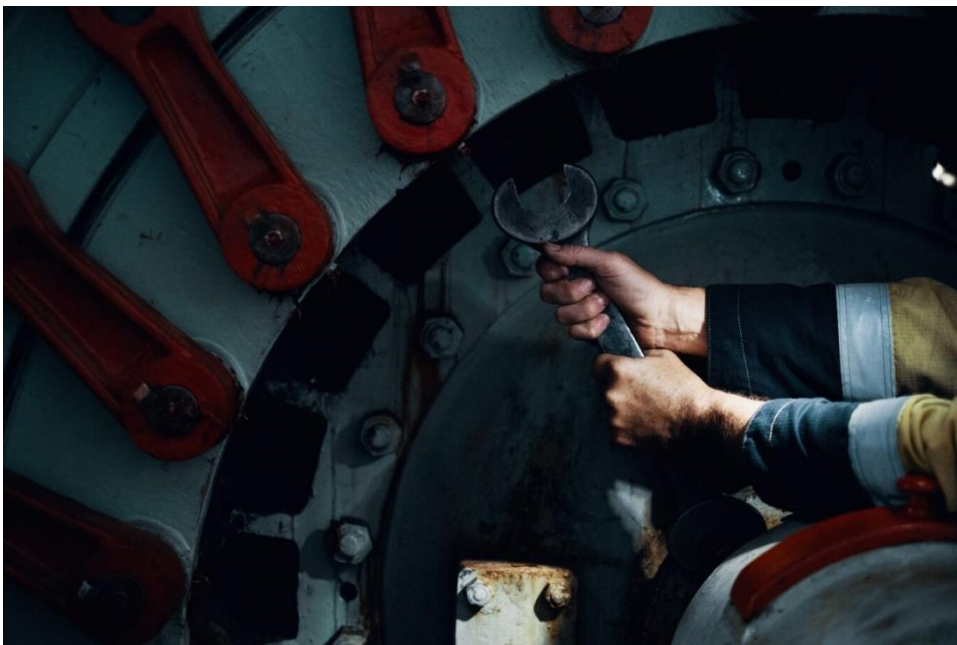
Begrep	Forklaring/informasjon/betydning
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol. En åpen standard applikasjonslags-protokoll.
3GPP	3rd Generation Partnership Project. 3GPP er en frivillig organisasjon mellom operatører og industri fra hele verden som utvikler cellulære telekom-standarder.
Aliasing	Aliasing er en feilaktig fremstilling og gjenskaping av et signal. Aliasing oppstår dersom samplingsfrekvensen er lavere enn det dobbelte av den høyeste frekvensen i signalet eller det dobbelte av båndbredden i signalet. Fenomenet omtales ofte som Shannon-Nyquist teoremet.
Båndbredde	Båndbredde uttrykker den maksimale mengden data som kan overføres per tidsenhet.
CCD	Charge-Coupled Device – en fotodetektor
DT	Digital Tvilling
FIR, IIR	Finite impulse response filter; Infinite impulse response filter
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Centers River Analysis System. Et verktøy som er designet for å utføre én- og todimensjonal hydraulisk beregning for et komplett nettverk av naturlige og konstruerte vannveier.
IEC 104	IEC 60870-5-104 standarden
IoT	Internet of Things eller Tingenes internett
Kvantisering	Kvantisering innebærer at det enkelte sample av et analogt signal blir tilordnet den nærmeste "tillatte" digitale verdi. Kvantisering utføres av det vi kaller en Analog til Digital (A/D)- omvandler.
Lora	Long Range. Et spredt spektrum modulasjonsteknikk, dvs ISO fysisk lag.
LoraWan	Lora Wide Area Network. ITU TU 4480 Standard utviklet av non-profit LoRa-alliansen.
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	"Long Term Evolution" er en standard for mobiltelefonsystemer som er utviklet av 3GPP alliansen. Ofte bare kalt 4G
MQTT	Message Queue Telemetry Transport. En maskin til maskin nettverksprotokoll for meldingsoverføring
NB IOT	Narrow band Internet of Things. Laveffekts radioteknologistandard utviklet av 3GPP. Fungerer på 4G og 5G nettet som driftes av en teleoperatør.
NTP	Network Time Protocol
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture. En "cross-platform, open source", IEC62541-standard for datautveksling fra sensorer til skyapplikasjoner utviklet av OPC Foundation.
PLS	Programmerbar logisk styring
RTU	Remote terminal unit. En mikroprosessorstyrt elektronisk enhet som samler og overfører enheter til et distribuert kontrollsystem eller SCADA
Sampling	Sampling er måling av en signalamplitude ved ekvidistante punkter i tid. Hver måling utgjør et sample. Antall sample tatt pr sekund er samplingshastigheten og angis ved samplefrekvensen i hertz (Hz), dvs antall samples/sekund.
SCADA	Supervisory control and data acquisition (SCADA) er en kontrollsystemarkitektur som omfatter datamaskiner, nettverksbasert datakommunikasjon og grafiske brukergrensesnitt for overvåking av maskiner og prosesser på høyt nivå. Det dekker også sensorer og andre enheter, for eksempel programmerbare logiske kontrollere, som har grensesnitt med prosessanlegg eller maskineri.
STDM	Stasjons DataMaskin – Ofte betegnelsen for enheten som samler inn data i prosessnettverket og sender det videre til SCADA.
Tidsnøyaktighet	Hvor riktig er klokken som setter tidsstempelet (i relevant kraftverks målesituasjon)
Tidsopløsning	Hvor mange desimaler inneholder sekundvisningen på tidsstempelet (i relevant målesituasjon)

Vern	En mekanisk og elektrisk beskyttelse av kritisk utstyr basert på målinger og gitte grenseverdier.
VGA	Video Graphics Array – en tidlig grafikkstandard for digitale bilder

1 Introduksjon

Digitaliseringen av kraftsektoren krever stadig nye sensorer for å dekke informasjonsbehov og gi nye muligheter for mer effektiv drift og kostnadsbesparelser. Dette dokumentet er ment som en veileder når kraftselskaper gjør en vurdering av nye sensorsystemer, både sensormuligheter, behov, teknologireferanser, bruksområder og vurderinger rundt kompetanse, kost/nytte og andre implementasjonsaspekter. Det drøftes noen erfaringer med ulike sensortyper, data fra sensorene og aktuelle anvendelser. Håndboken er basert på kunnskap og erfaringer i prosjektgruppen og det er gitt en rekke referanser i fotnoter og vedlegg for den som vil studere mer på konkrete tema.

Tradisjonelt har drift og vedlikehold av kraftverk vært basert på periodisk inspeksjon og rutinemessige kontroller. Imidlertid har denne tilnærmingen visse begrensninger når det gjelder nøyaktighet, mulighet til å gi kjapp respons og være kostnadseffektiv. Digitalisering og sensorovervåking har potensial til å endre denne dynamikken ved å gi sanntidsdata og innsikt som kan brukes til å forbedre drift, ytelse og redusere vedlikeholdskostnader. Ved å implementere sensorer og digitale systemer i kraftverket blir det mulig å overvåke en rekke parametere og prosesser, som for eksempel temperatur, trykk, vibrasjon, strømproduksjon og vannnivå. Denne konstante strømmen av data gir operatørene et øyeblikksbilde av kraftverkets tilstand og ytelse, og muliggjør umiddelbar respons på eventuelle avvik eller mulige problemer.



Figur 1 Foto: Hafslund Eco

Det bør og må være en lav terskel for å kunne sammenstille data fra forskjellige sensorer/kilder og benytte dem i tredjepartsanalyse/ beslutningsstøtteverktøy. Felles målemetodikk har derfor også vært et tema i denne tekniske gruppen. Det vil derfor bli satt krav til leverandører av sensorsystemer om at de må kunne

levere data på åpne og sikre dataformat. Tidsoppløsning i data må balansere tilstrekkelig datakvalitet opp mot overbelastning på eksisterende systemer og lagring av unødvendig store datamengder.

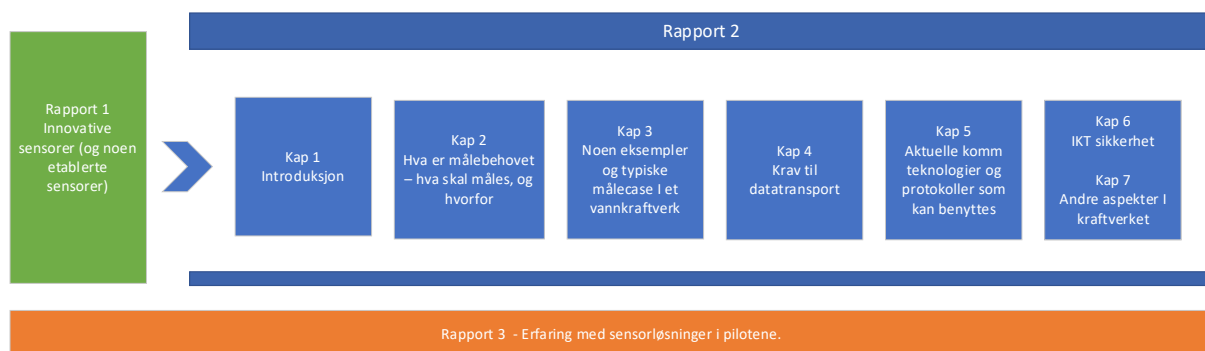
Når systemene er etablert kan den sanntidsbaserte overvåkingen gi flere fordeler. I tillegg til å gjøre det mulig å oppdage tidlige tegn på feil eller unormal drift kan dette også bidra til å forhindre dyre og uventede nedetider. Noe som kan gi selskapene store innsparinger. Ved å identifisere og adressere mulige problemer på et tidlig stadium, kan kraftverket opprettholde en stabil produksjon og optimalisere energiutnyttelsen som er et viktig samfunnsmessig aspekt.

Sensorovervåking kan også bidra til å forbedre selve vedlikeholdsprosessen. Med kontinuerlig tilgang til nøyaktig informasjon om utstyrets tilstand og ytelse, kan vedlikeholdsrutiner planlegges og utføres på en mer presis og effektiv måte. Dette kan resultere i reduserte vedlikeholdskostnader, lengre levetid for utstyret og redusert risiko for feil og driftsavbrudd.

Digitalisering og sensorovervåking legger også grunnlaget for dataanalyse og prediktivt vedlikehold som er et sentralt tema i Smartkraft-prosjektet. Ved å bruke avanserte algoritmer og maskinlæringsteknikker på de innsamlede dataene, kan kraftverket utvikle prediktive modeller som kan bidra til å forutse når utstyr eller komponenter trenger vedlikehold eller utskiftning. Dette gjør det mulig å planlegge vedlikehold mer strategisk, minimere nedetid og optimalisere driften.

I en tid hvor bærekraft og effektivitet er avgjørende, spiller digitalisering og sensorovervåking derfor en sentral rolle i å styrke kraftverkets konkurransekraft og bærekraftighet. Ved å ta i bruk sensorteknologi kan kraftverket oppnå bedre driftskontroll, redusere kostnader, forbedre vedlikeholdsprosesser og oppnå høyere produksjonsytelse. Det er derfor viktig for ledere og beslutningstakere i vannkraftbransjen å erkjenne betydningen av digitalisering og sensorovervåking som en kritisk del av fremtidens energilandskap.

Denne rapporten er skrevet av deltakere i Smartkraft sin tekniske gruppe «innovative sensorer». Rapport 1, 2 og 3 er relatert som illustrert i figur 2 og begrenset i innhold av mandatet til denne gruppen. For tema knyttet til systemarkitektur vises det til rapporter fra denne gruppen.



Figur 2 Sammenhengen mellom rapportene fra teknisk gruppe «Innovative sensorer» i Smartkraft.

2 Målebehov og målemetodikk

Som omtalt i introduksjonen er det viktig å kunne ta faktabaserte beslutninger på hva som er normal tilstand på enheter og systemer. Det er også viktig for å ivareta miljømessige hensyn - som å unngå utslipp og forurensning – samt følge nasjonale regler og retningslinjer i drift av anlegget.

Å unngå unødig nedetid har vært et sentralt tema i mange år. Årsakene til nedetid kan være mange, men manglende vedlikehold eller høy alder på dyre komponenter er én, og særlig om vedlikeholdet er endret fra tidsstyrt til risiko/havaristyrte vedlikehold. Økt påkjenning med hyppigere start og stopp av aggregat pga. markedstilpasning er en annen. Flere start og stopp betyr både termiske og mekaniske påkjenninger. Gode målemetoder, måleprinsipper og resulterende måledata er da selvsagt viktig for å følge utviklingen tett.

Ved å grundig klargjøre mulige utfordringer eller viktige momenter rundt sensor/måleløsningers implementasjonsaspekt kan man unngå en situasjon der implementeringen av måleløsningen koster flere ganger egenkostnadene av selve sensorene – eller at man har fått redusert det overordnede sikkerhetsnivået.

Tradisjonelt sett har vedlikeholdet av kraftverk bestått av periodiske rutiner og vedlikeholdere med enormt kjennskap til sitt kraftverk i normalt virkeområde. Historisk sett har kraftverksdriften vært svært stabil, noe som gir gode forutsetninger for å forvente atferd innenfor normal last. Dagens kraftverkdrift preges av svingninger i produksjon og kjøring i andre lastområder enn hva som tidligere ble brukt. Det endrede driftsmønsteret skaper andre vedlikeholdsbehov og gjør predikasjonen vanskeligere. Ansatte i kraftverket har tidligere utført manuelle tilstandskontroller, som har vært tilstrekkelig for å følge med på kjent tilstander. Slike kontroller utføres fortsatt den dag i dag. En kontrollrunde tar for seg målinger som ikke er digitalisert og/eller ikke overført til sentralt styringssystem. Kontrollrunden kan også brukes til å foreta mer subjektive vurderinger av tilstand.

Planlagt nedetid består hovedsakelig av periodiske revisjoner og tilsyn. De følger satte krav på frekvens og omfang. Uplanlagt nedetid oppstår som følge av en driftssituasjon. Det kan være redusert virkning på maskineriet eller en vannreguleringssituasjon som krever stans. Kortere planlagte stans kan foretas når kraftverket står av andre grunner.

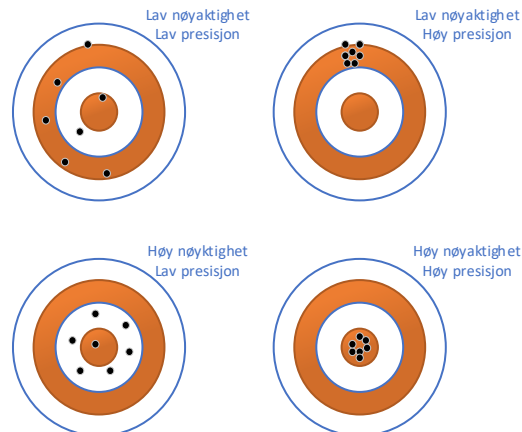
For en grundig oversikt over vannkraft generelt og utstyr som inngår i dette kan anbefales [1] som er en fritt nedlastbar rapport fra Hydropower Europe.

2.1 Hva er det faktiske målebehovet?

Etter at det er konkretisert et målebehov er det viktig å ha gjort noen grunnleggende vurderinger før det velges konkret måleprinsipp og måleinstrument.

- Hvorfor gjør jeg denne målingen og hvordan skal/kan målingen og data benyttes videre?
- Er dette den rette målingen å gjøre og på rett sted eller kan det finnes andre og bedre alternativ?
- Hvilken presisjon, nøyaktighet og hyppighet er nødvendig?
- Hvordan skal jeg overføre og lagre data?

Presisjonen og nøyaktigheten til målinger er essensielle og ulike faktorer. Presisjon refererer til hvor nære flere målinger av samme tilstand er hverandre. Nøyaktighet er et mål på hvor nær en måling er den sanne verdien av det som måles.



Figur 3 Illustrasjon som viser forskjellen på begrepene nøyaktighet og presisjon.

Målinger brukes blant annet for å muliggjøre sammenligning mellom ulike tilstander eller prosesser og referanseverdier. For eksempel kan målinger brukes til å sammenligne graden av vibrasjoner, temperaturer samt sammenligne dette med måledata fra da en komponent var ny. Gode målinger er med andre ord avgjørende for å få gode tilstandsvurderinger i anlegget. De lar operatører kvantifisere og sammenligne data nøyaktig, teste hypoteser og trekke gyldige konklusjoner og igangsette prediktivt vedlikehold som i sin tur kan spare store summer. På samme måte som gode data kan gi stor nytte er det også viktig å være bevisst på at unøyaktige målinger kan gi alvorlige implikasjoner og kostnader. I de etterfølgende avsnittene diskuterer vi noen sentrale karakteristikk ved målinger.

