NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK

Statkraft

RAPPORT

UNDERSØKELSE AV SMISVEISTE RØR EIET AV STATKRAFT

Utført av:

Jan Fredrik Nicolaisen, NVE-TT
Kjell Finnerud, Statkraft-PMK

AUGUST 1991

INNHOLD:

KONKLUSJON

1. INNLEDNING

2. BRUDD VED SMISVEISTE RØR-BRUDDÅRSAKER

3. MATERIALTEKNISKE FORHOLD

4. SPESIELLE FORHOLD VED RØRBRUDDET PÅ MAUDAL

5. TRYKKTRANSIENTER

6. TURBINREGULATOR

7. IKKE-DESTRUKTIV MATERIALKONTROLL AV KRAFTVERKSRØR

8. VURDERING AV BRUDDKONSEKVENSER

VEDLEGG:

Vedlegg 1: Rapporter fra anleggsbesøk

Vedlegg 2: Figurer fra bruddrisikovurderinger utført av Veritec

Vedlegg 3: Generell orientering om sprøbruddsikkerhet

Bildet på forsiden er fra Nore 1, Statkraft, og er tatt av Jan Fredrik Nicolaisen, NVE-TT, under inspeksjon den 19.09.90.

Ansvarlige underskrifter:

NVE Tilsyns og beredskapsavdelingen

Trond Ljøgodt
Avd.dir.

Statkraft PM

Ragnar Hartmann
Avd.dir.

Referanser:

[1]: Undersøkelser av smisveiste rør for NVE-Vassdragstilsynet, Nybro-Bjerck a/s, oktober 1989.

[2]: Rapport fra rørbrudd ved Maudal kraftverk, NVE-Vassdragstilsynet, 22.02.90.

Maudal kr.v. - rør 2, undersøkelser ifm. rørbruddet den 20.02.90, Nybro-Bjerck a/s

[3]: Stål, Almar-Næss, Tapir forlag 1984.

[4]: Haukeli kraftverk, vurdering av turbinrørledninger. Rapport datert 29.10.1990 fra Veritec, Prosjektnr. 311175.

Haukeli kraftverk, undersøkelse av 6 mm rør materiale fra turbinrørledning. Rapport nr. 90-3830 fra Vertitec.

[5]: Glomfjord kraftverk, undersøkelse av materialer fra turbinrørledning. Rapport nr. 90-3835 fra Veritec.

[6]: Glomfjord kraftverk, håndskrevet notat, fra Kristiansen vedrørende rørbrudd 20.11.57.

[7]: Nore I, inspeksjon av rørgate. Rapport datert 22.11.90 fra Det norske Veritas, prosjektnr. 32557244.

[8]: Nore I, ultralydkontroll av turbinrørledninger. Rapport av 24.8.1972 fra Det norske Veritas.

Nore I, kontrollrapport nr. 7219 av 1.9 og 8.9-1972 utført av Kværner Brug A/S.

[9]: Trykkvariasjoner i vannrør når vannhastigheten endres og elastisiteten er tatt med i betraktningen, Notat utført av H. Furu, Statkraft PMT.

KONKLUSJON:

Det ansees at det ved smisveiste rør er større risiko for brudd enn ved andre kraftverksrør.

Blant de undersøkte kraftverkene vurderes Glomfjord og Nore 1 å ha de alvorligste konsekvenser ved et eventuelt rørbrudd.

Statkraft og NVE Vassdragstilsynet gir i rapporten uttrykk for ulikt syn med hensyn til hensiktsmessigheten av videre undersøkelser for å kartlegge rørenes tilstand.

1. INNLEDNING

Med utgangspunkt i en rekke rørbrudd for smisveiste rør har NVE-Vassdragstilsynet og Statkraft (v/ Plandivisjonens Maskinavdeling) i samarbeid forsøkt å kartlegge relevante problemstillinger.

Ved arbeidet har man dels tatt utgangspunkt i generelle forhold vedrørende materialteknikk, trykktransienter ved kraftverk og kraftverkenes styreinnretninger, dels har man søkt å analysere spesielt Statkrafts anlegg: Nore I, Hakavik, Glomfjord og Haukeli.

Ved en evaluering av den aktuelle type er man avhengig av å kunne referere til anerkjente akseptkriterier. Dette foreligger det ikke for de forhold som rapporten berører. Man har derfor valgt et moderne gjennomsnittskraftverk som referanse. Her mener man med utgangspunkt i erfaring at rørbruddssikkerheten er tilfredstillende. Som konsekvens av dette følger at teoretisk tenkte belastninger som medfører rørbrudd ved et moderne kraftverk av den angitte type, ikke skal legges til grunn ved evalueringen av et kraftverk med smisveiste rør.

Det har videre vært et mål for samarbeidsprosjektet å utarbeide en offentlig tilgjengelig rapport som siden kan være til støtte for såvel kraftselskap som kontrollmyndighet ifm. de avgjørelser som i nær fremtid må tas for smisveiste kraftverksrør.

Smisveiste rør ble produsert fra århundreskiftet til 1949-50. Produksjonsprosessen foregikk ved at stålplater, som ble varmet opp til de ble rødglødende, ble hamret/smidd sammen mekanisk. Etterhvert ble valser tatt i bruk som smiverktøy.

I årenes løp har det skjedd en rekke brudd ved smisveiste rør, noe som er nærmere omtalt i kap. 2. NVE-Vassdragstilsynet satte i 1988 igang en undersøkelse av smisveiste rør, noe som ledet frem til at Nybro-Bjerck a/s ble engasjert til å utføre en generell undersøkelse av smisveiste rør [1].

Rørbruddet ved Maudal kraftverk den 20.02.90, ga økt bevissthet om smisveiste rør. NVE-Vassdragstilsynet deltok i etterundersøkelsene, rapport fra rørbruddet er utarbeidet [2].

Rapporten er blitt til etter anleggsinspeksjoner, samling av rapporter m.v. fra tidligere rørbrudd, observasjoner og prøver, samt engasjement av Veritas/Veritec i forbindelse med materialanalyse og vurderinger.

2. KJENTE RØRBRUDD FOR SMISVEISTE RØR I NORGE [1] [2]

Oversikt over registrerte brudd ved smisveiste rør:

	ANLEGG	RØR	ÅR	BEMERKNING
A	*Tyssefaldene	rør 4	1916	Innkn. etter trykkstøt?
B	*Tyssefaldene	rør 3	1980	35 % trykkstøt
C	Bjølvefossen	rør 1	1919	Aksiell utknekking
D	Bjølvefossen	rør 1	1922	Fylling av rør i -10 °C
E	Såheim			Detaljer ikke kjent
F	Glomfjord		1935	Detaljer ikke kjent
G	Glomfjord	rør 2	1957	Trykkstøt
H	Nore I		1946	Trykkstøt
I	Nore I		1972	Trykkstøt
J	*Vemork			Trykkstøt
K	*Sørfjord	rør 1	1972	Trykkstøt-mars
M	Riksheim	rør 1	1978	Trykkstøt-en rekke brudd
N	Maudal	rør 2	1990	Trykkstøt

*: Anlegg som i dag er nedlagt

Ved Bjølvefossen og Glomfjord skjedde rørbrudd i forbindelse med sabotasjeaksjoner i 1942. Videre er det registrert ett brudd ved Haukeli kraftverk i 1975 som følge av frostsprengning. Disse 3 rørbruddene er ikke tatt med i oversikten, fordi de ikke regnes som relevante i denne sammenhengen.

