



BKK PRODUKSJON AS

Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv

Bruk av damhistorikk med eksempler fra BKK

Oppdrag fra Energi Norge

Rapport versjon 1. februar 2018



Forsidefoto: 3D-modell av dam Grøndalsvatnet (Eksingedalen) etablert på bakgrunn av donebilder. BKK2017.

Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv. Bruk av damhistorikk med eksempler fra BKK.

Oppdragsgiver:

Skrevet av: Sigve Næss, Per Vidar Halsnes, Knut Kinne, Jonas Hodne, Eivind Vestbøstad, Torbjørn Kirkhorn, Louise Andersen, Gudmund Trætteberg

Dato: 1.2.2018

Seksjon/avd.:

Dok. ID: 11865081

Fordeles til: Energi Norge

Sammendrag:

Denne rapporten er utarbeidet vår/sommer 2017 på oppdrag fra Energi Norge. Oppdraget inngår i prosjektet Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv (DSHP). Eksemplene det refereres til i denne rapporten er hentet fra BKKs egne anlegg og det refereres også til noen eksempler fra Statkrafts anlegg.

Formål med damsikkerhetsarbeid er i henhold til damsikkerhetsforskriften §1-1 «...å fremme sikkerhet ved vassdragsanlegg og forebygge skade på mennesker, miljø og eiendom.» Dette er det omforent enighet om i bransjen.

I rapporten vises det til resultater fra damsikkerhetsarbeid. Ved systematisk å benytte ulike måle- og observasjonsmetoder, vil en oppnå tilfredsstillende kunnskap om dammens tilstand og sikkerhetsnivå. Ny teknologi gir dameiere nye verktøy for tilsyn og overvåking, og dette er det viktig å dra nytte av. Eksemplene vil bidra til å gi andre dameiere inspirasjon til å iverksette gode tiltak i sitt arbeid for økt damsikkerhet.

For å vurdere nytten av lekkasjemåling og nødvendige krav til målestedet synes det viktig å skille mellom de ulike damtypene, den enkelte dams behov for overvåking og muligheter for å bearbeide og filtrere lekkasjemåledata. BKK viser, gjennom å benytte innsamlede data fra overvåking av lekkasje, temperatur og nedbør, at man i konkrete tilfeller kan oppnå tilfredsstillende resultater for måling av lekkasje uten å måtte flytte målestedet nær, eller inntil dammen.

Innenfor setningsmålinger er det pekt på nytteverdi av direkte bearbeiding av landmålingsdata i felt, for eventuelt å avdekke mulige deformasjoner tidlig. I tillegg er det flere nye metoder som bidrar til å øke overvåking og dokumentasjon på utvikling av deformasjoner. Spesielt muligheter for laserskanning, drone, satellittmålinger for å lage 3D- modeller er ventet å bli et viktig bidrag framover.

I rapporten er det vist et eksempel fra dam Rødberg, en betongdam tilhørende Statkraft, som er utstyrt med måleutstyr for å kunne analysere effekter fra forskjellige laster over tid. Dette for å se hvordan dammen reagerer og hvor stor effekt alkaliekiselsreaksjonene har på dammen. Måleutstyret har en imponerende nøyaktighet og gir god kontroll med dammens kontinuerlige bevegelser. Dameier vil få tydelig varsler om uventet og unormale situasjoner oppstår. For entydige resultater fra målingene som nå er igangsatt i Dam Rødberg, vil det imidlertid ta tid før en kan konkludere i forhold til alkaliekiselpåvirkning.

Revisjon	Dato	Revisjon gjelder	Utarbeidet	Kontrollert	Godkjent
C	08.05.2018	Mindre revideringer etter oppdragsgivers innspill mottatt 27.04.2018	S.Næss	P:V:Halsens	M.Harkestad
B	01.02.18	Oppdatert og delvis omarbeidet etter oppdragsgivers innspill mottatt 14.12.17	S.Næss	P.V.Halsnes	
A	22.08.17	Utkast sendes oppdragsgiver for kommentarer	S.Næss	P.V.Halsnes	M.Harkestad

Denne siden er blank!

INNHold

1	INNLEDNING	3
2	LEKKASJEMÅLING	4
2.1	Sammendrag	4
2.2	Innledning	4
2.3	Myndighetskrav	5
2.4	Eksempel: Dam Svartavatnet i Haugsdalsvassdraget	5
2.4.1	Lekkasjemålesystem	6
2.4.2	Faktorer som påvirker lekkasjemåledataene.....	6
2.5	Eksempel: Dam Askjeldalsvatnet i Eksingedalsvassdraget	9
2.5.1	Lekkasjemålesystem	9
2.5.2	Faktorer som påvirker lekkasjemåledataene.....	10
2.6	Diskusjon	10
2.7	Konklusjon	12
3	DEFORMASJONSMÅLING PÅ DAMMER	13
3.1	Sammendrag	13
3.2	Generelt om setnings- og deformasjonsmålinger.....	13
3.2.1	Utførelse og ressursbruk ved deformasjonsmåling av dammer.....	13
3.2.2	Kort beskrivelse av «Måledata for dammer».....	14
3.2.3	Bruk av ny teknologi som droner, laserskanning, radar (satellittdata) og terrengmodeller 14	
3.2.4	Lovverk	15
3.3	Eksempel: Dam Stølsvatnet i Modalsvassdraget.....	16
3.4	Eksempel: Dam Holskardvatnet i Modalsvassdraget – overført til Evanger	20
3.5	Eksempel: Dam Svartavatnet i Samnangervassdraget.....	23
3.6	Konklusjon	26
4	UTVIDET MÅLEPROGRAM FOR BETONGDAMMER	27
4.1	Alkalireaksjon – hva skjer og virkningen av dette?.....	27
4.2	Dam Rødberg - utvidet måleprogram	28
4.2.1	Om inklinometeret:.....	28
4.3	Regelverk.....	30
4.4	Gjennomføring av måleprogrammet.....	30
5	ISLAST PÅ DAMMER	32
5.1	Oppsummering	32
5.2	Historikk	32
5.3	Vintersenking av magasinet - ett eksempel på alternativt tiltak	33
5.4	Fleksibel vurdering	34
5.5	Andre sine vurderinger av islast mot dammer	35
5.6	Konklusjon	36
6	VANNSIDEINSPEKSJONER UTEN TØRRLEGGING VED HOVED- OG REVURDERINGSTILSYN	37
6.1	Oppsummering	37
6.2	Innledning	37

6.3	Erfaringer fra tidligere skanning	37
6.4	Drøfting av ulike metoder	40
6.5	Konklusjon	40
7	DOKUMENTASJON AV FLOMLØPSKAPASITETER MED CFD-SIMULERING	41
8	REFERANSER	44
	VEDLEGG	45

1 INNLEDNING

Denne rapporten er utarbeidet på oppdrag fra Energi Norge som en del av arbeidet med Damsikkerhet i et helhetlig perspektiv (DSHP). Eksemplene det refereres til er fra BKKs anlegg, men det refereres også til arbeid og eksempler fra Statkraft.

Arbeidet er utført av BKK Produksjon, og følgende medarbeidere har vært involvert:

Per Vidar Halsnes, Knut Kinne, Eivind Vestbøstad, Jonas Hodne, Torbjørn Kirkhorn, Louise Andersen, Gudmund Trætteberg og Sigve Næss.

Fra Statkraft har følgende bidratt: Bård Aslak Birkeland og Harald Andreas Simonsen.

Rapporten er utarbeidet med tanke på at hvert hovedkapittel skal kunne leses uavhengig av hele rapporten.

Gjennom eksempler og diskusjon, demonstreres metoder som bidrar til et godt og riktig damsikkerhetsarbeid, gjerne ved en kombinasjon av måle- eller observasjonsdata. Ny teknologi gir dameiere nye verktøy for tilsyn og overvåking, og det er viktig å utnytte dette potensialet. Eksemplene bør kunne bidra til å gi andre dameiere inspirasjon til å planlegge og iverksette gode tiltak for å øke damsikkerheten i dialog med norske damsikkerhetsmyndigheter.

Bergen 1.2.2018

Sigve Næss

2 LEKKASJEMÅLING

2.1 Sammendrag

Lekkasjemåling er en anerkjent og lenge benyttet kontrollparameter for dammers tilstand. For nye fyllingsdammer stiller myndighetene krav om at lekkasjevann skal fanges opp inne i fyllingen like nedstrøms tetningskjernen for å redusere forstyrrende tilsig fra nedbør og snøsmelting. Ved eksisterende dammer hvor oppsamling like nedstrøms tetningskjerne ikke er etablert, skal oppsamlingen skje med ledevegger og fangdammer i nedstrøms damfot. Etablering eller oppgradering av lekkasjemålepunkt i henhold til myndighetenes krav kan ofte være veldig kostnadskrevenne, f.eks. på grunn av utfordrende terrengforhold.

Her sees på erfaringen fra to ulike dammer. Dammen ved Svartavatnet (Haugsdalen) har et lekkasjemålepunkt et stykke nedstrøms dammen, mens lekkasjemålingen ved Dam Askjelldalsvatnet (Eksingedalen) er oppgradert med nye ledevegger og fangdammer i damfoten. Gjennomgang av lekkasjemåledata fra de to dammene viser, som forventet, at lekkasjen påvirkes av magasin vannstanden. Videre sees at lekkasjemålingen for Dam Svartavatnet i stor grad også påvirkes av nedbør og snøsmelting i nedbørfeltet mellom dammen og lekkasjemålepunktet. Vi finner likevel at lekkasjemåledata fra Svartavatnet på tross av sine feilkilder gir oss nødvendig informasjon om lekkasjeutviklingen. Samtidig ser vi at selv den oppgraderte lekkasjemålingen ved Askjelldalsvatnet har sine feilkilder.

For å vurdere nytten av lekkasjemåling og nødvendige krav til målestedet synes det viktig å skille mellom de ulike damtypene, den enkelte dams behov for overvåking og muligheter for å bearbeide og filtrere lekkasjemåledata. Ved eksisterende anlegg bør det i større grad aksepteres andre løsninger som innebærer supplerende målinger i stedet for å gjennomføre en krevende og kostbar flytting av lekkasjemålestedet inn til dammen. Ved å benytte et alternativt målested lenger fra dammen, vil en ved overvåking, innsamling og analyse av andre data fra supplerende målinger (eksempelvis av nedbør og temperatur) kunne oppnå tilfredsstillende kontroll og sikkerhet.

2.2 Innledning

BKK bruker lekkasjedata for å vurdere dammers tilstand, og eksempelvis har ekstraordinær lekkasje utløst tiltak med reparasjoner på dammer.

Myndighetene har strenge krav til lekkasjemålepunkter med oppsamling av lekkasjevann inne i damkroppen, og der dette ikke er etablert skal oppsamlingen skje i damfoten. For mange dammer gjelder imidlertid at de ikke lever opp til disse kravene til lekkasjemåling, og det kan ofte være kostbart å etterkomme kravene. BKK har flere dammer der lekkasjemålepunktene ligger et stykke nedstrøms dammen og målingene påvirkes av nedbør og snøsmelting, og dermed ikke oppfyller kravene. BKK mener likevel at lekkasjemåledataene kan brukes til å vurdere dammenes tilstand og dermed gi myndighetene mulighet for å kunne dispensere fra gjeldende forskriftskrav. For å illustrere dette er det sett på lekkasjemålinger fra to av BKKs dammer, henholdsvis Dam Svartavatnet i Haugsdalsvassdraget og Dam Askjelldalsvatnet i Eksingedalsvassdraget. De to dammene representerer to forskjellige damtyper med forskjellig tetningselement og med forskjellige krav til overvåking av lekkasje, men representerer også en dam der kravene til lekkasjemåling ikke er oppfylt og en dam som nylig er oppgradert i henhold til kravene.

Gjennom analyse av lekkasjemåledataene og andre måleparametere, som direkte eller indirekte virker inn på lekkasjemålingen er det ønskelig å finne en enkel metode for automatisk å filtrere vekk feilkilder som skyldes magasin vannstand, nedbør og snøsmelting. Og dermed kunne sette opp og få et bevisst forhold til bruk av alarmverdier.

2.3 Myndighetskrav

Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften) § 7-2 stiller krav om overvåking av vassdragsanlegg med blant annet måling av lekkasje for dammer i konsekvensklasse 2,3 og 4 [1].

Kravene til oppsamling av lekkasjevann er beskrevet i veilederen for fyllingsdammer «*For å redusere forstyrrende tilsig fra nedbør eller snøsmelting, skal lekkasjevannet fanges opp inne i fyllingen like nedstrøms kjernen*» [2]. Ved eksisterende dammer der dette ikke er etablert skal oppsamlingen skje med ledevegger og fangdammer i nedstrøms damfot.

I Retningslinjer for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg utdypes kravene til overvåking av lekkasje [3]. Retningslinjene oppgir krav til hyppighet for måling og avlesning av data, jf. figur 2-1, samt krav til nøyaktighet og presentasjon og evaluering av data. Videre skal lekkasje fra dammen ifølge retningslinjene, registreres sammen med faktorer som kan påvirke lekkasjemålingen, f.eks. magasin vannstand. I tillegg vil det der nedbør og snøsmelting kan påvirke lekkasjemålingen være nødvendig å måle nedbør og temperatur.

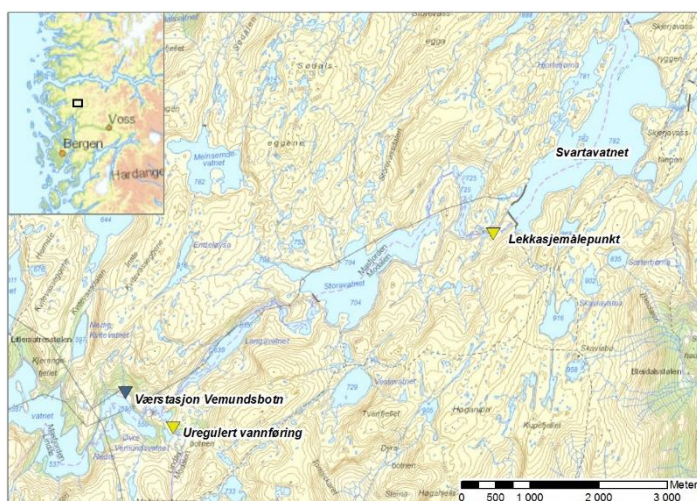
Damtype		Klasse	Lekkasje (jf. kapittel 3.1.1)
Fyllingsdammer	Fyllingsdammer med tetningskjerne av morene/asfaltbetong	3	KO
		2	KM
	Fyllingsdammer med tetning av betong, tre eller lignende	3	KM
		2	KM
	Fyllingsdammer fundamentert på løsmasser eller berg med utpregede svakhetssoner	3	KO
		2	KM

Figur 2-1 Krav til hyppighet for måling og avlesning av lekkasjedata (utsnitt av tabell 3-1 i Retningslinjer for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg [3]). Betegnelse KO og KM står for henholdsvis «Kontinuerlig overvåking (kontinuerlig måling, avlesning og eventuell bearbeiding av måledata)» og «Kontinuerlig måling. Avlesning utføres minst en gang i året». I forslag til ny veileder for overvåking deles fyllingsdammer to grupper ved at den midterste gruppen i tabellen fjernes.

2.4 Eksempel: Dam Svartavatnet i Haugsdalsvassdraget

Svartavatnet ligger i Haugsdalsvassdraget i Masfjorden og Modalen kommuner (jf. figur 2-2), og er inntaksmagasin for Vemundsbotn kraftverk. Hoveddammen er en steinfyllingsdam med frontal betongtetning, og ble bygget på tidlig 1960-tallet. Dammen er i bruddkonsekvensklasse 3. Reguleringsgrensene i Svartavatnet er henholdsvis 733,50 m.o.h. (LRV) og 781,50 m.o.h. (HRV).

Ved Vemundsbotn kraftverk har BKK en værstasjon der det registreres nedbør og lufttemperatur. Stasjonen ligger ca. 560 m.o.h. og ca. 6 km sør for hoveddammen i Svartavatnet. I en sideelv også ved Vemundsbotn kraftverk har BKK en stasjon for måling av uregulert vannføring. Stasjonen ligger ca. 590 m.o.h. og ca. 5,5 km sørvest for hoveddammen. Nedbørfeltet til stasjonen er ca. 7,5 km².



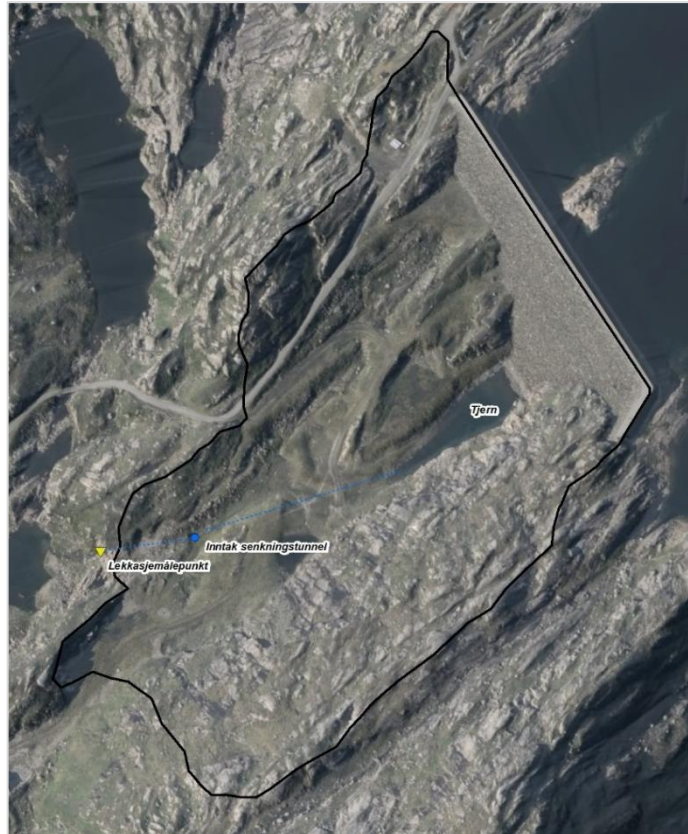
Figur 2-2 Oversiktskart.

2.4.1 Lekkasjemålesystem

I henhold til Retningslinjer for overvåking og instrumentering er det for denne dammen krav til kontinuerlig måling med avlesning minst en gang i året, jf. figur 2-1 [3].

Etter at dammen ble påbygget i 1983 ligger damfoten i kanten av et lite tjern, som dreneres gjennom et rør til en senkningstunnel. Lekkasje fra hoveddammen registreres i senkningstunnelen rett oppstrøms utløpet. Her er etablert et målepunkt med v-overløp og en trykksensor, som registrerer vannstanden bak v-overløpet, jf. Vedlegg A. Trykksensoren har tidligere registrert vannstanden en gang annen hver time, men fra høsten 2016 registreres vannstanden en gang hver time. Det er ikke fjernoverføring av data og dataene innhentes manuelt en gang i året.

Nedbørfeltet til lekkasjemålepunktet er vist på figur 2-3 og er ca. 0,09 km². Nedbørfeltet er bestemt basert på en terrengmodell med en meters oppløsning.

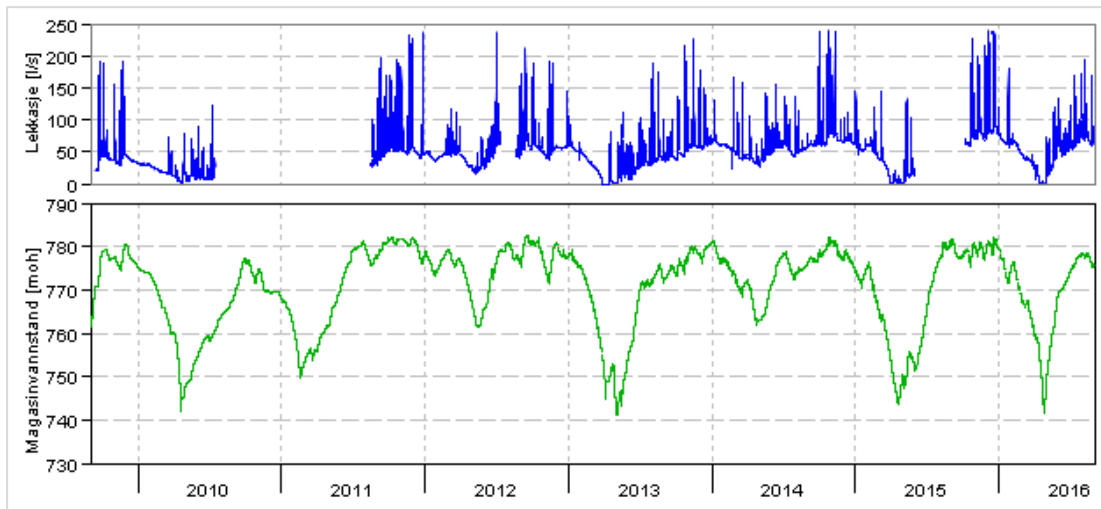


Figur 2-3 Lekkasjemålepunktet ligger i utløpet av senkningstunnelen, ca. 300 m nedstrøms dammen. Grensene til nedbørfeltet er fastlagt basert på en terrengmodell med en oppløsning på en meter. Nedbørfeltet til lekkasjemålepunktet er ca. 0,09 km².