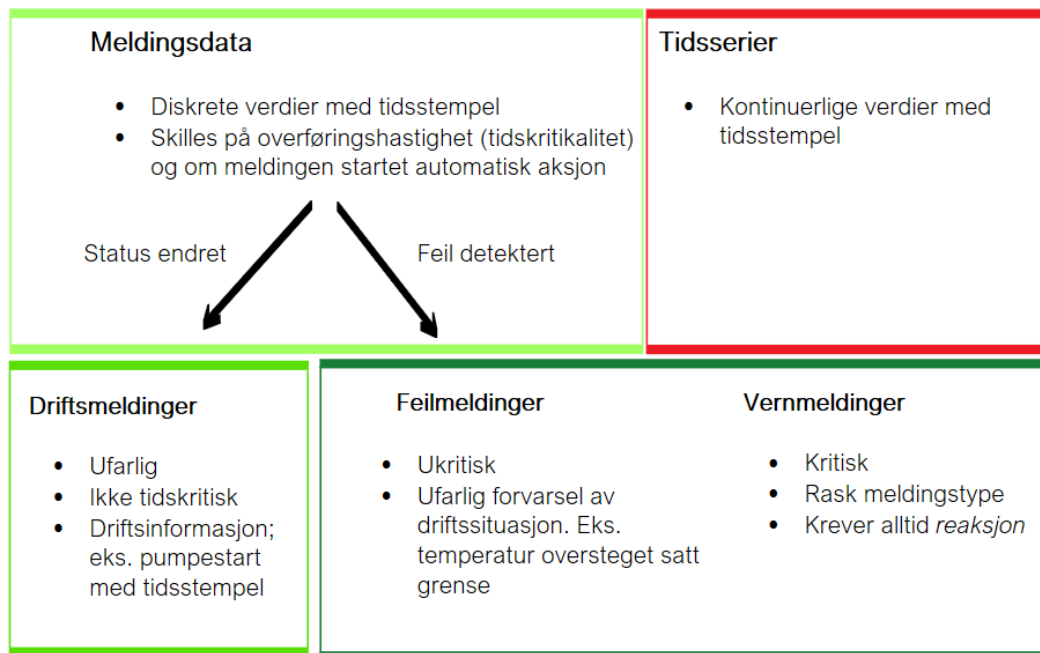
2.2 Tidsserie eller ikke tidsserie

Tidsserier er en informasjonspakke bestående av *måleverdi* og *tidsstempel*. Måleverdien kan være en tilnærmet kontinuerlig variabel, nedad begrenset av sensoropløsning og overføringsfrekvensens. Tidsserier følger utviklingen og danner grunnlaget for både analyser og mulige predikasjoner.

Meldingsdata er diskrete verdier med tidsstempel som angir en pre-definert driftssituasjon. Meldingsdata som blir sendt fra kraftverket kan grupperes i tre forskjellige kategorier etter kritikalitet og signalaksjon: a) driftsmeldinger, b) feilmeldinger og c) vernmeldinger.

- Driftsmeldinger melder om endret driftssituasjon. Disse signalene er ukritiske og prioriteres ikke i overføringsøymed. Det betyr at signalene ofte kommer med sykliske oppdateringer fra STDM. Driftsmeldinger kan for eksempel være beskjed om at en pumpe har startet. Driftsmeldinger kan gi merverdi ved å konverteres til tidsserier som kan brukes i analyse. For eksempel kan driftsmeldinger på en pumpe brukes til å følge med på kjøretid.
- Feilmeldinger er et ufarlig forvarsel. Det kan for eksempel være at temperaturen har oversteget en satt terskelverdi. Disse signalene indikerer en utvikling, men utløser ikke en automatisk reaksjon. Det er opp til driftspersonell å vurdere situasjonen og eventuell aksjon ved feilmeldinger.
- Vernmeldinger er derimot kritisk og igangsetter en motaksjon. Hvis vernet er utløst av en elektrisk feil vil systemet automatisk frakobles, mens en mekanisk feil fører til automatisk hurtig- eller nødstop. Vernmeldingen utløser et handlingssignal som går direkte til releet samtidig som vernmeldingen går til PLS og spontanoverføres videre til SCADA og driftssentralen. I tillegg regnes kommandoer som blir sendt til kraftverket som meldingsdata. Det er typisk start og stopp av

kraftverket. **Figur 4** gir en oversikt over og beskriver de forskjellige dataformatene som kommer fra kraftverket.



Figur 4 Forskjell mellom tidsserier og meldingsdata fra kraftverkene

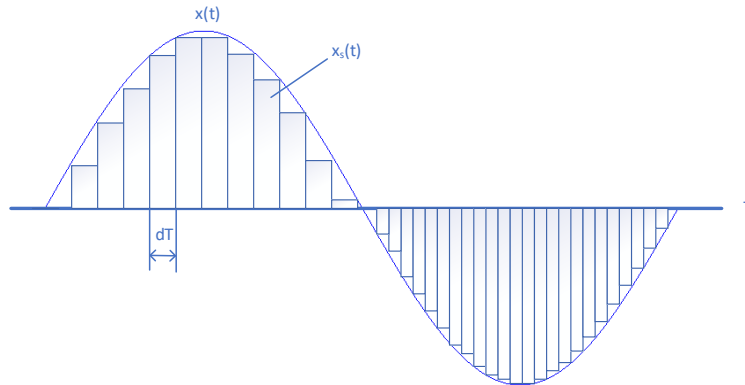
2.3 Tidsoppløsning og tidsnøyaktighet

Tidsoppløsning angir oppløsning på tidsstempelen til en målt verdi. Sagt med andre ord angir tidsoppløsning hvor mange sekundeler som inkluderes i tidsstempelen. Tidsoppløsningen setter den øvre begrensningen for sampleraten. Hvis tidsoppløsningen er lavere enn sampleraten kan vi ikke differensiere de ulike målingene. Hvis du måler noe hvert desisekund (1/10 sekund) - men kun har sekundoppløsning - får du 10 målinger med samme tidsstempel. Hvilken tidsoppløsning som er nødvendig avhenger av hva som skal måles og hvilken samplerate som kreves for å tilstrekkelig fange opp utviklingen i dataene. Vibrasjonsmålinger setter typisk strenge krav til tidsoppløsning, mens f.eks. en langsomt varierende vanntemperatur ikke gjør det. Tidsoppløsning på hundredels sekund fra kraftverk er ansett som tilstrekkelig for dataene som går via kontrollanlegget.

Tidsnøyaktig angir hvor nær klokken - som setter tidsstempelen - er sann tid. Dette er viktig for å ivareta dataintegritet og er en mulig feilkilde når man vil sammenligne verdier mellom ulike komponenter og kraftverk. Det er flere metoder for å synkronisere alle komponentklokkene. Kontrollanlegget kan ha en lokal GPS-klokke som synkroniserer de ulike komponentene etter et atomur, eller ved god fibernettdekning kan utstyret synkroniseres mot NTP-servere. Stasjonsdatamaskinen kan synkronisere seg over IEC 104 – protokollen til SCADA systemet. Tidsdrift varierer mellom ulike typer utstyr og eventuelle oppdateringen. Optimal synkroniseringsfrekvens avhenger av tidsdrift, men et fem-minutters intervall for synkronisering av kontrollanlegget er ansett som tilstrekkelig.

2.4 Frekvensinnhold og samplerate

Et typisk analogt signal kan se ut som vist i figuren under. Signalsampling er prosessen med å konvertere et kontinuerlig-tidssignal til et diskret-tidssignal ved å måle amplituden med jevne mellomrom. Vi kan angi denne verdien som $x_s(t)$. Om vi gjør dette med et jevnt tidsintervall dT , kaller vi dette for *samlingsintervallet* mens *samlingsfrekvensen* er gitt som $f_s=1/dT$. Dette kan sees i figur 5.



Figur 5 Eksempel på et analogt sinussignal $x(t)$ og digitale samplingsverdier $x_s(t)$ langs tidsaksen.

Ethvert signal kan representeres ved en gitt sammensetning av frekvenskomponenter og frekvensspekteret kan finnes fra signalet gjennom en matematisk metode kalt Fourier-transformasjon. Frekvensinnholdet kan deretter modifiseres gjennom ulike filtermetoder. En typisk metode er et lavpassfilter som slipper gjennom de laveste frekvensene, men blokkerer støy og høye frekvenser, f.eks. overharmoniske.

Teorien om signalsampling er basert på Nyquist-Shannons sampling teorem, som sier at et kontinuerlig-tidssignal kan rekonstrueres perfekt fra sine samples hvis samplingshastigheten er større enn eller lik (minst) to ganger den høyeste frekvenskomponenten i signalet¹. Med andre ord bestemmer samplingshastigheten den høyeste frekvensen som kan representeres av det tidsdiskrete signalet. Hvis et signal inneholder frekvenskomponenter over Nyquist-frekvensen - vil disse bli feilrepresentert i det digitaliserte, tidsdiskrete signalet - og et slikt gjenskapt signal vil være noe annet enn det originale.

Prosesen med sampling introduserer også såkalte kvantiseringsfeil, som oppstår når amplituden til det kontinuerlige tidssignalet avrundes til nærmeste nivå i den digitale representasjonen. Denne feilen kan reduseres ved å bruke et høyere antall bit for å representere amplituden til hvert sample (se **Figur**), men den kan aldri elimineres fullstendig. Høyere samplingsfrekvens gjør at det digitale signalet blir mer likt det originale analoge signalet, men prisen er da en økt datamengde.

Krav til overføringsbåndbredde vil øke fra et analogt til et digitalt signal ettersom digitaliseringen av en analog verdi som regel blir digitalisert med typisk 8, 16, 24 eller 32 bit. Som et eksempel kan vi anta et analogt signal med maksimal frekvens på f.eks. 3.4 kHz der en sampler med 8kHz (og dermed litt over det dobbelte av signalfrekvensen). Signalet digitaliseres med de nevnte 8 bit pr sample. Ved digitalisering blir

¹ Se f.eks. https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist-Shannon_sampling_theorem

da bitraten: (antall bit) * samplingsfrekvens = $8 \text{ [bit]} * 8 * 10^3 \text{ Hz [1/s]} = 64\,000 \text{ bits/s}$.

Et velkjent eksempel er digitalisering av audio lyd for lagring og avspilling på CD. Det høyeste akustiske hørbare signalet for mennesker er ca 20 kHz. Samplingsraten er (derfor) satt til ca 2.2 ganger dette og er 44.1 kHz². Når dette digitaliseres med 16 bits oppløsning har vi en datarate: $44\,100 \text{ [1/s]} * 16 \text{ bit} = 705\,600 \text{ bits/s}$. La oss deretter anta at vi har 20 sekunder lyd så gir dette en datamengde på $20 * 705\,600 \text{ bit} \sim 14 \text{ Mbit}$ - forutsatt én kanal / mono - og dobbelt datamengde i 2 kanaler / stereo. Moderne audiosystemer i dag har som regel enda høyere oppløsning og bitrate.

2.5 Datamengde og frekvens

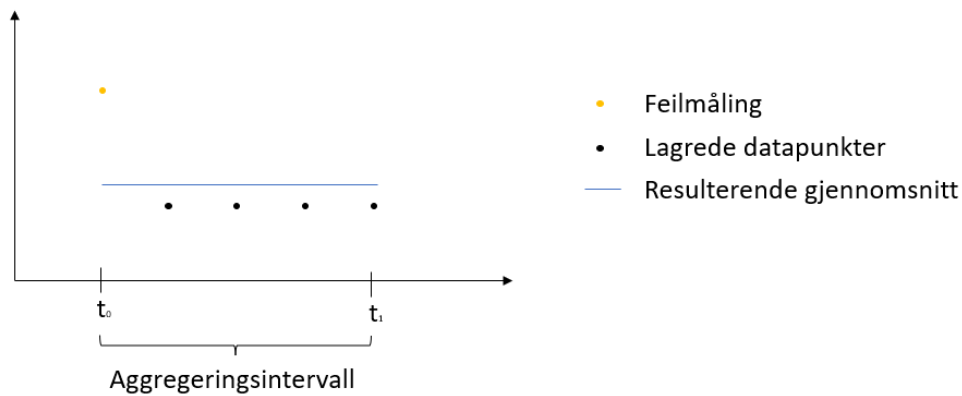
Krav til datamengde og frekvens i målprosessen er som tidligere nevnt direkte knyttet til målebehovet og den underliggende fysiske prosessen som man vil ha informasjon om. I et anlegg er det flere trege prosesser som ikke krever høy oppdateringsfrekvens, men som allikevel er viktige. I et kjøleanlegg vil temperaturendring på vannsiden gjerne endres tregt. Man kan derfor ha god kontroll på vanntemperaturene selv med lav samplingsfrekvens. Et annet eksempel er vannstanden i et magasin som man ønsker å måle nøyaktig, men som endres veldig tregt. Generelt sett har trykk og strømningsmålinger middels høye krav til samplingsfrekvens, så lenge målet ikke er å analysere trykkbølger eller signalpulser.

Innen video kan man ha svært ulike behov. Bruker man et kamera for å se på isdannelse vil frekvensen spille liten rolle i normalt tilstand. Flyter en større gjenstand inn imot inntaket ønsker man gjerne hyppigere oppdatering på hendelsesforløpet. Man bør sette oppdateringsintervallet for kameraet såpass lavt at deteksjon av raskeste hendelse kan oppnås. Hvis et kamera brukes til styring av grindrensker er man avhengig av at det ikke er for mye treghet imellom en utførende operasjon og responsen som observeres på skjermen. I tillegg til operasjonelle utfordringer ved kamerabruk i styringsprosesser, er det fare forbundet med operatørs manglende totalbilde. For eksempel kan det være personer som oppholder seg i nærheten av pågående driftssituasjonen, men utenfor kameraets synsvinkel. Slike trege prosesser krever ikke høy frekvens, men datamengden blir likevel stor med bilde og/eller videooverføring. Med dagens muligheter innen nettverkskommunikasjon er dog båndbreddebruk av kamerabilder som regel begrenset og neppe et problem.

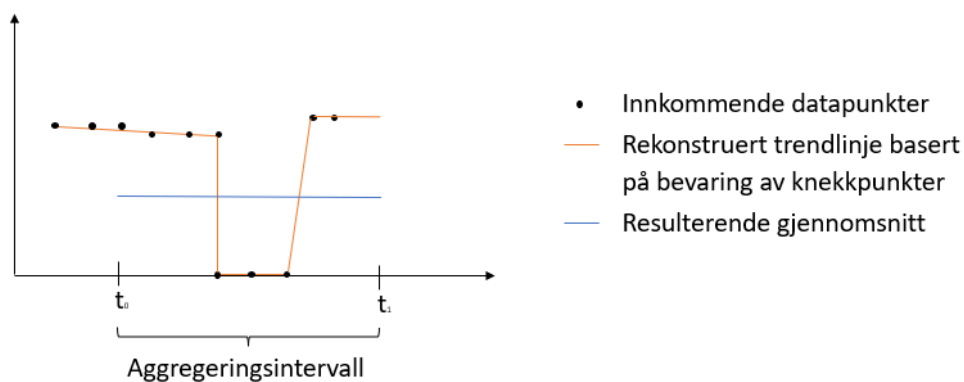
2.6 Aggregering / interpolering av data

Det er ønskelig å bevare informasjonen i måledata uten å lagre unødvendig mye med data. Hvilken metodikk som egner seg for å redusere lagringsmengden avhenger av måledataenes natur og tiltenkt formål. For enkelte målinger kan det være tilstrekkelig med timesverdi, for eksempel vil en vanntemperatur på et stort magasin variere lite innen timen. Et datapunkt konstruert basert på en måling per tidsperiode har stor risiko for å påvirkes av feil eller avvik på instrument. Et datapunkt som derimot er konstruert av gjennomsnittet av mange målinger på samme tidsperiode er mye mer robust mot avvik. Grunnlaget for lagrede dataverdiene påvirker dataintegriteten. **Figur** viser hvordan aggregeringsintervall gjør datasettet mer robust mot ekstreme feilverdier, mens **Figur** viser hvordan viktig informasjon kan gå tapt ved for langt aggregeringsintervall.

² Hz = svingninger pr sek dvs enheten [Hz] = [1/s] eller [s⁻¹]

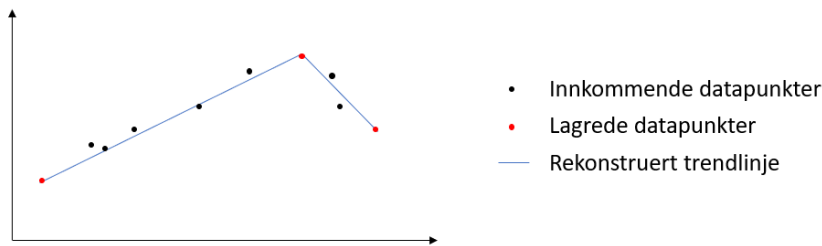


Figur 6 Aggregeringsintervallet glatter datasettet.
Feilmålinger får mindre innflytelse med høyere datafrekvens og lengre aggregeringsintervall.



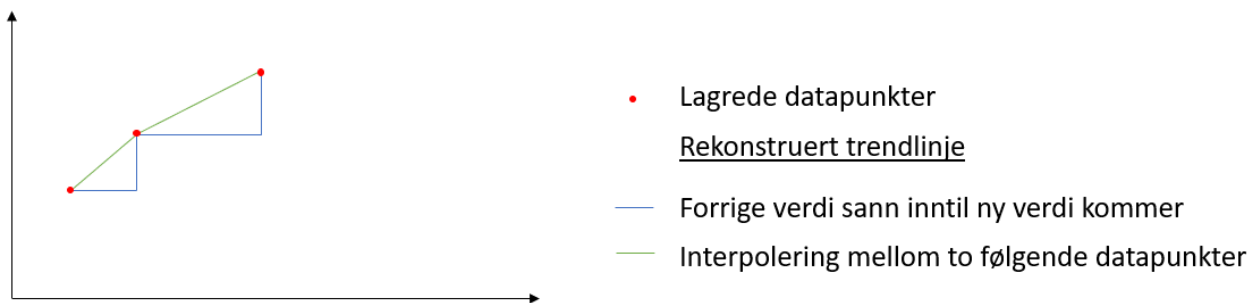
Figur 7 For langt aggregeringsintervall kan fjerne kritisk informasjon som at en måleverdi har vært i nullverdi.