Periode	Brudd:	Brudd ved rør som fortsatt er i drift:
1911-20	2	1
1921-30	1	1
1931-40	1	1
1941-50	1	1
1951-60	1	1
1961-70	0	0
1971-80	4	2
1981-90	1	1

Kronologisk oversikt over antall registrerte rørbrudd.

Et gjennomgående trekk er at rørbrudd har oppstått ved

ekstraordinære belastninger, som følge av stort trykkstøt m. v. I en del tilfeller er det oppstått brudd etter "normale" trykkstøt på 10-35 %. Med normalt trykkstøt menes den trykkøkning som oppstår ved lavtrykksanlegg. For høytrykksanlegg er 10-15 % en vanlig størrelse.

Ifm. tabellen ovenfor kan det nevnes at totalt antall anlegg med fortsatt eksisterende smisveiste rør av noen størrelse (trykk, diameter) er av størrelsesorden 25-30. Samtlige er montert før 1950. Høyre kolonne i tabellen fra og med perioden 1951-60 til og med perioden 1981-90 refererer derfor til hendelser ved et utvalg og antall av kraftverk som gjennom dette tidsrom er konstant. I tidsrommet fra og med perioden 1911-20 til og med perioden 1941-50 var antall rør derimot økende. Ut fra det faktum at rørbruddfrekvensen synes å ha vært
konstant fra 1911 og frem til i dag (et rørbrudd pr. 10-år), vil en direkte statistisk konklusjon fra oversikten ovenfor være at man hadde størst risiko for rørbrudd ved det enkelte anlegg i de første periodene, mens rørbruddsrisikoen etter 1951 har vært uendret. Således kan man ikke ut fra oversikten spore tendens til økt feilhyppighet slik det forventes når et utstyr/element nærmer seg slutten av sin levetid.

Dersom en tar utgangspunkt i samtlige smisveiste rør blir bildet noe endret: Antall rør har i perioden blitt redusert, som følge av at mange kraftverk har blitt nedlagt. En legger merke til at i tiåret 1971-80 er registrert 4 rørbrudd, hvorav to av anleggene er nedlagt. Nærmere studier av anleggene det gjelder (Tyssefaldene og Sørfjord) viser at nedleggelse av disse kraftverkene ble fremskyndet som følge av bruddene. Det er rimelig at dette tas hensyn til i en eventuell statistikk, noe som skulle indikere en økning i bruddhyppigheten.

På den annen side er antallet det her refereres til for lite til at feilhistorikken kan benyttes med sikkerhet. Den egentlige konklusjon blir derfor at statistikken ikke gir grunn for å trekke slutninger vedrørende endringer i feilhyppigheten.

3. MATERIALTEKNISKE FORHOLD [1]

Det er to faktorer som særlig er viet stor oppmerksomhet i undersøkelser av smisveiste rør:

- Slag-/brudd-seighet
- Sprekker i sveisesonen.

Det er verd å merke seg at de materialtekniske egenskapene forøvrig virker tilfredstillende, med eksempelvis gode verdier for bruddforlengelse.

Kjemisk sammensetning:

Smisveiste rør har normalt lavt innhold av C, varierende innhold av forurensningselementer (P og S), og forøvrig lavt innhold av andre elementer. Typisk kjemisk sammensetning (Nore):

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Ni%	Cu %	Cr %
.034	.017	.37	.019	.016	.062	.17	.014

Stålet i smisveiste rør betegnes vanligvis som godt sveisbare, men eldingsømfintlige.

Mekaniske egenskaper:

De mekaniske egenskapene er gjennomgående relativt gode ved smisveiste rør. I tabellen nedenfor er flytegrensen (Re), strekkfasthet (Rm) og forlengelse (A5) sammenholdt for rør ved Glomfjord, Haukeli og Maudal kraftverk:

Anlegg:	Flytegrense Re, MPa	Strekkfasthet Rm, MPa	Forlengelse A5, %
Glomfjord	229	373	34
Haukeli	347	447	27
Maudal	231	400	31

Slagseighet, Charpy V:

Følgende verdier for Charpy V test er fremkommet[J]:

	Temperatur:°C								
Anlegg:	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40	+50	+60
Bjølvefossen	3	4	6	8	11	16	22	33	45
Maudal		4	5	11	18	20	34		
Nore I (gj.sn.)	6	4	8	17	27				
Glomfjord (pr.1)			5		11		39		
-"- (pr.2)			6		9		24		
Haukeli			3		13		35		

Det bør påpekes at en har basert seg på en nedre omhylningskurve, mens ved Nore I var kun gjennomsnittsverdier oppgitt.

CTOD-verdier:

Følgende verdier for CTOD er fremkommet ved 0 °C: [mm]

Prøve/materiale:	t [mm]	CTOD min.	CTOD middel,
Maudal, grunnmat.	27	0,063	0,240
Haukeli, grunnmat.	6	0,083 (0,017)*	0,239
Glomfjord, grunnmat.	16	0,354	0,765
Glomfjord, grunnmat.	29	0,021	0,022
Glomfjord, smisveis	16	0,131	0,214

*: Usikker verdi for prøve som brakk under "precracking" (tilvirking av utmattingssprekk)

Vurdering av resultater:

I forhold til moderne stål har disse materialene dårligere seighetsegenskaper ved høye belastningshastigheter (Charpy slagseighet) og i nærvær av skarpe kjerver/defekter (CTOD bruddseighet). Nærmere bakgrunnsorientering om sprøbruddsikkerhet generelt er gjengitt i vedlegg 2.

Det er typisk for eldre stål av den typen det her gjelder, og tilskrives i hovedsak det høye innholdet av fosfor og andre forurensingselementer i disse materialene.

Mht. Charpy slagseighet regnes ved 0 °C verdien 27,5 J som akseptabel, ut fra normal konstruksjonspraksis. De målte verdiene ligger på 11-29 % av dette.

Min. CTOD-verdi målt av Veritec ifm. undersøkelse av slike materialer er 0,021 mm. Lokale verdier, ned mot 0,010 mm, i eldet materiale rundt en sprekkspiss, utelukkes ikke.

Fra bruddanalysediagram, satt opp av Veritec, får en følgende resultater: (Se vedlegg 2)

Med en fallhøyde på 300 mVs, og 50 % trykkstøt (=150 m) er nødvendig CTOD for å unngå brudd anslått til: (fig.1/vedlegg 2)

-sprekkdybde 12 mm $CTOD_{krit}$ = 0,019 mm
-sprekkdybde 18 mm $CTOD_{krit}$ = 0,050 mm

Tilsvarende for 20 % trykkstøt: (fig.2/vedlegg 2)

-sprekkdybde 12 mm $CTOD_{krit}$ = 0,012 mm
-sprekkdybde 18 mm $CTOD_{krit}$ = 0,029 mm

Resultatene viser at sprøbrudd vil kunne inntreffe under et sammenfall av ugunstige omstendigheter:

-lav CTOD-verdi
-stor sprekkdybde
-høyt spenningsnivå

For et eldre smisveiste rør er det realistisk å forvente sprekkdybder på 18-20 mm som materialfeil/defekter ifm. smisveisene. Med et materiale hvor CTOD generelt kan gå ned i 0,020 mm samtidig som trykkstøtene i det hydrauliske system kan komme opp i 20 %, må man derfor konkludere med at sikkerheten mot rørbrudd ut fra disse generelle betraktninger ikke er tilfredsstillende for de eksisterende smisveiste rør ved kraftverkene.