2.4.2 Faktorer som påvirker lekkasjemåledataene

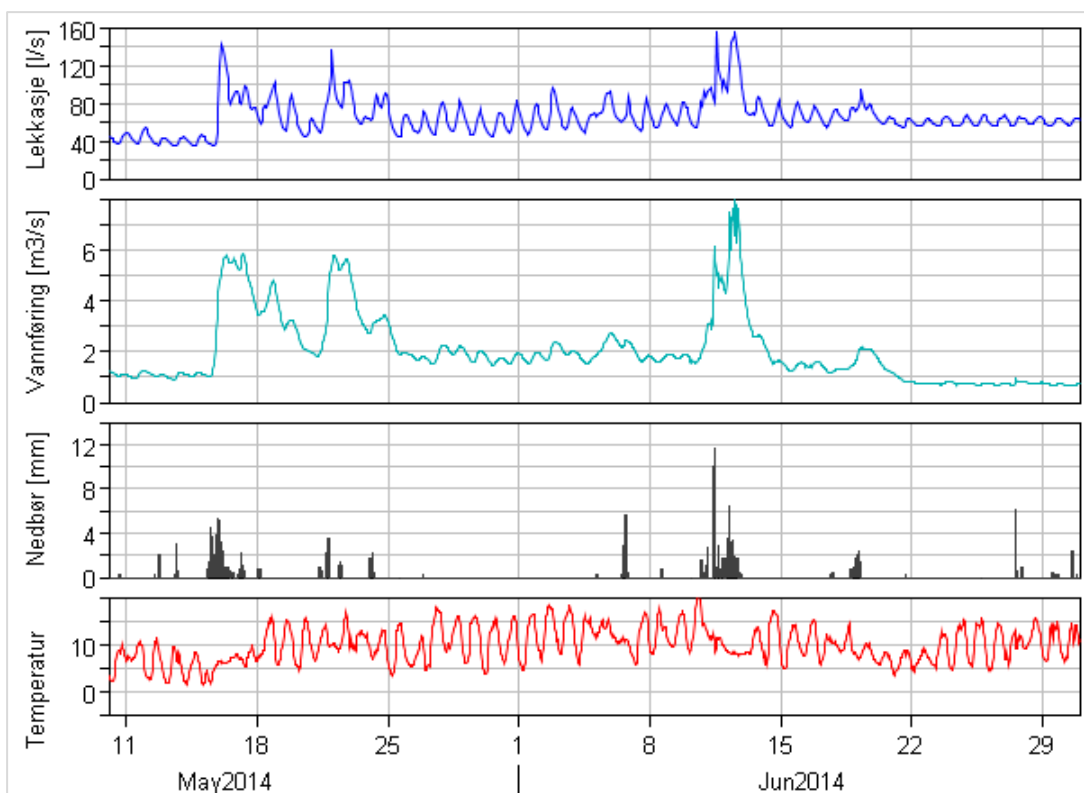
Siden lekkasjemålepunktet ligger noe nedstrøms dammen er det ventet, at den registrerte lekkasjevannføringen i tillegg til å være påvirket av magasin vannstanden i Svartavatnet også vil være påvirket av nedbør og snøsmelting i nedbørfeltet mellom dammen og målepunktet.

De registrerte lekkasjemåledata samt magasin vannstanden er vist i figur 2-4. Det er tydeligvis en sammenheng mellom magasin vannstanden og lekkasjemåledataene, men samtidig sees lekkasjemåledataene også å være tydelig påvirket av andre faktorer.



Figur 2-4 Vannføring registrert ved lekkasjemålepunktet nedstrøms dam Svartavatnet samt magasin vannstand i Svartavatnet (perioden 01.09.2009-31.08.2016).

For å avdekke i hvilken grad lekkasjemålingen påvirkes av nedbør og snøsmelting er nedbør- og lufttemperaturdata fra BKKs værstasjon ved Vemundsbotn kraftverk analysert. Arealdekningen i nedbørfeltet mellom dammen og målepunktet er snaufjell og det er ventet at nedbørhendelser vil observeres som markante og momentane utslag på vannstandsloggeren. I figur 2-5 er lekkasjevannføringen sammenlignet med nedbør og temperaturdataene samt med uregulert vannføring registrert ved målestasjonen i sideelven ved Vemundsbotn kraftverk. Figuren viser en typisk periode på våren med spredte nedbørepisoder, men som ellers er preget av snøsmelting. Tilsvarende viser figur a-0-3 i Vedlegg A en typisk periode på høsten preget av nedbør.

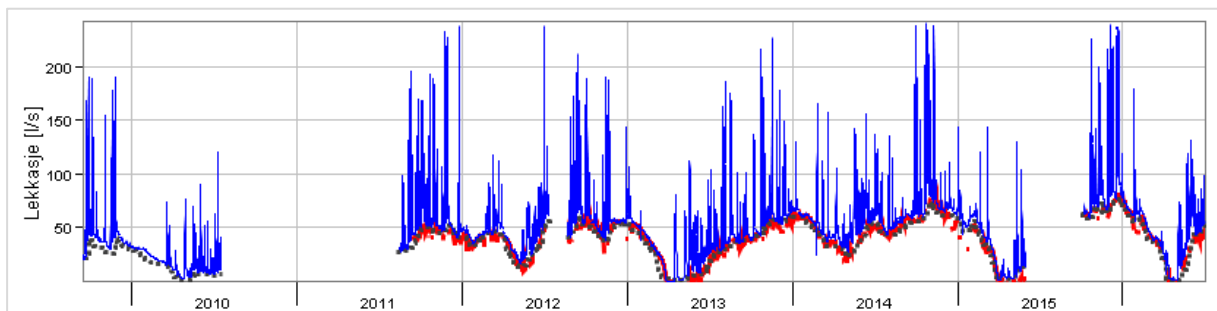


Figur 2-5 Lekkasjemåledata, uregulert vannføring ved målestasjonen Vemundsbotn samt nedbør og lufttemperatur registrert ved værstasjonen ved Vemundsbotn kraftverk for en typisk periode på våren preget av snøsmelting og spredte nedbørepisoder (10.05.2014-30.06.2014). For den viste perioden øker magasin vannstanden gradvis fra ca. 764 m.o.h. til 778 m.o.h.

Sammenligningen viser tydelig at lekkasjemålingen i tillegg til magasin vannstanden responderer på de samme faktorene som påvirker den uregulerte vannføringen i sideelven ved Vemundsbotn kraftverk. Det er med andre ord en direkte sammenheng mellom nedbør og snøsmelting og det som registreres av loggeren i lekkasjemålepunktet.

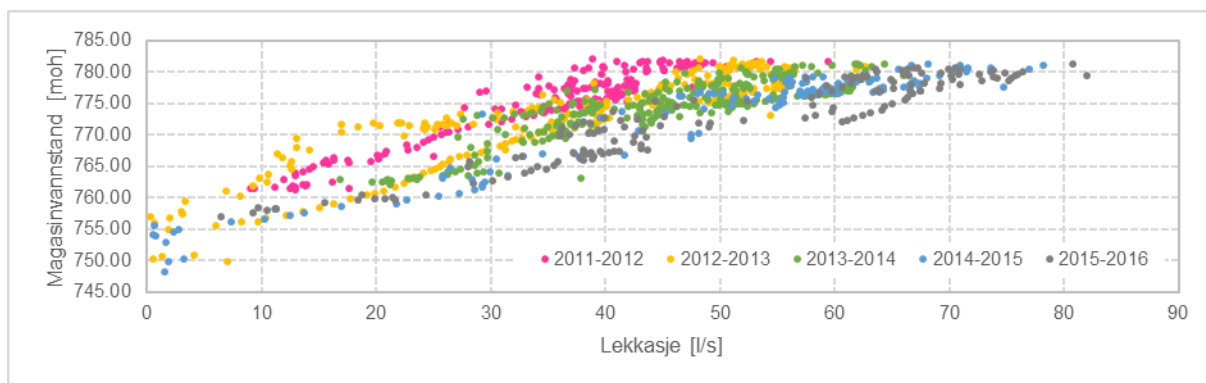
Gjennom ulike tilnærminger er det prøvd å filtrere lekkasjemåledataene med henblikk på å fjerne den tilleggs vannføringen som skyldes nedbør og snøsmelting i nedbørfeltet mellom dammen og lekkasjemålepunktet. Det er ønskelig å finne en metode for automatisk filtrering av lekkasjemåledataene. Innledningsvis ble det forsøkt å filtrere måledataene ved å omregne henholdsvis nedbør og uregulert vannføring registrert ved Vemundsbotn til tilsig til lekkasjemålepunktet. I første omgang ble filtreringen gjort med samme tidsoppløsning som lekkasjemåledataene er registrert, det vil si med 2-timers oppløsning. Selv om det var mulig å kjenne igjen visse mønstre genererte denne filtreringen generelt for mye støy i dataene til at det er mulig å bruke de videre, og da spesielt filtreringen basert på nedbørdataene. For å redusere effekten av tidsforskyving i nedbør på grunn av geografiske forhold, og som sannsynligvis bidrar en god del til den observerte «støyen» ble samme filtrering gjort på data med døgnoppløsning. På døgnoppløsning viste filtreringen basert på den uregulerte vannføringen seg ganske god, jf. figur 2-6 som viser den registrerte lekkasjemåleserien samt den automatisk filtrerte serien. Det er videre god samvariasjon mellom den filtrerte lekkasjemåleserien og magasin vannstanden, og statistisk beregning gir en R^2 -verdi på 0,79 for hele dataserien. Samvariasjonen er enda bedre for enkeltstående år og gir betydelig større R^2 -verdier (opp mot 0,90-0,95). Årsaken til dette er at lekkasjen har økt gradvis gjennom observasjonsperioden, se omtale nedenfor.

I de tilfeller hvor det ikke finnes representative måleserier som kan brukes til automatisk filtrering av lekkasjemåledata, kan det være en mulighet å korrigere dataene manuelt. Dette gjøres ved å anta at basisvannføringen stammer fra lekkasje gjennom dammen, mens lekkasjetoppene skyldes nedbør eller snøsmelting. Manuell filtrering blir en grov tilnærming og noe som må gjøres i ettertid, men vil sannsynligvis kunne gi nødvendig informasjon om størrelsen på lekkasjen og om den utvikler seg over tid. Lekkasjemåledataene fra Svartavatnet er også manuelt korrigert og den manuelle korreksjonen samsvarer godt med den automatiske filtreringen, jf. figur 2-6.



Figur 2-6 Registrert lekkasjemåledata (blå) sammenlignet med manuelt korrigert (grå stiplet) og automatisk filtrert (rød) lekkasjedata for perioden 01.09.2009-30.06.2016. Den automatiske filtreringen er basert på arealskalering av uregulert vannføring på døgndata.

Betraktes den filtrerte lekkasjevannføringen på figur 2-6, synes det å være en tendens til at lekkasjen øker over tid. For å undersøke dette nærmere er de filtrerte lekkasjedataene plottet opp mot magasin vannstand år for år, jf. figur 2-7. Figuren viser tydelig en utvikling med gradvis økt lekkasje gjennom perioden fra 2011 til 2016. Dette er ikke overraskende all den tid det sees nye fugeskader på dammens frontale betongplate. På tross av den omtalte støyen i lekkasjemåledataene gir databearbeiding som vist, et tydelig resultat.

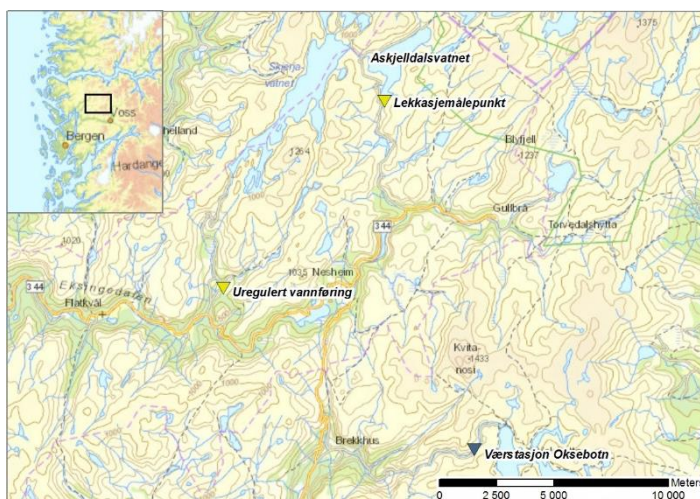


Figur 2-7 Automatisk filtrert lekkasjedata plottet mot magasin vannstand i Svartavatnet for perioden 17.09.2011-30.06.2016.

2.5 Eksempel: Dam Askjeldalsvatnet i Eksingedalsvassdraget

Askjeldalsvatnet ligger i Eksingedalsvassdraget i Vaksdal kommune (jf. figur 2-8), og er inntaksmagasin for Evanger kraftverk. Hoveddammen er en steinfyllingsdam med sentral tetning av morene og med støttefylling av sprengstein og tunnelstein. Dammen ble bygget i 1973-1974 og senest rehabilitert i 2014. Dammen er i bruddkonsekvensklasse 3. Reguleringsgrensene i Askjeldalsvatnet er 750,00 m.o.h. (LRV) og 805,00 m.o.h. (HRV).

Ved Oksebotn kraftverk i Teigdalsvassdraget, som er nabovassdraget mot sør, har BKK en værstasjon med registrering av nedbør og lufttemperatur. Stasjonen ligger ca. 815 m.o.h. og ca. 16 km sør for hoveddammen i Askjeldalsvatnet. I Fagerdalen, et sidevassdrag i Eksingedalsvassdraget, har BKK stasjonen 63.12 Fjellanger for måling av uregulert vannføring. Stasjonen ligger ca. 400 m.o.h. og ca. 10 km sørvest for hoveddammen. Nedbørfeltet til stasjonen er ca. 12,8 km².



Figur 2-8 Oversiktskart.

2.5.1 Lekkasjemålesystem

I henhold til Retningslinjer for overvåking og instrumentering er det for denne dammen krav til kontinuerlig overvåking, det vil si kontinuerlig måling, avlesning og eventuell bearbeiding av måledata, jf. figur 2-1 [3].



Figur 2-9 Etter rehabilitering i 2014 ble lekkasjemålepunktene bygget inn i damfoten. Bildet viser fangdammen i den vestlige delen av dammen.

løpet av året. Ved overskridelse av nederste alarmnivået må det gjøres en vurdering av om den økte lekkasjen kan skyldes nedbør og/eller snøsmelting. Den øverste alarmgrensen er derimot satt så høyt at den kun skal overskrides i situasjoner med mer ekstreme nedbørhendelser eller lekkasje. Overskrides den øverste alarmgrensen må det vurderes om det er nødvendig å sende inn personell for å kontrollere dammen.

Før rehabilitering av dammen ble lekkasjen oppfanget på to plasser nedstrøms dammen. Lekkasjen ble registrert manuelt ved tilsyn, og det finnes derfor ikke data fra før rehabiliteringen. I forbindelse med rehabilitering av dammen ble det bygget to fangdammer i damfoten for registrering av lekkasje. Her er det etablert målepunkt med v-overløp og trykksensor, som registrerer vannstanden bak v-overløpet en gang hver time, jf. Vedlegg A. Videre er det utstyr for direkteoverføring av måleverdier til produksjonsentralen.

Basert på erfaringer fra tilsyn har BKK satt alarmgrenser for lekkasjemåledataene. Den nederste alarmgrensen er satt relativt lavt, og det er sannsynlig at den vil overskrides flere ganger i

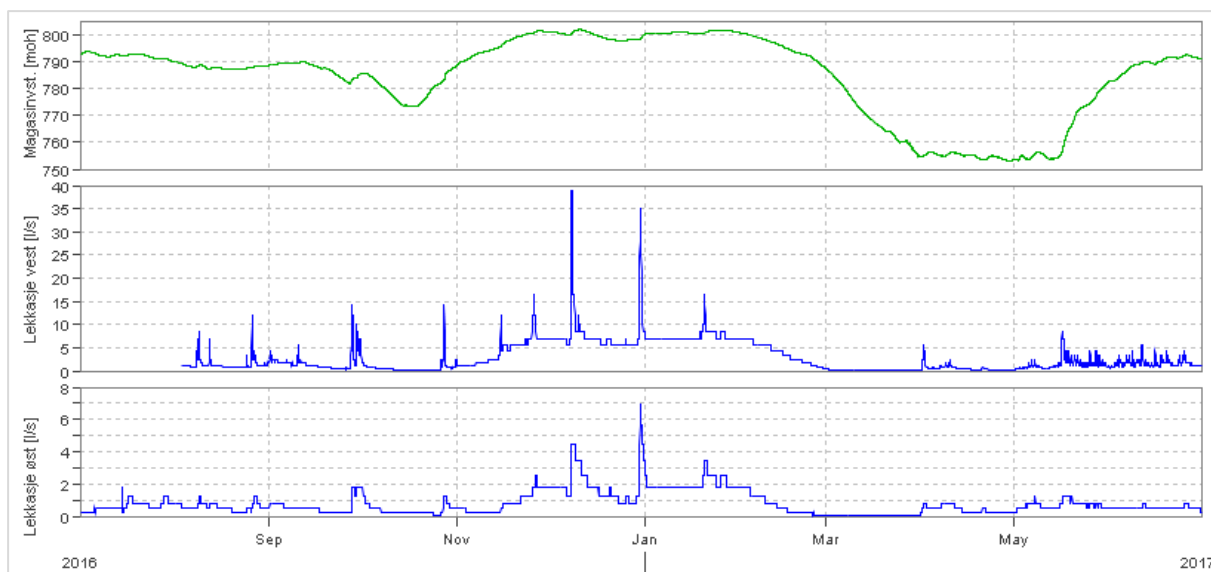
2.5.2 Faktorer som påvirker lekkasjemåledataene

Lekkasjemåledata fra de to oppsamlingspunktene samt magasin vannstand fra Askjeldalsvatnet er vist på figur 2-10. Generelt sees det å være god korrelasjon mellom vannføringen registrert ved de to lekkasjemålepunktene. Som ventet er det også her en sammenheng mellom magasin vannstand og størrelsen på lekkasjen, samtidig er lekkasjemåledataene tydeligvis også påvirket av nedbør og snøsmelting. At lekkasjemåledataene påvirkes av nedbør og snøsmelting sees også på figur a-0-6 og figur a-0-7 i Vedlegg A. Figurene viser lekkasjemåledata fra det vestlige oppsamlingspunktet sammenlignet med uregulert vannføring samt nedbør og lufttemperatur fra nærliggende stasjoner for henholdsvis en typisk periode på høsten preget av nedbør og en typisk periode på våren preget av snøsmelting. Samvariasjonen med uregulert vannføring er ikke så utpreget som for eksemplet fra Svartavatnet, og spesielt ikke på vinteren og skyldes nok i hovedsak at sammenligningsstasjonen ligger noe lavere.

Analyse av lekkasjemåledataene viser altså at til tross for at oppsamlingspunktene er plassert i damfoten er måledataene også her påvirket av nedbør og snøsmelting, men selvfølgelig i vesentlig mindre grad.

2.6 Diskusjon

De to eksemplene, som er beskrevet ved henholdsvis Dam Svartavatnet og Dam Askjeldalsvatnet, representerer to forskjellige damtyper med forskjellige krav til overvåking av lekkasje. Dam Svartavatnet er en fyllingsdam med frontal betongtetning med krav om kontinuerlig måling. Dam Askjeldalsvatnet er en fyllingsdam med tetningskjerne av morene, og har krav om kontinuerlig overvåking. Videre representerer Dam Svartavatnet og Dam Askjeldalsvatnet to ulike situasjoner, henholdsvis en dam der oppsamling av lekkasje ikke nødvendigvis er i henhold til kravene og en dam som nylig er oppgradert i henhold til kravene. Lekkasjemålepunktene for Dam Askjeldalsvatnet ligger i damfoten, som kravene tilsier, mens lekkasjemålepunktet for Dam Svartavatnet ligger nedstrøms dammen, og vil være vesentlig påvirket av forholdene i nedbørfeltet mellom dammen og målepunktet.



Figur 2-10 Magasin vannstand i Askjeldalsvatnet samt beregnet vannføring ved henholdsvis det vestlige og østlige lekkasjemålepunktet (perioden 01.07.2016-30.06.2017). Alarmverdiene for det vestlige lekkasjemålepunktet er 15 l/s og 50 l/s og for det østlige lekkasjemålepunkt 8 l/s og 50 l/s.

Gjennomgang av lekkasjemåledataene for begge dammene viser, som forventet, at lekkasjemålepunktet påvirkes av magasin vannstanden. Videre sees det at lekkasjemålingen ved Dam Svartavatnet også i stor grad påvirkes av tilsig fra nedbør og snøsmelting fra nedbørfeltet mellom dammen og lekkasjemålepunktet. Men det sees også at lekkasjemålingene ved Dam Askjeldalsvatnet til tross for at oppsamlingspunktene er plassert i damfoten, også påvirkes av nedbør og snøsmelting om enn i vesentlig mindre grad.

For eksemplet med Dam Svartavatnet er det gjennom ulike tilnærminger prøvd å finne en metode for automatisk filtrering av lekkasjemåledataene med henblikk på å fjerne den tilleggs vannføringen som er forårsaket av nedbør og snøsmelting. Med unntak av magasin vannstand blir det ikke målt andre parametere ved Svartavatnet som er relevante ved bearbeiding av lekkasjemåledata, og det er derfor anvendt nedbør-, temperatur- og vannføringsdata fra stasjoner som ligger ca. 5-6 km vest for hoveddammen. Gjennom analysene har vi sett at det kan være noen utfordringer med automatisk filtrering på fin tidsoppløsning. Noe av årsaken til disse utfordringene skyldes sannsynligvis den geografiske avstanden mellom lekkasjemålepunktet og de andre stasjonene, og som gjør at det kan være forskjell i værforholdene fra den ene til den andre plassen. Ved å gjøre filtreringen på døgndata forsvant noe av støyen, og spesielt filtrering basert på data for uregulert vannføring ga et tilfredsstillende resultat. Videre er den umiddelbare konklusjonen at filtrering basert på nedbør- og temperaturdata krever mer bearbeiding av dataene, og sannsynligvis at det er nødvendig å sette opp en hydrologisk modell for å lykkes med dette, spesielt også for perioder med snøsmelting. Det er ikke gjort forsøk på å filtrere lekkasjemåledataene for eksemplet med Dam Askjeldalsvatnet, men en umiddelbar utfordring som er sett her er den noe dårligere korrelasjon til målestasjonen for uregulert vannføring. Korrelasjonen er dårligst i vinterperioden, og skyldes sannsynligvis at denne målestasjonen ligger noe lavere enn Askjeldalsvatnet. For å få til automatisk filtrering på fin tidsoppløsning må måleparametere trolig som et minimum samles inn ved lekkasjemålepunktet for at geografiske værvariasjoner skal unngås.

For damtyper med tetning av betong, tre eller lignende, og som ikke har krav om kontinuerlig overvåking, kan bearbeiding av lekkasjemåledata gjøres på relativt grov tidsoppløsning, f.eks. døgndata, og fortsatt gi nødvendig informasjon om størrelsen på lekkasjen og om den utvikler seg

over tid. Dersom databehandlingen gjøres med grov tidsoppløsning gjør det også resultatet mindre sensitiv overfor geografiske værvariasjoner, og det er da mulig å bearbeide dataene basert på nedbør, lufttemperatur, uregulert vannføring, som ikke nødvendigvis er innsamlet rett ved. Om det ikke finnes eller ikke finnes egnede stasjoner i nærheten så ser vi med eksemplet fra Dam Svartavatnet at det også er mulig å gjøre en manuell korreksjon av lekkasjemåledataene og fortsatt få ut tilstrekkelig informasjon.