Kongstanken bak lagringsalgoritmer er å lagre så lite data som mulig, men fortsatt kunne rekonstruerte datasettet med tålelig feilmargin. Vi ønsker å optimalisere mengden mtp bruk og analyser. Det er tungvint å analysere massive mengder med data – hvis de mengdene ikke gir mer verdi til analysene så er det unødvendig å lagre. Det er flere kostnader knyttet til datalagring, det økonomiske er selvfølgelig ett, men energiforbruk og klimaavtrykk forbundet med serverparker er også relevant. Intensjonen er med andre ord å kun lagre relevant variasjon i datasettet. Dette kan gjøres ved å lagre knekkpunkter i datasettet og anta at interpolering imellom knekkpunktene beskriver datasettet i tilstrekkelig grad. Sagt med andre ord så er distansen mellom de faktiske målte sensordataene og den interpolerte trendlinjen tilstrekkelig liten. **Figur** eksemplifiserer akseptabel feilmargin mellom datapunkter og rekonstruert trendlinje i datalagring som baserer seg på bevaring av knekkpunkter.



Figur 8 Datalagring basert på bevaring av knekkpunkter godtar små avvik mellom registrerte datapunkter og rekonstruert trendlinje.

Det er mest relevant å sammenligne ulike sensor/måledata på samme tidspunkt. Hvordan trendene rekonstrueres utfra datasettet påvirker ekstrapolerte verdier og dermed analysegrunnlaget. Hvis du skal interpolere verdien for ett tidspunkt imellom to lagrede verdier kan du enten anta at den sanne verdien er en lineær interpolasjon mellom de to lagrede verdiene eller at forrige verdi er sann. **Figur** viser hvordan de to forskjellige antagelsene manifesterer seg når man rekonstruerer data.



Figur 9 Rekonstruksjon av lagrede data avhenger av hvilke antagelser om dataenes gyldighet som er lagt til grunn. Antagelse om lineær utvikling mellom datapunkter gir ett veldig annerledes resultat enn om vi antar at forrige datapunkt er gyldig inntil nytt datapunkt er registrert.

I tilfeller hvor ovenfornevnte tilnærminger til aggregering og interpolering/rekonstruksjon ikke er tilstrekkelig, kan man benytte medianfiltrering, ulike varianter av FIR/IIR filtre, og kubisk eller høyere orden spline interpolering mellom målepunktene.

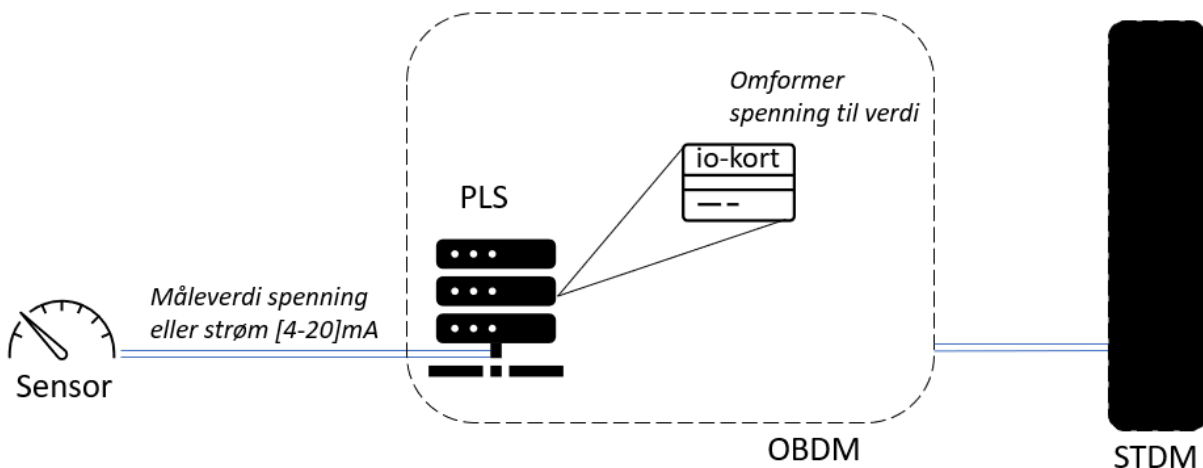
2.7 Dødbånd

Dødbånd er en komprimeringsmetode for måledata som er vanlig i SCADA-systemer. Dette henger igjen fra tiden der man sendte data på seriegrensesnitt og hadde begrenset overføringskapasitet. Målet var å kun sende endringer av en vesentlig betydning. Absolutt dødbånd krever en minimumsendring av måleverdi for at verdier skal overføres til neste ledd i kommunikasjonskjeden. Absolutt dødbånd er angitt i likning 1.

$$|y_{m\ddot{a}lt} - y_{sendt}| > \Delta \quad (1)$$

Der $y_{\text{målt}}$ er nåværende måling og y_{sendt} er siste registrerte måleverdi. Senterpunktet som det absolutte dødbåndet regnes fra endrer seg kontinuerlig.

Analog til digital konversjon av måleverdier medfører alltid en viss usikkerhet. Denne usikkerheten øker i hvert ledd. For å illustrere kommunikasjonsskjeden fra sensor til SCADA-system kan vi se på en temperaturmåling. Detektor i felt måler en verdi, typisk spenning eller strøm, innen et gitt verdiområde. Verdien kan for eksempel være en strømmverdi innen 4-20 mA. Hardware kobler sensor til PLSen hvor strømmmålingen konverteres til riktig domene, temperatur i vårt eksempel. En temperaturendring som er innenfor PLSens programmerte dødbånd vil ikke sendes videre til STDM og så driftssentralen. Dødbånd kan konfigureres i alle kommunikasjonsprotokoller mellom systemer som snakker med hverandre. Videre har sensorer har ulike målenøyaktigheter i seg selv. En 4 leders sensor har målenøyaktighet ned til 3-4 desimalers nøyaktighet, men eldre PLS-er håndterer ikke 4 ledere og slår sammen to ledere. Det gjør at totaloversikten går tapt. **Figur** illustrerer dataflyten fra sensor til stasjonsdatamaskinen og beskriver hvordan måleverdi blir konvertert til tallverdi i riktig format på veien.



Figur 10 Prinsipiell skisse over dataflyt fra sensor til stasjonsdatamaskinen (STDM)

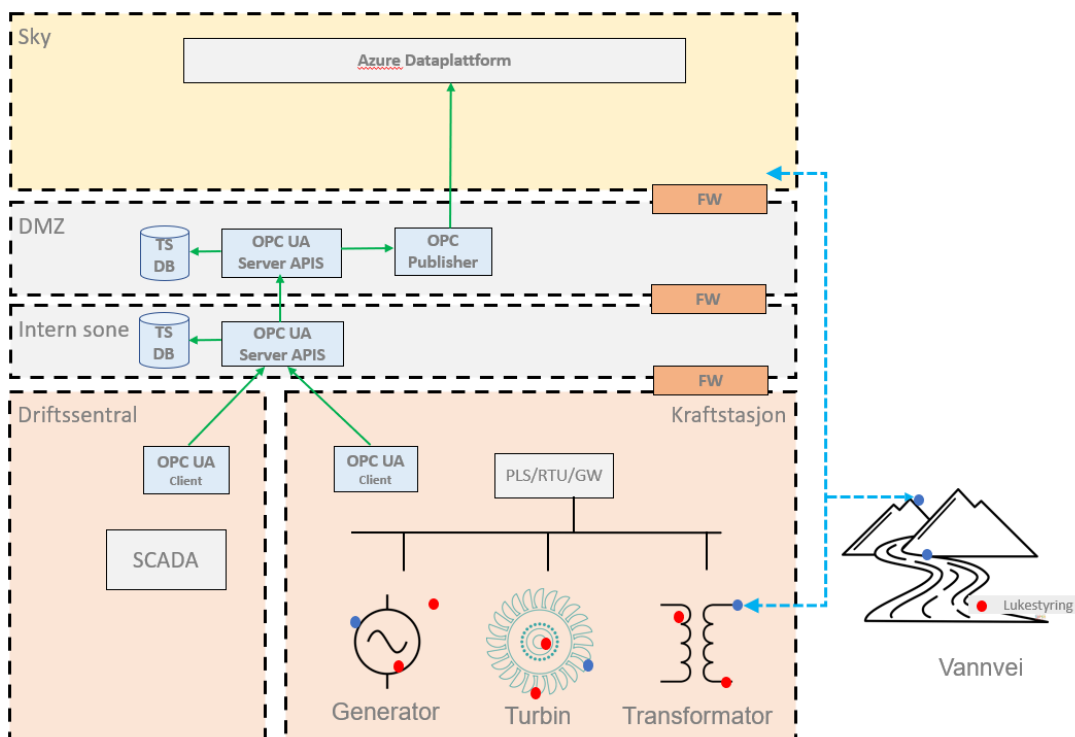
Uten dødbånd-filtrering ville alle sensordetekterte endringer i måleverdier blitt oversendt til driftssentralen. Signalomfanget krever enorm kapasitet av infrastrukturen, samt det drukner driftssentralene med unødvendig informasjon. Optimalisering av dødbånd er relativt vanskelig og avhenger av måleverditype. Hvis dødbåndet er smalere en sensorens målesikkerhet overfører vi støydata. Målingens natur angir hvor høy oppløsning som er informativ og nyttig. For bredt dødbånd reduserer dataoppløsningen og forringer datakvaliteten. Fast samplingsfrekvens er ikke mulig om frekvensen er hyppigere enn verdiutviklingen. Dødbåndet som er fastsatt av PLS-en krever leverandør intervensjon for både å sjekke innstillinger, samt å utføre endringer. Det betyr at innsyn i dødbåndsinstillinger er både kostbart og tidkrevende.

3 Måletekniske behov i vannkraftanlegg

I vannkraftverket brukes sensorer til å overvåke ulike parametere som vannstand, vannføring, turbinhastighet, generatoreffekt og så videre. Se Figur . Disse sensordataene overføres typisk gjennom SCADA som er et datamaskinbasert kontrollsystem som brukes til å overvåke og kontrollere anleggets drift.

SCADA-systemet består av en rekke komponenter, inkludert:

- Sensorer: Komponenter og systemer som måler anleggets fysiske parametere, som for eksempel vannstand og strømningshastighet.
- RTU: Elektroniske enheter som er installert på de eksterne stedene der sensorene er plassert. RTU-ene samler inn data fra sensorene og sender dem til SCADA-systemet.
- PLS: Datastyrt kontrollere som brukes til å kontrollere driften av anlegget. De mottar data fra RTU-ene og sender kontrollsignaler tilbake til anlegget.
- Kommunikasjonsnettverk: Dette er nettverket som kobler RTU'ene og PLS'ene til SCADA-systemet. Det kan være et kablet eller trådløst nettverk, avhengig av de spesifikke kravene til anlegget.



Figur 11 Arkitekturprinsipp for datainnsamling på vannkraftanlegg utarbeidet av AP2.3 Arkitektur

Sensordata (røde prikker) overføres gjennom kommunikasjonsnettverket til SCADA-systemet, hvor de vises på en dataskjerm i kontrollrommet. Operatører kan bruke disse dataene til å overvåke anleggets drift i sanntid og gjøre nødvendige justeringer for å sikre optimal ytelse. SCADA-systemet kan også generere varsler eller alarmer hvis noen parametere går utenfor normalt område eller hvis det er en feil i systemet, slik at operatørene kan iverksette passende tiltak for å forhindre skade eller nedetid. De blå prikkene i figur 11 illustrer sensorer som overføres direkte til dataplattform for bruk til analyse.

Den mest brukte metoden for innsamling av data i vannkraftbransjen har derfor vært å hente ut data fra SCADA systemet hvor det meste av informasjon er samlet. Med bakgrunn i at SCADA systemet er bygd opp

med prinsipp om drift og overvåkning, uten tanke om dataanalyse, kan vi i mange tilfeller miste verdifull informasjon. Figur 11 illustrerer dataauthenting fra SCADA, men også direkte fra PLS/RTU/GW og sensorer som er uavhengig av kontrollsystemet (markert i blått). I visse tilfeller er det hensiktsmessig å sende nye sensor data via SCADA og ikke direkte til separat overvåkningssystem, men kostnaden med å sende via SCADA kan være høyere enn med direkte overføring og må vurderes i hvert enkelt tilfelle.

For å illustrere viktigheten av de ulike måletekniske prinsippene presenterer vi noen eksempler eller «case» som representerer en del typiske og ulike måleteknisk behov i et vannkraftverk. Vi ønsker å gi et innblikk i hvorfor behovskartlegging er viktig. Ved å forstå hva du fysisk skal måle og formålet med resulterende dataene kan sensorimplementeringen tilpasses. Eksempelvis vil en lik konfigurering av alle målinger enten gi altfor mye eller altfor lite data. Uten behovskartlegging og implementeringstilpasning vil ikke investeringene gi optimal avkastning. Enkelte prosesser går raskt mens andre går tregt. I andre tilfeller er det stor krav til oppløsning i tid eller rom, mens det mange ganger kan holde med en grov oppløsning. Vi har i dette kapitlet forsøkt å fokusere på seks ulike tema som er generiske og felles for de fleste anlegg.

3.1 Case 1 Luke

Måling av lukeåpning er en singel verdi som skal oppdateres ved behov. Dette kan gjøres som en fysisk måling av lysåpning, det er ofte brukt trekk-vire enkoder med 4-20mA eller TTL/CANopen³. Alternative metoder er lineære posisjonssensorer der hydraulikksylindere brukes for opptrekk. Alternativt så kan også sensorer med laser for avstandsmåling brukes i visse tilfeller.

Oppløsning i centimeter er gjerne tilstrekkelig da det er andre feilkilder i beregninger for vannføring som har større betydning enn om du har mm nøyaktighet på målingen. Dette er en velkjent måling, og det finnes hylleware sensorer med bredt utvalg fra leverandører. Relativt standardisert målemetode, men det vil være nødvendig med lokale mekaniske tilpasninger.

Krav til nøyaktighet avhenger av bredden og funksjonen til luka: Flomluker for beredskap vil ha lavere krav til oppløsning enn en tappeluke for produksjon eller minstevannføring. På en luke som er 1 meter bred vil en unøyaktighet på 2-3 cm ha mindre å si enn på en luke som er 10 meter bred. Vanlig målenøyaktighet på wiredrag er +/- 0,1% med analog sensor og +/- 0,05% med enkoder. På større installasjoner vil det være en fordel å dublere målinger slik at det er en viss form for kontroll med nøyaktighet. Videre bør sensorene som brukes på luker sikres mot å avgi feil måleverdier ved ekstern påvirkning slik som tordenvær og lynnedslag, samt elektriske støykilder i nærheten.

For å hindre at luka ødelegges ved enten å kjøres hardt i bunn eller i åpning er det nødvendig med endebrytere som gir tilbakemelding på lukket og åpnet tilstand. Ofte er det også brytere som gir tilbakemelding på 25%, 50% og 75% åpning i tillegg til stengt og 100% åpning. Disse kobles opp på digitale innganger. Stengt/100% tilbakemelding bør i tillegg til å gi tilbakemelding, forigles mot kommando for lukke/åpne. Dette kan gjøres i programvare eller via rele og styresignal. Dette bør kontrollmåles og kalibreres årlig.

Hvilken oppløsning vil holde for denne målingen?

Gitt for eksempel 0,5 meter lukehøyde, krav til 1cm nøyaktighet gir et krav om minst 50 mulige verdier. Det er ønskelig med måleområde i hele lukas lysåpning fra full åpning til helt lukket.

³ <https://en.wikipedia.org/wiki/CANopen>

- 16 bits oppløsning er ikke nødvendig på sensoren (65536 verdier)
- 10 bit oppløsning vil gi 1024 datapunkter, så dette vil være tilstrekkelig hvis kravet er 1cm på 5 meter.

Hvis derimot luka har 15 m lukehøyde og det er krav til 1 cm nøyaktighet så vil ikke 10 bit oppløsning være tilstrekkelig.

Hvilken tidsoppløsning/samplerate og tidsnøyaktighet kreves?

Det er ønskelig med sanntidsoppdatering av målt verdi ved kjøring av luka slik at man kan redusere hastigheten når man nærmer seg endepunktene og at man kan manøvrere tilstrekkelig kontrollert til å unngå for raske svingninger i vannstanden i vassdraget. Dette stiller noen krav til kommunikasjon; radiolinje, 4G/5G, fiber, er alle gode alternativer. Utover dette vil det være ønskelig å få tilsendt oppdatering ved endring, samt daglig oppdatering av målinger for kontroll.

Alder og type luke vil være med å bestemme hvor kjapt disse beveger seg. Normalt vil det ta flere minutter å åpne en luke fra lukket tilstand til helt åpen. F.eks. en 5 meter luke bruker 10 minutter fra lukket til helt åpen tilstand. Dette gir en åpningshastighet på 0,0083 m/s. eller 0,83 cm/s. Hvis en ønsker tilbakemelding per cm åpning vil det i dette tilfellet være tilstrekkelig oppdateringshastighet på 1Hz (en gang per sekund) fra sensoren.

Endring i fra 0 til 1m i løpet av en time med samplerate på en time vil ikke fange opp endringene underveis. Er dette endring av nivå i en kum bør man ned på minutt-rate for å kunne fremstille endringsforløpet. Tidsnøyaktighet samt hvor godt tiden stemmer med den virkelige tiden. Dette kan ha stor innvirkning ved sammenstilling av ulike målinger, men kan ha mindre å si dersom man ser på en isolert case.

Hvilken datastørrelse og kommunikasjonsmetode kan benyttes?

Det er små datamengder involvert, og under 1kB. Tilsvare ca. 1MB i måneden. 1kB/sek tilsvare ca. 105MB/mnd. Mest utbredt er 4-20mA sensorer med radiolinje eller 4G kommunikasjon. På grunn av overhead på kommunikasjon og annen TCP/IP-trafikk, er typisk forbruk over 4G til en dam med fjernstyring på luker og vannstandsmåling er 1-5GB / mnd. Dette kan reguleres ved å stille på oppdateringsfrekvens på målinger.