I hvert enkelt tilfelle må man imidlertid vurdere de aktuelle trykkstøt. Dette er nærmere behandlet under punkt 5.

4. SPESIELLE FORHOLD VED RØRBRUDDET PÅ MAUDAL [2]

Ifm. rørbruddet ved Maudal kraftverk 20.02.90 er det rapportert at elverksjef Hove og stasjonsleder Todnem umiddelbart etter ulykken registrerte korrosjon på bruddflaten utenfor området som senere er utpekt som den bindefeilen bruddet antas å ha utviklet seg fra.

Veritec som senere analyserte bruddet fikk seg dessverre først tilsendt den aktuelle materialprøve etter at denne hadde vært eksponert i fuktig miljø i et par dager. Hele bruddsnittet var da jevnt korrodert. Etter etsing av bruddflaten hevder så Veritec at ingen del av denne utenfor den angitte bindefeil hadde korrodert før restbruddet oppsto. Dette avviker fra kraftverkspersonellets observasjoner.

Om det var korrosjon utenfor bindefeilen umiddelbart etter bruddet, er av betydning for fastleggelse av størrelsen på den feil som det ustabile restbrudd utviklet seg fra. Dette er i neste omgang av betydning for å kunne bestemme den egentlige årsak til rørbruddet.

Hvis materialfeilen før bruddet kun besto av den angitte bindefeil, ville trykkstøtet ved et normalt avslag ut fra teoretiske betraktninger her ikke være tilstrekkelig for å utløse bruddet. Startet man derimot med en større materialfeil, kan man ha større grunn til å påstå at bruddet oppsto som følge av et normalt avslag. Det er heller ikke rapportert noe fra kraftverket som indikerer større trykkstøt.

Skulle derimot påstanden fra Veritec om manglende korrosjon medføre riktighet, har man to muligheter. Trykkstøtet vært større enn antatt uten at man kjenner årsaken til dette. Det kan også være at andre forhold enn de man har tatt hensyn til ved de teoretiske vurderinger har virket inn. I begge tilfeller er det i så fall forhold som man ikke har oversikt over og som således blir med på å øke risikoen ifm. eksisterende smisveiste rør ut over det nivå man kan fastlegge ved tilstandskontroll basert på dagens teknologi.

5. TRYKKTRANSIENTER [9]

Av forhold som gir opphav til trykktransienter i et kraftverk, kan man nevne:

- Hydrauliske massesvingninger som følge av effektreguleringer/lastavslag.
- Elastiske trykksvingninger (water hammer) som følge av effekreguleringer/lastavslag.
- Svingninger som følge av resonanser mellom det elektriske nett og/eller kraftverkets hydrauliske/elektriske/mekaniske deler.

Trykkvariasjonen ved massesvingninger vil teoretisk være proposjonale med -dQ/dt hvor Q er vannføring og t er tid. Går tiden for en vannføringsreduksjon (avslag) mot null, ser man at trykkstigningen må gå mot uendelig. I praksis vil imidlertid trykkstigningen begrenses av den mulighet vannet i et kraftverkssystem har til å strømme opp gjennom sjakter og i en viss grad også ut i det fri fra disse. I tillegg vil også elastisiteten i både vann og rør bidra til å redusere trykkøkningen som følge av momentane vannføringsreduksjoner.

Elastiske trykksvingninger, også benevnt Joukowsky-trykkstøt, kan i det enkelte tilfelle beregnes ved hjelp av differensialligninger. Disse blir som regel løst i henhold til karakteristikkmetoden.

Antar man imidlertid en oppbremsingstid T for vannstrømmen slik at T er mindre enn 2L/a samtidig som dQ/dt er konstant under oppbremsingen, kan Joukowsky-trykkstøtet settes til:

$$\Delta h = (a/g)\,\Delta c = \sim 120\,\Delta c$$

Her er Δh trykkstøt (m.v.s), a trykkbølgehastigheten i rørsystemet (~1200 m/s), g tyngdens akselleråsjon (m/s^2), L avstanden fra stengeorgan til refleksjonssted for trykkbølgene og c vannhastigheten.

Trykkstøtene man beregningsmessig får ved å benytte formelen foran, tilsvarer i praksis det som ville oppstå ved momentan stenging av turbin eller ventil. Forfatterne av denne rapporten har ikke registrert slike tilfeller, og regner dem derfor som lite sannsynlig. Sannsynligheten for at dette skal skje må anses å være neglisjerbar. Nevnes må også at formelen benyttet for Nore 1 gir en trykkøkning i tillegg til det normale statiske trykk på 713 mVS, med andre ord et totaltrykk på 1073 mVS.

Om Nore-rørene var dimensjonert i henhold til Damforskriftene og NS 3472 med 15% trykkstøt, ville dette medført at man hadde bragt rørmaterialet til flyt ($\sigma_{0,2}$) ved allerede ca. 700 mVS. Om man ved Nore krever at rørene skal tåle trykket på 1073 mVS, har man da ikke kun problemer ved Nore og andre kraftverk med smisveiste rør. Problemet gjelder i så fall de aller fleste kraftverk i Norge.

Konklusjonen vedrørende Joukowsky-trykkstøt blir derfor at man ikke kan benytte angitte forenklede overslagsformel for å

fastlegge dimensjonerende maksimalverdi for dette ved kraftverket som skal undersøkes. Man må derimot analysere styresystemet for turbinlukke-mekanismene og stengeventilene ved det enkelte kraftverk for å finne kortest tenkelige stengetid. Ut fra dette foretas det trykkstøtberegning etter karakteristikkmetoden. Ved beregningen må trykkforholdene kartlegges langs hele rørtrasseen slik at den faktiske sikkerhet mot brudd for den enkelte rørseksjon bestemmes.

Et tredje forhold som gir opphav til trykktransienter, er resonanser. For "ideelle" svingesystemer uten dempning vil en eksiterende impuls med frekvens som faller sammen med en av systemets egenfrekvenser, etter hvert kunne frembringe svingeamplituder av uendelig størrelse.

Oppstår det slike svingninger i et hydraulisk system, kan man tenke seg at trykksvingningene i de aller fleste tilfeller vil pendle omkring det stasjonære driftstrykk som middelverdi. Videre kan det i vann som kjent ikke oppstå vesentlig lavere trykk enn fordampningstrykket. Øker derfor maksimaltrykket ut over det dobbelte av driftstrykket, vil det ved minimumstrykk dannes vanndamp i vannsystemmet. Det antas at dette i neste omgang påvirker systemets egensvingefrekvenser og derigjennom bidrar til å begrense trykkamplitudene.

Angitte betraktning er imidlertid svært forenklet. Det riktige må være at man eventuelt her søker å analysere problemet med mer eksakte metoder.

Et utgangspunkt at kraftverk med smisveiste tilløpsrør skal kunne tåle trykksvingninger av den angitte størrelsesorden uten at rørbrudd oppstår, synes heller ikke å være realistisk. Det må også understrekes at dette krav gjort gjeldende for et moderne kraftverksør dimensjonert etter Damforskriftene, NS 3472 og 10% trykkstøt, medfører spenninger over materialets $\sigma_{0,2}$. Slike spenningsspisser, om de mot formodning skulle opptre, vil ikke være en "engangsspiker", men kanskje bli stående over lang tid. I så fall må utmattingsbrudd også kunne påregnes ved moderne kraftverk.

Oppsummering: Å bestemme hvilke trykktransienter som i spesielle situasjoner kan oppstå i et kraftverk, er en komplisert oppgave som ikke kan løses med enkle overslagsformler. Benyttes likevel slike som antydet i det foregående, blir konklusjonen at ikke bare kraftverk med smisveiste rør er å anse som utrygge. Samme konklusjon må da trekkes når det også gjelder moderne kraftverk.