Damtyper med morenetetning er sårbare for indre erosjon i motsetning til dammer med f.eks. tetning av betong, og det setter derfor også andre krav til overvåking av lekkasje. Det er muligheter for å forbedre kvaliteten ved damanlegg der eksisterende lekkasjemålinger påvirkes av nedbør og snøsmelting, og der det er krav om kontinuerlig overvåking. En mulighet kan være å etablere en værstasjon med måling av nedbør og lufttemperatur, og på bakgrunn av disse dataene sette opp en hydrologisk modell for lekkasjemålepunktet. Utfordringen med å sette opp en modell blir kalibrering av modellen siden den sannsynligvis må kalibreres mot lekkasjemåledataene, som også er påvirket av magasin vannstand. Om det er mulig å etablere en målestasjon for uregulert vannføring virker det mer fordelaktig enn en værstasjon, ettersom uregulert vannføring vil gi dataene nødvendige for filtrering direkte uten behov for modellering. Det kan også være en mulighet å installere en turbiditetssensor i lekkasjemålepunktet. Vi har ikke erfaring med turbiditetsmåling og er derfor usikre på hvordan sensoren vil reagere i en situasjon med en vesentlig nedbørhendelse kontra ved lekkasje. Gir økt lekkasje vesentlig større utslag på turbiditet enn naturlige nedbørhendelser vil en turbiditetssensor kunne gi direkte informasjon om dammers tilstand. Er det derimot ikke så entydig vil turbiditetsmåling sammen med andre måleparametere nok fortsatt kunne gi viktig informasjon. Ved damanlegg der det er to eller flere lekkasjemålepunkter er det mulig å sammenholde disse målingene, og manglende samvariasjon vil kunne indikere mulig lekkasje. De fleste trykksensorer for registrering av vannstand registrerer også vanntemperatur, og dette har vist seg å være nyttig i arbeid med analyse og feilsøking.

Gevinsten ved å få til automatisk filtrering av lekkasjemåledataene er at vi kanskje kan slippe å oppgradere eksisterende lekkasjemålepunkter, som ikke er i henhold til myndighetskravene, og som kan være utfordrende å få til teknisk. Det vil også gi mulighet til å sette strengere alarmgrenser, og mulighet for også å sette alarmgrenser som avhenger av magasin vannstanden. Faren ved å sette opp automatisk filtrering er at den informasjonen vi egentlig søker filtreres bort. Det er derfor viktig med gode og pålitelige måleparametere.

2.7 Konklusjon

For å vurdere nytten av lekkasjemåling og nødvendige krav til målestedet synes det viktig å skille mellom de ulike damtypene, den enkelte dams behov for overvåking og muligheter for å bearbeide og filtrere lekkasjemåledata. BKK viser, gjennom å benytte innsamlede data fra overvåking av lekkasje, temperatur og nedbør, at man i konkrete tilfeller kan oppnå tilfredsstillende resultater for måling av lekkasje uten å måtte flytte målestedet nær, eller inntil dammen.

3 DEFORMASJONSMÅLING PÅ DAMMER

3.1 Sammendrag

I dette kapittelet er det i hovedsak fokusert på analyse av deformasjonsmålinger av fyllingsdammer. Gjennomgang av historiske data for tre utvalgte BKK-dammer, Dam Stølsvatnet (Modalen), Dam Holskardvatnet (Modalen) og Dam Svartavatnet (Samnanger), viser at de totale deformasjonene er små og gjennomgående mindre enn det som er forventet.

For Dam Stølsvatnet har kjerneboltene maksimalt hatt 0,1% total setning i perioden 1981-2017, Dam Holskardvatnet har hatt maksimal setning på 0,2% i perioden 2006 – 2016 og Dam Svartavatnet har hatt maksimal setning på 0,6 % for perioden 1986-2016.

Normalt antas setninger på 0,5 – 1,0 % av damhøyden å være rimelig over dammens levetid, men ofte er setningene mindre. Et forbedringspotensial som er avdekket er at måten målingene gjennomføres og logges på kan forenkles uten at mengden data reduseres.

Nye metoder for datafangst ved skanning, satellitt, radar eller fotogrammetri kan gi betydelig utvidet informasjon om damdeformasjoner. Dette vil redusere arbeidet med deformasjonsmålingene, og kan effektivisere deformasjonskontrollen for mange dameiere, da en ikke blir avhengig av å ha med landmåler. Nye metoder der man lager terrengmodeller med høy oppløsning av hele damanlegg vil være et godt supplement til å vurdere tilstand og ikke minst å oppdage eventuelle deformasjoner i dammene over tid.

Innenfor setningsmålinger er det pekt på nytteverdi av direkte bearbeiding av landmålingsdata i felt, for eventuelt å avdekke mulige deformasjoner tidlig. I tillegg er det flere nye metoder som bidrar til å øke overvåking og dokumentasjon på utvikling av deformasjoner. Spesielt muligheter for laserskanning, drone, satellittmålinger for å lage 3D- modeller er ventet å bli et viktig bidrag framover.

Blant annet har drone vist seg å være et effektivt, lett tilgjengelig hjelpemiddel og hvor utviklingen er ventet å være betydelig fremover.

3.2 Generelt om setnings- og deformasjonsmålinger

3.2.1 Utførelse og ressursbruk ved deformasjonsmåling av dammer

BKK har 26 dammer som det blir utført setningskontroller på. For samtlige dammer blir det utført årlige målinger. Av de 26 dammene er det 15 dammer som har sentral tetningskjerne med enten morene, pukkbittumen eller betong, ni fyllingsdammer som har frontal tetningsplate av betong og to av dammene er massivdammer.

Siden BKKs dammer ligger geografisk spredt og ofte langt til fjells, er deformasjonsmåling en relativt tidkrevende aktivitet. I løpet av en full arbeidsdag blir det vanligvis gjennomført deformasjonsmåling på to dammer. Etterarbeidet med å prosessere data tar omtrent like lang tid, grovt regnet kan man anta et dagsverk per dam med måling og etterarbeid.

Målingene skjer ved at landmålingskikkerten monteres på en betongsøyle som er støpt for dette formålet. Kikkerten kalibreres ved å måle inn minimum to fastpunkt i området. Deretter går man fysisk rundt på dammen og plasserer et spesialtilpasset prisme på setningsboltene i kjernen som skal måles. Boltene på luft- og vannside måles inn med vanlig prisme. Etter utført måling må data prosesseres, regnes om i aktuelt høydegrunnlag for dammen og så legges måledata inn i programmet «Måledata for dammer» som er et dataprogram der historikken blir lagret og man har mulighet til å analysere målingene.

3.2.2 Kort beskrivelse av «Måledata for dammer»

Databaseprogrammet som brukes til å håndtere måledata og damhistorikken er «ISY JobTech Måledata for dammer», som er utviklet av Norconsult i samarbeid med bransjen. Programmet tar hånd om lagring, bearbeiding og presentasjon av data fra dammålinger. Det kan vises tidsserier for relative deformasjoner (setning, radiell- og tangentiell forskyvning), bevegelse i horisontalplan, på tvers av dam (snitt) og på langs (oppriss). Målingene vil også presenteres som relative setninger (% av dammens høyde). Data kan kombineres i ulike analyser for å vurdere om dammene oppfører seg ulikt i forhold til mellom annet poretrykk, vannstand og lekkasje (hver for seg eller i ulike kombinasjoner), lekkasje og nedbør, lekkasje i forhold til magasin vannstand og deformasjoner i forhold til magasin vannstand.

Forbedringspotensial ved bruk av tradisjonelle setningsmålinger og bruk av «Måledata for dammer»

BKKs erfaring og måte som man gjennomfører setningsmålingene på i dag, medfører at man ikke vet om målingene er gode nok, før man har gjort beregninger som blir gjort etter at måledata er overført fra måleboken i totalstasjonen til beregningsprogram og data blir lagt inn «Måledata for dammer». Dette blir for BKK sin del først gjort på kontoret etter befaring er gjennomført. I enkelte tilfeller der man får for stort avvik fra forrige måling eller mistenker at det kan være feil, må man vurdere om det må gjennomføres ny måling eller om det er selve målingen som er feil. Metoden som i dag benyttes av BKK kan forbedres ved at data fra «Måledata for dammer» og målebok fra totalstasjon integreres og at man får fortløpende kvalitetskontroll og beregning av setninger.

3.2.3 Bruk av ny teknologi som droner, laserskanning, radar (satelittdata) og terrengmodeller

Det har de siste årene blitt tilgjengelig ny teknologi som kan anvendes til kontroll av deformasjoner og setninger. Både bruk av bilder tatt fra drone, laserskanninger, setningsmålinger fra satellitt og bruk av digitale terrengmodeller.

Drone:

BKK har siste året begynt å ta i bruk drone ved inspeksjon og periodiske tilsyn. Bilder som blir tatt fra drone kan brukes til å lage terrengmodeller. Nøyaktigheten til terrengmodellene kan være god dersom man har flere kalibreringspunkt som man legger inn i modellen. Foreløpig har ikke BKK laget terrengmodell av samme anlegg i påfølgende sesonger og har derfor ikke noe grunnlag for å vurdere om metoden kan brukes til vurdering av deformasjoner over tid. Det antas at det ved hjelp av flere kalibreringspunkt kan oppnås nøyaktighet på terrengmodeller på et par cm. Med utviklingen innen droner, kamera og prosesseringsverktøy, er det ventet at nøyaktigheten økes betydelig de neste årene.

Uansett vil bilder som man tar fra drone ha en stor verdi ved visuell vurdering av tilstand på ulike deler av damanleggene. Spesielt nyttig er det på deler av damanleggene som det er knytt en risiko ved å befare.

Laser:

Der er også mulig å lage terrengmodeller basert på laserskanning fra totalstasjon eller fra luftbårne farkoster. BKK har i løpet av 2017 skannet et par -tre dammer med bruk av totalstasjon, men heller ikke her har vi data fra flere målinger for å vurdere på deformasjoner over tid. I disse par-tre tilfellene har målet for skanningen i utgangspunktet vært å få forbedret grunnlag for som bygget dokumentasjonen. I mange tilfeller vil laserskanning være godt egnet til kontroll av deformasjoner Utstyret som brukes er det samme som benyttes til innmåling av setning- og deformasjonsmålingene. Det må påregnes noe mer tid til analyse av data.

Satelittmålinger

Rapporten «Damhistorikk og instrumentering, Evaluering og dokumentering av eksisterende dammers sikkerhet, Sweco 2017», har en opplisting av forventet nøyaktighet og kostnader ved bruk av ulike metoder for etablering og gjennomføring av deformasjonsmålinger.

Når det gjelder satelittmålinger har dette så langt ikke vært et tema i BKK for å vurdere deformasjoner i damanlegg. Ulike rapporter, mellom annet «Fagrapport Pilotstudie måling av deformasjon på dammer med InSAR, Globesar AS 2014», viser til at det kan oppnås høy nøyaktighet ved bruk av satelittmålinger.

Terrengmodeller:

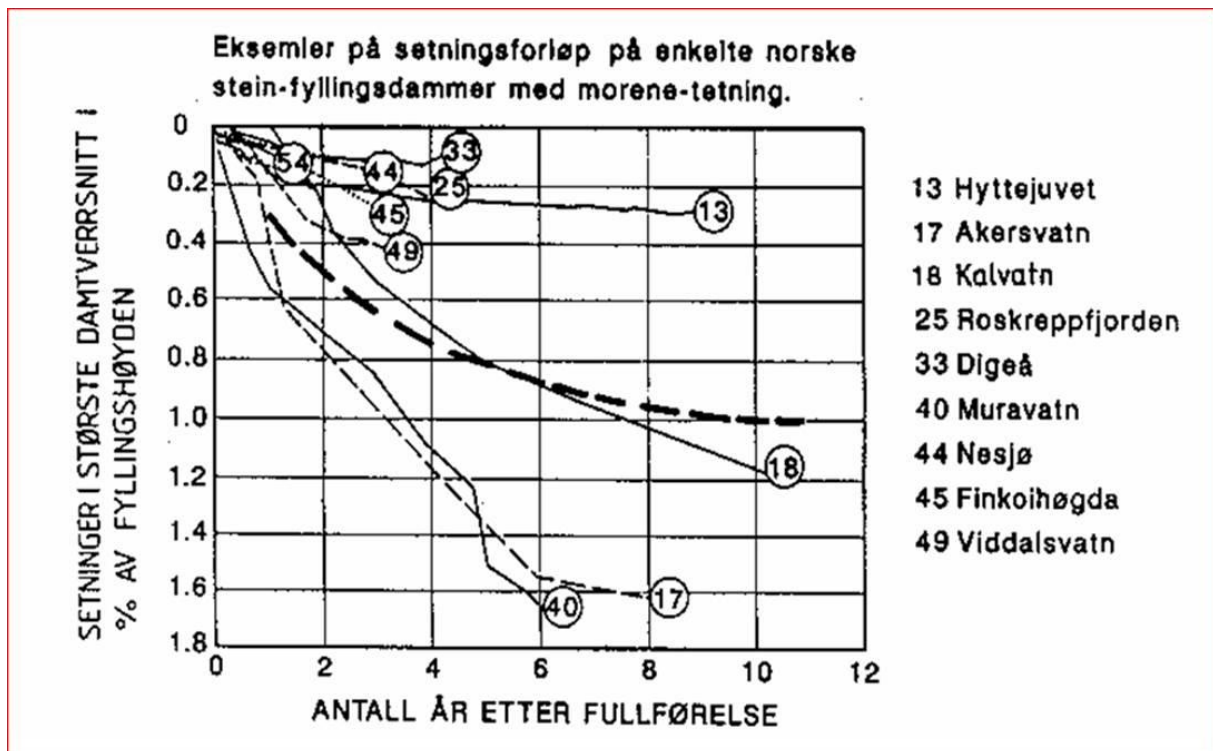
Terrengmodeller kan genereres av data fra ulike datakilder. Nøyaktigheten blir ikke bedre enn nøyaktigheten på datagrunnlaget for terrengmodellen. Fordelen med terrengmodeller av hele damanleggene er at deformasjoner i spesielt større anlegg lettere kan oppdages ved at man sammenligner terrengmodeller fra ulike tidspunkt og generer differanseplott. Metode med differanseplott vil også kunne lages basert på data fra satelittmålinger.

Trenden i dag er at metodene for å «fange» data for å etablere terrengmodeller blir enklere og mer brukervennlige og det er knyttet mindre kostnader til datafangst og dataanalyse. Det er også forventet at metoder for å forbedre nøyaktighet i modellene blir enklere. Maskinlæring og kunstig intelligens (AI), bildegjenkjenning vil sannsynligvis bli mer integrert i de ulike programvarene for behandling av data. Bruken av terrengmodeller vil stille større krav til databehandlingskapasitet og lagringskapasitet da grunnlagsdata for terrengmodellene er ekstremt store.

3.2.4 Lovverk

Damsikkerhetsforskrifta kap. 7 § 7-2 stiller krav til overvaking og § 7-5 stiller krav til revurdering. Veileder for fyllingsdam kap. 2.8 «*Forventede setninger skal bestemmes for nærmere angitt tidsperiode (vanligvis 50 år) og tidsforløpet for setninger, inklusive krypsetning, skal vurderes og presenteres grafisk. Forventede setninger skal gis et tillegg for å redusere usikkerheter i beregninger jf. Damsikkerhetsforskrift §5-10 h*»

Retningslinje for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg kap 3.1.4 gir føringer for Måling av deformasjoner og setninger i fyllingsdammer. Kap 3.4 gir føringer for krav til nøyaktighet og kap. 4 til presentasjon og evaluering av måledata.

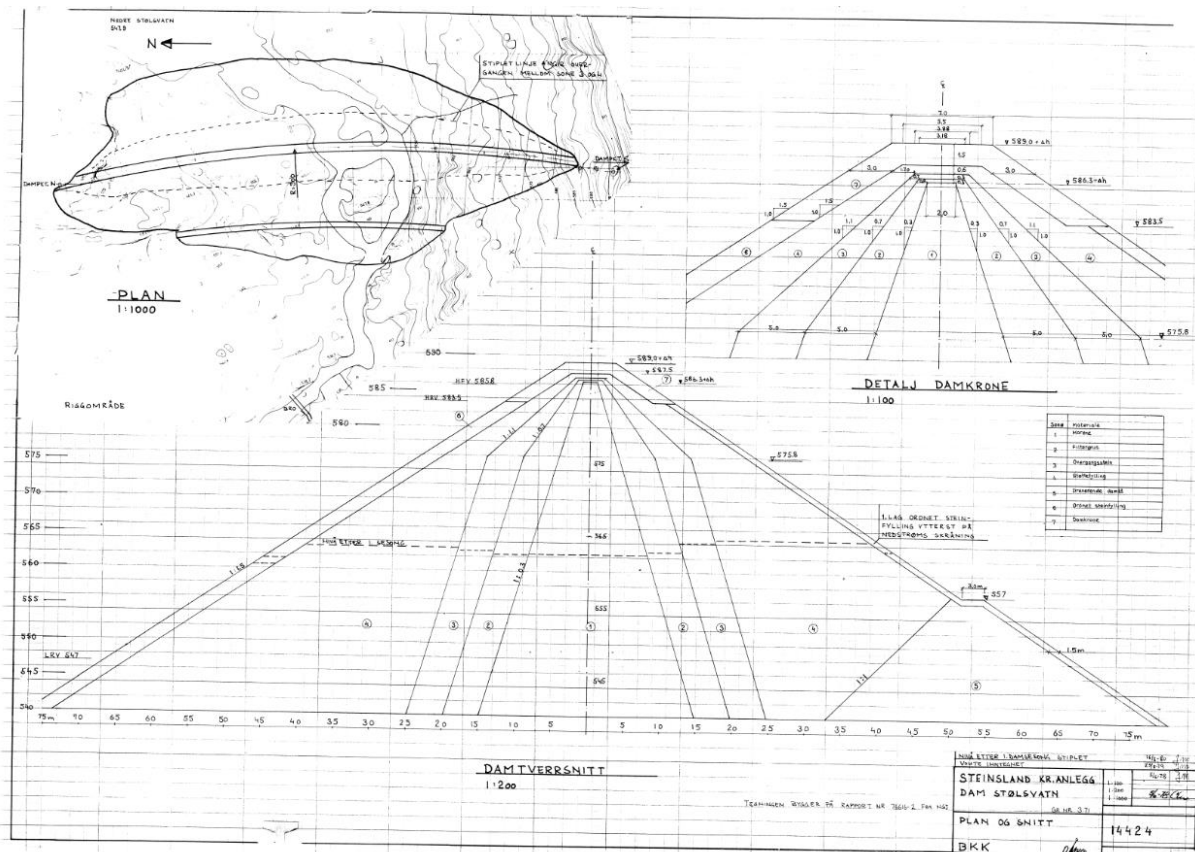


Figur 3-1 Illustrasjonen er hentet fra Damkurs 1, kompendium «Fyllingsdammer, del 2».

3.3 Eksempel: Dam Stølsvatnet i Modalsvassdraget

Dam Stølsvatnet i Modalen er en steinfyllingsdam med sentraltetning av morene. Dammen ble bygget i perioden 1979 til 1980. Stølsvatnet er inntaksmagasin til Steinsland kraftverk. Regulerbart volum er 42,0 mill. m³. Magasinfyllingen kan variere mye i løpet året.

Dammen er 52 m høy på det høyeste. HRV er 583,5 m.o.h og LRV er 547 m.o.h. Normalvannstanden i Stølsvatnet før regulering var 548 m.o.h. Dammen er fundamentert på fjell. Laveste punkt i fundamentet er på kote 547. Dimensjonerende flomvannstand er 585,92 m.o.h i hht til teknisk plan som er Q₁₀₀₀ inkl 10% usikkerhetspåslag. PMF vannstand er 586,43 m.o.h. Topp krone ligger på kote 589,0 m.o.h, og planlagt topp tetning etter oppgradering er 587,00 m.o.h inkl. 0,25 m sigemonn.

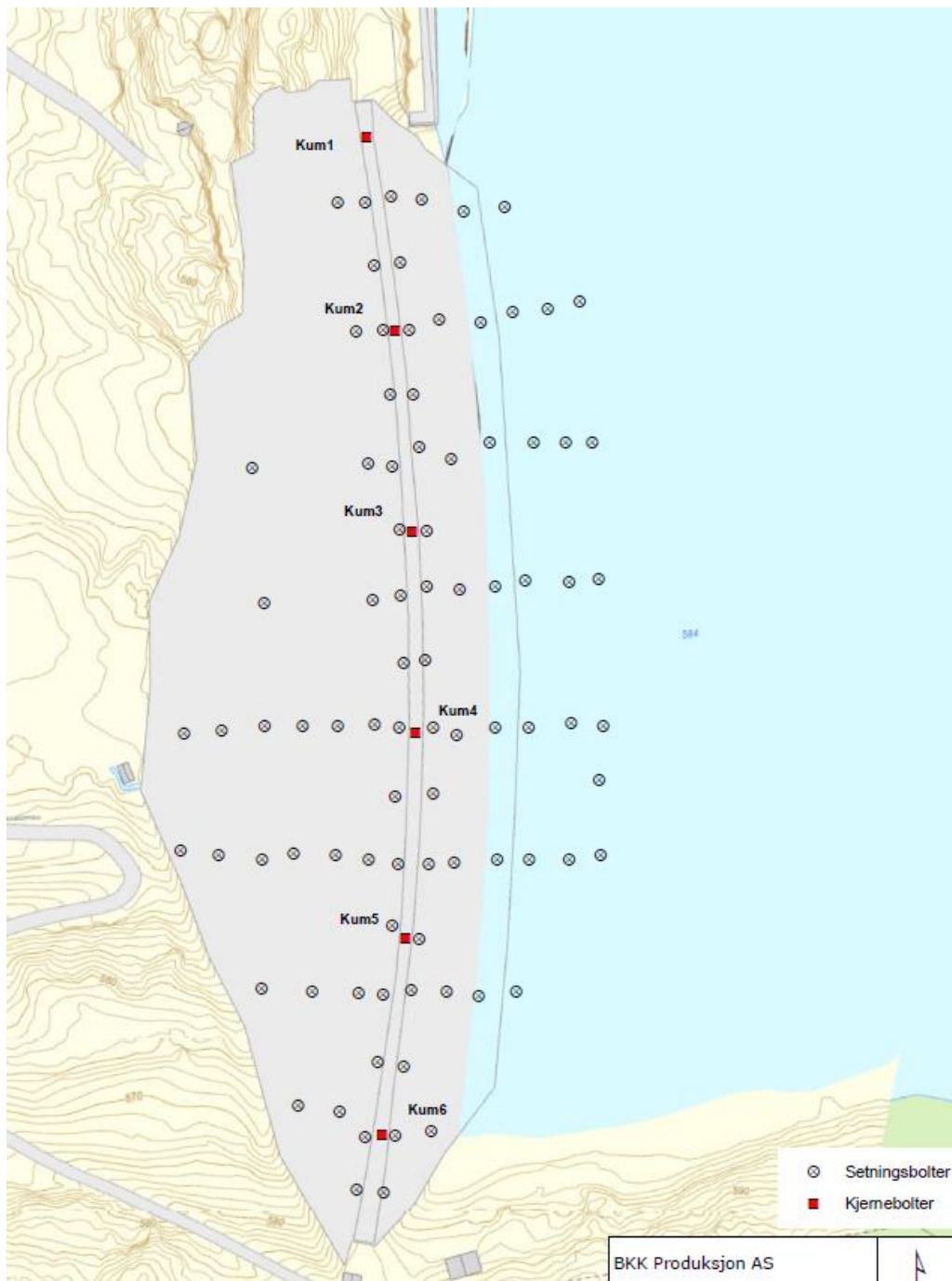


Figur 3-2 Skisse av tværnsnitt av dammen, BKK tegning 14424.