Trådløskommunikasjon med batteridrift er et alternativ der man baserer seg på lokalt produsert strøm (e.g. solceller). Passer godt med NB-IoT. alternativt Lora-Wan eller 4G. Målepunkt i nær tilknytning til kraftverket kobles direkte inn i lokalkontrollanlegget.

3.2 Case 2 Vibrasjonsvern

Konvensjonell bruk av vibrasjonsvern er primært rettet mot å unngå høy konsekvens / større havari ved allerede inntruffet hendelse. Vernene samler inn data som gir flere muligheter til analyse ut over det å kun treffe en gitt alarmgrense som enten varsler eller stopper et aggregat.

Måling foretas direkte på eller på kort avstand i fra måleobjektet: Akselerometere monteres direkte på utstyret som skal måles, mens avstandsprober og hastighetssensorer plasseres med kort avstand til målepunktet. Typiske målinger er kast, løft, uretthet i akselstreng og store vibratoriske kraftpåkjenninger. Vibrasjonsmåling har begrensede muligheter med kun én enkelt sensor. Hvor mange sensorer som

benyttes avhenger av kompleksitet til et aggregat, tilkomst til sensorer, alder, hvor viktig de er for selskapene o.l.

De ulike målingene kan i prinsippet avledes i fra hverandre ved hjelp av integrasjon og derivasjon, men man mister gjerne noe av signalkvaliteten og får avdriftsproblemer ved for mange utledede målinger. Det er derfor mest hensiktsmessig å plassere en gitt sensor for de verdiene/enheten man ønsker å måle i. Det er ikke alle målinger som er rent overførbare, for eksempel hvordan kastet ser ut i en aksel: Er det et ovalt bevegelsesmønster eller et sirkelformet bevegelsesmønster. Dette egner seg for kun avstandsprober i ulike retninger, normalt med to prober vinkelrett på hverandre.

Selve vibrasjons-sensorene er standard instrumentering, men i overføring og bruk av dataene har det ikke vært vanlig å overføre rådata med høy samplefrekvens til overliggende systemer. For å kunne overvåke ved høy frekvens er man som oftest avhengig av en form for kantanalyse, enten bygget inn i et vern eller i en datamaskin på kraftverket som leser i fra vernet digitalt eller lytter på analogsignalene. For det sistnevnt har vern ofte dedikerte utganger med galvanisk skille.

Akselerasjonsmåling som krever direkte kontakt med en overflate kan være en utfordrende balansekunst mellom å fange opp verdier som representerer objektet man ønsker å måle, mekanisk demping og egensvingninger i konstruksjon rundt målepunktet. Det er ikke alltid hensiktsmessig eller mulig å plassere et akselerometer direkte på stedet man ønsker å overvåke.

Dersom et akselerometer plasseres på et konstruksjonsmessig sted med mye svingninger kan amplitudeverdiene skape et falskt høyt bilde av kreftene komponenter utsettes for. Det motsatte kan forekomme om sensorplassering er på et veldig avdempet konstruksjonsområde. Eksempelvis kan et akselerometer plassert litt ut på et kryss fange opp en høy vertikal akselerasjonsamplitude som følge resonans i krysset, men som da ikke er representativt for vertikal belastning akselsystemet eller aggregatets komponenter utsettes for.

16-bit oppløsning med 8 kHz sampling vil være dekkende for de fleste vibrasjonscasene som er naturlig å overvåke for et aggregat.

3.3 Case 3 Vannstand i magasin

Måling av vannstand i magasin tilknyttet kraftverket er nødvendig for å vite hvor mye vann som er disponibelt til produksjon av elektrisk energi. Det er ingen kraftverk som er bygget for å kjøre på full last hele døgnet, hele året rundt. Det store spørsmål blir da, skal vi produsere kraften i dag eller i morgen?

Alle regulerte magasin tilknyttet et kraftverk har normalt minimum én måling av vannstanden. Noen større magasin har også på flere ulike plasser i magasinet for å detektere lokale forhold som f.eks. trangere innsnevring hvor vannet forflytter seg tregere og det oppstår høydeforskjeller i magasinet. For å sikre rett målekvalitet monteres det gjerne 2-3 sensorer per målepunkt for å bekrefte at målingene gir riktig verdi. Det er nå også mer vanlig å måle vannføringen inn til magasinet fra elver og overføringstunneler for å tidlig kunne beregne nøyaktig tilsig og da endringen av vannstand i magasinet.



Figur 12 - Bilde fra Skagerak Kraft av Kvernassbekken med trykkmåler i vannet og en moderne datainnsamler.

Normalt er det ønskelig med oppdatering av målepunktet med øyeblikksverdi hver time. Ved måling av tilsig inn til magasin i form av elver eller bekkeinntak hvor endring oppstår raskere er det ønskelig med oppdatering hvert 15. minutt. I flomsituasjoner kan det være ønskelig hvert 5. minutt. Tidsopløsning og nøyaktighet er avhengig av hvordan magasinet er utformet; hvor kjapt endringer skjer i et magasin basert på kjøremønster eller tilsig; og hvor ofte modellverktøyet kjøres. Nøyaktigheten settes ofte til 0,05% for hele måleområdet. Det er da viktig å huske på at en %-vis angivelse i feilmargin skalerer med måleområde slik at 1% avvik på f.eks 1m vil gi inntil 1 cm feil, mens 1% på 50 meter vil gi inntil 50 cm feil.

Den mest vanlige målemetoden er en fysisk måling hvor det brukes trykkmåling direkte i vannet. Trykkmålingen konverteres til meter over havet. Det er verdt å merke at det er forskjellig måleteknikk for ventilerte trykkmålere og måling av absolutt trykk. Ved måling av absolutt trykk må det i tillegg måles atmosfærisk lufttrykk for å kompensere for endringene i lufttrykket. Uten kompensering kan dette utgjøre flere cm i et magasin, som igjen kan utgjøre mange tusen m³ med vann.

Alternative måleteknikker er:

- Boblerørsmåling hvor det blåses lufttrykk i et rør som går ut i vannet, lufttrykket i røret måles på land.
- Radar - ultralydmåling som måler avstand til vannoverflaten.

For måling i elver og bekker brukes det samme måleprinsipp hvor det i tillegg lages en vannføringskurve for omregning fra målt vannhøyde til vannføring. Her kan det brukes en hydraulisk modulering av vannveien for å raskere bygge riktig vannføringskurve med færre målepunkt, ofte brukt er metodikk fra HEC-RAS.

Sensorer for formålet kommuniserer typisk på SDI-12 over RS485 der det er krav til lavt strømforbruk og høy nøyaktighet. Alternativt benyttes 4-20mA. Det sendes typisk små datamengder, under 1kB, det tilsvarer ca. 1MB i måneden. Mest brukt er trådløskommunikasjon med batteridrift, her passer det godt

med NB-IoT for lang rekkevidde og lavt strømforbruk. Alternativt Lora-WAN eller LTE(4G). Målepunkt som er i nær tilknytning til kraftverket og brukes direkte i styringen av kraftverket kobles direkte inn i lokalkontrollanlegget. Typisk her er måling av inntak og elver hvor kraftverket styres basert på vannstandsregulator. Med bakgrunn i IT-sikkerhet anbefales det å holde sensorer utenfor kraftverket også utenfor kraftverkets nettverksone når det ikke brukes direkte i styringen.

3.4 Case 4 Meldingsdata

I et typisk SCADA-system som henter data fra kontrollanlegg i kraftverk kommer det i tillegg til analoge måleverdier også tekststrenger som indikerer hendelser med tidsstempel. Disse tekststrengene eller meldingsdata - som omtalt i kapittel 2 - kan for eksempel vise når en motor startet på en vannpumpe.

Lensekummer samler alt spillvann nederst i en kraftstasjon. Kummene er typisk utstyr med en vannstandsmåler som setter i gang lekkvannspumpene når vannet overstiger ett gitt nivå. Systemet er autonomt og selvregulerende. Hver start og stopp på pumpene dokumenteres av meldingsdata til SCADA-systemet. Meldingsdataene består som oftest av verdiene *drift* (pumpe i drift) og **drift* (pumpe er ikke i drift) sammen med et tidsstempel. Meldingsdataene inneholder informasjon om kjøremønsteret til pumpene og kan konverteres til innsikt i tilstand. Kjørestatus og tidsstempel kan brukes til å beregne driftstid og tid mellom kjøring, disse sier henholdsvis noe om pumpeeffektiviteten og vanntilsg i lensekummen. Forlenget driftstid kan indikere at pumpefiltrene er tette og må renses. Kortere tid mellom kjøringen indikerer et høyere tilsg og dermed økt lekkasje i kraftstasjonen. Utviklingen av kjøremønsteret til lekkvannspumpene avslører noe om tilstanden til både pumpe-systemet og stasjonen for øvrig.

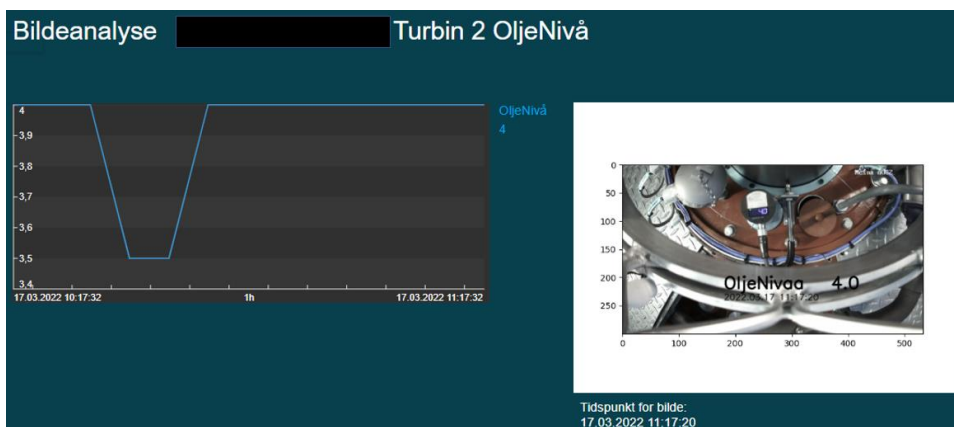
Lekkvannspumper er et enkelt og autonomt system som er lite sårbart for unøyaktigheter som tidsdrift, men tidsnøyaktighet er generelt viktig i et kraftverk og skal etterstrebes for alle signaler. Meldingsdata som start og stopp til lekkvannpumpe er interessant i analyse-øyemed, men trenger sjeldent ageres på umiddelbart. Meldingsdata blir *ikke* ansett som tidskritiske signaler og blir overført til SCADA systemet i henhold til stasjonsdatamaskinen sin syklustid. Tidsoppløsning på tidels sekundnivå er tilstrekkelig for å gi anslag på pumpenes driftstid. Kravene til tidsoppløsningen er tilstrekkelig ivaretatt av syklustiden som stort sett ligger på hundredels sekund.

3.5 Case 5 Bilededata

Enkelte sensorer viser verdi lokalt, men oversender ikke verdien videre til styringssystemet. Å koble opp nye sensorer i kontrollanlegget kan være både tidkrevende og kostbart. Et webkamera er en billig og fleksibel måte for å avbilde lokale ikke-overførte sensorverdier til eksterne plattformer. Metoden er en hurtig løsning for å få overført og tilgjengeliggjort måleverdier til personell samt dokumentere verdiutviklingen.

Som eksempel er oljenivået til et aggregat vist lokalt på skjerm, men i dette tilfelle ikke overført til overordnet SCADA-system. Rask endring i oljenivået skaper en driftssituasjon hvor personell må manuelt sjekke nivåene hver dag, og det vekker mistanke om en garantisak. Et kamera som avbilder måleren blir derfor satt opp for å dokumentere utviklingen og gi personell mulighet til å følge med på nivået uten å være fysisk til stede i kraftverket. Det fastmonterte kameraet tar bilde av skjermen hvert 5. minutt og batchoverfører bildene til fellesdomene hver time. Enkel segmentanalyse av digitale tall konverterer bilde til en verdi. Resultatet av bildebehandlingen blir kvalitetssikret av driftspersonell som sjekker for samsvar

mellom bilde og beregnet verdi i samme plattform. **Figur** viser datapresentasjonen som ble tilgjengeliggjort for driftspersonell.



Figur 13 Visning av både billededata og algoritmeresultatet basert på bildebehandling. Visningen både tilgjengeliggjør data til driftspersonell i sanntid og åpner for kvalitetssikring av algoritmen.

Dette er ikke en standard måling, men en ad-hoc håndtering av nødvendige målinger som ikke overføres til SCADA-systemet når en driftssituasjon oppstår. Løsningen krever et webkamera, kabling og internett for overføring av bilder. Fysiske omgivelser er viktig med tanke på montering av kamera og påfølgende bildeanalyse. Et fastmontert kamera forenkler kompleksiteten av bildeanalyse betraktelig fordi objektet av interesse befinner seg på samme sted i hvert bilde og dermed kan bildekoordinatene hard-kodes. Et fleksibelt kamera, f.eks. overvåkingskamera kan også brukes for å følge med på lokale sensorer, men krever objekt identifikasjon før bilde kan konverteres til tallverdi med bildeanalyse. Andre fysiske faktorer som lysforhold påvirker også informasjonsomfanget i bildene. Lysforhold må tas hensyn til ved tidskonfigurering av billedtaking, bildebehandlingen eller at man setter opp flere lyskilder.

Kameraet kan ta bilder og overføre de hyppigere enn personell har anledning til å sjekke oljeaggregatet manuelt. Manuell verdisjekk vil typisk være begrenset til et fåtalls ganger i løpet av en arbeidsdag. Tidsnøyaktigheten er ikke kritisk, men bør som alltid være ganske presis for å sammenligne verdier med andre sensorverdier. Timesoppløsning på oversending av bilder ble ansett som tilstrekkelig grad av sanntid for drift og hvert 5. minutt som tilstrekkelig timesoppløsning i dokumentasjons-øyemed.

3.6 Case 5 Videodata

I dette avsnittet beskrives en case der det er mye data som skal overføres. En slik case vil være overvåking som skal skje med video og/eller høyoppløselige bilder og der dataene sendes inn til en sentral prosesseringsenhet. Som eksempel er overvåking av varmeutviklingen (infrarød emisjon) på små områder i et generator-rom med en IR (infrarød) sensor, også omtalt som varmekamera. Metodikken muliggjør også fysisk måling av temperatur over et stort areal (det kameraet ser) – og med varierende avstander innenfor 3-10 meter.

Sikkerhet ved overføring av bilder må ivaretas. Plassering av kamera må særskilt vurderes for å unngå skade på kamera og linse. Avklaring av om det kreves egen strømforsyning eller om det kan benyttes batteri – som i så fall må skiftes. Det vil også normalt kreves et eget interfacekort for bildeprosessering og overføring om dette ikke er integrert i kameraet. Er varmemålingen utendørs må det korrigeres for

solinnstråling da det ellers vil gi feilaktig resultat. Innendørs trengs lite korreksjon, men det må også gjøres korreksjoner på blanke overflater som kan reflektere annet lys.

Med hensyn til valg av utstyr så finnes standard IR-sensitive videokameraer som leverer bilder i svart/hvitt. Forventet område er fra -minus 20°C til 650°C som innebærer at det er følsomt for 7,5 -14 µm IR stråling. Typisk er oppløsningen for IR-kamera lavere enn for ordinære kamera i det synlige området. Det som ikke er standard, er at man kan velge å koble inn en digital tvilling i avviksdeteksjonen der modellen må trenes.

En piksel er billedpunktet som detekterer IR-strålingen, som regel i et halvledermateriale følsomt i det aktuelle bølgelengdeområdet. Hver av pikslene kan ha f.eks. 16 bits oppløsning i intensitet (2 byte pr piksel), dvs 2^{16} eller 65 536 ulike nivå av intensitet eller fargeskala. Forventet temperaturopløsning på denne typen kamera er typisk rundt +/- 2%. Lokal lagring av bilder er mulig i noen kamera (f.eks. 1000 bilder), men det vil i et kraftverk være lite praktisk for kontinuerlig overvåkning da dette innebærer manuell innsamling. Det anbefales for øvrig valg av kamera som kan ta både IR og synlig lys bilder av samme objekt for overlapp og analyse (såkalt bildefusjon). Det bør også være en innebygd IR avstandsmåler.

Vi antar VGA videodata med 30 eller 15 rammer i sekundet med 16 bits oppløsning. Video blir normalt komprimert iht MPEG4⁴ standarden og bilder som JPEG/JPG. Det finnes flere andre standarder som også benyttes i digitale kamera, slik som TIF, GIF, PNG og RAW. Datamengde som skal overføres avhenger mye av om det er fulle bilder eller om det er benyttet komprimeringsalgoritmer som kan være tapsfrie eller med tap (men der tapet betyr lite). Som eksempel vil et infrarødt kamera med 640x480 oppløsning ved 30fps ved bruk av tapsfri komprimeringsmetode trenge rundt 60-90Mbp. Alle data forventes å være digitale og det benyttes heltall eller datapakker.