6. TURBINREGULATOR

(bidrag fra Kværner Eureka a.s v/Dagfinn Nes)

Sikkerheten til et mellomtrykk/høytrykk vannkraftanlegg er i tillegg til inntaksluker og rørbruddventiler avhengig av turbinsystemet bestående av hovedstengeventil, tappeventil, turbinpådrag, vannvei sikkerhetsventil etc. med sine styresystemer.

Vannveisystemets sikkerhet har direkte sammenheng med trykkstøtbegrensningen, som av den grunn krever pålitelig hastighetsbegrensning av pådragene. Trykksjakten ned til kraftstasjonen må vises oppmerksomhet.

I eldre konstruksjoner er hastighetsbegrensningen svært ofte lokalisert i sleidsystemet. "Kriseblende" for å hindre trykksjaktskader ved eventuelt rørbrudd i styresystemet har vært vanlig i senere tid.

Stående pendlinger, eventuelt med økende trykkamplitude på grunn av ustabilitet i systemet kan være en kritisk situasjon. Det å kunne definere systemet, samt stille inn parametrene iflg. beregninger er i denne sammenheng av stor verdi.

Mekanisk-hydrauliske systemer som baserer tidskonstanter på oljeforbruk over små kanaler/blender, er avhengig av temperatur (oljeviskositet) og mekanisk slitasje som oppstår over tid.

Moderne beregningsverktøy er nødvendig ettersom kompleksiteten av vannveisystemene øker og større krav til beregningsnøyaktighet stilles for å kunne optimalisere anlegget.

Enkle prøver med aggregatet i tomgang, der turtallet tvinges ned med slagbegrenser for deretter å "frigjøre" regulatoren, har begrenset verdi, i de tilfelle aggregatet forlanges stabilt til fullast. Praktiske prøver på fullast er sjelden gjennomførbare pga nettforholdene.

Sikkerhetsinnretninger og konsekvensvurdering av sikkerhet bakt inn i turbinregulator og ventilstyring.

Sikkerheten er i det vesentligste ivaretatt av det hydrauliske systemet. Viktige konstruksjonsdetaljer vil være:

- Lukke- og åpnetider bestemmes av faste blender i tilknytning til hoved reguleringsventil og hurtig-lukkerventil.

- Blende for minimum lukketid monteres direkte i hovedservomotor.

- Reguleringsventil overstyres av hurtiglukkerventil som bør ha inngang for normalstopp og nødstopp.

- Eventuelt mekanisk-hydraulisk rusevern har funksjon for direkte styring av hurtiglukkerventil.

Den mest alvorlige feil er overskridelse av maksimal lukke-hastighet for turbinpådragene. Dette skal ikke kunne inntreffe med mindre det er blitt begått grov uaktsomhet ved service- og vedlikeholdsarbeidet på turbinregulatorens hydrauliske system. Det handler her om at blender ikke er gjenmontert eller er blitt skiftet.

Det foreligger også en viss fare for at det hydrauliske systemet ikke er skikkelig luftet etter sammenstilling. Luft i systemet

kan kortvarig føre til ukontrollert lukkehastighet.

Andre alvorlige feil er mekanisk blokkering av pådragene, eller rørbrudd mellom reguleringsventil og servomotor.

Blokkering av turbinpådraget medfører at aggregatet går i rusning inntil hovedventilsystemet har stengt.

Ved styrerørbrudd vil servomotor gå til nøytralposisjon, og dette vil normalt være stengte nåler forutsatt vanntrykk tilstede.

Turbinleveransene til NORE I, GLOMFJORD og HAKAVIK kommer fra 4 ulike leverandører og disse er:

J.M. Voith, Neyrpic, Myrens Verksted A/S og Kværner Brug A/S.

Alle turbiner er av type Pelton med horisontal aksel.

Glomfjord

Glomfjord kraftverk har installert 6 stk. horisontale Pelton-aggregater levert av J.M. Voith Agg. 1-3 er fra årene 1920-22 og. agg. 4-5 fra 1949.

Regulatorene er av mekanisk-hydraulisk type og alle gjennomgikk en mindre modernisering i 1967-68. Styringene for hovedstenge-ventilene (3 sluseventiler + 3 kuleventiler) ble oppgradert i samme tidsrom.

Høsten 1982 gjennomførte Sørumsand Verksted A/S (rapport 35719) med assistanse fra anleggets folk, rengjøring, inspeksjon, mindre utbedringer samt funksjonstest av turbinregulatorene og ventil-styringene.

Nore I

Nore I har installert 8 stk. doble horisontale Pelton-turbiner fra året 1925 og utover. Aggregat nr. 1 og 2 er levert av J.M. Voith, aggregat nr. 3-7 er levert av Kværner Brug A/S og aggreget nr. 8 er levert av Neyrpic.
Samtlige aggregat ble på 1980-tallet bygd om til ASEA, EH-A elektrohydraulisk overgang og elektronikk type HPC 610.

I forbindelse med idriftsettelsen av aggregatene etter ombyggingen ble Sørumsands Verksted A/S engasjert i oppjustering av mekanisk-hydraulisk utstyr. Det vises til rapporter nr. 40503, 40631, 40632, 47656.

Rapportene vitner om at kombinering kniv-nål ikke har vært til-fredsstillende for alle aggregat.

Oppdeling av leveranser til et system kan være uheldig da dette lett medfører manglende totaloversikt. Delleverandører vil normalt være ansvarlig kun for sin del av leveransen. Sikkerhet ved totalsystemet (regulatorene) blir da noe uoversiktlig.

Hakavik

Hakavik Kraftverk har installert 4 stk. horisontale Pelton-turbin samt ett Pelton husaggregat. Aggregat 1-3, samt husaggregat ble levert av Myrens Verksted A/S i 1921 og agg. 4 ble levert av Kværner Brug A/S i 1936.

Foruten de generelle betraktninger rundt denne type regulator-utrustning kan nevnes at dersom "oljebrems" tømmes ved uhell, vil

regulatorens integrasjonselement bli borte og dermed blir systemet ustabilt. Av sikkerhetsmessige årsaker forutsetter konstruksjonen jevnlig tilsyn.

Generelt er overvåking av trykk og nivåer for trykkoljeanlegget nødvendig for å gi stoppkommando før ukontrollerte bevegelser opptrer.

Konklusjon: Manglende oppfølging og menneskelige feil fra kraftverkspersonalets side kan føre til regulatorfeil og unormale trykktransienter.

7. IKKE-DESTRUKTIV MATERIALKONTROLL FOR KRAFTVERKSRØR

En mulighet som er blitt drøftet er å undersøke rør med ikke-destruktivt måleutstyr, for å oppdage og måle sprekker som måtte finnes. Dette ble vurdert bl.a. i Tyssefaldene etter bruddet i 1980.

For å kunne basere seg på dette, vil en måtte ha en kritisk feilstørrelse å gå ut fra. Beregninger basert på lineær elastisk modell og utført i forbindelse med Tyssefaldenes rørbrudd gir feilstørrelser i området 38-107 mm gjennomgående sprekklengde. Det er imidlertid "tilpassede" verdier, da kriteriet for bruk av teorien ikke er oppfylt. Ut fra stålmaterialets lave slagseighetsverdier i forhold til det som kreves i dag vil akseptabel sprekklengde bli langt mindre.