Totalt er det ca. 733 000 m³ stein i dammen. Dammen er ca 360 m lang på toppen. Bredden av tetningskjernen varierer fra 30 m i laveste punkt til 2 m i toppen.

Dammen ble revurdert i 1996 (rapport datert 1999) og i perioden 2011-2013. Etter siste revurdering er det gitt pålegg om å utbedre dammen slik at den skal tilfredsstillende gjeldende krav til damsikkerhet, herunder økt flomavledningskapasitet, økt kronebredde mm. Etter planen skal oppgraderingene gjennomføres i perioden 2018-2019.

Opprinnelig var det installert totalt 93 bolter for setningskontroll og deformasjonsmålinger på dammen. Det er i dag i bruk seks bolter for setningskontroll av tetningskjerna som er plassert i kummer i damkrona, og det er videre plassert 39 bolter på luftsiden og 49 bolter på vannsiden for kontroll av setning/forskyving.

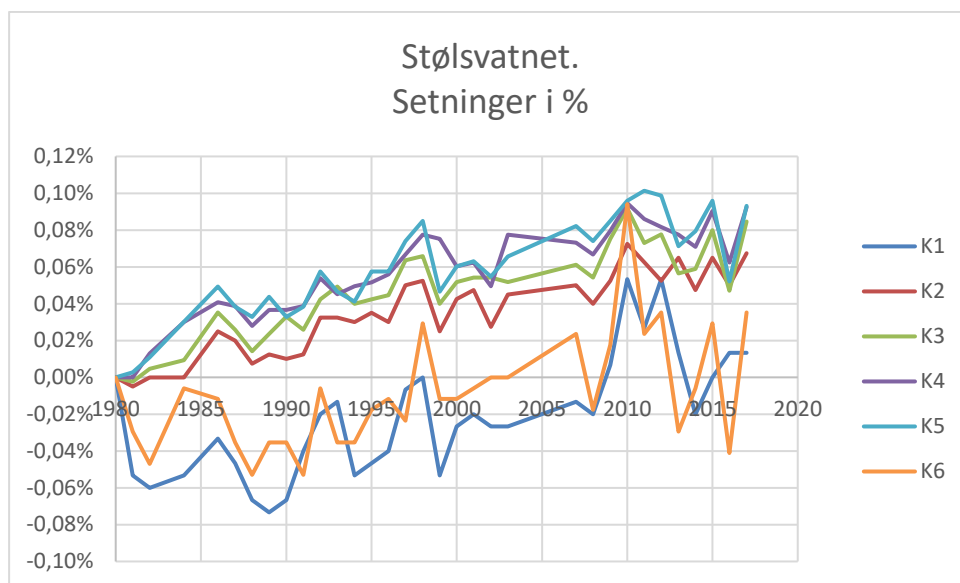


Figur 3-3 Dam Stølsvatnet Kontrollbolter

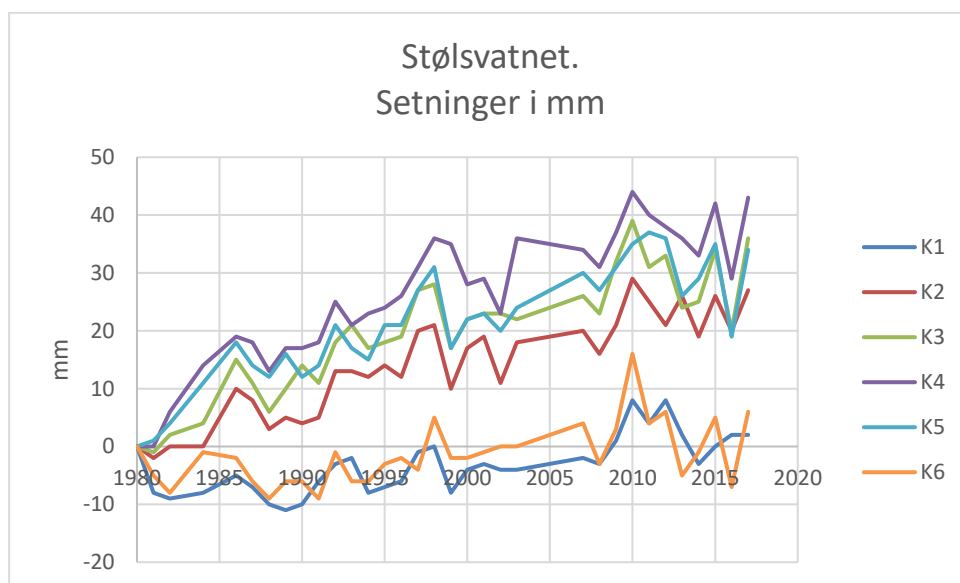
Målingene viser at de totale setningene har vært små. Grafene viser også at setningsforløpet for alle boltene har hatt noenlunde samme variasjoner.

Tabell 1 Oversikt over målinger kjernebolter 1980 - 2017

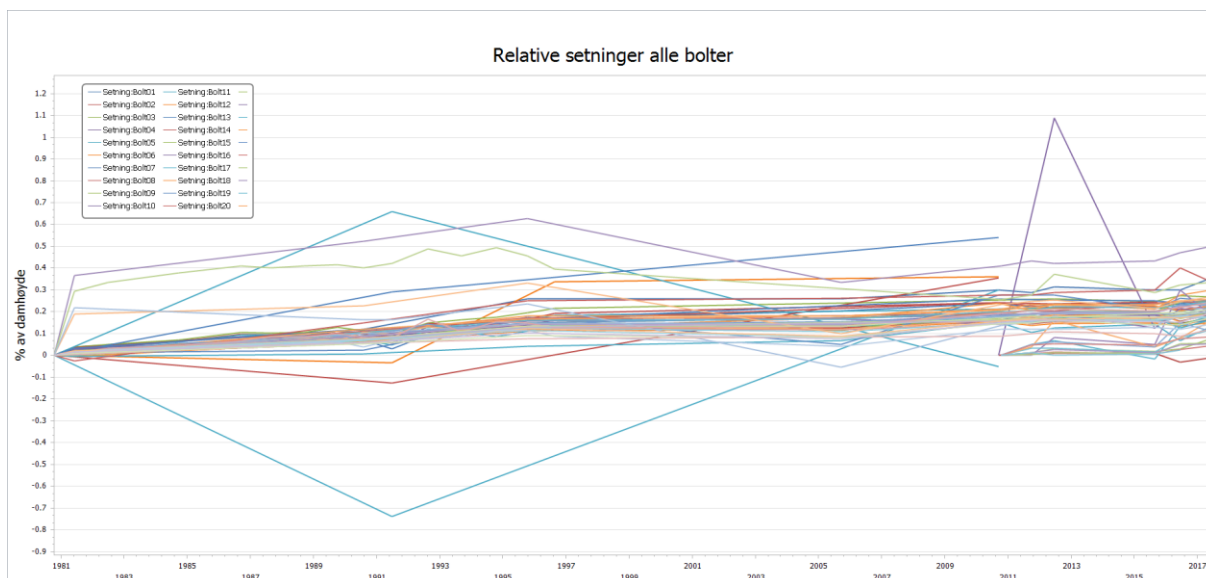
Kjernebolt nr.	Høyde i 1980 (Z) (m)	Høyde i 2017 (Z) (m)	Setning (ΔZ) (mm)	Opprinnleg høyde	% setning av høyde
K1	589,009	589,007	-2	15 m	0,01%
K2	589,522	589,495	-27	40 m	0,07%
K3	589,443	589,407	-36	42,5 m	0,08%
K4	589,754	589,711	-43	46,5 m	0,09%
K5	589,640	589,606	-34	36,5 m	0,09%
K6	589,284	589,278	-5	17 m	0,04



Figur 3-4 Stølsvatnet. Setninger i % av damhøyde i kjernebolter 1980-2017.



Figur 3-5 Stølsvatnet. Setninger i kjernebolter i mm 1980-2017.



Figur 3-6 Dam Stølsvatnet. Relative setninger alle bolter 1981-2017.

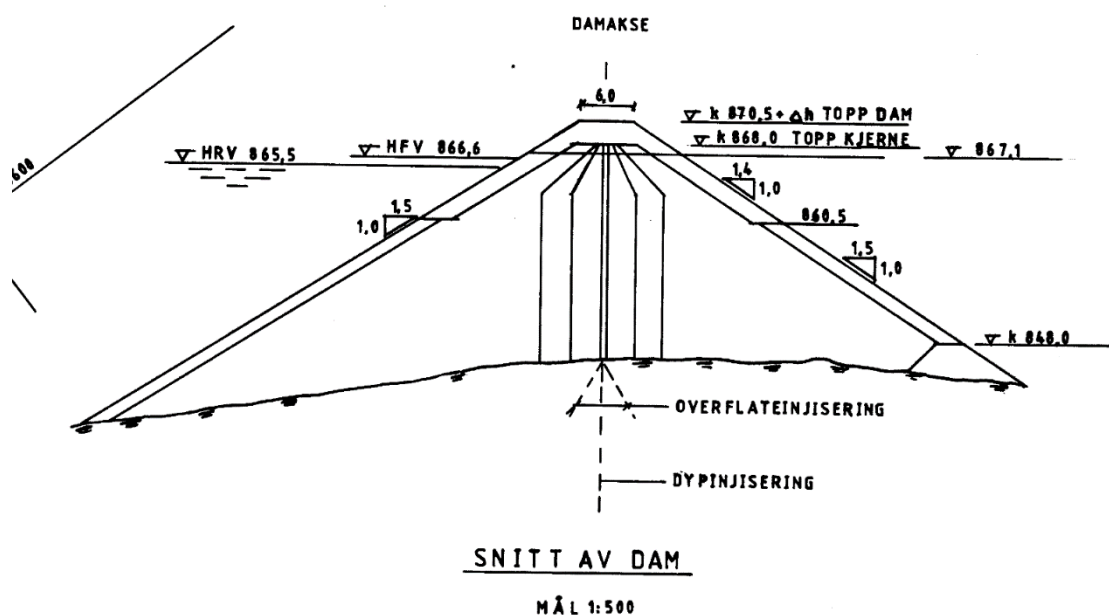
Basert på måleresultatene ser vi at dammen har små og mindre setninger enn forventet.

3.4 Eksempel: Dam Holskardvatnet i Modalsvassdraget – overført til Evanger

Dam Holskardvatnet ligger i Modalsvassdraget, men er overført til Evanger kraftverk. Dammen er en steinfyllingsdam med sentraltetning av pukk bitumen. Dammen ble bygget i perioden 1982 til 1984. Holskardvatnet er et reguleringsmagasin i tilknytning til Evanger kraftverk.

Dammen er 25 m høy på det høyeste. HRV er 865,50 m.o.h. og LRV er 796,00 m.o.h. Dimensjonerende flomvannstand er 866,67 m.o.h. Topp krone ligger på kote 870,50 m.o.h, og prosjektert topp tetning skal ligge på kote 868,0 m.o.h i tillegg er det sigemonn på toppen av dette.

Magasin vannstanden har mindre årlige variasjoner enn tilfellet er for f.eks Dam Stølsvatnet.



Figur 3-7 Skisse av tverrsnitt av Dam Holskardvatn, utsnitt fra tegning BKK nr 22632

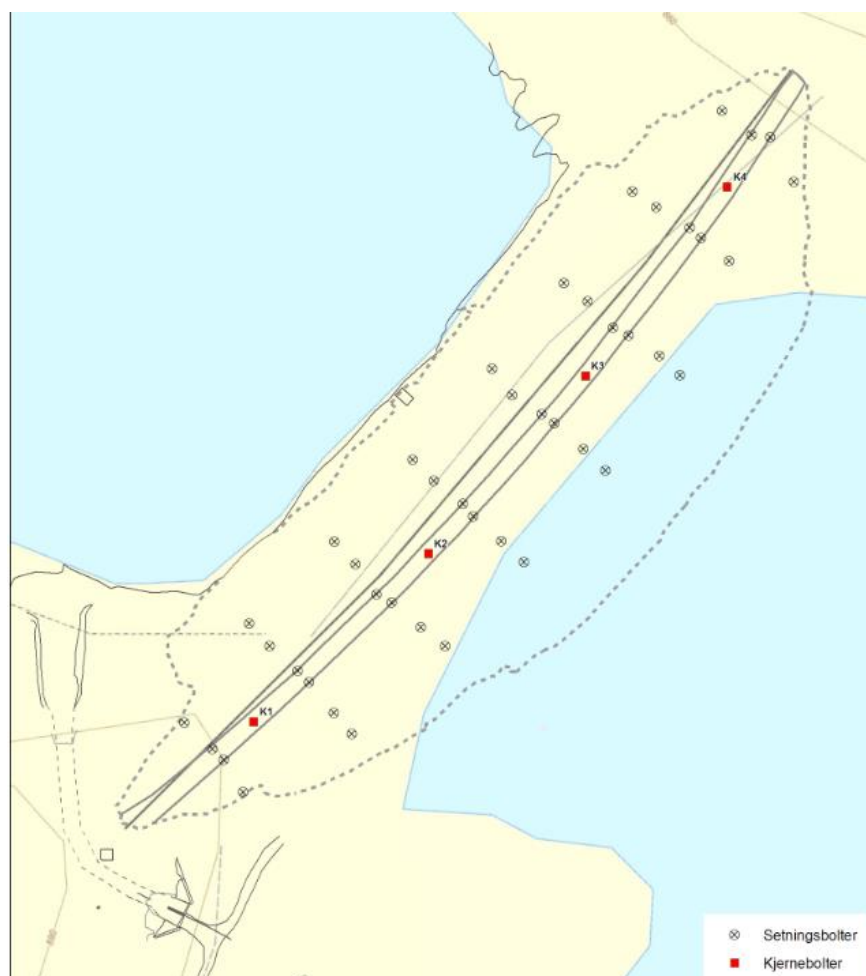
Bredden av tetningskjernen er 0,5 m. Dammen er 328 m lang på toppen.

Det er montert 4 bolter for setningskontroll av tetningskjernen (i kummer), det er videre plassert 23 bolter på luftsiden og 20 bolter på vannsiden for kontroll av setninger og deformasjonsmåling.

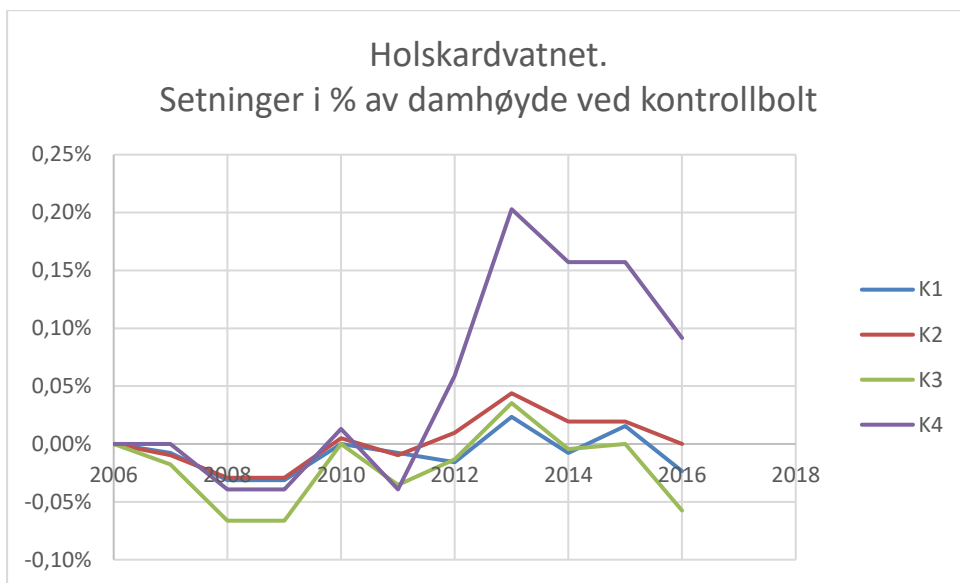
Kjerneboltene ble etter første innmåling inspisert fysisk ved hvert periodisk tilsyn, men ikke målt. Det ble da skrevet i rapportene om at det var tegn til setning på kjernen. Selve kjerneboltene ble først montert senere i 2004. Det er bare data for målinger etter 2006 som er lagt inn i programmet «Måledata for dammer».

Tabell 2 Oversikt over setningsmålinger Holskardvatnet 2006-2016

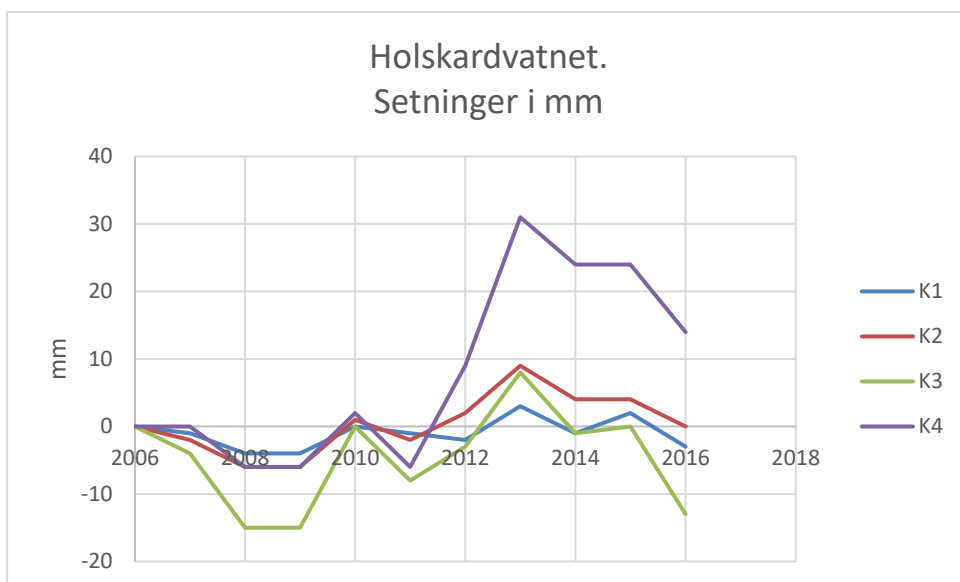
Kjernebolt nr.	Høyde i 2006 (Z) (m)	Høyde i 2016 (Z) (m)	Setning (ΔZ) (mm)	Opprinnlig høyde	% setning av opprinnelig høyde
K1	868,351	868,354	+3	12,8 m	-0,02%
K2	868,292	868,292	0	20,53 m	0
K3	868,370	868,383	+13	22,62 m	-0,06%
K4	868,317	868,303	-14	15,28	0,09%



Figur 3-8 Holskardvatnet. Kontrollbolter



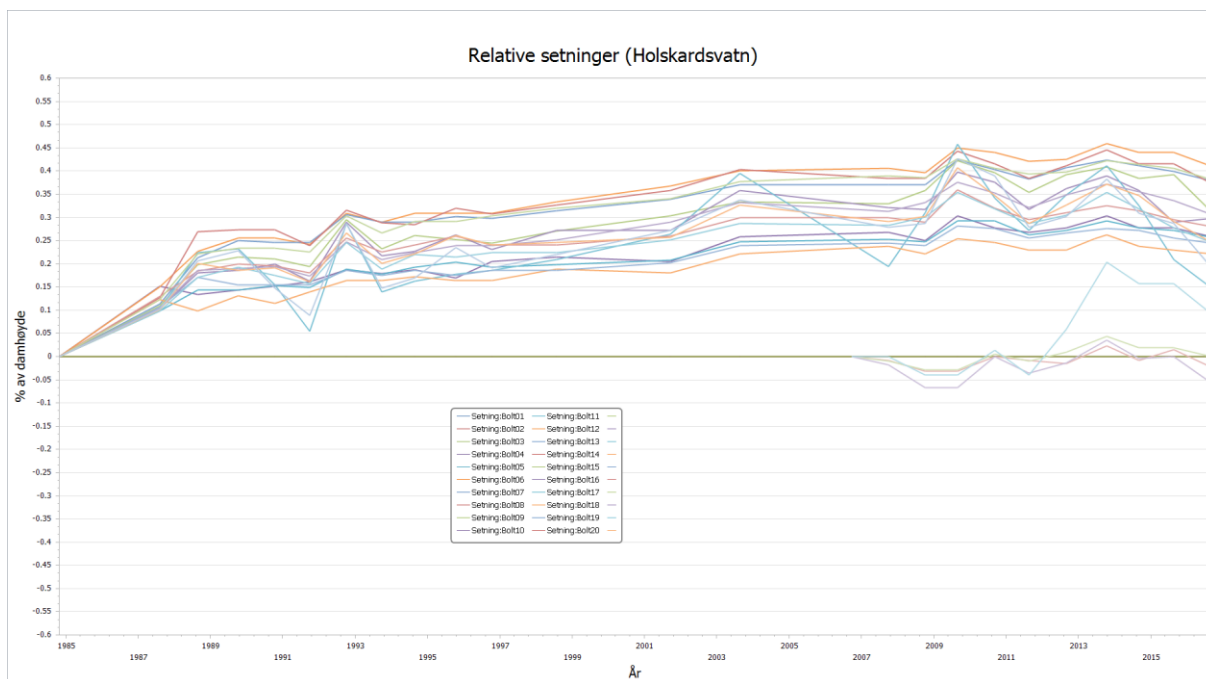
Figur 3-9 Holskardvatnet. Setninger i % av damhøyde.