Datamengde for bilder kan finnes som følger:

- Multipliser detektorens antall horisontale piksler med antall vertikale piksler for å få det totale antallet piksler til detektoren.
- Multipliser det totale antallet piksler med bitdybden (digital oppløsning i en piksel) til detektoren (16 bit, 14 bit osv.) for å få det totale antallet databiter.
- Del det totale antallet biter med 8 for å få filstørrelsen i byte. (1 byte = 8 bit)
- Del antall byte med 1024 for å få filstørrelsen i kilobyte og del eventuelt igjen med 1024 for å få filstørrelsen i Megabyte.⁵

Kamera beregnet for synlig lys har normalt vesentlig høyere oppløsning. Ta f.eks. HD oppløsning som har $1920 \times 1536 = 2\,949\,120$ piksler i sensoren. Det gir da datastørrelse på $2\,949\,120 \times 16 \text{ bit} = 47\,185\,920 / 8 \text{ bits per byte} = 5\,898\,240 \text{ bytes} = 5\,760 \text{ kB} = 5\,625 \text{ MB}$. I tillegg til ren oppløsning kommer også eventuelle kontrolldata og fargekanaler (f.eks. RGB - Rød, Grønt, Blått eller andre varianter i fargekartet som til sammen gir hvitt lys).

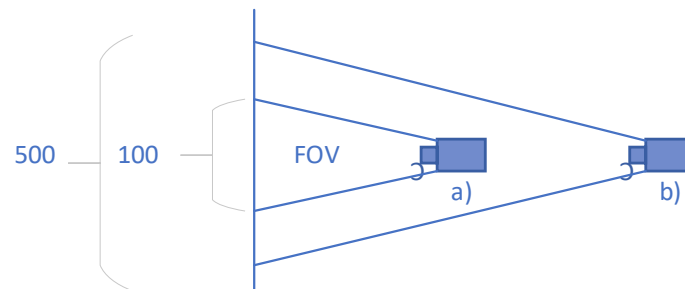
Oppsummert så vil båndbredden som trengs for prosessovervåking med kamera avhenge av en rekke faktorer, og spesielt a) oppløsningen til det infrarøde kameraet b) bildefrekvensen som kameraet tar bilder med og c) om det benyttes komprimerings-algoritmer i bildeprosesseringen eller til å overføre dataene. Kameraer med høyere oppløsning og høyere frekvens vil raskt multiplisere nødvendig databåndbredde.

⁴ Se f.eks <https://en.wikipedia.org/wiki/MPEG-4> og <https://en.wikipedia.org/wiki/JPEG>

⁵ Se f.eks. <https://technical-tips.com/blog/internet/why-is-1-kbyte-1024-11085> for diskusjon om det er 1000 eller 1024 byte i en kilobyte

Om krav til oppløsning i et kamera:

Hvor små detaljer man kan se i bildet/video vil avgjøres av sensorstørrelse og antall piksler og utsnittet man vil se gitt avstanden fra objekt til kamera. Dersom en ønsker å overvåke et større område fra avstand – f.eks. fra en vegg i større rom - men samtidig se små detaljer - vil dette kreve høyere oppløsning enn om man kan plassere kameraet nært inntil et objekt og har god belysning.



Figur 14 Synsfelt eller synsflate - «Field of view» - ved to ulike kameraavstander a og b. FOV er konstant, og faktisk synsfelt øker derfor med avstanden L.

Om man ikke kjenner til synsfeltet (eng: field of view⁶) kan dette estimeres som følger der $CCD(H)$ er den horisontale bredden på kamera-chipen i mm, L er avstanden fra kamera til objekt og linsens fokallengde i mm er f .

$$\text{Horisontalt Synsfelt} = HFOV = L * \frac{CCD(H)}{f} \text{ [m]} \quad (2)$$

For eksempel kan vi anta et kamera med en 5 MegaPiksel sensor en chip med bredde på 5,8 mm og fokallengden på linsen er 1,7 mm. Dersom avstanden til observert objekt er 3 meter, vil HFOV for dette kameraet bli $3 * (5,8/1,7) = 10,2$ meter

Oppløsningen⁷ er gitt som.

$$\text{Oppløsning} = \frac{\text{Antall Pixler (horisontalt)}}{HFOV} \text{ [piksler/m]} \quad (3)$$

Dersom antall piksler i denne chipen er HD standard - 1,920 (H) x 1,080 (V) - gir det oppløsning på $(1920 \text{ piksler} / 10,2\text{m}) = 188 \text{ piksel/meter}$. For å kunne skille ut et lite objekt bør det være et minimum (typisk 5-10) piksler for å kunne se detaljen klart.

Linseforvrengning og sensorstørrelse kan spille en rolle i å få god oppløsning og bør tas i betraktning ved at en har nok margin. Optikk og zoom bør derfor være av like god kvalitet som kameraet.

3.7 Case 6 Måledata til Digital Tvilling

En Digital Tvilling (DT) i vannkraft refererer til en virtuell kopi av et vannkraftverk som er opprettet ved hjelp av datamodellering, simulering og dataanalyse. Den digitale tvillingen kan være en omfattende og

⁶ (*) I fotografi defineres Field of View som $FOV = 2 \arctan[\text{sensor størrelse}/2f]$, der f er fokallengde på linsen. FOV oppgis i radianer og uttrykker det vinkelområdet man ser og i en gitt avstand gir det derfor en observerbar flate.

⁷ Fra amerikanske leverandører ofte pixels per foot og oppløsning i ppi - pixels pr inch - eller DPI = dots pr inch for trykt materiale

nøyaktig representasjon av det fysiske vannkraftverket, inkludert alle dets komponenter og prosesser. En DT kan også være en representasjon av kun enkeltkomponenter eller enkeltsystemer i et vannkraftverk. DT-modellen oppdateres som regel kontinuerlig med sanntidsdata fra målinger i det faktiske anlegget. For at en DT-modell skal kunne fungere optimalt så er det svært viktig å føre modellen med sensoravlesninger (måledata) fra relevante steder i kraftverket. Det er også viktig at målingene er korrekte i forhold de forutsetningene som man har lagt til grunn i modellen.

DT-teknologi kan brukes til å optimere driften av vannkraftverket ved å la operatørene simulere ulike scenarier og teste ulike driftsstrategier før de iverksettes i selve anlegget. Den digitale tvillingen gir også en mulighet for predikativt vedlikehold, da den kan oppdage mulige utstyrsfeil før de oppstår ved å analysere sanntidsdata fra det faktiske anlegget og sammenligne dem med data fra den digitale tvillingen. Hvis måledataene og modellen viser forskjellige resultater, så er det grunn til å anta at det kan ha oppstått en anomalitet.

I et vannkraftverk kan DT inkludere modeller av vannturbiner, generatorer, overføringslinjer og andre komponenter. Den kan også brukes til å simulere ytelsen til anlegget under forskjellige driftsforhold, for eksempel endrede vannstrømningshastigheter eller elektriske belastninger. Ved å analysere dataene fra den digitale tvillingen kan dermed operatører ta beslutninger om hvordan de skal optimere anleggets drift og forbedre effektiviteten.

DT-teknologi kan også brukes til å lære opp operatører og ingeniører, da den gir en realistisk og interaktiv plattform for å lære om anleggets drift og vedlikehold. Den kan brukes til å simulere nødsituasjoner og teste responsen til operatørene, slik at de kan få verdifull erfaring uten å risikere sikkerheten til det faktiske anlegget eller personellet. DT-teknologi er derfor et kraftig verktøy for å optimalisere drift og vedlikehold av vannkraftverk, forbedre effektiviteten og påliteligheten deres, og redusere risikoen for nedetid eller utstyrsfeil.

Eksempel 1: Digital tvilling modell av statortemperatur i generator:

Statortemperaturen i et vannkraftverk er direkte relatert til produksjon (aktiv effekt) da det er ohmsk tap i viklingene. Dermed vil statortemperaturen øke ved økt produksjon. Statoren må også kjøles, som regel ved hjelp av luft til vann varmevekslere. Hvis det er snakk om et elvekraftverk så vil statortemperaturen svinge over året med ca. 20 grader da elvevannstemperaturen svinger mellom 0-20 grader (typisk) fra sommer til vinter. Statoren kjøles også ved luften i bygget da temperaturen på bygget svinger opp og ned med utetemperaturen. Mange kraftstasjoner varmes kun opp med tap fra generatoren og har ikke særskilte egne radiatorer eller liknende annet enn for å hindre frost ved en stans.

Statortemperaturen kan modelleres på forskjellige måter, og i enkle tilnærminger der man ikke modellerer alle fysiske forhold kan man benytte en lineær modell dersom man ikke modellerer stans, men stabil drift. $St = a \cdot Ev_t + b \cdot L_t + c \cdot A_e$. (St = modellert statortemperatur, L_t = lufttemperatur, Ev_t = elvevannstemperatur, A_e = Aktiv effekt). Modellen må trenes med normal statortemperatur, normal vanntemperatur på de forskjellige årstidene og normal lufttemperatur på de forskjellige årstidene og da er riktige målinger av disse viktige. Man får da koeffisientene a , b og c . Man kan nå estimere statortemperaturen ved å mate inn L_t , Ev_t og A_e i modellen. Dersom målt statortemperatur og modellert statortemperatur fra den digitale tvillingen avviker mye, så kan dette da indikere at man har en feilsituasjon som det må ageres på.

Eksempel 2: Digital Tvilling "Thermal Aging" på generator.

"Thermal aging" modulen beregner gjenværende levetid på isolasjonen i en vikling gitt temperaturene den er utsatt for over tid. Modellen som brukes kommer fra Rothe og Hameyers artikkel "Life Expectancy Calculation for Electric Vehicle Traction Motors Regarding Dynamic Temperature and Driving Cycles⁸". Modellen vurderer den termiske aldringseffekten på isolasjonen som den mest avgjørende levetidsparameteren. Beregningen gjøres ved å ta i bruk den kjemiske forringelsesloven til Arrhenius⁹ med hensyn til materialspesifikke egenskaper, nominell levetid og temperaturen i statorviklingene. Beregningen kjøres en gang i døgnet hvor den får input med temperatur serie fra sensor på statorvikling fra forrige døgn med gjennomsnitt pr. kvarter, i tillegg brukes romtemperatur i maskinhall. Modellen kjøres for hver enkel måleserie, slik at gjenværende levetid beregnes for det området temperaturmålingen representerer.

Modellen gir to resultater:

- Estimert gjenstående levetid i timer basert på nåværende bruksmønster. Som kan brukes til å estimere driftskostnader som f.eks. kostander for start/stopp, høy last eller lav last.
- Estimert gjenstående levetid i timer basert på vanlig belastning/bruk. Som kan brukes til å planlegge nedetid/reparasjoner.

Modellen er implementert i Skageraks SmartKraft pilot Digital tvilling for produksjonsoptimalisering.



Figur 15 Foto: Skagerak Kraft, Generator fra 1907 ved Gamle Dalsfos Kraftverk

4 Krav til datatransport basert på måletekniske behov

Det er ofte en grunnleggende vurdering om det er aktuelt å benytte trådløs eller trådbasert (ledningsbasert) overføring av sensordata til sentralsystemet.

Det vil ofte være aktuelt å gjøre installasjon i et eksisterende anlegg. Trådløse systemer kan i praksis være det eneste reelle alternativet der ledninger er vanskelige eller upraktiske å trekke, for eksempel spesielt

⁸ <https://ieeexplore.ieee.org/document/5994793>

⁹ https://no.wikipedia.org/wiki/Arrhenius'_ligning

kompleks ruting eller begrensninger for gjennomføringer i bygningsmassen. Trådløst betyr da som regel reduserte installasjonskostnader, minimale forstyrrelser på drift, personell og innvendig i bygget samt et system som er raskt å få etablert. Trådløse nettverk er også relativt fleksible mht nettverksstruktur.

Kostnadmessig er det to hovedfaktorer – kostnadene for selve systemet/ komponentene inkludert installasjonsarbeidet samt løpende vedlikeholdskostnader. Selv om startkostnadene kan være litt høyere for et trådløst system, vil eventuelle modifikasjoner som må gjøres i fremtiden være billigere, inkludert utvidelser og forgreininger. Det bør derfor vurderes om det kan forventes utvidelser og flere tilkoplinger senere.

4.1 Trådløs overføring

Det finnes to typer trådløse enheter – batteribaserte og selvdrevne og/eller med energihøsting. I batteridrevne trådløse systemer vil alle sensorer og aktuatorer være batteridrevne. Batterier må skiftes, de må også lagres og oppbevares klar til bruk, og deretter kastes på en sikker måte etter bruk. Mange batteridrevne systemer kan derfor være upraktisk. Selvdrevne trådløse enheter høster energien de trenger for å fungere via f.eks. små solpanel eller bevegelse, trykk, lys, temperatur eller vibrasjon. Dette er særlig aktuelt for utendørs målere, f.eks. vannstandsmålere og gjør dem praktisk talt vedlikeholdsfrie. Selv om denne teknologien i utgangspunktet er dyrere enn batteridrevne enheter, vil systemet i det lange løp kunne være langt mer økonomisk, samt mer bærekraftig.



Trådløs teknologi egner seg særskilt godt til IoT-applikasjoner, og tillater direkte tilkobling over en rekke kommunikasjonsteknologier som omtales senere i dette avsnittet, f.eks. Wi-Fi, 4G/5G mobildatanettverk eller lokale trådløse nettverk. Trådløse systemer kan ha høy grad av sikkerhet bygget inn, som regel via programvare. En klar ulempe for trådløse systemer er mulig blokkering fysisk av signaler gjennom f.eks. tykke og metalliske vegger og enheter. Det er også mulighet for interferens på samme signalkanal eller frekvens ved flere sendere. Dette vil i så fall redusere datarate og øke feilrate.

Med trådløse systemer kan en operatør koble seg til og være mobil i anlegget og kan f.eks. med en bærbar enhet gjøre notater, sende meldinger etc. uten å måtte koble seg til en fysisk node. I praksis kan man ta kontrollrommet ut i produksjonen.

I kritiske trådløse styringssystemer er det vanlig at utstyret skal stoppe ved tap av signal. Et eksempel er et trådløst styrepanel til en kran. Ved å overføre kritiske styresignaler via trådløs kommunikasjon kan man derfor risikere at stasjoner stopper som følge av brudd eller redusert trådløs overføringsevne. Man er også sårbar overfor eksterne trusler som signaljamming. Per i dag åpner ikke maskindirektivet opp for trådløs styring av kritiske anleggsfunksjoner, men man skal ikke se bort ifra at det vil komme på sikt.

Batteribaserte løsninger

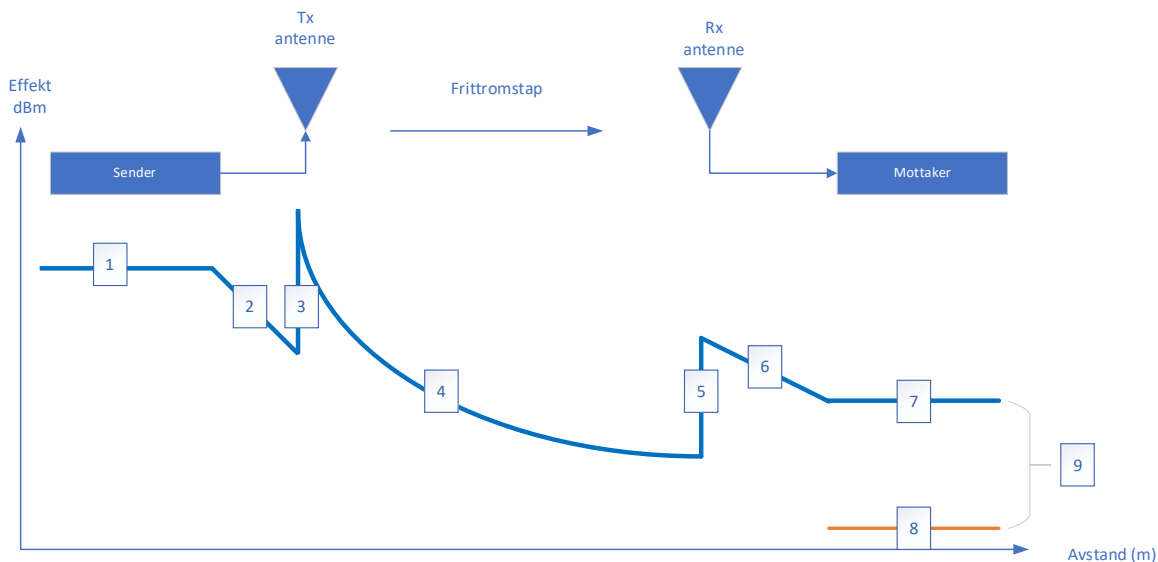
Batteridrevne sensorer har gjerne mulighet for å konfigureres slik at de ikke sender ut signaler om det ikke er aktivitet på målingen som utføres. Dette er ganske vanlig for vibrasjonssensorer hvor data ikke sendes dersom vibrasjonsnivået er veldig lavt. Har man da utstyr som blir stående ute av drift i lengre perioder er man avhengig av å minimum få tilbakemelding på sensorens helsetilstand og batteritilstand. Slike sensorer kan normalt konfigureres til å sende ut en pakke ved en gitt frekvens som inneholder en egenstatus for sensor.

For sensorer på batteridrift bør det vurderes periodisk bytte av batterier i stedet for bytte ved egenvarsling i fra sensor for lokasjoner som har bemanning sjeldnere enn ukentlig. Dette for å unngå unødvendige operasjonelle/driftsmessige forstyrrelser og tidsbruken som er knyttet til et batteribytte. Alternativt kan man vurdere å benytte trådløse sensorer med ekstern strømkilde. Skal man vurdere dette bør infrastrukturen være tilrettelagt på en slik måte at arbeidet for å koble til strøm ikke blir like omfattende som å koble til et trådbundet instrument.

Link-budsjettet

Ved trådløs kommunikasjon er det såkalte link-budsjettet sentralt. Link-budsjett beregninger inkluderer de ulike tap og forsterkninger i overføringen fra sender til mottaker og gir en signal-margin. Denne marginen i forhold til mottakerens følsomhet viser om overføringen har et godt nok signal-støy forhold til at signalet korrekt kan dekodes uten at feilraten blir for høy.