Det er grunn til å understreke at det ikke har noen verdi å gjøre kostbare ikke-destruktive undersøkelser så lenge en ikke har et akseptkriterium å gå ut fra.

Det kan også være usikkerhet forbundet med bruk av ikke-destruktive metoder, og da særlig ved smisveiste rør. En sveitsisk undersøkelse ved W. Müller [1] argumenterer sterkt for at ultralydundersøkelser ikke er egnet til å finne sprekker og bindefeil ved smisveiste rør fordi inneslutninger, slagg m.v. virker forstyrrende inn.

Ultralyd er likevel en metode som er velegnet for å skille todimensjonale materialfeil fra tredimensjonale, men dette kan kreve at det benyttes forskjellige lydhoder og at man kommer til for å avsøke feilen fra mer enn et punkt. Av denne grunn har også

ultralyd-undersøkelser til nå vært den mest utbredte metode for fullverdig ikke-destruktiv materialkontroll av kraftverksrør utført av stål.

En ny metode er hvirvelstrømmålinger. Dette kan benyttes uten at gammel maling fjernes. På den annen side vil man ved hvirvelstrømmålinger kun detektere overflatefeil. I bruddmekanisk sammenheng har en feil i overflaten langt mer ugunstig virkning enn en tilsvarende stor feil som ikke går ut til overflaten. Ut fra produksjonsprosessen smisveiste rør har gjennomgått, der langsgående sveis bankes/smis sammen, vil det imidlertid ikke være unormalt at bindefeil skjules fra overflaten.

Velger man i første rekke å konsentrere seg om overflatefeil, har man også mulighet for å benytte magnetpulvermetoden, enten med elektroder eller permanentmagneter. Anvendes det elektroder, blir gammel malingfilm beskadiget.

Kostnadene ved ultralydsundersøkelser er store idet en må sandblåse sveisesømmen, undersøke med ultralyd, og male over etterpå. I [1] går en ut fra 1000 kr. pr. løpende meter rør som en tommelfingerregel.

Alt i at må en kunne si at gjennomføringen av ultralyd-kontroll på smisveiste kraftverksrør er forbundet med høy vanskelighetsgrad både når det gjelder fastleggelse av akseptkrav, gjennomføringen av registreringene og tolkningen av disse. Det er ikke gitt at vanlige kompetansekrav som gjelder ultralydoperatører i industrien, er tilstrekkelige for den operatør som skal undersøke et smisveist kraftverksrør. Gjennomføringen av den angitte kartlegging av materialfeil er meget kostbart.

Når det gjelder verdien av å utføre tilstandskontroll ifm. smisveiste rør, har NVE og Statkraft her ikke kommet frem til et helt samsvarende syn.

NVE mener at sålenge en ikke har akseptkriterier for ikke-destruktive undersøkelser og disse er såvidt vanskelige å fremskaffe, har det ikke noen verdi å sette igang slike utover det som til nå er gjort ved Glomfjord og Nore 1. Det vises her til vurdering fra Nybro-Bjerck a/s i [1], der nytteverdien og kostnadene ved slike undersøkelser ble vurdert.

Statkraft mener at dette bør være opp til den enkelte kraftverkseier å vurdere. Hvis NVE ut fra generell viten om smisveiste rør og aktuell bruddkonsekvens ved et enkelt anlegg finner at rørtilstanden ikke er tilfredstillende, bør kraftverkseieren få anledning til å bevise det motsatte. Dette kan tenkes gjennomført i 3 faser. Fase 1: Kraftverkseieren meddeler etter henvendelse fra NVE at han kan tenke seg å utføre undersøkelser. Fase 2: Kraftverkseieren oversender NVE til godkjennelse resultater av en forundersøkelse med vurdering av trykktransienter, materialegenskaper, opplegg for ikke-destruktive undersøkelser og akseptkriterier. Fase 3: Gjennomføring av ikke-destruktive materialundersøkelser. Noe avhengig av hvilken tid på året man kan komme til og undersøke røret, bør total tid fra NVE's første henvendelse til sluttført

fase 3 ikke ta lenger enn ca. 1 år.

8. VURDERING AV BRUDDKONSEKVENSER

Bruddkonsekvensene ved anleggene som er vurdert er varierende. Selv om brudd aldri kan betegnes som akseptabelt bør en likevel ta hensyn til bruddkonsekvensene, og skille mellom anlegg der brudd ikke medfører umiddelbar fare for menneskeliv og anlegg der faren for tap av menneskeliv ved rørbrudd er stor.

Ved Nore I og Glomfjord kraftverk kan rørbrudd medføre betydelig fare for tap av menneskeliv. Som det fremgår av vedlagte rapporter ligger bolighus, vei/bru og kraftstasjon utsatt til. Videre ligger kraftstasjonen, med bemannet kontorlokale vegg i vegg, utsatt til ved rørbrudd.

Ved Hakavik kraftverk vil rørbrudd kunne ramme veien til kraftstasjonen, men kraftstasjonen ser ut til å gå klar. Kraftstasjonen er dog bemannet. Bolighus i nærheten ser også ut til å ligge sikkert til ved rørbrudd. Dette kraftverket plasseres i en mellomposisjon.

Ved Haukeli kraftverk ser ikke rørbrudd ut til å ha store konsekvenser. Rørtrasseen ligger i en kløft, og kun kraftstasjonen (ubemannet) ser ut til å bli rammet ved rørbrudd. Nærliggende anleggshus er imidlertid bemannet, men ser ikke ut til å kunne bli rammet ved rørbrudd. Riksveien (E76) ligger omlag 150 meter unna, og det vurderes som lite sannsynlig at den rammes ved rørbrudd fordi dempningen vil være stor i forhold til rørenes kapasitet.

Anleggene Nore 1 og Glomfjord ansees å ha store og alvorlige bruddkonsekvenser, Hakavik har noe mindre bruddkonsekvenser. Ved Haukeli vurderes til å ha små konsekvenser ved rørbrudd.

Vedlegg 1

Statkraft

Dokumenttype
PMK-RAPPORT

Tittel	Tilgjengelighet/merknad		
HAUKELI KRAFTVERK KONTROLL AV RØRGATENE	OFFENTLIG		
Dok.id. / J.nr. / Arkivnr. PM/000088	Arkivsted SAKARKIV		Dato 10.10.90
Prosjekt	Ansv. for Statskraftverkene Finnerud Kjell	Adm.enhet PMK	Sign.
Stikkord/emneord	Saksbehandler Fjærvold Kjell-Tore	Adm.enh./Init. PMK/KTF	Sign. KTF
	Saksbehandlers tlf.nr. 9584	Ant.ark i alt 5	Derav bilag 0

Rapport fra kontroll av rørgatene på Haukeli kraftverk 21. - 22.08.90.

Dokumentet sendes til
S. Ammerud, PBG
R. Normann, DTo
PM, PMP, PMK, PMT

INNHOLDSFORTEGNELSE

INNLEDNING

RESULTAT AV KONTROLL

- Beregninger
- Tilleggsspenninger over opplagringene
- Materialanalyse
- Veggtykkelse
- Fundamenter
- Mekaniske skader
- Isproblemer
- Korrosjonsskader
- Kontrollhyppighet

KONKLUSJON

MÅLERESULTATER

1. INNLEDNING

I forbindelse med fullstendig tilstandsvurdering av Haukeli kraftverk ble det foretatt kontroll av rørgatene.