Figur 3-10 Holskardvatnet. Setninger i mm (2006-2017)

Setningsmålingene av tetningskjernen, se figurene over, viser at det totalt sett har vært små setninger i dammen. Grafene viser også at setningsforløpet for tre av fire av boltene har hatt noenlunde samme variasjoner, men med et lite avvik for bolt K4: Dette er likevel er godt innenfor det som kan forventes. For de andre boltene i dammen er det ikke funnet store forskyvninger eller deformasjoner.

Dammen ble revurdert i 2001-2005. Overløpsdammen ble stabilisert i 2012.



Figur 3-11: Holskardvatnet. Relative setninger alle bolter

3.5 Eksempel: Dam Svartavatnet i Samnangervassdraget

Dam Svartavatnet i Samnanger og ble opprinnelig bygd i 1923 som en betongdam med bruddstein. I 1975 ble dammen påbygd på luftsiden med bruddstein for å stabilisere dammen. I 1982 ble den gamle dammen bygd inn i en steinfillingsdam med morenetetning, og HRV ble økt fra 620,9 m.o.h. til dagens HRV på 625,9 m.o.h.

Damkronen har en buet lengde på 180 m. Totalt steinvolum i fyllingsdammen er omlag 230 000 m³. Dammen ble oppgradert i 2012-2013 med forsterkning av damtå og bygging av lekkasjemåleutstyr. Svartavatnet er inntaksmagasin til Kvittingen kraftverk. Dammen ble revurdert i 2003 og etter planen skal ny revurdering være utført innen utgangen av 2018.

Dammen er 34 m høy på det høyeste. Dimensjonerende flomvannstand er 627,73 (ref. flomberegning datert 2010). Topp krone ligger på kote 630,5, og topp tetning ligger på ca kote 628.

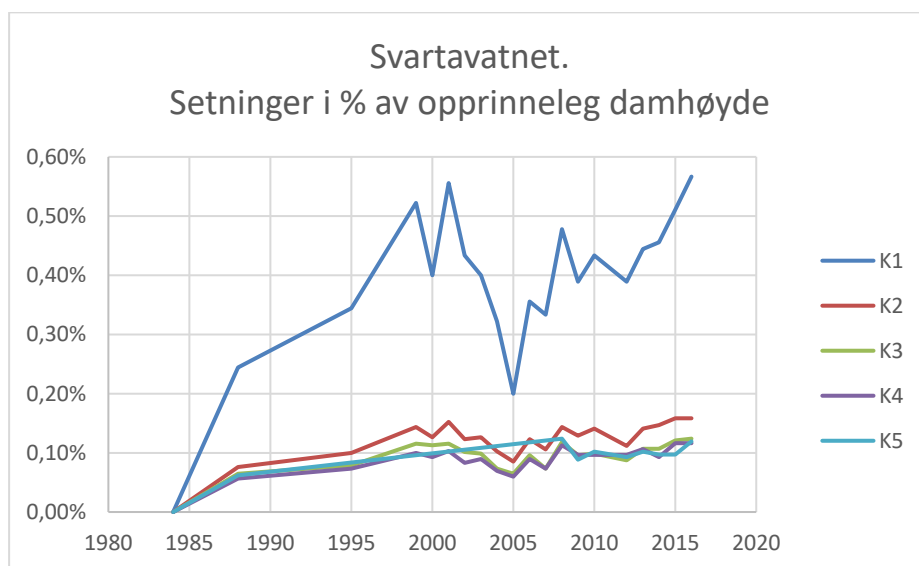
Det er montert totalt 38 bolter for setningskontroll og deformasjonsmåling, der fem er for setningskontroll av tetningskjernen plassert i kummer i damkrona, og det er videre plassert 25 bolter på luftsiden og 8 bolter på vannsiden for kontroll av setning og deformasjon.

Tabell 3 Sammendrag av setningsmålinger for Svartavatnet i Samnanger 1984-2016

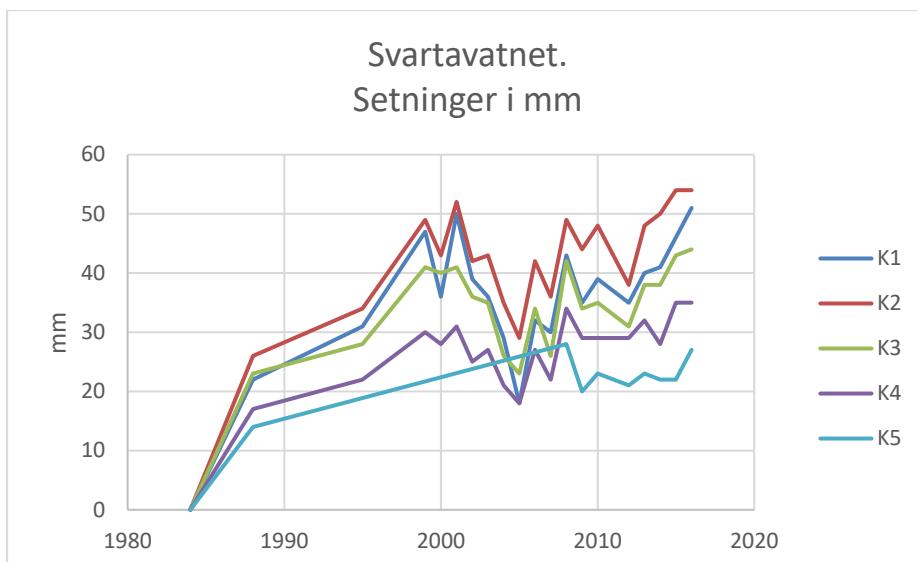
Kjernebolt nr.	Høyde i 1984 (Z) (m)	Høyde i 2016 (Z) (m)	Setning (ΔZ) (mm)	Opprinnleg høyde	% setning av høyde pr 2017
K1	630,600	630,549	-51	9	0,57%
K2	630,641	630,587	-54	34,1	0,16%
K3	630,482	630,438	-44	35,5	0,12%
K4	630,312	630,277	-35	30,1	0,12%
K5	630,434	630,407	-27	22,6	0,12%



Figur 3-12 Kontrollbolter Svartavatnet

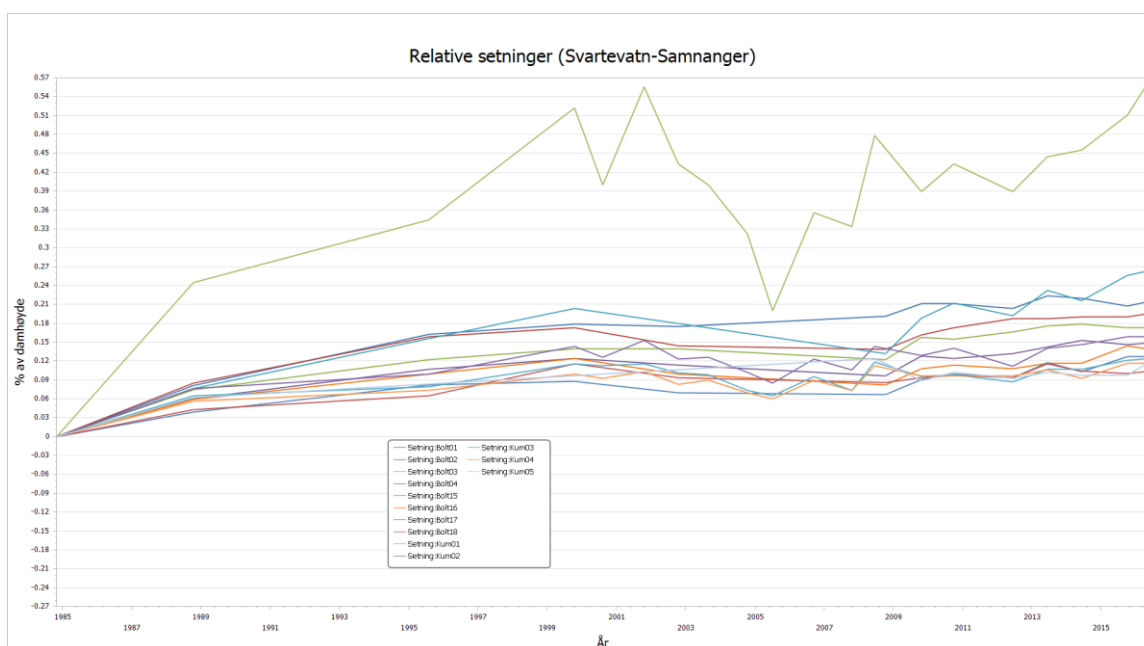


Figur 3-13 Dam Svartavatnet. Setninger i % av damhøyde.

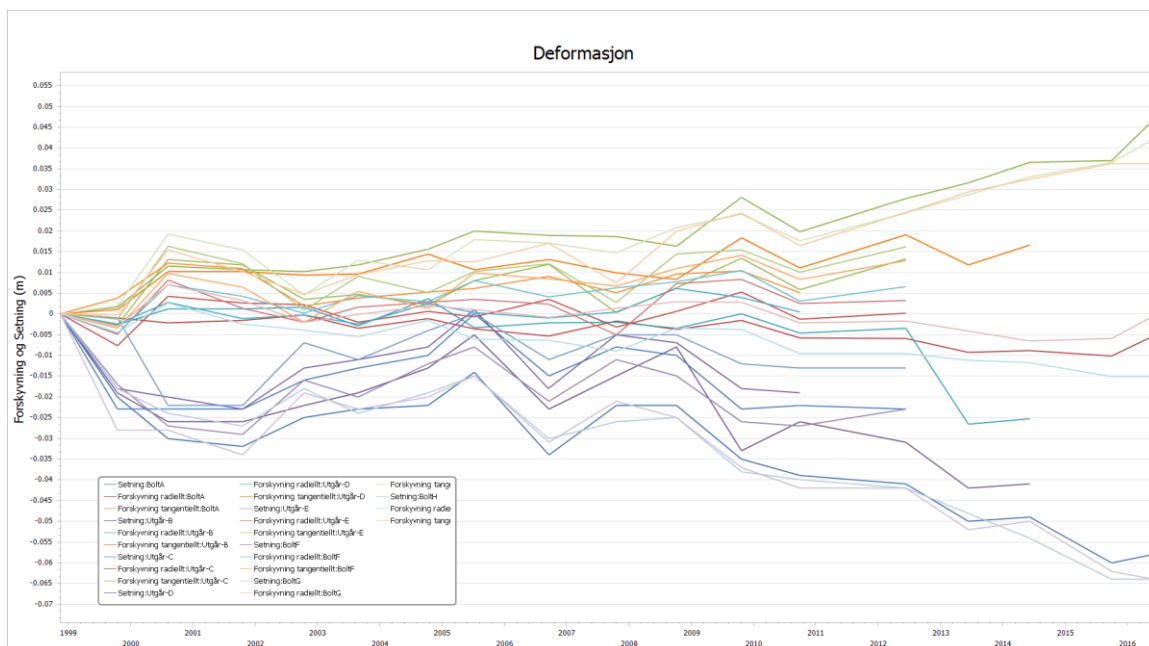


Figur 3-14 Dam Svartavatnet. Setninger i mm (1986 – 2016).

De totale setningene har totalt sett vært små og mindre enn det som kan forventes. Bolt K1 har hatt relativt større bevegelse enn de andre boltene, men målt setning i mm for bolten er ikke spesielt avvikende i forhold til de andre boltene.



Figur 3-15 Dam Svartavatnet. Relative setninger alle bolter.



Figur 3-16 Dam Svartavatnet, Deformasjoner (radielt, tangentielt og setninger) i mm for alle bolter.

3.6 Konklusjon

Normalt antas setninger på 0,5 – 1,0 % av damhøyden å være rimelig over dammens levetid, men ofte er setningene mindre. Et forbedringspotensial som er avdekket er at måten målingene gjennomføres og logges på kan forenkles uten at mengden data reduseres.

Nye metoder for datafangst ved skanning, satellitt, radar eller fotogrammetri kan gi betydelig utvidet informasjon om damdeformasjoner. Dette vil redusere arbeidet med deformasjonsmålingene, og kan effektivisere deformasjonskontrollen for mange dameiere, da en ikke blir avhengig av å ha med landmåler. Nye metoder der man lager terrengmodeller med høy oppløsning av hele damanlegg vil være et godt supplement til å vurdere tilstand og ikke minst å oppdage eventuelle deformasjoner i dammene over tid.

Innenfor setningsmålinger er det pekt på nytteverdi av direkte bearbeiding av landmålingsdata i felt, for eventuelt å avdekke mulige deformasjoner tidlig. I tillegg er det flere nye metoder som bidrar til å øke overvåking og dokumentasjon på utvikling av deformasjoner. Spesielt muligheter for laserskanning, drone, satellittmålinger for å lage 3D- modeller er ventet å bli et viktig bidrag framover.

Blant annet har drone vist seg å være et effektivt, lett tilgjengelig hjelpemiddel og hvor utviklingen er ventet å være betydelig fremover.

4 UTVIDET MÅLEPROGRAM FOR BETONGDAMMER

I dette tilfelle er hensikten å overvåke deformasjoner i en hvelvdam hvor det er påvist alkalireaksjoner. Utviklingen i deformasjoner og volumutvidelse skjer langsomt i norske dammer som er utsatt for alkalireaksjoner. Men over tid kan betongsvellingen redusere dammens sikkerhet og damlukenes manøvreringsevne.

For å få et riktig bilde av deformasjoner som skyldes kjemiske reaksjoner i betongen, må andre størrelser som gir bevegelser og deformasjoner i dammen, registreres samtidig. Måleutstyret må være svært nøyaktig og måleseriene må gå over mange år.

4.1 Alkalireaksjon – hva skjer og virkningen av dette?

Alkaliereaksjoner er reaksjoner mellom alkalier i sementen i betongen og spesielle reaktive mineraler i tilslaget. Ved reaksjonen dannes en gel som gir volumutvidelse og dermed indre spenninger i betongkonstruksjonen, og som igjen fører til oppsprekking og med tiden nedbryting av betongen. Reaksjonen krever minst 80% fuktighet i betongen, alkalier (som det er nok av i vanlig sement) og reaktivt tilslag. Reaksjonshastigheten øker med stigende temperatur.

Det som normalt kjennetegner alkalireaksjonene er en kombinasjon av krakelering, oppsprekking, og utfelling av gel i sprekke. Det er geldannelsen i riss og sprekker som gir svelling av betongen. I Norge er det reaktive elementet i tilslaget av en type silikater som reagerer så langsomt, at de første rissene i det karakteristiske krakelermønsteret blir synlige i overflaten først 10 – 20 år etter at konstruksjonen er støpt. Krakelermønsteret kommer først til syne på deler av konstruksjonen som har høyest temperatur - vanligvis der betongflatene er mest eksponert for sollys. Gelutfelling fra rissene er et sikkert tegn på at krakeleringen skyldes alkalireaksjoner.

I større konstruksjoner kan deformasjoner pga volumutvidelser være første sikre signal på at en alkalireaksjon er i gang. Indikasjoner kan være at svinnfuger klemmes sammen slik at fugemateriale tyter ut og betong mot fugene sprekker. For platedammer har vi mange eksempler på dette, og spesielt utsatt er knekkpunkter i damaksen. For gravitasjonsdammer er følgene av alkalireaksjoner mindre alvorlige, men oppsprekking kan gi øket poretrykk i dammen, og dermed dårligere stabilitet. For hvelvdammer er det registrert vertikal bevegelse (oppover) i krone, og horisontal bevegelse som varierer med nivå i dammen, mot magasinet. Betongsvellingen gjør at spenningene i dammen endres utover det som var tatt hensyn til under prosjekteringen.

Vi har flere eksempler på at det har vært gjort tiltak for hindre forkiling av luker som er innstøpt i betong hvor det skjer alkalireaksjoner. I flere større kraftstasjoner har betongsvellingen av samme årsak vært holdt under oppsikt. Dette for å kunne iverksette tiltak i tide og før elektro-mekanisk utstyr tar skade.

Når det først er brukt et reaktivt tilslag, er det lite som kan gjøres for å hindre utviklingen. Dammer står – ut fra sin funksjon – i fuktig miljø, slik at å etablere og opprettholde et tørt miljø i store deler av konstruksjonen er nærmest umulig.

Alkalireaksjoner er en irreversibel skadetype som med tiden kan få store negative konsekvenser for konstruksjonen, og i verste fall også få alvorlige konsekvenser for tilstøtende konstruksjoner. I forbindelse med tilsyn er det derfor viktig å registrere utviklingen mot objektive referanser. I tilfeller der følger av reaksjonen (volumutvidelse) kan gå ut over damsikkerheten, bør instrumentering installeres, slik at det er tid nok for planlegging og iverksetting av nødvendige tiltak før virkningene blir kritiske.

4.2 Dam Rødberg - utvidet måleprogram

I Dam Rødberg er det påvist alkalireaksjoner, og her har Statkraft besluttet å sette i gang et utvidet måleprogram, for bedre å forstå oppførselen til dammen og sikre kontinuerlig drift av dammen ved mindre ombyggingstiltak.

Dam Rødberg er en hvelvdam utsatt for alkalireaksjoner. Ved høyre vederlag er hvelvet avsluttet mot en høy gravitasjonsseksjon som går videre over i en seksjon med flomluke. Effekten av alkalireaksjonene på dammen er foreløpig ukjente. Analyser viser at kun en mindre utvidelse som følge av alkalireaksjoner vil påvirke hvelvet negativt og utgjøre et destabiliserende bidrag. Omfanget av reaksjonene er usikkert; reaksjonene kan eskalere, avta eller stå stille.

Overvåking vil kunne bidra til å kartlegge samvirke mellom hvelv, gravitasjonsdam og lukeseksjon. Dette er av interesse både i forhold til overføring av krefter mellom konstruksjonene, og for å overvåke effekten av alkalireaksjoner på hvelv, gravitasjonsdam og lukeseksjon.



Figur 4-1: Dam Rødberg

I løpet av sommeren 2017 instrumenterte Statkraft dammen for å dokumentere hvelvets bevegelse og avdekke utviklingen i deformasjoner pga av alkalireaksjonene, og ønsker med dette å teste forskjellige instrumenteringsmetoder og databehandlingsteknikker for langtidsplanlegging av riktige tiltak på dammen, samt prøve ut ny teknikk for overvåking av deformasjoner i hvelvdammer.

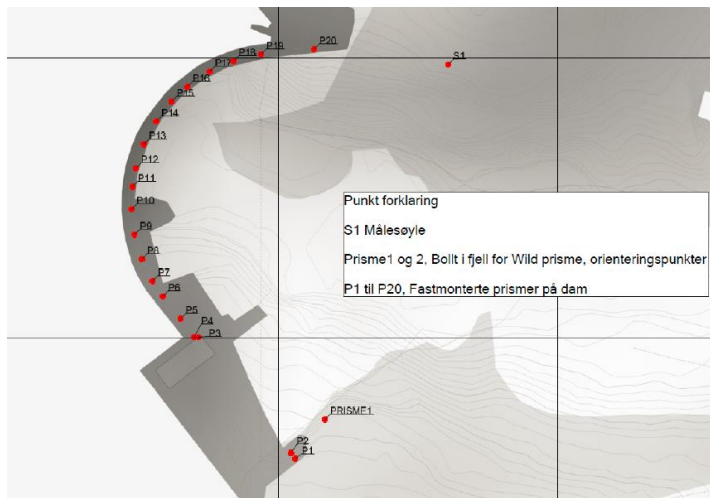
Instrumenteringen består av to typer:

- Målepunkter på kronen der fastmonterte prismer måles av en totalstasjon. Denne metoden er vanlig i Norge, men gir et veldig begrenset bilde av situasjonen og er som regel av liten verdi. Målinger bør skje ved lik temperatur og magasin vannstand.
- Installasjon av inklinometer nedover langs hvelvet for å måle hvelvets bevegelse hver 0,5 m. Dette er mer en internasjonal målemetode som gir en høy nøyaktighet.

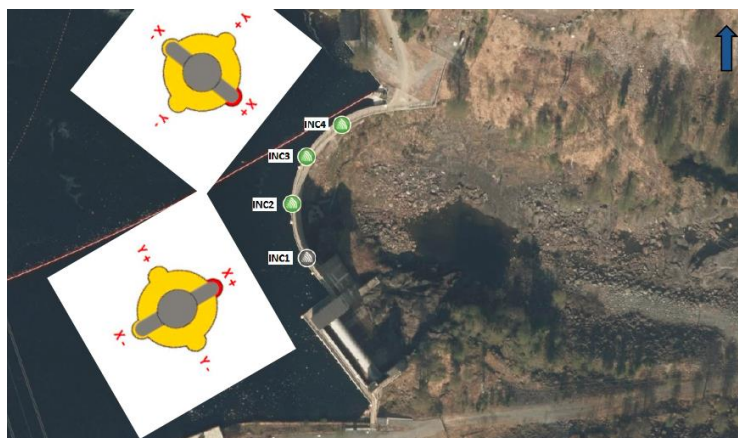
4.2.1 Om inklinometeret:

SAAF500 er en sammenhengende kabel bestående av 500 mm lange målesegmenter. Disse segmentene inneholder MEMS sensorer som måler vinkelendringer mellom segmentene med veldig høy nøyaktighet. SAAF500 monteres i en kanal eller et plastrør med en indre diameter på minimum 27-29 mm, det går en datakabel fra enden av sensoren til et loggerskap. SAAF-systemet er et robust system som kan benyttes til både horisontale og vertikale deformasjonsmålinger. Nøyaktigheten for en

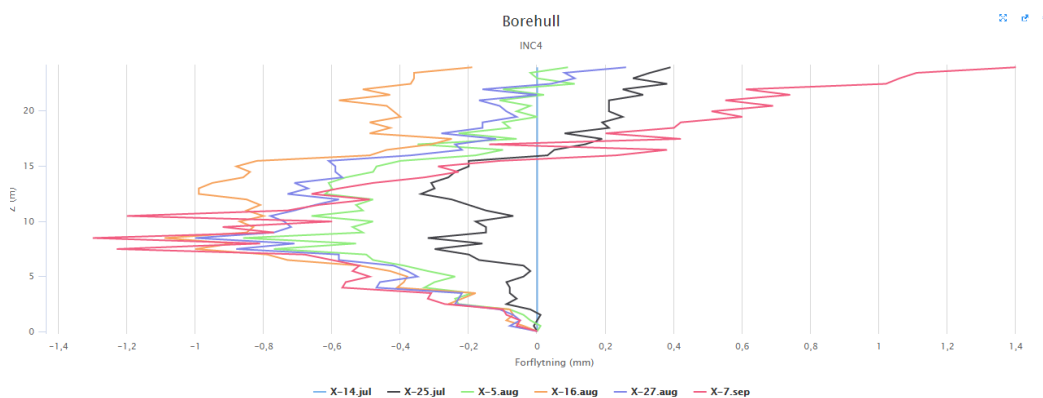
32 meter lang sensor er på ca 1,5 mm. SAAF-instrumentet måler temperaturen langs hele lengden av sensoren og bruker så denne informasjonen i deformasjonsberegningen for å oppnå så gode måleresultat som mulig og på den måten minimere påvirkningen av temperaturendringer



Figur 4-2 Plassering av målepunkter på damkrone



Figur 4-3 Plassering av inklinometere nedover langs hvelvet.