På denne måten kan en da finne minimums uteffekt eller maksimal avstand mellom sender og mottaker. Merk at mange av måleparametrene vil være frekvensavhengig så normalt baseres beregningen på leverandørens datablader.



Figur 16 Linkbudsjettet gir en oversikt over forsterkning og tap av signaleffekt fra sender til mottaker. Link-marginen er forskjellen mellom innkommende signal og mottakerfølsomhet. Her vist med en senderenhet med antenne (Tx) som sender via fritt rom til en mottakerenhet med antenne (Rx):
1) Utgangseffekt 2) Tap i overføringer, kabler etc. 3) Forsterkning i senderantenne, 4) Frittromstap 5) Forsterkning i mottakerantenne. 6) Tap i mottaker, kabler etc 7) Mottatt signaleffekt 8) Mottakerfølsomhet 9) Fading-margin (margin for reelle tap, f.eks vegetasjon, multi-path på bygninger etc).

Fra figuren ser vi de ulike parameterne i link-budsjettet fra venstre mot høyre:

- PT_x: Sendereffekt, dvs. fra senderenheten til kabel/antenne
- LT_x: Tap i sender, kabel, kontakter etc. fram til antenne
- GT_x: Antenneforsterkning på sendesiden. Denne oppgis normalt i dBi relativt til en isotrop antenne.
- LP: Strekningstap (fritt rom) i meter

GR_x: Antenneforsterkning, mottakersiden
LR_x: Tap i mottaker, kabel, kontakter etc.
PR_x: Mottatt effekt

Det mottatte effektnivået PR_x finnes ved å inkludere tap og forsterkninger i overføringen. Verdiene oppgis i dB (desibel) – som er logaritmisk – og verdiene kan derfor summeres. Dette regnestykket utgjør linkbudsjett beregningen som gjør at man kan vurdere om effektmarginen er stor nok til å unngå bitratefeil:

$$PR_x \text{ (dB)} = PT_x - LT_x + GT_x - LP + GR_x - LR_x \quad (4)$$

Frittromstapet som er strekningstapet fra sender til mottaker er en funksjon av både distanse og frekvens. Høyere frekvenser gir større tap. Tapet er et resultat av en kuleformet utbredelse fra antennen, slik at effekten avtar med kvadratet av avstanden. Frittromstapet kan uttrykkes som

$$F_{TAP} = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{c/f} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{c/f} \right) \quad (5)$$

Der $c/f = \lambda$ = bølgelengden (m), c = lyshastighet m/s og f = frekvens (Hz). Log er tier-logaritmen \log_{10} . F.eks. om vi benytter ISM frekvensen 2,4 GHz = $2,4 \cdot 10^9$ Hz har vi $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 2,4 \cdot 10^9 = 0,125$ m = 12,5 cm. Frittromstapet i dette eksempelet gir da for avstanden 100m: $20 \log_{10}(4 \cdot 3,14 \cdot 100 / 0,125) = 80$ dB.

Som en tommelfingerregel vil maksimal kommunikasjonsavstand halveres om frekvensen dobles og kan også oppgis som i uttrykket under om man splitter ut avstands- og frekvensdelen i formelen:

$$\text{Frittromstap } F_{TAP} \text{ (dB)} = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32,44 \quad (6)$$

Der d = distansen fra sender til mottaker i km og f = sendefrekvensen i MHz. Konstanten inkluderer da konverteringsfaktorene mellom m og km samt Hz og MHz. Man kan manipulere formelen etter egne behov, dvs relevant frekvensområde og avstand. F.eks. vil faktoren MegaHertz som er 10^6 Hz kunne trekkes ut som en konstant i uttrykket pga reglene om addisjon av logaritmiske faktorer der $\log_{10}(A \cdot B) = \log(A) + \log(B)$. Som et eksempel: $A = 10^6$ og $B = 2$ som gir $\log(10^6 \cdot 2) = \log(10^6) + \log(2) = 6 + 0,3 = 6,3$.

Differansen mellom mottakerens følsomhet i dB og faktisk mottatt effekt kalles fading margin. Fading marginen bør (typisk) være > 20dB for å ha tilstrekkelig signal/støy forhold og akseptabel bitfeilrate, men dette tallet er avhengig av modulasjonsmetode.

Instruktive videoer på spesifikke link-analyser finnes det en rekke ressurser for på internett, blant annet YouTube¹⁰. Både Excel regneark for linkbudsjett og beskrivelser fra leverandører av beregning av linkbudsjett konkrete trådløse kommunikasjonsløsninger er ofte tilgjengelig for nedlasting, men vil da som regel være begrenset til å brukes med det aktuelle produktet. En grundig svensk rapport om ulike trådløse teknikker i kraftverk kan også finnes i [2].

¹⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=aNOuN6LMtow> er et eksempel på en video om linkbudsjett

4.2 Trådbasert overføring

Trådbundne sensorer er den konvensjonelle metoden å koble til sensorer på. Det er fortsatt å foretrekke i mange tilfeller som for styresignaler, ved behov for høy samplingsrate, stor datamengde eller behov for lite dødtid mellom målt verdi og mottak av verdi. Trekking av trådbaserte sensorlinjer må som regel være planlagt i bygge- eller modifikasjonsprosjekter for at de ikke skal bli svært dyre. Trådbundne sensorer benyttes ofte opp imot eksisterende kontrollanlegg som raskt blir et fordyrende ledd om det er mange ulike aktører som må involveres for å legge inn sensorsystemet.

Selv om en trådbundet sensor kan ha svært nøyaktig måleverdi i utgangspunktet er det allikevel støy eller usikkerhet som kan oppstå i signalveien, da signalet normalt vil innom flere steg og prosesseringsledd. Det er ikke alltid like enkelt å vite hvilken komprimeringsalgoritme eller annen modifikasjon signalet har blitt utsatt for før det ender opp i en datalagringsplattform. Dersom en trådbundet sensor overføres på et separat nett, har man større kontroll på signalbehandling og færre ledd er med i kjeden som kan påvirke signalet.

Kablede sensorer kobles fysisk til et nettverk ved hjelp av kobberledninger eller optisk fiber, noe som gjør det vesentlig sikrere mot hacking og uautorisert tilgang. En person må fysisk få tilgang til sensoren for å tukle med den, noe som er utfordrende i kablede nettverk. Kablede nettverk kan ved spesielle behov også være fysisk sikret, med tilgang kontrollert av nettverksadministratorer. Dette gjør det lettere å kontrollere hvem som har tilgang til dataene som samles inn av sensorene og å overvåke for mistenkelig aktivitet. Samtidig kan enhver enhet som har tilgang til det kablede nettverket fritt kommunisere med andre enheter på nettverket, så lenge det er tillatt.

Kablede nettverk gir som regel vesentlig høyere hastigheter enn trådløse nettverk. Hastighetene har stadig økt med Gigabit-rutere som standard i dag. Et kablet nettverk har et begrenset sett med brukere som kobler seg til det når som helst, så det er også sjelden begrenset av uventet trafikk. Når brannmurer og andre nødvendige sikkerhetsapplikasjoner er konfigurert korrekte er et kablet nettverk rimelig godt beskyttet mot uønsket og uautorisert tilgang.

5 Aktuelle protokoller og teknologier for datatransport

Kommunikasjon mellom ulike enheter og programvaresystemer er en nøkkelkomponent i et industrielt automasjonssystem. Det er derfor relevant å trekke fram aktuelle kommunikasjonsstandarder og protokoller som muliggjør effektiv kommunikasjon mellom ulike enheter og fra forskjellige leverandører. Kommunikasjonsprotokoller er et helt eget felt innen informatikk og det er en lang liste med protokoller og standarder som har blitt publisert siden 1970-tallet, designet for ulike applikasjoner og teknologityper. Noen av disse har vært leverandørspesifikke standarder med lisenskrav som siden er gjort åpen og tilgjengelig og fri bruk samt at brukere kan bidra til videreutvikling.

5.1 Ulike protokoller / kommunikasjonsbærere

En kommunikasjonsprotokoll er et system med regler som lar to eller flere enheter i et kommunikasjons-system overføre informasjon¹¹. Protokoller definerer regler, syntaks, semantikk og synkronisering av kommunikasjon og mulige feilgjenopprettingsmetoder. Protokoller kan implementeres i maskinvare, programvare eller en kombinasjon.

¹¹ https://hmn.wiki/nn/Communications_protocol

Kommunikasjonssystemer bruker veldefinerte formater for utveksling av ulike meldinger. Hver melding har en eksakt betydning ment å fremkalle et svar fra en rekke mulige svar som er forhåndsbestemt for den spesielle situasjonen. Den angitte oppførselen er typisk uavhengig av hvordan den skal implementeres. Kommunikasjonsprotokoller må avtales av de involverte partene. For å komme til enighet kan en protokoll utvikles til en teknisk standard, enten som bransjestandard eller via en av flere internasjonale standardiseringsorganisasjoner. Et programmeringsspråk beskriver det samme for beregninger, så det er en nær analogi mellom protokoller og programmeringsspråk: protokoller er for kommunikasjon hva programmeringsspråk er for beregninger. En god og grundig referanse og detaljert beskrivelse av ulike industriprotokoller kan finnes blant annet i [3].

For overføring av data i kraftverket fra sensor til sluttbruker trenger vi derfor en protokoll som beskriver signalet slik at mottakeren vet hvordan signalet skal tolkes. Blant de mange ulike protokollene er noen leverandørspesifikke mens andre er standardiserte. Valg av protokoll vil være avhengig av ulike faktorer, slik som datamengde, sikkerhet, leveringsnøyaktighet, tidsstempling osv.

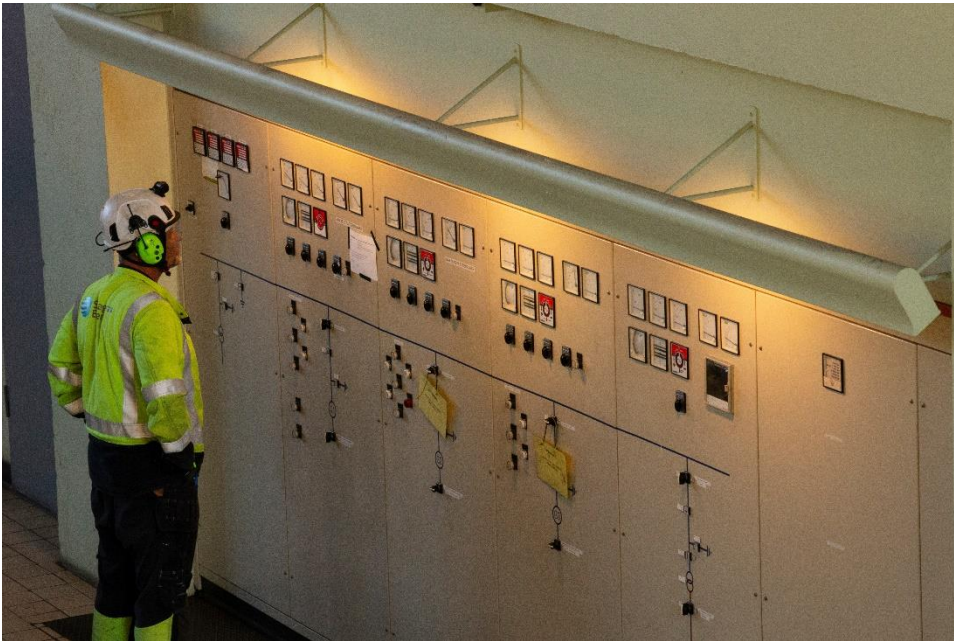
5.1.1 IEC 104

Generell info

IEC 60870 5-104-standarden er en vanlig kommunikasjonsprotokoll brukt i kraftverkindustrien. Fjernkontroll av transformatorstasjoner eller kraftverk ved hjelp av IEC 60870 5-104-standarden lar operatøren kontrollere steder atskilt over lange avstander fra et sentralisert kontrollrom og optimalisere bruken av ressurser for oppgaven. Definisjon av standardiserte fjernkontrollprotokoller gjør det mulig å integrere systemer automatisert av forskjellige leverandører i et kontrollsenter. Dette gjør det mulig å kontrollere systemet uten behov for protokollomformere eller tilpasninger.

Bruk av TCP/IP-baserte tilkoblingskanaler til de eksterne stasjonene gjennom optiske fibre, digitale radiolinker eller mobiltelefonnettverk ved bruk av 3G/4G, gjør det mulig å få tilgang til disse systemene med flere kommunikasjonskanaler og å bruke større båndbredde i fjernkontrolloppgaven. Fordelen med IEC 104 protokollen er at det går lite datatrafikk på linjen samtidig som den kjører i sanntid. Ulempen med IEC 104 oppstår ved sambandsbrudd. For eksempel hvis TCP-linken går ned og forbindelsen brytes får SCADA-systemet beskjed umiddelbart og melder det videre. Ethvert lite tidsbrudd i TCP-forbindelsen krever reetablering av forbindelse. Konstant kommunikasjon krever mye strøm som kan være problematisk for fjerne og isolerte målestasjoner utenfor nettet.

Hovedforskjellen fra IEC 101 er at 101-protokollen er seriell basert, mens 104-protokollen går på Ethernet.



Figur 17 Skagerak Kraft - Kontrollpanel ved Gamle Dalsfos Kraftverk

5.1.2 MQTT

Generell info

MQTT står for Message Queueing Telemetry Transport. Det er et enkelt publish-subscribe meldingssystem. Det ble opprinnelig laget for å overføre telemetri-data fra oljeledninger over satellitt og har senere blitt utviklet til en ISO-standard. MQTT er en transportbærer og ikke egen protokoll. Meldingsformatet kan være av typene Json, binary og OPC Pub/Sub. OPC Pub/Sub har ett annet tilkoblingsgrensesnitt enn mer tradisjonell OPC Client / Server.

MQTT har flere lag med kvalitet som kan bygges inn, også kalt QoS (Quality of Service)

- QoS 0 – Meldingen blir sendt, men ingen garanti for at noen mottar den. "Fire and forget"
- QoS 1 – Meldingen garanteres at den blir sendt minst en gang, brokeren gir tilbakemelding om meldingen er mottatt.
- QoS 2 – Meldingen garanteres at den blir sendt nøyaktig en gang, brokeren gir tilbakemelding om meldingen er mottatt. Enheten bekrefter at meldingen er mottatt og brokeren bekrefter igjen.

Relevant bruk i vannkraftverk

- Sending av måledata fra sensorer med bruk av enklere IoT-enheter, men kan også brukes til å sende meldinger fra lokalkontrollanlegget.
- For tilkobling til Microsoft Azure kan det brukes ferdige MQTT Brokere i Microsoft IoT Hub, tilsvarende finnes for de andre plattformene i Google Cloud, Amazon WS og IBM.

Fordeler og ulemper

- Lettvekts-protokoll som gjør den aktuell til bruk i utstyr med lavt strømforbruk og lav båndbredde.
- Typisk NB-IoT kommunikasjon og lignende.
- Kø-systemet muliggjør at meldingene kan ligge tilgjengelig frem til abonnenten tar imot signalene.

- QTT støtter to-veis kommunikasjon med IoT-enheter som gjør at du f.eks. kan oppdatere parametere ute i felt.

5.1.3 AMQP

Generell info

AMQP står for Advanced Message Queuing Protocol og er utviklet for informasjonsutveksling mellom bedrifter og/eller applikasjoner. AMQP er en binær applikasjonslagsprotokoll, designet for å effektivt støtte en lang rekke meldingsapplikasjoner og kommunikasjonsmønstre. Autentisering og/eller kryptering basert på SASL og/eller TLS. Den forutsetter en underliggende pålitelig transportlagsprotokoll som Transmission Control Protocol (TCP). Typisk tjeneste for mottak av AMQP til dataplattform er Microsoft Azure Event Hub eller Amazon MQ.

Relevant bruk i vannkraftverk

- Sending av data fra et helt kraftverk eller et helt system.
- Deling av data med leverandører og eksterne via f.eks. en event hub.

Fordeler og ulemper

- Fordel å bruke ved å sende større datamengder. Eksempelvis fra et helt kraftverk.
- Kø-systemet gjør at meldingene ligger tilgjengelig frem til abonnenten tar imot meldingene, dette er en fordel ved brudd i kommunikasjon. Vær oppmerksom på at det kan være en tidsbegrensning på hvor lenge meldingene kan bli lagret.

5.1.4 OPC UA

OPC UA er en åpen og plattformuavhengig kommunikasjonsprotokoll som spesifiserer informasjonsutveksling mellom industrielle systemet. Den står for kommunikasjonsflyt på enheter innad i maskiner, mellom maskiner og mellom maskiner og overordnet styringssystem. UA står for "unified architecture" og peker til protokollens fleksibilitet i form av tilknytningsmuligheter mellom enheter og systemet samt skalerbare ved plattformuavhengighet av tilknyttede programvarer. OPC UA er konfigurert for tilknytning til internett på grunn av integrerte protokoller som *https*. Sikkerhet er også innebygd i protokollen for tilgangskontroll, autentisering og kryptering. I motsetning til andre kommunikasjonsprotokoller (som klassisk OPC) kan OPC UA sende og motta komplekse informasjonspakker. En kompleks informasjonspakke kan bestå av flere måleverdier, innstillinger på instrumentet, digital beskrivelse av det fysiske objektet og mer metadata som gir ett mer komplett bilde av målingen.