Ved kontroll av rørene ble det foretatt tykkelsesmåling fra utsiden av rørene, vha ulralydapparat og digital tykkelsesmåler. Det ble i tillegg foretatt sprekk-kontroll med virvelstrømapparat på 6 av montasje-skjøtene på rørene nede ved stasjonen. I tillegg ble det tatt innvendig visuell kontroll. (Se egen rapport). Kontrollene ble utført som stikk-prøve, men menes å gi et representativt bilde av rørenes tilstand. Se vedlagte måleskjema med prøveprotokoll.

Rørene med diameter Ø 600 mm er fra 1940, mens øvre del med diameter Ø 1000 mm er fra 1967.

Tilstede ved kontrollen:

Kjell Finnerud, PMK
Kjell-Tore Fjærvold, PMK

2. RESULTAT AV KONTROLLEN

Beregninger

Rør nr 1 er et Mannesannrør med flytegrense 380 N/mm² (prøver tatt i 1985 i forbindelse med rørbrudd). Rør nr 2 er et rør fra Hutta Ferrum. En antar at dette er et stål med flytegrense på 220 N/mm².

Ved beregning av nye rør i dag ville en legge sikkerheten på 2,5 for frittliggende rør i betongsadler. En tar da kun hensyn til ringspen-ningene og ikke de lokale spenningstoppene over betongstøttene.

Beregning av rør nr 1 viser at en trenger en nødvendig tykkelse på 5 mm for å få en sikkerhet på 2,5 for den nedre delen. Tykkelsene som er målt har et snitt på 9 mm. Også for den øvrige delen av røret har en meget god sikkeret. Dette betyr at groptæringe kan være opp til 4 mm dype uten at det skulle være noen reell fare for lekkasje på røret. Dette gjelder under forutsetning om at det er brukt materialkvalitet med flytegrense på 380 N/mm² i hele rørgatens lengde. En går ut fra at det er brukt denne materialkvaliteten i hele rørstrekningen.

For rør nr 2 er det brukt tykkere rør oppstrøms kloss nr 2. Ved bruk av materialkvalitet med flytegrense på 220 N/mm² har en også her en sikkerthet på 2,4 med dagens målte tykkelser. Røret synes også å være i noe bedre stand enn rør nr 1.

Tilleggsspenninger over opplagringene

Spenningene over opplagerklossene er ca 50% høyere enn for jevnførende spenning i røret. Dvs at rørene fremdeles har tilfredsstillende sikkerhet.

Materialanalyse

I forbindelse med rørbrudd på rør nr 1 i 1985, ble det tatt materialprøver av røret. Flytegrensen for stålet var 380 N/mm², og når seigheten i tillegg var god, er dette bra. Materialet er i tillegg godt sveisbart.

Prøver av rør nr 2 er ikke tatt. Vi går ut fra at det min. dreier seg om et stål med flytegrense på 230 N/mm². Selv dette gir bra sikkerhet for rør nr 2 etter dagens forhold.

Veggtykkelse

Generelt har tykkelsen på rørene blitt redusert med fra 1 til 2 mm. Det er sannsynligvis en del groptæringer inne i rørene, men disse ble ikke observert ved stikkprøvekontrollen. Slike tæringer på ca 2 - 3 mm lokalt burde ikke ha noen betydning når røret ellers har god tykkelse. (Se kapittel om beregninger).

Utvendig er det noe varierende kvalitet på malingbelegget, men stort sett er dette for dårlig hvis rørene skal kjøres i 10 til 20 år til. Det bør males utvendig. Innvendig maling synes vanskelig å få utført pga rørenes små diameter.

Fundamenter

Visuell inspeksjon av støttene av betong viser at disse er i bra stand. Det er noen få som bør utbedres noe. (Se bemerkninger i måleprotokollen).

Mekaniske skader

Pendelbukkene av stål har noen få skader. Skadene bør utbedres. (Se bemerkninger i måleprotokollen).

I selve rørtraséen var det en god del stein. Steinene har enkelte plasser truffet rørveggen og gitt noen få lokale innbulninger. Disse ansees ikke som farlige. Stein og betong rundt rørene fjernes. Disse ansees som ikke farlige.

Isproblemer

Ved tømt rør og lekkasje i ventilene, kan det dannes is i rørgatene. Når vannet sette på, kan det føre til oppstuving og evt trykkstøt. En slik situasjon er driften inneforstått med.

Uforutsatte trykkstøt er selvsagt ikke heldig, og kan medføre brudd. Feil regulering av turbinen kan også gi trykkstøt. Se rapport fra PMT angående turbinen.

Korrosjonsskader

Ved innvendig inspeksjon ble det ikke påvist større groptæringer e.l. enn det som ble målt med ultralyd fra utsiden av røret. (Se rapport fra denne inspeksjonen).

Kontrollhyppighet

Hvis røret beholdes og det ikke foretas noen form for korrosjonsbehandling innvendig i røret, anbefales det at det tas tilsvarende kontroll som den ovennevnte om ca 5 år.

3. KONKLUSJON

Røret synes å ha en godstykkelse som langt på vei oppfyller de krav vi stiller ved dimensjonering av nye rørgater. Røret kan være noe svekket pga alle groptæringene, men med gjennomsnittlig god godstykkelse skulle ikke dette være noe alvorlig. Røret bør imidlertid males utvendig hvis en ikke skal få en økt akselerasjon av korrosjon, og svekkelse av røret. Betongstøttene og pendelbukkene bør også overhales. Men dette er et begrenset arbeid. Stein som ligger inntil rørene bør fjernes. Videre bør rørgaten ryddes for buskas.

Hvis røret behandles som ovenfor nevnt, bør det kunne brukes i mange år fremover.

Vedlegg 1

NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK
Vassdragstilsynet

RAPPORT

INSPEKSJON VEDRØRENDE: RØRGATEN VED NORE I KRAFTVERK, STATKRAFT	
UTFØRT AV: JAN FREDRIK NICOLAISEN	DATO: 19.09.90

Med på inspeksjonen var:

Arne Bjercke, Statkraft

Anlegget, som ble idriftsatt i 1927, har 8 rør, som er nummerert fra venstre mot høyre i strømningsretningen. Omlag 50 m fra kraftstasjonen forgrener hvert av rørene seg i to. Maksimalt vanntrykk er 300 meter.

Smisveiste rør:

Etter inspeksjon langs rørgaten kan en fastslå at rør 1, 2, 3, 4, 6 og 7 er smisveist i hele lengden nedstrøms kloss 3. Oppstrøms kloss 3 er de klinket på langs. Rør 5 og 8 er elektrisk sveiset.

De 16 forgreningsrørene ble ikke inspisert i detalj, men det ble observert at de fleste av disse er smisveist.

Bruddkonsekvenser:

Omlag 50-70 m fra rørgaten ligger et boligfelt, hvorav noen få boliger tilhører Statkraft. Under inspeksjonen ble beliggenheten vurdert til å ligge utsatt til ved rørbrudd for en del av boligene, (som ikke eies av Statkraft). Når en tar hensyn til lek/ ferdsel m.v. i nærheten av boligene er det opplagt at et rørbrudd kan føre til fare for liv i tillegg til større skade på annen manns eiendom.

Videre går bru over rørgatens nedre parti, ved rørbrudd vil ferdsel her være utsatt. Til slutt nevnes at kraftstasjonen er utsatt ved rørbrudd.

Tidligere rørbrudd m.v.

Under rørbruddet på et av de mindre grenrørene nær kraftstasjonen i 1972 ble taket av betong "blåst av" kraftstasjonen, i følge Bjercke. Rørbruddet ble etterfulgt av en ultralydsundersøkelse av hele rørgata, som jeg fikk rapport fra.