Figur 4-4 Eksempel på presentasjon av resultat fra måling. Her er det ca 8 uker mellom første og siste måling, noe som er for kort periode til å si noe om bevegelser pga alkalireaksjon.

4.3 Regelverk

Ifølge Damsikkerhetsforskriften (DSF), § 7-2 skal det utarbeides en plan for overvåking som omfatter interntilsyn, instrumentering og målinger med grenseverdier for aktuelle måleparameter. I retningslinjen til DSF gir følgende formål for instrumentering av dammer i driftsfasen:

1. Identifisere prosesser som kan påvirke dammens sikkerhet og dermed muliggjøre planlegging av tiltak på kort og lang sikt.
2. Gi varsel om og identifisere unormale situasjoner ved dammen som kan kreve et spesielt tilsyn eller igangsetting av en beredskapsplan.

Hensikten med instrumentering er å avdekke trender og eventuell unormal oppførsel ved anlegget. Måledata bør derfor fortløpende evalueres og tolkes i forhold til:

- Nøyaktigheten av de forskjellige målingene.
- Avvik og hurtige endringer i måledataene.
- I hvilken grad målingene er påvirket av andre parametere

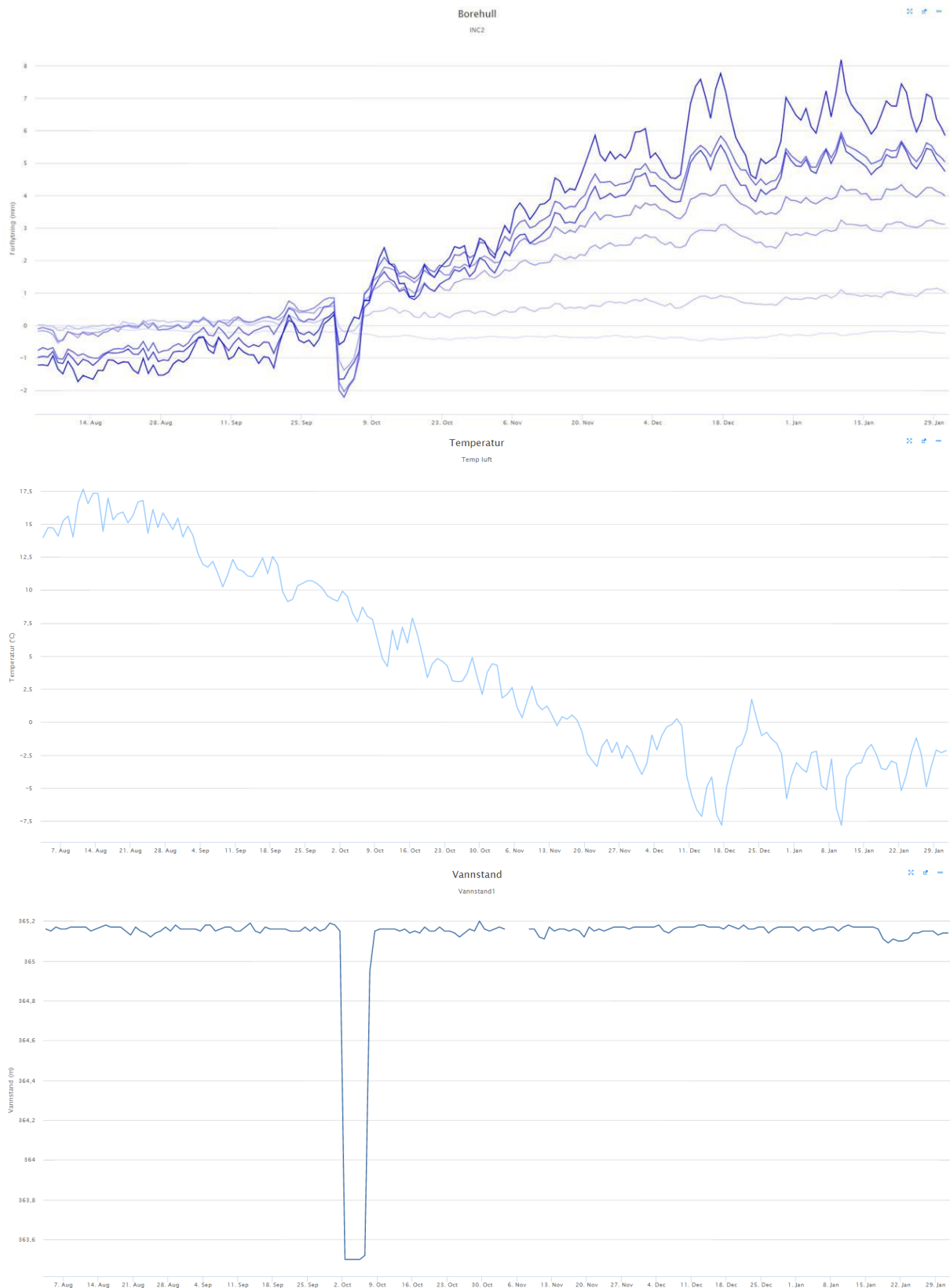
4.4 Gjennomføring av måleprogrammet

Statkraft gjennomfører måleprogrammet som omfatter oppmåling, etablering av målesøyle, målepunkter, kjøp av utstyr, arbeid og innfesting av SAAF kabler samt bearbeiding av data. Prosjektet er av stor interesse både fordi det bruker flere typer av data og flere målemetoder for å verifisere metodene. Prosjektet er av allmenn nytte for dameiere.

Deformasjonsutvikling pga alkalireaksjoner er en langsom prosess. Eksempelvis er deformasjoner pga alkalireaksjoner i Bjølsegrødammen (Statkraft, Bjølvefossen kraftverk, ref. Hans Martin Skjefstads masteroppgave, 2012.) i løpet av 61 år estimert på grunnlag av målinger til ca 70 mm eller 0,8 promille lengdeøkning langs krone, og 30,5 mm eller 1,4 promille (fri) økning i høyde. I Votnadammen i Røldal er betongutvidelse på grunnlag av målinger vurdert til 0,44 – 0,54 promille i målepunktene med størst bevegelse, i løpet av ti år fra 1980 til 1990. (Ref Damsikkerhet II Betongdammer, Nils Ødegård 1992). Grafen på neste side viser - regnet ovenfra- deformasjon, temperatur og magasin vannstand. Det er god korrelasjon mht deformasjon versus temperatur, og deformasjon versus magasin vannstand. Dammen responderer raskt på endringer i temperatur og magasin vannstand, og disse små bevegelsene pga noen graders temperatur- eller vannstandsending vil tilsvare mange år med deformasjon pga alkalireaksjoner. Over et halvt års tid ser vi at hvelvet beveger seg mot luftsiden etter hvert som temperaturen synker. Bevegelse i denne retningen betyr at volumreduksjon pga temperaturfallet er større enn volumøkning pga alkalireaksjoner.

Et par meters senkning av magasin vannstanden gir en umiddelbar bevegelse på et par mm mot vannsiden.

Måleutstyret montert på Dam Rødberg, har en imponerende nøyaktighet og gir dameier god kontroll med dammens kontinuerlige bevegelser. Dameier vil få tydelig varsler om uventet og unormale situasjoner oppstår. For entydige resultater fra målingene som nå er igangsatt i Dam Rødberg, vil det imidlertid ta tid før en kan konkludere i forhold til alkaliekiselpåvirkning.



Figur 4-5 Grafer som viser deformasjon i dammen, lufttemperatur og magasinvannstand over et halvt år, fra ca 7. august 2017 til 29. januar 2018.

5 ISLAST PÅ DAMMER

5.1 Oppsummering

Ved revurdering og etterkontroll av eldre dammer er det vanskelig å oppnå tilstrekkelig stabilitet når kravet til islast på 100 kN/m (~10 tonn/m) legges til grunn for stabilitetskontrollen. Manglende stabilitet med hensyn på islast er ofte utløsende for omfattende ombygging og stabilisering av mindre mur- og betongdammer. Erfaringene både fra BKK og andre dameiere er at det sjelden observeres skader på dammer som kan tilskrives islast. Riktignok finner vi «fasadeskader» på dammer og andre konstruksjoner fra frysing/frostsprenning, men dette skyldes ikke islast slik det er beskrevet i Damsikkerhetsforskriften.

Det er betimelig å spørre om kravet til dimensjonerende islast er for bastant i dagens forskrifter, eller om en i større grad skulle gitt åpning for bruk av skjønn ved stabilitetskontroll. Videre bør det gis muligheter for å velge alternative løsninger som overvåking av islegging, muligheter for vinter-senking av vannstand og andre tiltak som hindrer oppbygging av islast utover det den aktuelle dammen kan tåle.

5.2 Historikk

Dambyggere har alltid vært klar over isens evne til å utvide seg når temperaturen i isen synker. Tilsvarende har isens sprengkraft skapt problemer for den som har lagt vannrør eller bygget vannkanaler.

Krav om dimensjonerende islast kom inn i de første damforskriftene fra 1981 punkt 6.5.3 der det heter:

Karakteristiske verdier for istrykk fastsettes etter vurdering av de klimatiske og topografiske forhold på stedet.

I vedlegget til forskriften «Regler og anbefalinger» heter det mellom annet:

Vanligvis bør det ikke regnes med mindre verdi for karakteristisk istrykk enn 100 kN/m for dammer og tilstøtende konstruksjoner. Lasten regnes å angripe 250 mm under HRV.

Før 1981 var det gjerne vanlig å regne et istrykk på mellom 30 og 50 kN/m pr. meter. Likevel finner vi brukt høyere dimensjonerende istrykk brukt ved beregning av dammer høyt til fjells.

For BKKs tre-, mur- og betongdammer har det historisk vært brukt ulike størrelser for dimensjonerende islast. Ulikhetene skyldes nok at det var ulike personer som har dimensjonert dammene. Her er 4 tilfeldige eksempler på hvilken last som er lagt til grunn:

- 1939. Murdammene ved Øvre og Nedre Dukavatnet, Samnangervassdraget, ligger 800 m.o.h. og ble i dimensjonert for en islast 100 kN/meter (egentlig oppgitt som 10 tonn/meter). Revurdering pågår.
- 1950. Den 9 meter høye betongplatedammen ved Nedre Botnavatnet, Osterøy (280 m.o.h.) er dimensjonert uten hensyn til islast. Dammen ligger kystnært i et område med vekslende temperatur og værforhold gjennom en vanlig vinter. Arbeid med teknisk plan for forsterking av dammen pågår.
- 1960. Trebukkedammen ved Skjerjevatnet, i Haugsdalsvassdraget, 810 m.o.h. ble dimensjonert for 75 kN/meter islast i feltene, men med 100 kN/meter for selve trebukkene. Dammen ble oppført som er midlertidig regulering tidlig på 1960-tallet, men ble stående i nesten 30 år.

- 1966. Betongplatedammen ved Tverrvatnet, i Førdevassdraget, er 12 meter høy og ligger på sørsiden av Sognefjorden 488 m.o.h. Den er dimensjonert for en islast på 75 kN/meter. Revurdering pågår.



Figur 5-1 Betongplatedammen ved Nedre Botnavatnet, Osterøy, ble dimensjonert uten hensyn til islast.

BKK har i liten grad registrert skader på dammer som kan tilskrives islast. Bare trebukkedammen ved Skjerjevatnet som ble bygget ca. 1960 ble på 1980-tallet alvorlig skadet av istrykket fra det tilfrosne magasinet slik at dammen ble revet løs fra fundamentet og skjøvet bakover. Trolig hadde islegging av magasinet frosset fast i dammen og løftet dammen ved senere vannstandsstigning. «Dambruddet» førte ikke til alvorlige hendeseler da nedstrøms magasin hadde god kapasitet til å fange opp «bruddbølge» etter denne skaden. Det er ikke kjent nøyaktig når bruddet fant sted, eller om bruddet utviklet seg over lenger tid. Dammen ble ikke reparert, men senere revet og erstattet av nye fyllingsdammer i forbindelse med at magasin vannstanden ble hevet i 1989-1991.

Det må nevnes at BKK har hatt 6 andre trebukkedammer uten at det er registrert skader fra islast. I dag har BKK bare igjen en mindre trebukkedam. Denne er plassert i konsekvensklasse 0.

5.3 Vintersenking av magasinet - ett eksempel på alternativt tiltak

Etter revurderingen av murdammene ved Øvre og Nedre Dukavatnet i 1997 ble det konkludert med at dammene ikke var stabile med hensyn til dimensjonerende islast. Dette på tross av at dammene i 1939 ble bygget etter beregninger med en islast på 100 kN/meter.

BKK søkte NVE om en prøveordning med vintersenking av Øvre Dukevatnet med 1,7 meter og Nedre Dukevatnet med 1,6 meter. NVE ga tillatelse for en 5-årsperiode med vintersenking fra 1. desember – 1. juni. Senere ble prøveperioden forlenget med 10 år til 2016, deretter forlenget fram til at pågående revurdering blir avsluttet.



Figur 5-2 Bjelkestengsel i dammen ved Øvre Dukavatnet som benyttes for å vintersenke magasinet 1,7 meter under HRV i perioden 1.desember – 1.juni. Her står bjelkestengselet i «sommerstilling».

BKK har dokumentert i sitt FDV-system dato for fjerning og setting av bjelkestengsel vår og høst slik at vintersenkingen kan kontrolleres av NVE. Erfaringen med denne ordningen er svært god, og magasinet har på disse årene aldri vært over fastsatt vintervannstand i perioden 1.desember – 1.juni.

Ny revurderingsrapport i 2017 der dammens stabilitet kontrolleres etter et skjerpet regelverk i forhold til tidligere revurdering, viser at dammene ikke er stabile selv med vintersenkingen innført i 2001. BKK må derfor nå vurdere om det skal gjøres en full oppgradering av dammene uten vintersenking, eller om det skal velges en kombinasjonsløsning med vintersenking og stabiliserende tiltak.

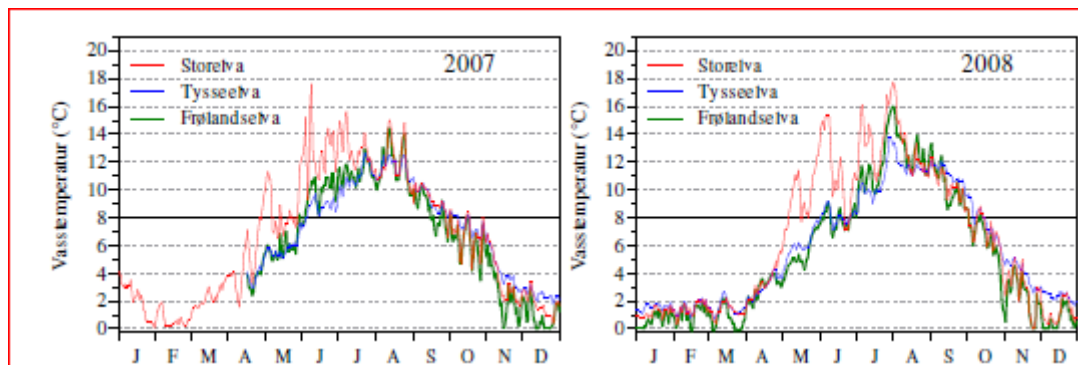
5.4 Flexibel vurdering

Med få eksempler av isskader på dammer må det være relevant å få mer fleksible løsninger når gjeldende dimensjoneringskrav ikke kan oppfylles.

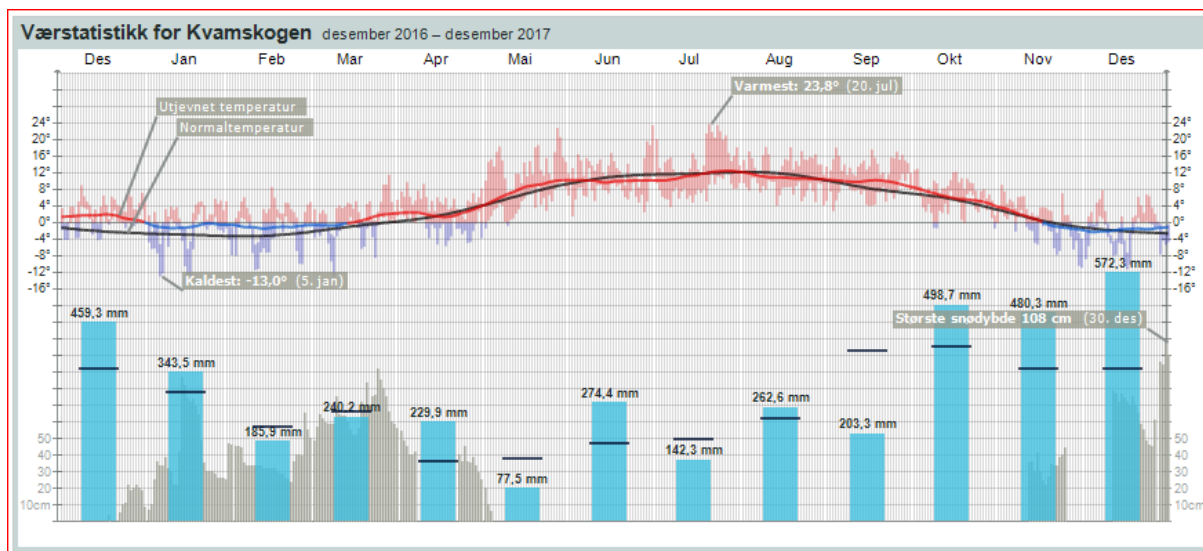
Retningslinjer for laster på dammer anbefaler at 100 kN/m benyttes som minimum islast, men det åpnes også for å bruke lavere islast. I praksis er det svært vanskelig å få aksept hos NVE for bruk av lavere last.

Retningslinjene legger til grunn at en last på 100 kN/m tilsvarer ½ meter istykkelse. For å oppnå denne istykkelsen må en regne med 20 minusgrader i snitt over en hel måned. Dette er svært uvanlig i kystnære områder i Sør-Norge.

Mulighetene for instrumentering/overvåking av temperatur og islegging, sammen med fjernstyrte luker og tappemuligheter, gir gode muligheter til å endre magasin vannstand og gjennomstrømming slik at faren for skadelig istrykk mot dammer og andre reguleringsanlegg reduseres vesentlig.



Figur 5-3 Regulantene har vanligvis mye lokale data, eksempelet i figuren over er vanntemperatur ved 3 ulike målesteder i Samnangervassdraget (BKK).



Figur 5-4 Etter hvert finnes også gode og lange serier for lufttemperaturen mange steder i landet som kan være aktuelle å benytte ved vurdering av islegging ved dammer og andre reguleringsanlegg (eksempel fra yr.no)

NVE bør også gi åpning for å bruke midlertidig eller permanent vintersenking av magasinene når dette kan være et aktuelt alternativ.

Det gis i dag muligheter til å fravike kravene til islast når det kan monteres varmelementer eller boble-anlegg som skal hindre islegging og dermed opptredende istrykk. Dette er best egnet for luker og mindre konstruksjoner. For dammer vil det vanligvis bli for kostbart både å installere og drifte.

5.5 Andre sine vurderinger av islast mot dammer

I Sveige er det i dag et regelverk som setter ulike krav til hvilke islaster som skal legges til grunn for dimensjonering og kontrollregning av dammer. Kravene varierer fra 50 – 200 kN/m alt etter dammenes plassering fra sør til nord i landet [4]. I denne rapporten erkjenner en også at det er manglende kunnskap om hvordan islaster opptrer og hvilke krav som bør settes for islast på dammer.

I masteroppgave fra Aslak Bøhle Foss (NTNU, juni 2017) er det sett på forsøk fra måling av istrykk mot dam. Forsøkene er gjort av NORUT i Narvik. I masteroppgavens heter det følgende:

Det ble konkludert med at størrelsen på sprekker, antall sprekker og % frysing av sprekker i et isdekke hadde stor påvirkning på opptredende islast ved vannstandvariasjon. De nevnte parameterne hadde, sammen med vannstandsvariasjon, istykkelse og temperaturendring størst påvirkning på både lastens maksimale verdi og isdekkets oppførsel.

Ved en samlet vurdering av alle komponentene presentert i oppgaven ble det konkludert med at dagens kunnskap om islast ikke er tilstrekkelig. Da is er et veldig komplisert materiale å beregne, er det nødvendig å utføre større og flere måleprogrammer på feltet i framtiden. Det ble også konkludert med at dagens regelverk både er utdatert og at datagrunnlaget regelverket er basert er for lite omfattende.

Både i disse publikasjonene og i andre undersøkelser stilles det spørsmål ved om det er godt nok grunnlag for gjeldende forskriftskrav. På denne bakgrunn mener BKK det må være en viss fleksibilitet i valg av tiltaket ut fra de faktiske islastene som kan forventes ut fra erfart historisk ispåvirkning. Her kan erfaring og forskning fra andre land med store klimatologiske variasjoner gi gode og nyttige innspill.

5.6 Konklusjon

Det er svært ulikt i hvilken grad dammer utsettes for islast. Magasin med hyppig varierende vannstand eller med stor gjennomstrømming fryser sjelden til og dammer ved slike magasin utsettes derfor nesten aldri for kritisk istrykk.

Anleggseierne bør på bakgrunn av lokale temperaturserier og driftserfaring kunne få aksept for mer lokalt vurderte islaster. Sammen med sanntidsovervåking av temperatur og islegging vil mange anlegg kunne avlastes ved å øke gjennomstrømming eller senke vannstand i kritiske kuldeperioder.