5.1.5 Ethernet-baserte protokoller

Generell info

Det finnes en rekke industrielle kommunikasjonsprotokoller som er basert på standard Ethernet og TCP/IP-protokoller. De støtter peer-to-peer-kommunikasjon og gir mulighet for utveksling av sanntidsdata. De mest kjente er Ethernet/IP, Profinet, Ethercat og Modbus TCP/IP. Det er vanskelig å skille de ulike typene og de ulike PLS-leverandørene har gjerne valgt hver sine foretrukne. Alle nevnte protokoller er åpne standarder som blir vedlikeholdt av ulike organisasjoner:

- Ethernet/IP er vedlikeholdt av ODVA (Open DeviceNet Vendor Association)
- Profinet er vedlikeholdt av Profibus & Profinet International (PI)

- Modbus TCP/IP er opprinnelig utviklet av Modicon (nå Schneider Electric) og senere vedlikeholdt av Modbus Organization.
- EtherCAT er en åpen standard, som administreres av EtherCAT Technology Group (ETG)

Relevant bruk i vannkraftverk

- Alle protokollene er relevant å bruke i vannkraft.

Fordeler og ulemper

- Alle nevnte protokoller har mindre fordeler og ulemper sett opp mot hverandre, men ingen større forskjeller som er verdt å nevnes spesielt.

5.1.6 RS232, RS485 og SDI-12

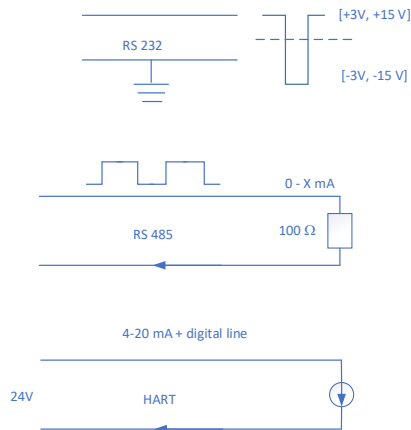
Generell info

Det finnes en del klassiske serielle protokoller som fortsatt er mye i bruk. De vanligste er *RS232* som benyttes positiv og negativ spenning som signalering. Denne signaleringen er ikke særskilt robust for ekstern støy og har en maks datarate på rundt 100kb/s i praksis – ofte vesentlig lavere. Det eksisterer flere protokoller som kjører over RS232 der SDI-12 er en vanlig protokoll for avlesning av vannstandsmålere.

RS232 er en eldre protokoll som ofte brukes for kortdistansekommunikasjon mellom to enheter, vanligvis over et enkelt tvunnet par eller kabel. Den bruker en single-ended signaleringsmetode, noe som betyr at hver signallinje refereres til en felles jording. Dette gjør at RS232 ikke er særlig effektiv over lange avstander, og kan være utsatt for støy og forstyrrelser.

Som alternativ har man *RS485* der man benytter en strømsignalering. Man terminerer da en twisted pair kabel med en endemotstand og strømmen konverteres til en spenning. Datakommunikasjonshastigheten varierer omvendt med den totale lengden på en RS485-kabel. Jo kortere total lengde, jo raskere maksimal hastighet og omvendt. På RS485 terminaler og på ledere så vil en liten negativ spenning representere en binær «av» bit, og en liten positiv spenning representerer en binær «på» bit. RS485 er svært robust mot støy og interferens. Det finnes også protokoller som kjører oppå RS485, slik som klassisk Modbus.

SDI-12 er en seriell forbindelse som kommuniserer på 1200 baud med bruk av RS232. Protokollen er mye brukt for applikasjoner hvor det er krav til lavt strømforbruk og høy nøyaktighet på målingen. Ofte brukt som erstatning av standard 4-20mA signaler fra sensorer. Man kan da også sende flere ulike måleverdier på samme kommunikasjonslinje.



Figur 18 Signaleringsnivåer for RS232, RS485 og Hart kontakter. RS232 benytter positive og negative spenninger for digital signalering, RS485 benytter strøm til digital signalering, 4-20mA benytter strøm til analog signalering, HART legger en digital signalering ovenpå et 4-20mA signal.

Relevant bruk av disse i vannkraftverk

- Interface fra eldre sensorer
- Interface fra eldre kontrollanlegg som er koplet til sensorer

Fordeler og ulemper

- Lav datarate
- Ingen feilsjekking annet enn paritetsbit
- Utdatert teknologi som ikke alltid støttes av moderne datainnlesningsutstyr.
- Høyere målenøyaktighet.
- Lavere strømforbruk.

5.1.7 Seriell baserte protokoller som Profibus, Modbus

Begge protokollene baserer seg på RS232 og RS485 som beskrevet i kapitel 5.1.6 og har begrenset overførings kapasitet sammenlignet med Ethernet-protokollene. Valget på hvilken av protokollene som blir benyttet faller ofte valget av leverandør av utstyret, men som en tommelfingerregel er Modbus en mer tilgjengelig protokoll. ¹²er en åpen protokoll og det finnes versjoner av protokollen for serielle linjer, Modbus RTU og Modbus ASCII. Det er også to varianter av P¹³ som brukes i dag, den mest vanlig brukte Profibus DP, og den mindre brukte, applikasjonsspesifikke Profibus PA. Begge protokollene er fornyet med ethernetbaserte versjoner, Modbus RTU kan relateres til Modbus TCP/IP og Profibus til Profinet.

5.2 Trådløse kommunikasjonsteknologier og -protokoller

Protokoller for trådløs kommunikasjon er standard sett med regler for hvordan elektroniske enheter kommuniserer med hverandre i et trådløst nettverk.

¹² Se f.eks <https://en.wikipedia.org/wiki/Modbus> og <https://tinyurl.com/2s7pbk4z> (Schneider Electric).

¹³ Se f.eks <https://www.elprocus.com/profibus/> og <https://en.wikipedia.org/wiki/Profibus>

5.2.1 2G og 3G

2G er en betegnelse for andre generasjons mobiltelefoni som kom i 1993, det vil si den første digitale mobile taletelefonien som etterfulgte analoge systemer (NMT m.fl.). 2G-tjenester innebærer taletelefoni samt kapasitet for enkle dataoverføringer (f.eks. SMS eller GPRS) over mobiltelefon.¹⁴ 2G har en maksimal bitrate på 64 kbps.

3G er en betegnelse for tredje generasjons mobiltelefoni som kom i 2001 og omfatter mobile tjenester for sending av data, bilde og tekst i mobilnettverk. Teknologien var utfaset i Norge ved utgangen av 2021. De vanligste teknologiene for 3G-tjenester er europeisk UMTS og amerikansk CDMA.¹⁵ Med 3G digital, mobil dataoverføring ble det mulig å overføre data, bilder og film over mobilnett.

Relevant bruk i vannkraftverk

- 2G og 3G er faset ut og i praksis ikke relevant lengre.

5.2.2 LTE, 4G og 5G

LTE er en trådløs radioaksessteknologi¹⁶ for bredbåndstilknytning med teoretiske bredbåndshastigheter på 100 og 50 Mbit/s henholdsvis ned og opp til basestasjonen og med frem og tilbake forsinkelse på mindre enn 10 ms. Teknologien ble rullet ut i 2009 og opererer med 100 MHz båndbredde. LTE etterfulgte UMTS som igjen etterfulgte GSM/EDGE som vi kjenner som 3G teknologi.

Utrulling av LTE / 4G ble begrunnet først og fremst med at standarden skal gjøre det billigere per megabyte for mobiloperatørene å produsere mobilt bredbånd ved å gjenbruke eksisterende IP-nett, i tillegg til at den også skal levere lavere forsinkelse og høyere båndbredder til kundene. Mange operatører valgte LTE også på grunn av sømløs mobilitet mellom GSM/EDGE, UMTS og LTE. LTE er et såkalt IP-basert bredbåndssystem. Det benyttes "Orthogonal Frequency Division Multiple Access" (OFDMA) som kodingsform. OFDMA gir høyere datahastigheter, forbedret spektraleffektivitet og redusert forsinkelse som de viktigste egenskapene.

Relevant bruk i vannkraftverk

Kameraovervåkning vannstands- og vannføringsmålinger, målinger der kablet nettverk ikke er tilgjengelig, samt midlertidige måleoppsett.

5G er etterfølgeren til 4G og er gjeldende generasjons mobilnettverk. 5G ble lansert i 2018. Mens fokuset ved utviklingen av 3G og 4G var på å gi brukerne høyere båndbredde, har det ved utviklingen av 5G også vært fokus på infrastruktur og tjenester som skal kunne støtte «smarte» samfunn og industrielle behov. Her trengs i tillegg til behov for høyere båndbredde også støtte til høy tetthet av oppkoblede enheter samt oppkoblede enheter som krever høy pålitelighet og lav forsinkelse. 5G operer med en båndbredde 30GHz til 300 GHz og kan teoretisk støtte hastigheter opp til 10 Gbps. I praksis er 5G ca 10 ganger raskere enn 4G.

Relevant bruk i vannkraftverk

- *Kamera overvåkning*, vannstands og vannføringsmålinger, målinger der kablet nettverk ikke er tilgjengelig, midlertidige måleoppsett.

¹⁴ <https://no.wikipedia.org/wiki/2G>

¹⁵ <https://no.wikipedia.org/wiki/3G>

¹⁶ Mobilt bredbånd med LTE – teknologi, sikkerhet, tjenester og utbygging. Hveem, FFI 2011. <https://publications.ffi.no/nb/item/asset/dspace:3732/11-00709.pdf>

For vannkraftapplikasjoner er ikke veldig lav tidsforsinkelse ned i ms / μ s veldig viktig i de fleste applikasjoner, selv om mange av operatørene markedsfører at 5G har store fortrinn med lav tidsforsinkelse. Det er mest sannsynlig at vannkraftaktørene vil fortsette å bruke 4G men vil gå til 5G når utvalget av terminaler kun støtter 5G, prisene og utvalget har stabilisert seg

5.2.3 NB- IoT

NB-IoT (NarrowBand-IoT) er en standard også kjent som en laveffekts bredbåndsnett teknologi. NB-IoT og LTE-M er begge eksempler på protokoller som er avhengig av en eksisterende 4G/5G-mobilinfrastruktur. LTE-M har høyere båndbredde og mindre rekkevidde enn NB-IoT. NB-IoT tillater et høyt antall enheter koblet opp og bruker små datapakker. Dette gir god rekkevidde, lavt energiforbruk og lave kostnader. LTE-M er på sin side utviklet for å gi enheter god båndbredde og høyere kapasitet, men har et høyere energiforbruk.

NB-IoT kan være en god teknologi for å kople til og lese data fra enheter som sender små datamengder. Enhetene bruker små mengder strøm og energi ettersom de kan settes i hvilemodus og kan i mange applikasjoner stå ute i felt i flere år uten tilsyn eller batteribytte.

NB-IoT ble opprinnelig spesifisert av 3GPP i deres release 13¹⁷ som en tilkoblingsløsning for enheter som ikke beveger seg. NB-IoT-enheter er designet for å operere på et veldig smalt 180 kHz-spektrum for å kunne redusere maskinvarekostnader. Med release 14 ble datahastigheten øket til opptil 120 kbps nedlink og 160 kbps opplink.

Relevant bruk i vannkraftverk

- Måling av nivå i magasiner, elver og bekker, bekkeinntak, hydrometeorologiske (hydmet) stasjoner osv.

Fordeler og ulemper

- Lang rekkevidde, ved fri sikt har NB-IoT rekkevidde på 100 km
- Lavt strømforbruk og båndbredde.
- Kan ikke kommunisere større datamengder på kort tid
- Bruker samme frekvensområde som 4G og 5G men signalleringsen skjer i guard bandet mellom hoved tale/data-kanalene. Dette gjør at teknologien har lang levetid og kan bruke eksisterende infrastruktur fra telekom-operatørene.

5.2.4 Lora

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) er et eksempel på en LPWAN-protokoll designet for lange rekkevidder og lave båndbredder. Den benytter seg av Semtec sin proprietære, men meget innovative LoRa-protokoll og opererer på 868 MHz i Europa som er ett av flere såkalte ISM-bånd som er åpne for ulike anvendelser. I tillegg til at vannkraftaktørene kan sette opp egne gateways og bygge egen infrastruktur, finnes det også globale og regionale LoRaWAN-nettverk. I Buskerud har blant annet Viken Fiber et LoRa-nettverk som man kan benytte på kommersielle vilkår.

Relevant bruk i vannkraftverk

¹⁷ <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-13>

Trådløs kommunikasjon for nye sensorer utenfor lokalkontrollanlegget der det er vanskelig å benytte kablede nettverksforbindelser, der sensorer må stå alene ute i felt i årevis uten batteribytter, samt der det er for svak dekning i tradisjonelle 4G / 5G kanaler slik at egen dekning må bygges ut. Ofte brukt der du har behov for et større antall sensorer innenfor et bestemt området som kan dekkes av LoRa-nett. For eksempel i et kraftverk, vassdrag eller damanlegg.

Fordeler og ulemper

Krever mer av organisasjonen å bygge ut egen infrastruktur fremfor å leie av en teleoperatør, men det kan etableres dekning der en teleoperatør ikke har planlagt å bygge ut dekning pga lite kundegrunnlag. Et eksempel på dette er inne på fjellet, i fjernliggende områder med lav befolkningstetthet, i kupert terreng, i anlegg under bakkenivå eller i fjellanlegg

5.2.5 Wi-Fi

Wi-Fi er egentlig navnet på en bransjeallianse (Wi-Fi Alliance) som sertifiserer at utstyr for trådløst Ethernet er kompatibelt med kravene i standardserien IEEE 802.11 definert av Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)¹⁸. De siste 20 årene har Wi-Fi teknologien blitt videreutviklet gjennom forskjellige standarder. Den siste gjeldende standard, Wi-Fi 6 (IEEE 802.11ax) ble standardisert i 2019 og muliggjør en teoretisk båndbredde på over 600 Mbit/s. Standardene er basert på prinsippene for Ethernet og spesifiserer flere alternative radioteknologier. En kort oversikt:

- 802.11 er basisstandard. Den benytter radiofrekvenser i det lisensfrie 2,4 GHz-båndet. Maksimalt teoretisk overføringshastighet er 2 Mbit/s.
- 802.11a benytter radiofrekvenser i 5 GHz-båndet. Dette frekvensbåndet er begrenset til innendørs bruk. Maksimal teoretisk overføringshastighet er 54 Mbit/s.
- 802.11b benytter radiofrekvenser i 2,4 GHz-båndet. Maksimal teoretisk overføringshastighet er 11 Mbit/s.
- 802.11g benytter radiofrekvenser i 2,4 GHz-båndet. Maksimal teoretisk overføringshastighet er 54 Mbit/s. 802.11b og 802.11g kan benyttes samtidig i et WLAN, men dersom det er 802.11b-utstyr på nettet blir overføringshastigheten for 802.11g-utstyr redusert.
- 802.11n benytter radiofrekvenser både i 2,4 GHz-båndet og i 5 GHz-båndet. Maksimal teoretisk overføringshastighet er oppgitt av IEEE til mer enn 100 Mbit/s. Den aktuelle hastigheten vil være bestemt av hvilke funksjoner som er tatt i bruk. Bruk av MIMO er ett av alternativene som kan bidra til økt overføringshastighet. 802.11n enheter kan være enkeltbånd (2,4 GHz eller 5 GHz) eller dobbeltbånd. De kan benyttes samtidig med eldre enheter, men overføringshastigheten blir lavere.
- Den effektive hastigheten er betydelig lavere; cirka 5,5 Mbit/s for 802.11b og cirka 27 Mbit/s for 802.11a/g. Dersom enheter med lavere kapasitet befinner seg innenfor dekningen til et aksesspunkt, vil dette påvirke den effektive datahastigheten. Den reelle hastigheten er også avhengig av radioforholdene.

Relevant bruk i vannkraftverk

Brukes ofte for trådløs kommunikasjon i administrativt nett.

Fordeler og ulemper

¹⁸ <https://snl.no/Wi-Fi>

Kjent teknologi og mye utstyr på markedet.



Figur 19 Foto fra Skagerak Kraft – Generatortopp på Hjartdøla Kraftverk

6 IKT-sikkerhet knyttet til sensorinstallasjoner

Ved å ta en klar stilling til hva man skal benytte dataene til, legges det klare føringer for hvilke sikkerhetsregimer man bør legge opp til. Ved å benytte eksisterende vei via kontrollanleggsnett kreves få eller ingen endringer innenfor IKT-sikkerhet dersom man kun benytter konvensjonell trådbundet instrumentering. Bruker man derimot dette nettet til å koble på enheter som lar seg nå via annet usikret nett eller cloud-løsninger innfører man en betydelig sikkerhetsrisiko.

For å ikke gå på kompromiss med sikkerhet bør det heller legges opp til et parallelt sensor/IoT-nettverk som er uavhengig av kontrollnettet. Ønsker man data ut av kontrollanlegget som ikke finnes i SCADA kan det settes inn en datadiode. Datadioden fungerer som et fysisk skille med enveiskommunikasjon for signaler. Kontrollanleggsdata kan da overføres via det mindre sikre parallellnettet uten å gi noen større fare for at eksterne parter kan komme seg inn på kontrollnettet.

Det kan være at man ønsker å sende styresignaler også på IoT-nettet, som for eksempel ved posisjonsstyring av et kamera. Det vil allikevel ikke påvirke datadioden om den er på samme nett etter dioden.

6.1 Sikkerhetsaspekter (forriglingskontroll og arbeid på anlegg i drift)

Sikkerhet er viktig i vannkraft både når det gjelder sabotasje, utilsiktet manøvrering, samt tilgang til markedssensitiv informasjon. Vannkraftaktørene er pålagt å ivareta sikkerheten gjennom blant annet kraftbedskapsforskriften.