Tidligere rørbrudd skjedde i 1949, da ble ny rørseksjon innmontert uten videre undersøkelser, i følge driftsbestyrer Nilsen.

Videre ble det opplyst fra Nilsen at rør 2 og 4 ble utsatt for store trykkstøt rundt 1980, med trykk oppe i 600 meter vanntrykk ved kraftstasjonen.(!)

Maksimalt trykkstøt er nå, i følge Nilsen, begrenset til 10% ved innstilling av regulator.

Rørbruddsventilene m.v.

Rørbruddsventilene prøves til delvis lukking hver 8. dag. Videre lukkes rørbruddsventilene 100% mer enn en gang i året. Ventilene kan i tillegg til automatisk utløsning også lukkes med impuls fra kraftstasjonen.

Det bør sjekkes hvordan ventilene er kalibrert for automatisk lukking ved økning av vannhastigheten i rørene. Videre bør sikkerheten ved impuls-utløsningen av ventilene gjennomgås, med tanke på de skader rørbrudd kan medføre på signaloverføringen.

Vedlegg 1

NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK
Vassdragstilsynet

RAPPORT

INSPEKSJON VEDRØRENDE:	
SMISVEISTE RØR VED GLOMFJORD KRAFTVERK, STATKRAFT	
UTFØRT AV: Jan Fredrik Nicolaisen	DATO: 27.09.90

Med på inspeksjonen var:

fagarb. Lorentsen, Statkraft-Glomfjordverkene
stasjonsleder Thorrud, Statkraft-Glomfjordverkene
o.ing. Finnerud, Statkraft PM
a.ing. Fjærvold, Statkraft PM

Data om rørgaten:

Antall rør: 3 stk.
Maksimalt statisk vanntrykk: omlag 462 mVs
Diameter: 2.0 - 1.4 m

Kraftstasjonen er bygget i 1917/18, da ble rør I og II montert. Rør III ble levert under krigen og satt i drift i 1947. (Rør I er lokalisert til høyre i strømningsretningen).

Storparten av rørgata er av smisveiste rør. Nederste delen er bandasjert. Det var ikke lett å fastslå om de bandasjerte rørene var smisveist, men det kan vi gå ut fra, da vi ikke observerte noe som tyder på at de ikke er det.

Lengst oppstrøms i rørgata, mellom kloss 11 og 12, er rør II elektrisk sveiset. Dette partiet ble byttet ut til nyere elektrisk sveiset rør etter rørbrudd i 1957, noe vi fikk rapport fra.

Oppstrøms kloss 6 er også et parti av rør I elektrisk sveiset. Videre er strekningen mellom fundament 5 og 7 overgang mellom bandasjert rør som går ned mot stasjonen, og ikke bandasajert rør. Denne overgangen er mellom kloss 5 og 6 for rør I, ved kloss 6 for rør II, og mellom kloss 6 og 7 for rør III. Mye tyder på at deler av dette partiet er skiftet ut etter sabotasje i 1942, som førte til brudd på rør I og II. Thorrud skulle undersøke detaljene rundt dette grundigere, slik at en kan fastslå nærmere hva som er skiftet ut.

Rørbruddsventilene ble inspisert. I følge Thorrud er "flagget" som skal medvirke til lukking av rørbruddsventilen ved økning av vannstrømmen, vanskelig å få kalibrert på en tilfredstillende måte. Dette tilsier at en må basere seg på eletrisk lukking fra kraftstasjonen, noe det er lagt opp ledning for. Ledningen så ut til å være lokalisert langs med rørtrasseen hele veien, noe som gjør den sårbar ved et eventuelt rørbrudd. Dette skulle undersøkes nærmere av Thorrud.

Videre er lukking basert på det såkalte arbeidsprinsippet, det vil si at signal må gis for at lukking skal skje. Ved brudd på ledning vil det ikke være mulig å få gitt lukkesignal. Dersom en hadde basert seg på holdestrøm ville strømbrudd kunne gitt automatisk lukking. Det er en sikrere løsning, men vil muligens bli sett på som et drifts-problem/forstyrrelse.

Rørbruddsventilen prøves til delvis lukking hver 14. dag. Det var uklart om ventilen ble prøvd til 100% lukking hvert år, slik vi krever.

Bruddkonsekvensene så ut til å være store mot kraftstasjonen. Vann fra rørbrudd vil sannsynligvis følge rørtrasseen ned mot kraftstasjonen. Kraftstasjonen, som arkitektonisk må være en av de fineste i Norge, har i tillegg til driftspersonell også kontorpersonell m.v. Det er regelmessig omvisninger i stasjonen, og utløpet fra stasjonen er en yndet fiskeplass for hobbyfiskere. Under inspeksjonen ved tilfeldig forbipassering var det en som kastet opp en stor laks, som av de lokale ble omtalt som en "liten" fisk.

Til slutt nevnes følgende:

- Ved kloss 6 ("pianoet") var det løse steinklosser som så ut til å representere en fare mot rørgata. En del av steinene var sikret, men dette bør vurderes på nytt.

- En støttepilar mellom kloss 10 og 11 på rør II hadde skader i betongen som bør rettes opp snarlig.

- Det var ikke noe å utsette på rørets overflate, som ble overhalt i 1988.

Fra rester av gamle rør ble det avtalt med Lorentsen at deler av to rør-rester skulle sendes til Finnerud for analyse hos Veritec e.l. Prøveprogram settes opp av Statkraft PM og NVE-Vassdragstilsynet i samarbeid.

Vedlegg 1

NVE
NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIVERK
Vassdragstilsynet

RAPPORT

INSPEKSJON VEDRØRENDE: RØRGATEN VED HAKAVIK KRAFTVERK, STATKRAFT	
UTFØRT AV: JAN FREDRIK NICOLAISEN	DATO: 02.10.90

Med på inspeksjonen var:

Finnerud, Statkraft

Anlegget har 2 stk. smisveiste rør, med diameter fra 1.4 til 0.8 meter.

Trykkhøyden er ca. 388 m statisk vanntrykk.

Rørbruddsventilen er ikke pålitelig med tanke på automatisk utløsning, ifølge stasjonsleder Gislerud. Fjernutløsning av ventilen kan gjøres fra stasjonen. Ledningen for fjernutløsning er lokalisert i god avstand, ca 50 m, fra rørgata.

Fjernutløsning er blitt prøvd ukentlig, 100 % lukking av ventilen er ikke blitt prøvd.

Det har ikke vært nevneverdige driftsproblemer ved rørgata, på tross av trykkstøt på omlag 300 mvs.

Overflaten på røret er slitt, malingen begynner å skalle av. Overflatekorrosjon er utbredt, uten at dype tæringer ble registrert. Innvendig ble røret malt i 1980.

Bruddkonsekvensene begrenser seg til stasjonen, og muligens ett bolighus nær stasjonen.

SPRØBRUDDSIKKERHET.

1.Innledning.

Med sprøbrudd menes i denne sammenheng ustabile brudd med hurtig, ukontrollert, sprekkvekst.

Brudd av denne typen skjer med minimal bruddeformasjon.

Karakteristisk for sprøbruddet er at det kan inntreffe ved nominelle driftsspenninger som er langt lavere enn materialets flytegrense.

Bruddet starter fra skarpe materialfeil, f.eks. sveisefeil, som forårsaker lokale spenningskonsentrasjoner. Feil som utløser sprekkvekst og brudd er ofte små, og de farligste feil er "plane" feil (to-dimensjonale feil som sprekker o.l.)