Det bør også i større grad åpnes for å benytte «alternative løsninger» som fast vintersenkning av magasinet. Dette kan være permanent lavere vannstand gjennom vinteren eller midlertidig senking av magasin i lenger kuldeperioder.

6 VANNSEINSPESJONER UTEN TØRRLEGGING VED HOVED- OG REVURDERINGSTILSYN

6.1 Oppsummering

Dagens regelverk åpner for bruk av ulike metoder for vannsideinspeksjon/kartlegging ved revurdering uten tørrlegging av damside eller annen anleggsdel. Det synes likevel som NVE ikke vil akseptere undervannskartlegging/skanning som eneste inspeksjonsmetode, men forutsetter kompletterende tilsyn som dykking eller ROV-inspeksjon (foto/video).

Erfaringene med bruk av undervannskamera og multistrålesonar er gode, og vi er inne i en rivende utvikling av utstyr som gir oss mange nye muligheter. Her kan nevnes muligheter for bruk av «grønn laser» og bruk av avanserte 2D og 3D kamera som nå testes ut for bruk i oppdrettsnæringen. BKK mener at målet må være å få aksept for at skanning er tilstrekkelig når en ellers ikke har indikasjoner på skader som krever nærmere undersøkelser ved tørrlegging, ROV eller bruk av dykker.

6.2 Innledning

Det er vanlig å tørrlegge vannsiden på dammer, luker og andre anleggsdeler i samband med revurderingstilsyn. Tørrlegging gir alltid best forhold for tilsyn, men kan være krevende og kostbart å få til. NVE aksepterer vanligvis revurderingstilsyn uten tørrlegging, noe retningslinjene også gir åpning for når det heter (retningslinjene, tabell 2-1):

Vannsideinspeksjon skal gjennomføres, ev. ved bruk av dykker m/kamera, fjernstyrt miniubåt, ol. NVE kan gi fritak fra full vannsideinspeksjon for anlegg i laveste bruddkonsekvensklasse.

Mulighetene for inspeksjon av vannsiden uten nedtapping videreføres i utkast til ny veileder for revurdering der det heter:

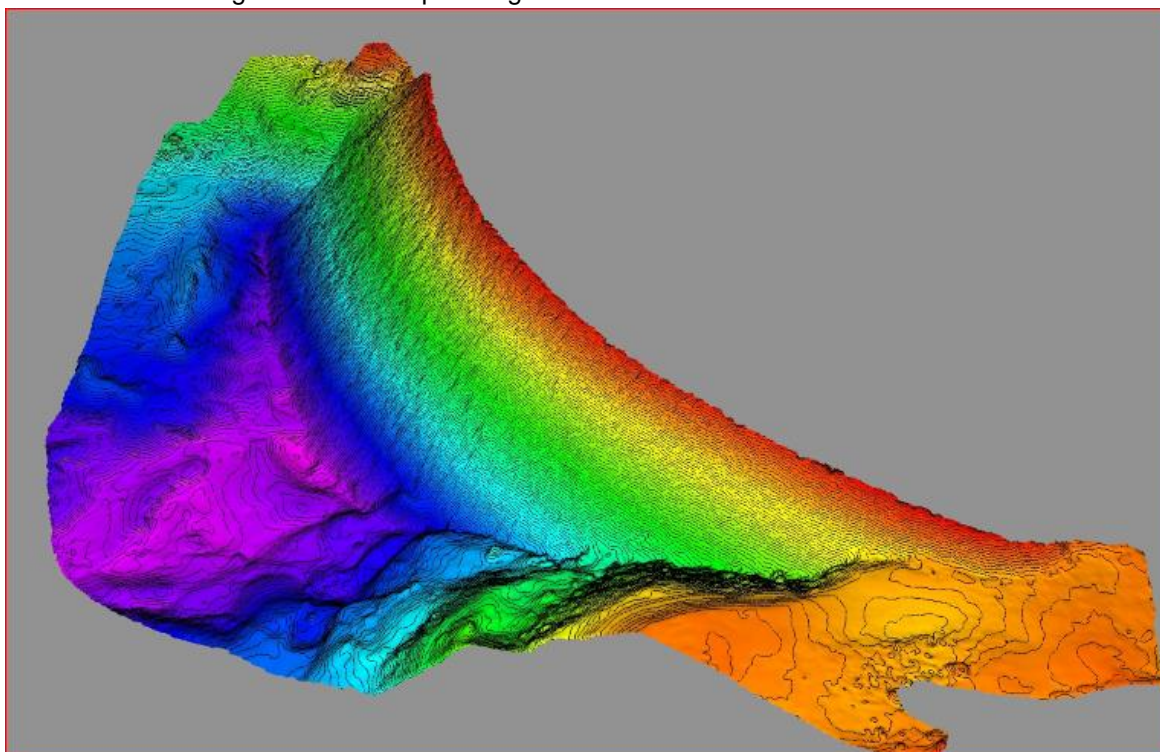
- «Vannsideinspeksjon kan gjennomføres med dykker eller ROV, eventuelt i kombinasjon med undervannskartlegging, for eksempel med multistråle-ekkolodd/skanning, dersom dette gir tilfredsstillende dokumentasjon for å vurdere sikkerheten. Slik gjennomføring kan være nødvendig for dammer for flerårsmagasin, dammer i elver eller dammer som ikke kan tørrlegges pga. klimatiske forhold. Det forutsettes da at fagansvarlig for revurderingen er til stede under inspeksjonen. Videre må kvaliteten på undervannsinspeksjonen, tilhørende testing og dokumentasjon være god nok til at fagansvarlig kan trekke sikre konklusjoner om anleggets tilstand, tilsvarende som ved inspeksjon av tørrlagt vannside.»
- «For noen dammer kan det være vanskelig eller umulig å tappe ned magasinet for vannsideinspeksjon i forbindelse med revurdering. NVE oppfordrer i slike tilfeller til at det blir gjennomført vannsideinspeksjon dersom magasinet blir tappet ned utenom planlagt revurderingstidspunkt, for eksempel ved lav magasin vannstand pga. tørrår.»

Med dette er det gitt gode muligheter for å foreta vannsideinspeksjon for anlegg i alle konsekvensklasser uten å tørrlegge dam eller andre anleggsdeler. NVE forutsetter likevel at undervannsskanning benyttes i kombinasjon med annen inspeksjon som dykker eller bruk av ROV.

6.3 Erfaringer fra tidligere skanning

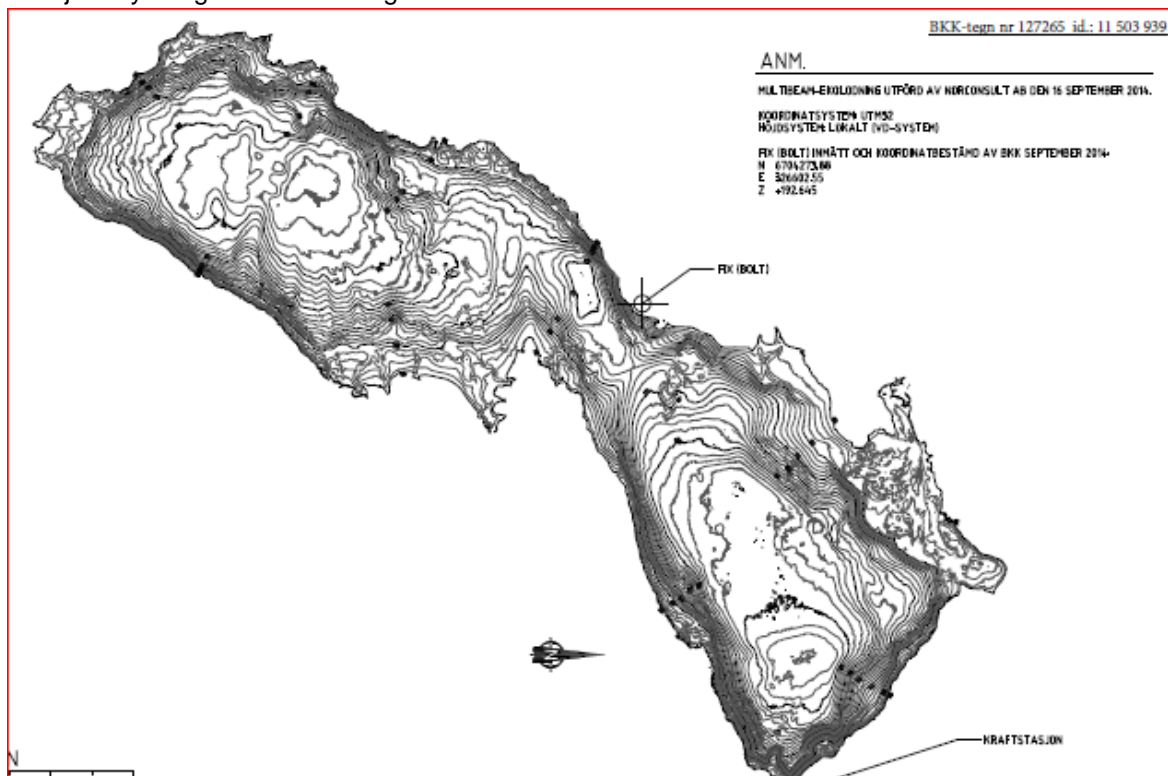
Allerede i 2003 testet BKK ut skanning av vannsiden som del av revurdering på fyllingsdammen ved Svartevatnet i Samnangervassdraget. På figur 6-1 viser vannside av dammen i vel 20 meters høyde scannet. Utstyret som da ble benyttet var relativt tungt og måtte rigges på en flåte, samt at skanningen

var relativt grov med en nøyaktighet rundt 0,5 meter. Dette var likevel tilstrekkelig til å avdekke om det skulle vært vesentlige skader i damplastringen.



Figur 6-1 Sonarkartlegging av vannside Dam Svartevatnet, Samnanger (2003).

BKK har også kartlagt magasinet med multistråle-ekkolodd. Dette er gjort med lettere utstyr fra en 15-fots båt som raskt kunne settes på vannet. Magasinet på figur 6-2 er ca. 1 km langt og ble skannet i løpet av en arbeidsdag. Magasinkartet er koordinatbestemt og tegnet med 1-meters koter, men kan detaljeres ytterligere om ønskelig.



Figur 6-2 Multibeam-ekkolodd for magasinkartlegging i Grønsdalsvatnet (Norconsult 2014).

BKK gjennomført revurderingstilsyn på dammen ved Svartavatnet i Haugsdalen i 2016. Dette er en vel 50 meter høy fyllingsdam med frontal betongplate. Her ble det benyttet ROV som fotograferte alle plateskjøter/fuger på hele vannsiden. Sammen med tidligere inspeksjon og fotografering av tørrlagt vannside for noen år tilbake, håper vi at NVE skal akseptere dette som fullverdig revurderingstilsyn av dammens oppstrøms side. Revurderingsrapporten er fortsatt under arbeid (januar 2018).



Figur 6-3 Demonstrasjon av ny ROV som kan kjøres flere kilometer inn i vanntunneler for å inspisere vannveien med luker og porter (foto: BKK 2017).

Statkraft har også prøvd ut skanning i samband med revurderingstilsyn på større dammer. Dette har gjerne vært i kombinasjon med oppmåling av hele dammen både på luft- og vannside. For undervannsmålinger i 2016 satte Statkraft følgende minimumskrav til utførelsen:

- Komplette innmåling og kartlegging av dammens vannside og magasinbunn.
- Kvalitet og nøyaktighet for alle oppdragene skal være iht. Kartverkets standard for produksjon av basis geodata.
- Det skulle benyttes multistråle ekkolodd basert på stråleforming (Beam Forming), maks 1x1 grad åpningsvinkel og minimum 400 kHz frekvens eller tilsvarende.
- Posisjonering med RTK GNSS (GPS og GLONASS), CPOS korreksjoner som et minimum eller basestasjon satt opp over et godt og helst offisielt fastpunkt. Nøyaktighet i plan skal være bedre enn 5 cm og i høyde 8 cm (CPOS).
- Bevegelses- og kurssensor, 0,03 grader pitch/roll og 0,05 grader heading. Tilsvarende eller bedre.
- Lydprofileringsutstyr som kan bestemme lydshastigheten i hele vannsøylen med min 5 cm/s nøyaktighet.
- Dataene leveres som punktsverm i sosi-format, bearbeidet kotekart og 3D-modell.

Statkraft sine erfaringer fra undervannsskanning er gode. Gitt at utstyret og skanningen har tilstrekkelig god kvalitet, kan skanning gi svært detaljerte modeller der eventuelle problemområder eller uregelmessigheter kommer godt til syne. ROV/dykker kan i etterkant benyttes for å se nærmere på ønska områder.

Det å få en god datamodell er en stor fordel fordi en i ro og mak kan studere modellen, og på en helt annen måte lete etter uregelmessigheter og problemområder. Deretter kan ny skanning foretas for

eksempel etter 5 år og da sammenlignes med tidligere skanning for å finne endringer. Dette vil gi dameier mye bedre muligheter for å analysere endringer enn dagens deformasjonsmålinger.

6.4 Drøfting av ulike metoder

Bruk av ROV (foto/video) eller dykker kan være fornuftig ved inspeksjon av en betongdams vannside eller en luke/lukepropp. En dykker vil kunne bruke redskap for å banke eller skrape i overflaten av betong og stål for å dokumentere tilstand. ROV vil kunne ta gode bilder langs en betongfuge og kunne registrere oppsprekking av betongflater. Både dykker og ROV vil kunne ta nøyaktige kontrollmålinger (cm/millimeter) av sprekker eller kontrollmåle bevegelser i fuger.

For tilsyn og kartlegging av større fyllingsdammers vannside mener BKK at skanning er suverent best. Vi forutsetter naturligvis posisjonsbestemt utstyr som kan skanne med slik nøyaktighet at en ved senere skanninger kan tegne et setningskart som viser bevegelser i plastringen eller en oppstrøms damplate. Selv kontroll av setningsbolter ved tørrlagt vannside gir en nøyaktighet på +/- 1 millimeter, og skanning bare kan gi en nøyaktighet på ca. 5 cm, vil det reelle behovet for kontroll av bevegelsen i en fyllingsdamside være tilstrekkelig med skanning.

6.5 Konklusjon

Erfaringene med bruk av undervannskamera og multistrålesonar er gode, og vi er inne i en rivende utvikling av utstyr som gir oss mange nye muligheter. BKK mener målet må være å få aksept for at skanning alene er tilstrekkelig. Hvis en da får indikasjoner på skader kan en supplere med nærmere undersøkelser som nedtapping, bruk av ROV eller dykker.

7 DOKUMENTASJON AV FLOMLØPSKAPASITETER MED CFD-SIMULERING

Kontroll av flomavledningskapasitet er en viktig del av revurdering av dammene. Mangelfull flomavledning fører til økt flomoppstuvning i magasinet med påfølgende fare for overtopping av tetningskjerne, hele dammen eller omliggende infrastruktur. Underdimensjonerte og dårlig fungerende flomløp har ført til flere alvorlige damhendelser både i Norge og internasjonalt.



Figur 7-1 Den vel 50 meter høye fyllingsdammen ved Stølsvatnet i Modalen er bygget med lukka flomløp.

Spesielt kritisk er lukka flomløp som flomtunneler og flomsjakter, da kapasiteten i et lukka vannløp øker lite etter at vannløpet først er fylt. Slike flomløp kan være komplisert å kontrollere siden vannstrømmen får mange retningsendringer underveis fra magasinet via overløpsterskel til samlekanal og videre gjennom innløp til sjakt/tunnel transporteres til nedstrøms side av dammen. Det er derfor vanlig at lukka overløp er bygget etter foregående modellforsøk, og at det er behov for nye modellforsøk i samband med senere ombygging/utvidelse av de samme flomløpene.

Et slikt eksempel er dammen ved Stølsvatnet, Modalen, (figur 7-1) som ble bygget i 1979-80 etter at det i 1979 ble utført modellforsøk av flomløpet ved Vassdrags- og havnelaboratoriet (VHL) i 1979. Flomløpet ble den gang dimensjonert for 250 m³/s som tilsvarte en vannstandsstigning på 2,5 meter. Ved hver ny flomberegning har dimensjonerende flom (Q₁₀₀₀) økt, og i 2017 er vi med tillagt usikkerhetsmargin og framtidig klimapåslag (40 %) oppe i en «dimensjonerende» flom på nærmere 800 m³/s, noe som framtvinger en radikal utvidelse av dagens flomløp.

BKK planla å gjennomføre modellforsøk som grunnlag for utvidelse av flomløpet med ny flomtunnel i tillegg til dagens flomavledning. En startet likevel først å arbeide med en 3D-modell og CFD-simulering for å finne hvordan et nytt «sideoverløp» med ny flomtunnel burde utformes. Gjennom CFD-simuleringen ønsket en å prøve ut hvordan et nytt overløp og tunnel burde designes.

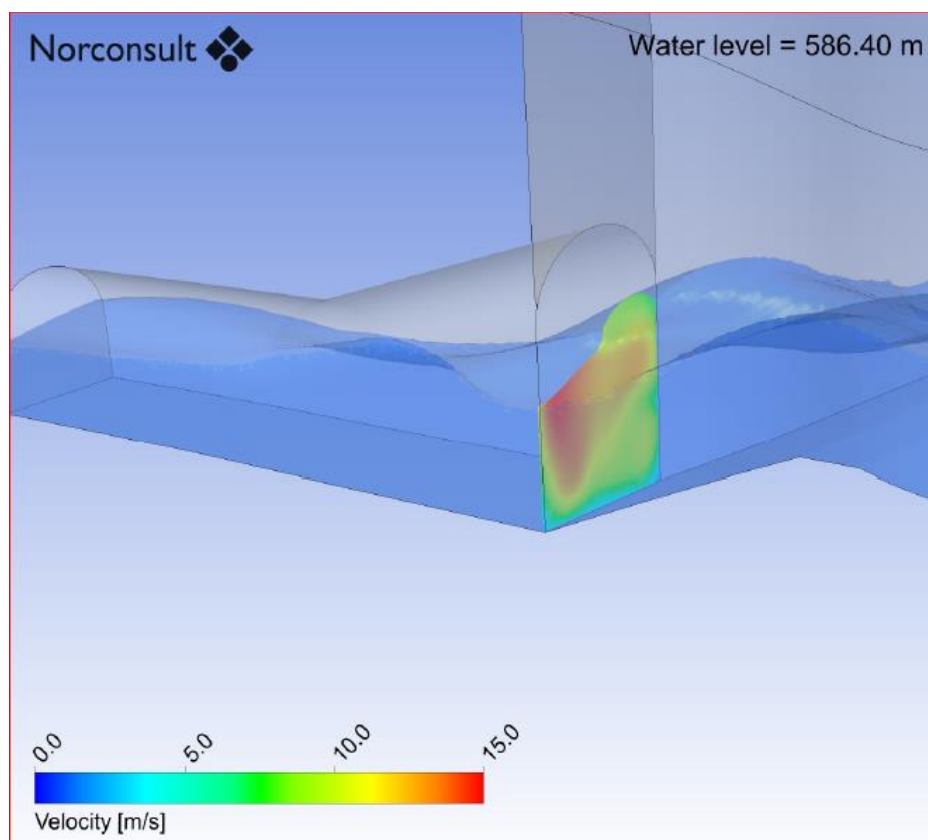
Hva er CFD?

Computational Fluid Dynamics (CFD) er en fellesbetegnelse for kraftige beregnings- og analyseverktøy for simulering av gass- og væsketransport (fluider). Programvaren løser Navier-Stokes (NS) likningene numerisk ved hjelp av datamaskiner. CFD gjør det mulig å studere 3D-løsninger slik at design og prosjektering kan verifiseres og optimaliseres (teknisk og kostnadsmessig).

CFD-beregninger er komplekse og krever høy kompetanse av operatør. Til tross for dette gir resultatene et lettforståelig beslutningsgrunnlag i form av 2D/3D visualisering av strømningsmønstre, temperatur, trykk, varme- og massetransport, stråling, røykutvikling med mer. Resultatene gir oppdragsgivere, arkitekter og øvrige rådgivere tidlig oversikt over hvilken betydning løsningsalternativer og ønsker får for prosjektet.

Figur 7-2 Faktaramme er hentet fra www.ramboll.no

Gjennom CFD-simuleringen utført av Norconsult ble ulikt design av overløpet og innløpet til flom-tunnelen testet for å finne den teknisk og økonomiske mest optimale løsningen. BKK synes CFD-simuleringen ga en god og tilstrekkelig dokumentasjon over utforming av nytt flomløp som etter planen skal bygges. Avledningskapasiteten for valgte løsningen ble deretter kontrollert etter «anerkjente metoder» (håndberegninger), i samsvar med damforskriften § 5-8, 10 ledd. Dette er senere akseptert av NVE som tilstrekkelig dokumentasjon for bygging av nytt flomløp, men NVE tar forbehold om at det senere kan kreves modellforsøk for å verifisere at løsningen gir tilstrekkelig flomavledning.



Figur 7-3 Visualisering av vannlinje og hastigheter ved innløp til ny flomtunnel Dam Stølsvatnet (fra CFD-simuleringen). Snittet viser hvordan vannhastigheten varierer over tverrsnittet ved innløpet av flomtunnelen som her er 63 % fylt ($544 \text{ m}^3/\text{s}$).

For å verifisere CFD-simuleringene vil BKK under framtidige flom- og overløpssituasjoner gjøre kontrollmålinger og fotografere vannstand og vannlinje i overløpet, for eksempel ved hjelp av droner, for å se om simuleringene er sammenfallende med virkelige opptredende vannlinjer/vannstander gjennom overløp og mot innløpet av flomtunnelen.

I lignende tilfeller vil det være aktuelt å gjøre CFD-simulering av lukka eller åpne flomløp i god tid før utvidelse skal gjennomføres. Da kan en bygge en modell som kan testes mot virkelig opptredende overløpssituasjoner. En kontrollert CFD-simulering kan da legges til grunn for modellering av endringer/utvidelser av flomløpet. På denne måten vil en være tryggere på at CFD-simuleringen for endra flomløp vil ligge nær den virkelige situasjonen etter en ombygging. For å sikre ytterligere trygghet i valg av løsning kan en også supplere dette med modellforsøk.

BKK mener at erfaringen fra bruk av CFD-simulering etter hvert bør aksepteres av NVE som tilstrekkelig dokumentasjon av flomløpskapasiteter, enten dette gjelder etterkontroll av eldre flomløp eller dimensjonering av nye flomløp. Erfaringsmessig ligger CFD-simulering nærmere opp til de reelle fysiske forholdene enn klassisk beregningsmetodikk der mer konservative forutsetninger legges til grunn. Sammenlignet med modellforsøk gir CFD-simulering større mulighet til å teste ut ulike design for å tilpasse løsningen de fysiske forholdene på stedet.