Det bør skilles på hva slags data som kan sendes i ulike klasser av nettverk. Aktørene bør ha et prinsipp om at datatransport for fjernstyring / SCADA holdes helt adskilt fra datatransport fra separate sensorer der formålet er ren utlesning av måledata. Videre bør man ikke introdusere radioteknologi i sikre nett / SCADA-nett der fjernstyringsinformasjon sendes. Årsaken til dette er at en ondsinnet aktør da kan tenkes å

stå på utsiden av en vannkraftinstallasjon og benytte radioforbindelsen til å trenge inn for så å kunne fjernstyre / fjernbetjene kritiske systemer.

Bruksbegrensninger ligger nært knyttet mot IKT-sikkerhet i den grad at valg av hvor langt man vil benytte sensorene stiller krav til IKT-sikkerhet, enten at dataen brukes til analyse/prediksjon eller at man lar analyser styre funksjoner utenom SCADA. HMS er også veldig relevant for hvordan analyse og prediksjon skal ta egne beslutninger, og er nært knyttet mot forriglingskontroll. Man kan i verste fall være i en situasjon der personell jobber med en luke, koblingsanlegg og eller andre kritiske funksjoner samtidig som en algoritme velger å kjøre funksjonen med alvorlige konsekvenser som resultat.

I henhold til NEK EN 60204-32 skal det særlig tas hensyn til følgende forhold:

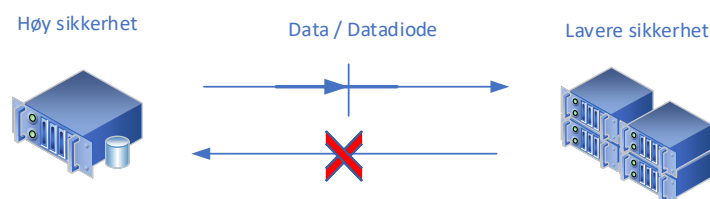
- maskinen skal ikke kunne starte på en uventet måte,
- maskinens driftsinnstillinger skal ikke kunne endre seg på en ukontrollert måte, hvis en slik endring kan føre til farlige situasjoner

6.2 Datadioder

Datadioder er maskinvareenheter som tillater enveisoverføring av data og informasjon. Enveis transmisjon kan noen ganger være en sofistikert kombinasjon av enveis teknologi og maskinvare som tillater toveis dataoverføring for spesifikke brukstilfeller, mens datadioder i seg selv ganske enkelt er enveis maskinvareløsninger.

Datadioder er vanligvis plassert mellom to nettverk med forskjellige sikkerhetsnivåer, det ene er sikrere og det andre har et lavere sikkerhetsnivå. Slike systemer er separert for å beskytte svært sensitive data, som er kjent som en luftspalte i et nettverk. Tradisjonelt brukte organisasjoner bærbar medier som USB-er eller DVD-er for å overføre data på tvers av de adskilte nettverkene, men dette ville gjøre hensikten med å segregere nettverkene selvdødeliggende siden en ondsinnet programvare også kan spres gjennom flyttbare medier.

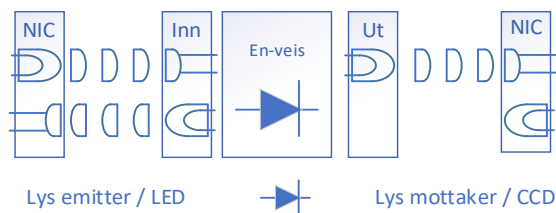
Datadioder finnes med forskjellige databærere. Den sikreste klassen av datadioder benytter optisk fiber for enveis transmisjon. Fordelen med å bruke optisk fiber er at det kan fysisk inspiseres at det ikke kan sendes data begge veier, men kun ut av datadioden. En softwarebasert datadiode er langt vanskeligere å inspisere dersom man ikke har kildekode. Selv da kan kildekode inneholde titusener av linjer som gjør det tidkrevende å inspisere samtidig som veldig spesialisert kompetanse trengs.



Figur 20 Datadioder sikrer at data/informasjonsflyt bare kan skje en vei, normalt fra et system med høyere sikkerhet til et med lavere sikkerhet

Data overføres fra nettverk med høy sikkerhet til lavere sikkerhet, men det er ikke i stand til å overføres i motsatt retning, sikret på maskinvarenivå. En datadiode plassert mellom disse to nettverkene sørger for at dataflyten forblir mulig, om enn i én enkelt retning. Dette i sin tur bevarer integriteten til nettverkene ved

å forhindre lekkasje av sensitive data. Datadioder er ofte optiske løsninger som vist i figuren, men kan også være SW-baserte. SW/HW løsninger kan imidlertid i teorien var utsatt for hacking.



Figur 21 Hardware-basert datadiode. Data fra en NIC (Network Interface controller) til en annen over en datadiode er kun mulig fra venstre mot høyre da venstre side har en aktiv LED/lysdiode, mens høyresiden kun har en passiv fotosensor / CCD.

Datadioder brukes vanligvis i to forskjellige scenarier: For det første når informasjon overføres fra et nettverk med høyere sikkerhet til et nettverk med lavere sikkerhet. Slik dataoverføring skjer når operatører krever dataene fra visse prosesser, f.eks. fra data i lokalkontrollanlegget som skal overføres til driftskontrollanlegget eller for en revisjon eller en analyse. Tilstedeværelsen av en datadiode sikrer at data bare kan overføres i en enkelt retning og ingen ondsinnet aktør kan dra nytte av forbindelsen i motsatt retning for å få tilgang til sikrere nettverk for å hacke og manipulere det.

For det andre brukes datadioder også når data overføres fra et nettverk med lavere sikkerhet til et nettverk med høyere sikkerhet. Dette gjør at informasjon kan samles inn fra nettverket med lavere sikkerhet, kompiles og sendes tilbake til nettverket med høyere sikkerhet. Som sådan kan ingen sensitive data kompromitteres og lekkes gjennom samme kanal, og dermed holde nettverkene trygge.

6.3 Integritet i målinger og krav til nøyaktighet

Et stort spørsmål i mange sammenhenger der det f.eks. er stor avstand fra måleutstyr til sensorutlesning er om vi kan stole på data. Er dataene fra der vi tror; hva er integriteten, feil- og usikkerheten til målingen; bør man derfor ha ID'er på sensorer; sjekksummer osv?

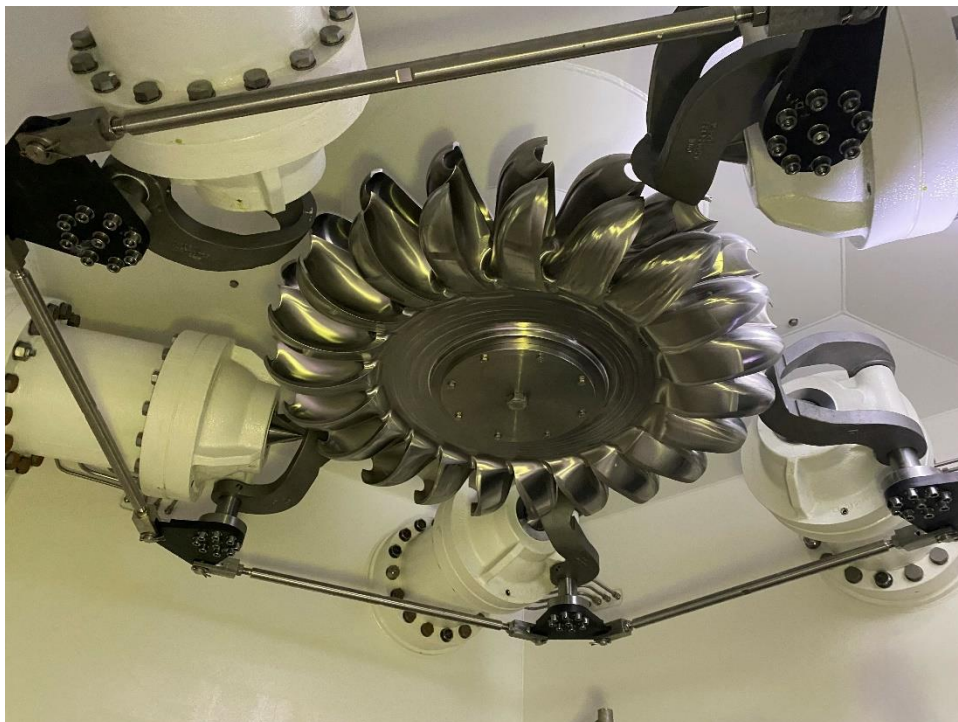
De fleste sensor og målesystemer i dagens anlegg er mer eller mindre intelligente, med innebygde mikroprosessorer og toveis kommunikasjonsmuligheter. Med innebygde diagnosefunksjoner gir disse enhetene forventning om å forbedre enhetens pålitelighet og tilgjengelighet, men dette er ikke alltid tilfelle i praksis og over tid kan det bli inkonsekvenser i enhetsdata på tvers av applikasjoner.

Under systeminstallasjon, igangkjøring og utsjekking utføres av og til prosedyrer på disse enhetene som kan resultere i en endring i konfigurasjonen, at ekstra enheter blir tilkopleet etc. I løpet av enhetens livssyklus utfører teknikere rutinemessig vedlikehold, justerer for sensordrift, oppdaterer enhetens fastvare og vedlikeholdsprosedyrer. Mange teknikere bruker håndholdte enheter for å utføre disse prosedyrene, og de riktige endringsloggene blir ikke alltid fanget opp i kontrollsystemet.

Til dags dato har ingen enkelt mekanisme vært tilgjengelig for å rasjonalisere inkonsekvensene mellom målesystemene fra disse forskjellige kildene og applikasjonene. Alle applikasjonene snakker ikke alltid sammen og det blir heller ikke oppdatert, lagret og analysert relevante data dynamisk. Dette er et forhold som en bør være klar over i store anlegg og derfor innføre regelmessig kalibrering og sjekk av integritet.

Kjøring med minstevannføring / konsesjonskrav har spesielt krav til måleteknisk nøyaktighet og datalagring. NVEs retningslinjer¹⁹ for registrering av minstevannføring legger blant annet disse føringene for å oppnå tilstrekkelig dokumentasjon:

- Minstevannføringen registreres minimum en gang per time.
- Data må lagres og oppbevares på en sikker måte for senere dokumentasjon.
- Måledata fra anleggets levetid kan legges frem for NVE.



Figur 22 Foto fra Skagerak Kraft – Peltonhjulet på Gjuvåa Kraftverk

7 Andre aspekter ved sensor- og dataløsninger

Som et avsluttende avsnitt gir vi en kort beskrivelse av noen ulike forhold knyttet til sensorinstallasjoner som ikke er direkte knyttet til sensorene selv. Det gjelder inngrep i anleggene ved installasjoner, vurderinger rundt lokale prosessering av data og nødvendig kompetanse i organisasjonen for å gjennomføre aktuelle tiltak.

7.1 Inngrep i anleggene ved sensorinstallasjoner

Avhengig av type sensor må det gjerne tilpasses monteringsbraketter, gjøre inngrep i maskineri, komponenter og rør. Sensorer som ikke krever en spesifikk retning eller kontakt kan monteres på eksisterende kabelgater og arrangement for oppheng. For sensorer som ikke krever direkte kontakt med et prosessmedium, måler på en overflate eller avstand, kan man benytte ikke invaderende metoder som lim, tape eller klemmer. Ved montering direkte på komponenter eller i komponentene bør man ta høyde for galvanisk korrosjon, skader i gods, svekkelse av konstruksjon eller fare for fremmedlegemer. Sistnevnte kan f.eks. være ved at man introduserer metallspion i hydraulikk- eller smøreolje ved boring.

¹⁹ https://publikasjoner.nve.no/veileder/2020/veileder2020_03.pdf

I eldre anlegg er det ikke vanlig med demonterbare gjennomføringer og man står i fare for å ødelegge eksisterende kabler ved boring i tetningsmasse. Desto oftere denne operasjonen gjentas, desto større risiko er til stedet for skade på kabler. Det kan i mange tilfeller være lurt å heller montere separate demonterbare kabelgjennomføring av type MCT Brattberg eller Roxtec, for større fleksibilitet og lav risiko for skade på eksisterende kabler.

7.2 Kantprosessering

I et anlegg bruker vi som tidligere omtalt i denne håndboken ulike sensorer og måleutstyr for å samle data om en rekke ulike tilstandsvariable som vannstrøm, lukeposisjon, turbinytelse og andre viktige driftsparametere. Tradisjonelt sett samles og behandles dataene sentralt, der alle målingene sendes til en sentral server eller kontrollrom for analyse og beslutningstaking. Kantprosessering er en annen tilnærming som innebærer å utføre databehandling og analyse i «kanten» av nettverket, nærmere bestemt der målingene blir gjort. I stedet for å sende alle rådata til ett sentralt sted, kan vi behandle og analysere data lokalt - ved kilden - ved hjelp av spesialisert maskinvare og programvare.

Fordelene med kantprosessering er flere:

- *Redusert forsinkelse:* Ved å behandle målingene i kanten, kan vi få sanntidsinnsikt og raskt reagere på avvik eller endringer i systemet. Dette er avgjørende for å opprettholde effektiv og sikker drift på anlegget.
- *Optimalisering av båndbredde:* Å overføre store mengder rå måledata til en sentral server kan kreve betydelig nettverksbåndbredde. Kantprosessering lar oss forhåndsprosessere data og bare sende relevant informasjon eller aggregerte resultater, noe som reduserer mengden data som må sendes over nettverket.
- *Økt pålitelighet:* Kantprosessering muliggjør lokal beslutningstaking og kontroll, selv i situasjoner der forbindelse til en sentral server eller nettverkstilkoblingen midlertidig blir brutt.

En ulempe med kantprosessering kan være tap av rådata, ukjente filtrerings- og aggregeringsmetoder samt andre mulige feilkilder som ikke er eller blir synlige for brukeren.

For å implementere kantprosessering, plasserer vi vanligvis kantenheter eller kantberegningssystemer på strategiske steder i kraftverket. Disse enhetene er utstyrt med prosesseringskraft, minne og programvarefunksjoner for å utføre dataanalyse og tilsvarende oppgaver. De kan kjøre algoritmer, utføre beregninger og generere handlingsrettede tiltak basert på resultater fra de innsamlede målingene.

Noen vanlige teknikker som brukes i kantprosessering inkluderer:

- *Datafiltrering og forbehandling:* Dette innebærer å fjerne støy eller irrelevant data fra målingene, slik at bare nøyaktig og nyttig informasjon blir behandlet videre.
- *Dataaggregering og sammendrag:* I stedet for å overføre hver eneste måling kan vi aggregere data og sende oppsummert informasjon, for eksempel gjennomsnitt, maksimum eller trender, til den sentrale serveren.
- *Avviksdeteksjon:* Kantprosesseringsalgoritmer kan utformes for å identifisere unormale mønstre. Dette kan være en særlig effektiv teknikk for bruk med video og bildebaserte prosesser.

7.3 Kompetansebehov

Ved økt grad av instrumentering og høyere krav til instrumenteringens ytelse vil også behovet for kompetanse øke. Sensorer som ikke har et konkret bruksformål før implementering av

tilstandskontrollmetodikk eller prediktivt vedlikehold har gjerne vært uten kalibreringsrutiner, referansesjekk mot annen instrumentering eller uten noen form for periodisk vedlikehold. I hvilken grad sensorene skal følges opp periodisk avhenger primært av kritikalitet til instruments oppgave og grad av avdrift over tid.

Desto mer sammensatt bruken er av sensorer desto mer utfordrerne er det å forstå konsekvensene av kalibrering av en sensor i drift, koble ut signalet eller annen form for påvirkning av signalet. Dette øker ikke bare kompetansebehovet for den enkelte sensorer, men også sammensetningen av bruken av dataene.

Økt grad av instrumentering vil sannsynligvis medføre økt vedlikeholdsbehov innenfor instrumentering. Ved å benytte kombinasjoner av tradisjonell trådbundet teknologi og ulike trådløse kommunikasjonsformer vil det også være behov for en bredere kompetanse inn sensorikk og måleteknikk, både når det gjelder installasjon og vedlikehold.

8 Referanser

Referanser er til fri/gratis litteratur som kan gi mer omfattende og utfyllende informasjon om enkeltaspekter omtalt i rapporten. For øvrig er det i hovedsak brukt fotnoter i teksten, f.eks. til relevante nettsteder og publikasjoner.

[1] <https://hydropower-europe.eu/uploads/news/media/The%20state%20of%20the%20art%20of%20hydropower%20industry-1600164483.pdf> , Jean Jacques Fry, Mario Bachhiesi, Anton Schleiss, mars 2020, (engelsk) 87 sider.

[2] <https://energiforsk.se/media/30053/kartlaggning-av-tradlos-teknik-i-vattenkraften-energiforskrapport-2021-792.pdf>. Niclas Selberg et al, Energiforsk, august 2021 (svensk) 70 sider.

[3] <https://www.clarify.io/learn/industrial-protocols> Guide to Industrial Protocols, Clarify, Christian Berg, september, 2022

Forfatterne vil gjerne takke øvrige prosjektdeltakere for gode innspill, bidrag og kommentarer under utarbeidelsen av denne rapporten.



SmartKraft er et pilotprosjekt del-finansiert av Enova gjennom Klima- og energifondet i perioden 2021 til 2024.

Det overordnede målet med SmartKraft er uttesting og implementering av nye digitale verktøy for tilstandsovervåking, prediktivt vedlikehold og driftsoptimalisering i vannkraftverk.

SmartKraft samler vannkraftprodusentene Statkraft, Skagerak Energi, Sira-Kvina Kraftselskap, NTE Energi, Glitre Energi, Hafslund Eco, Hydro og TrønderEnergi, samt Energi Norge og The Norwegian Smartgrid Centre for pilotering av ny energi og klimateknologi. The Norwegian Smartgrid Centre er prosjektleder og ansvarlig for prosjektet ovenfor Enova.

<https://smartgrids.no/smartkraft/>