8 REFERANSER

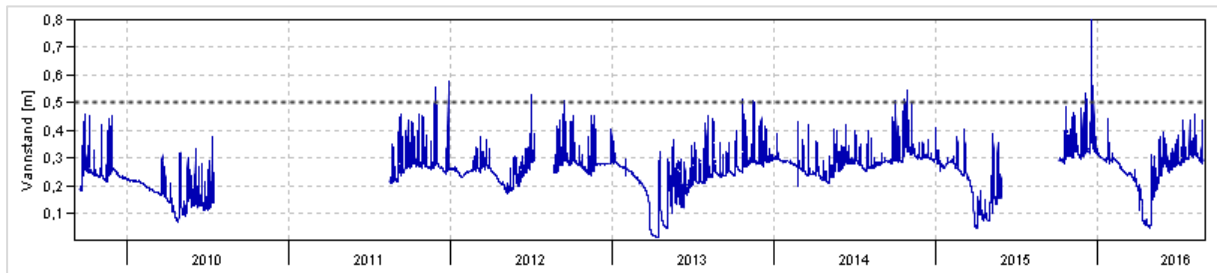
- [1] Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften) 2010.
- [2] Veileder for fyllingsdammer til § 5-10 og § 6-1 i forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg. NVE Veileder 4-12.
- [3] Retningslinjer for overvåking og instrumentering av vassdragsanlegg til § 2-6 og § 2-7 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg (Sikkerhetsforskriften) 2000.
- [4] Retningslinjer for tilsyn og revurdering av vassdragsanlegg til § 7-2 og § 7-3 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg (Sikkerhetsforskriften).
- [5] Lastförutsättningar avseende istryck, rapport 2017:439 Energiforsk.

VEDLEGG

Vedlegg A Datagrunnlag for vurdering av lekkasjemåledata

Vedlegg A-1 Eksempel: Dam Svartavatnet i Haugsdalsvassdraget

Vannstandsdata registrert ved lekkasjemålepunktet nedenfor Dam Svartavatnet i perioden 01.09.2009 til 31.08.2016 er vist i figur a-0-1. V-overløpet er gyldig opp til vannstand på 0,50 m. Når vannstanden er større enn 0,50 m vil vannet renne over en betongkant i tillegg til v-overløpet.

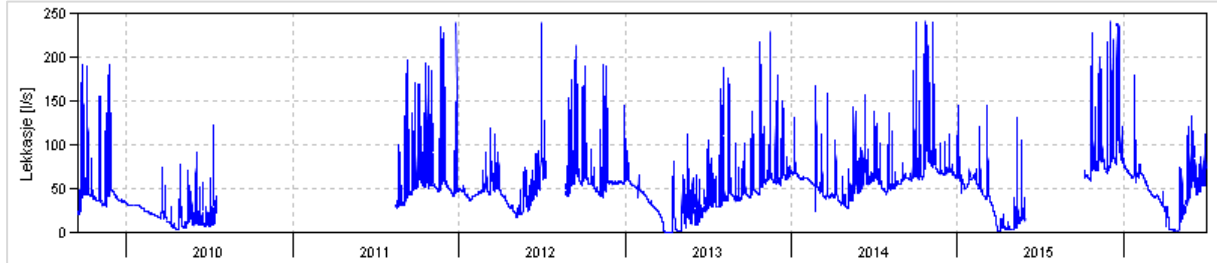


Figur A-0-1 Vannstand registrert ved lekkasjemålepunktet for Dam Svartavatnet i perioden 01.09.2009-31.08.2016. Den stiplede linjen markerer nivået for overkanten av v-overløpet.

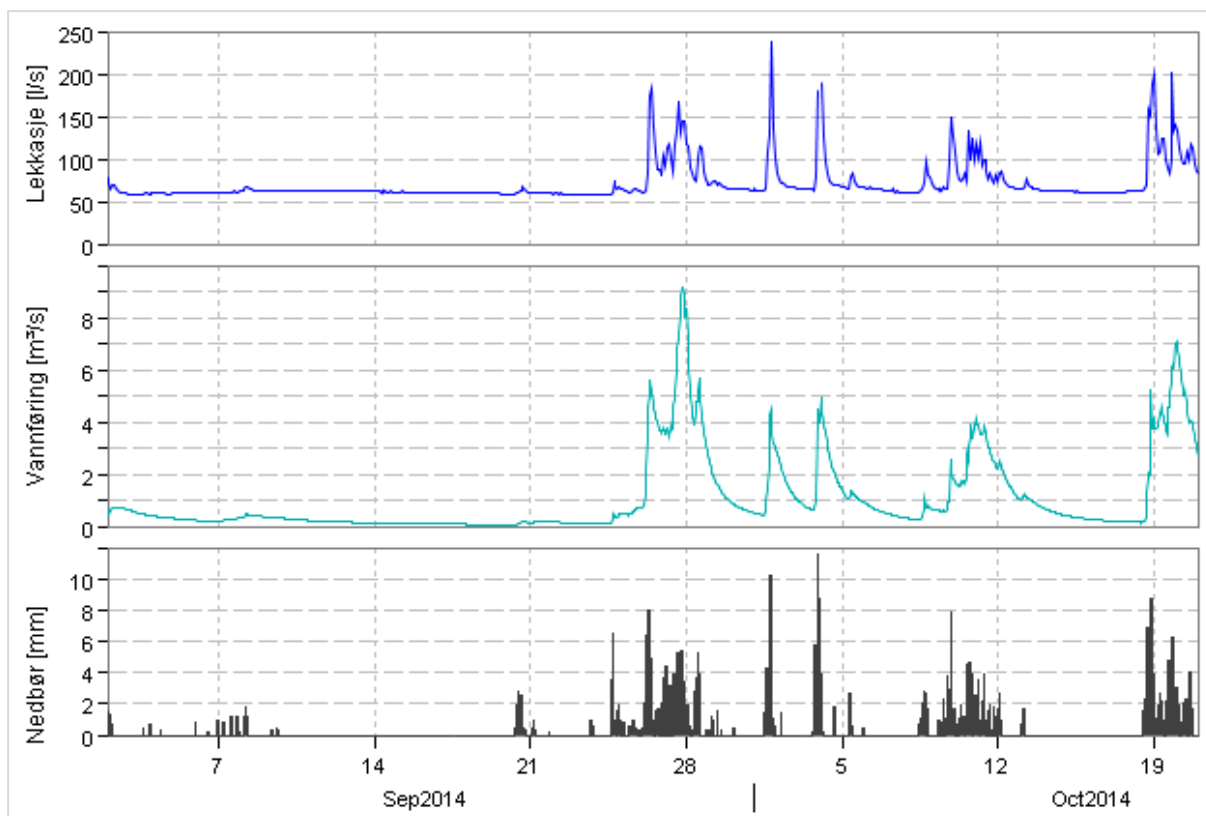
Vannstanden i v-overløpet omregnes til vannføring etter følgende formel, bemerk at formelen ikke gjelder når vannstanden overstiger overkanten på v-overløpet:

$$Q = (8/15) \cdot \mu \cdot \tan(\varphi/2) \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{5/2} \quad \text{der } \mu \text{ er overløpskoeffisienten og } \varphi \text{ er åpningsvinklen.}$$

Beregnet vannføring er vist i figur a-0-2.



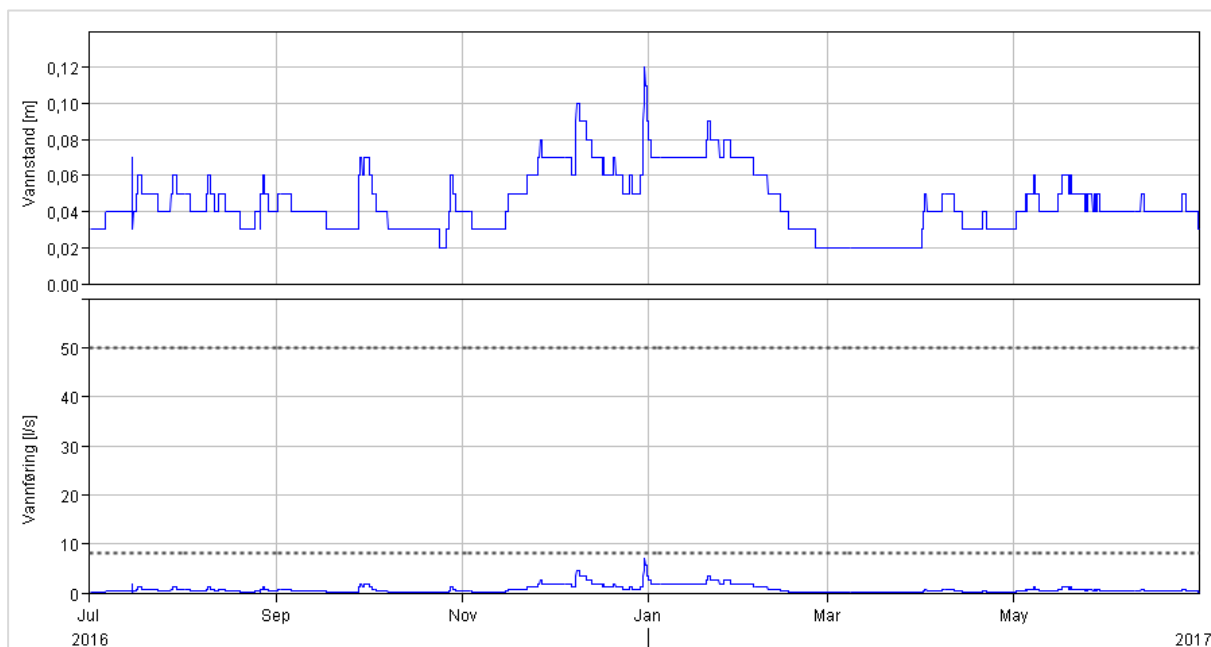
Figur A-0-2 Vannføring ved lekkasjemålepunktet i perioden 01.09.2009-31.08.2016. Bemerk at vannføring ved vannstand over overkanten på v-overløpet ikke er beregnet.



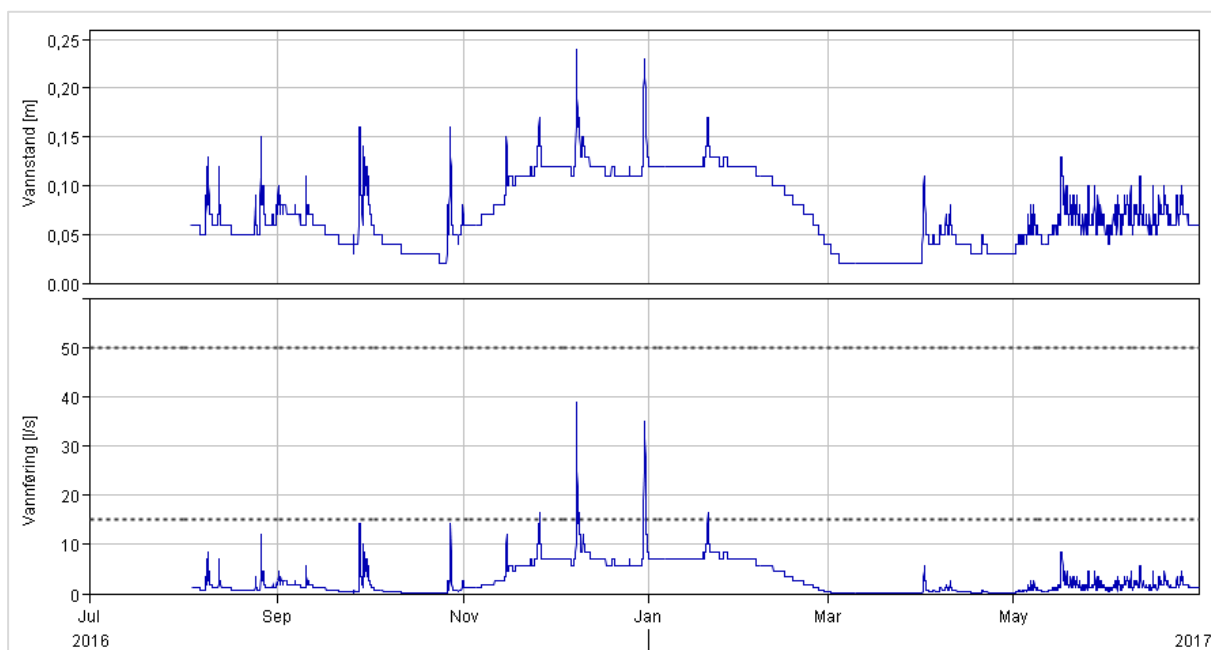
Figur A-0-3 Vannføring registrert ved lekkasjemålepunktet, uregulert vannføring ved målestasjonen Vemundsbotn og nedbør registrert ved værstasjonen ved Vemundsbotn kraftverk for en typisk periode på høsten preget av nedbørhendelser (01.09.2014-20.10.2014). For den viste perioden er det generelt høy magasin vannstand, og vannstanden øker gradvis fra ca. 776 m.o.h. til 780 m.o.h.

Vedlegg A-2 Eksempel: Dam Askjelldalsvatnet i Eksingedalsvassdraget

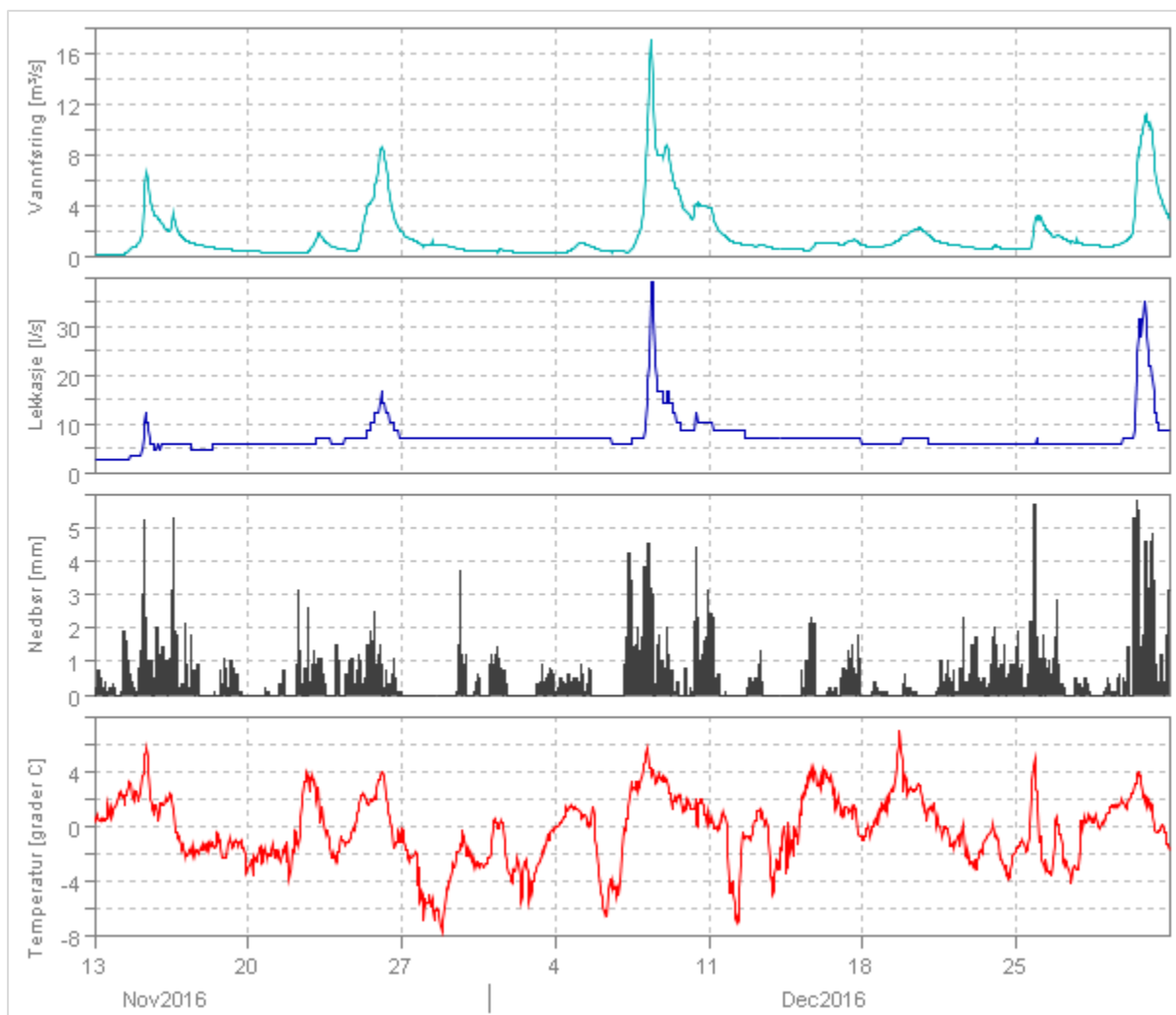
Vannstandsdata registrert ved lekkasjemålepunktene ved Dam Askjelldalsvatnet for perioden 01.07.2016 til 30.06.2017 er vist i figur a-0-4 og figur a-0-5. Vannstand omregnes til vannføring etter formelen ovenfor, og beregnet vannføring er vist i figur a-0-4 og figur a-0-5.



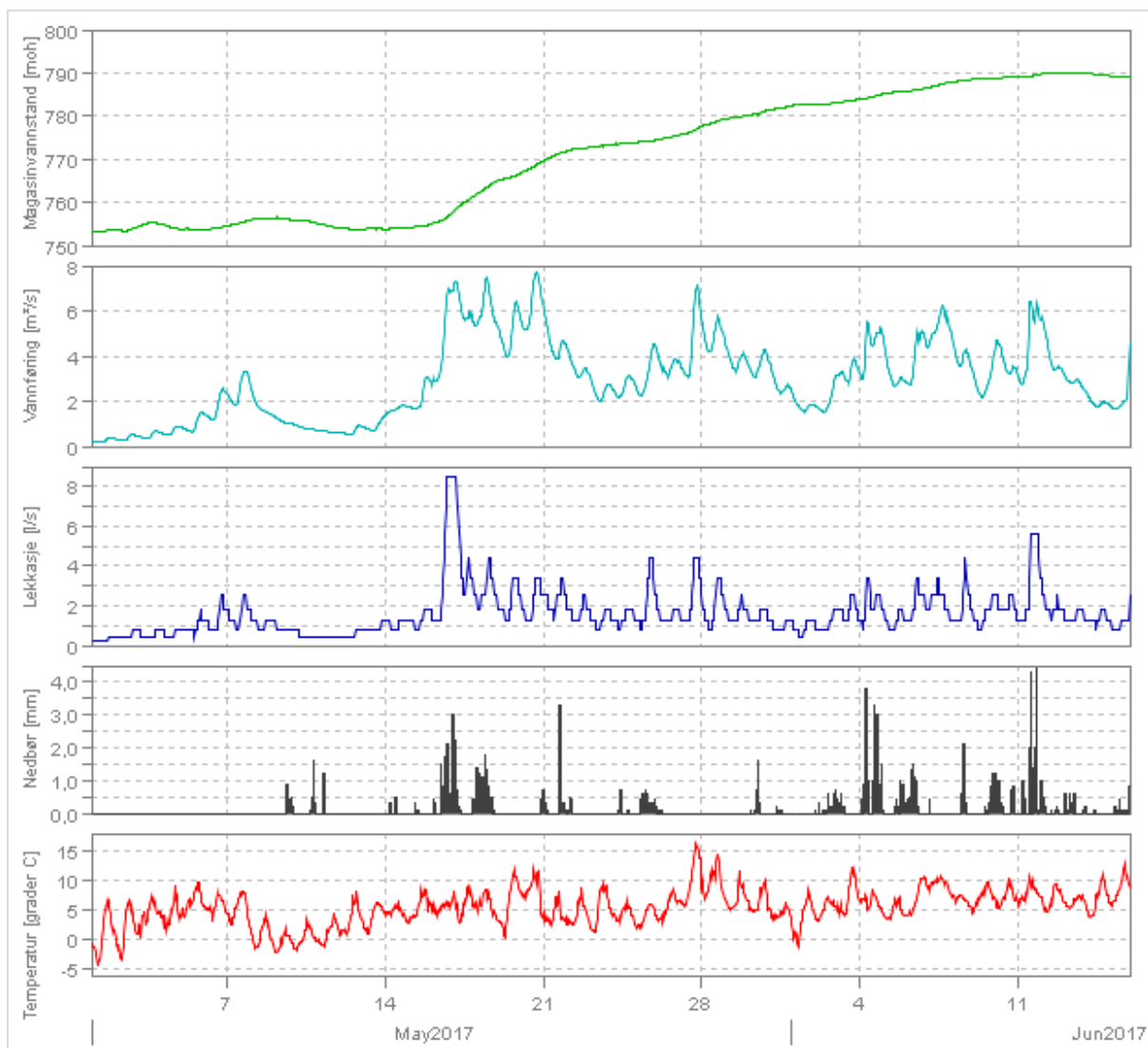
Figur A-0-4 Dam Askjelldalsvatnet. Øverst vannstand registrert ved det østlige lekkasjemålepunktet i perioden 01.07.2016-30.06.2017, og nederst beregnet vannføring samt alarmverdiene på henholdsvis 8 l/s og 50 l/s.



Figur A-0-5 Dam Askjelldalsvatnet. Øverst vannstand registrert ved det vestlige lekkasjemålepunktet i perioden 01.07.2016-30.06.2017, og nederst beregnet vannføring samt alarmverdiene på henholdsvis 15 l/s og 50 l/s.



Figur A-0-6 Vannføring registrert ved det vestligste lekkasjemålepunktet sammenlignet med uregulert vannføring ved målestasjonen 63.12 Fjellanger samt nedbør og temperatur registrert ved Oksebotn kraftverk for en typisk periode på høsten preget av nedbørhendelser (13.11.2016-31.12.2016). Magasinvannstanden var generelt høy gjennom hele denne perioden og varierer mellom 795-802 m.o.h.



Figur A-0-7 Magasin vannstand i Askjeldalsvatnet, vannføring registrert ved det vestligste lekkasjemålepunktet, uregulert vannføring ved målestasjonen 63.12 Fjellanger samt nedbør og lufttemperatur registrert ved Oksebotn kraftverk for en typisk periode på våren preget av snøsmelting (01.05.2017-15.06.2017).