Sprøbrudd har gjennom tidene vært en hyppig bruddårsak ifm. stålkonstruksjoner, og det er etterhvert utviklet en rekke prøvemetoder for å karakterisere materialenes tendens til sprøbrudd.

Rent skjematisk kan disse metodene deles i tre grupper:

- småskala rangeringsprøving (slagseighetsprøving)
- bruddmekanisk prøving
- full-/storskala prøving

2.Slagseighetsprøving.

Den vanligste fremgangsmåte for å unngå sprøbrudd er å stille bestemte krav til materialets og sveisens evne til å oppta mekanisk energi ved Charpy prøving.

Opprinnelig forlangte man at omslagstemperaturen, definert som temperaturen ved en energiabsorbsjon på 27,5J, skulle være lavere enn en nærmere bestemt konstruksjonstemperatur som lå godt under normal driftstemperatur for konstruksjonen.

Verdien 27,5J er en empirisk verdi som fremkom etter en omfattende undersøkelse av sprøbrudd i skip under den annen verdenskrig.

I standarder for stålkonstruksjoner er vanligvis denne verdien skjerpet, for å ta hensyn til effekten av større platetykkelser og høyere flytegrense.

Charpy prøvingen foregår under stor belastningshastighet, og metoden karakteriserer et materiales evne til å motstå slagbelastning. Det er det totale slagarbeid som måles, man skiller ikke mellom hvor mye energi som brukes til å initiere bruddet og hvor mye som går med til å forplante det.

Fordelen ved denne metoden er at den er enkel og billig, og bygger på et stort erfaringsgrunnlag. Med kjente materialer er metoden godt egnet til å sjekke om man har den spesifiserte materialkvalitet.

Slagseighetsverdien kan imidlertid ikke brukes for å dimensjonere mot sprøbrudd.

3.Bruddmekanisk prøving.

Bruddmekanikken er basert på teoretisk/matematisk analyse av parametrene som påvirker sprøbrudd og tar sikte på å karakterisere motstanden mot sprøbrudd med en materialkonstant.

Innen lineær-elastisk bruddmekanikk kalles denne konstanten K_{IC}, mens man innen den elastisk-plastiske bruddmekanikk har sprekkåpningen (CTOD) som parameter.

Grunnlaget er følgende antagelser:

- sprøbrudd initieres ved feil i materialer som forårsaker store spenningskonsentrasjoner.
- det eksisterer en kritisk feilstørrelse, og at to-dimensjonale (plane) materialfeil større enn kritisk feilstørrelse utløser et ustabilt brudd (sprøbrudd).
- kritisk feilstørrelse er avhengig av av spennings-/tøynings-tilstanden ved sprekkfronten og av materialets egenskaper.

Fremgangsmåten for å bestemme K_{IC} og CTOD er standardisert.

K_{IC} og CTOD karakteriserer motstanden mot initiering av sprøbrudd ved langsom pålastning.

For en del viktige materialer har man observert at bruddseigheten avtar med økende deformasjonshastighet.

28-02-1991

Ved lave temperaturer der man har sprøbrudd som dominerende bruddmekanisme, vil imidlertid bruddseigheten variere lite med deformasjonshastigheten.

Fordelen med bruddmekanisk prøving er at resultatene kan brukes til å forutberegne kritisk sprekkstøttelse eller kritisk spenning i en konstruksjon.

Den bruddmekaniske prøvingen er imidlertid mer omfattende og kostbar enn Charpy prøving.

3.1.Lineær-elastisk prøving (K_{IC}).

For at den lineær-elastiske bruddmekanikken skal være relevant og kunne anvendes for dimensjonerig mot ustabile brudd må forholdene ved sprekkspissen være dominert av plan deformasjon, dvs. treakset spenningstilstand, og dermed begrenset utstrekning av flytesonen foran sprekkspissen.

Denne betingelsen er bare oppfylt ved meget store platetykkelser eller i sprø materialer.

Kriteriet for om K_{IC} kan brukes som parameter kan formuleres som følger:

$$t \geq 2{,}5\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_F}\right)^2$$

der:

t = platetykkelse

K_{IC} = bruddseighet (MPa $\sqrt{m}$)

σ_F = flytegrense (Mpa)

For vanlige konstruksjonsstål er lineær-elastisk bruddmekanikk som oftest ikke relevant.

3.2.CTOD - prøving (Crack Tip Opening Displacement).

Når en sprekk initieres fra en skarp feil i et duktilt stål, skjer det først en strekking av materialet foran feilfronten.

I den elastisk-plastiske bruddmekanikken postulerer man at den kritiske åpningen ved spissen av en sprekk, $CTOD_c$, like før en ny sprekk initieres, er en konstant for et bestemt materiale av gitt tykkelse.

Den kritiske CTOD verdien betegnes vanligvis med δ_c.

Da CTOD verdiene er tykkelsesavhengige kreves at prøvingen skal utføres i full materialtykkelse.

4.Full-/storskala prøving.

Ved slik prøving tar man sikte på å reprodusere de virkelige forhold så direkte som mulig med grunnmateriale og sveiseforbindelse i full godstykkelse og med stor bredde på prøvestykket, slik at sprekkgeometri og spenningsfordeling tilsvarer de virkelige forhold.

5.Resultat av utførte materialundersøkelser.

5.1.Slagseighet.

Følgende verdier for Charpy V test er fremkommet:

	Temperatur, °C								
Anlegg:	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40	+50	+60
Bjølvefossen	3	4	6	8	11	16	22	33	45
Maudal		4	5	11	18	20	34		
Nore I (gj.sn.)	6	4	8	17	27				
Glomfjord (pr.1)			5		11		39		
Glomfjord (pr.2)			6		9		24		
Haukeli			3		13		35		

Det bør påpekes at en her har basert seg på en nedre omhyllingskurve, mens ved Nore I var kun gjennomsnittsverdier oppgitt.

5.2.CTOD-verdier.

Følgende verdier for CTOD er fremkommet, ved 0 °C:

Prøve/materiale	t, mm	CTOD min., mm	CTOD middel, mm
Maudal, grunnmat.	27	0,063	0,240
Haukeli, grunnmat.	6	0,083 (0,017)*	0,239
Glomfjord, grunnmat.	16	0,354	0,765
Glomfjord, grunnmat.	29	0,021	0,022
Glomfjord, smisveis	16	0,131	0,214

*: usikker verdi anslått for prøve som brakk under "precracking".

6.Vurdering av resultater.

I forhold til moderne stål har disse materialene dårlige seighetsegenskaper ved høye belastningshastigheter (Charpy slagseighet) og i nærvær av skarpe kjerver/defekter (CTOD bruddseighet).

Dette er typisk for eldre stål av den typen det her gjelder, og tilskrives i hovedsak det høye innholdet av fosfor og andre forurensningselementer i disse materialene.

Mht. Charpy slagseighet regnes ved 0 °C 27,5J som akseptabelt. De målte verdier ligger på 11 - 29% av dette.

Min. CTOD verdi målt av Veritec ifm. undersøkelse av slike materialer er 0,021mm. Verdier ned mot 0,010mm utelukkes ikke, men forventes evt. bare å opptre helt lokalt, f.eks. i eldet materiale rundt en sprekkspiss.

Risikoen for sprøbrudd kan vurderes ved å sette opp såkalte bruddanalysediagram, jfr. vedlagte figurer 1 og 2 som er utarbeidet av Veritec for Nore I.

Parametre som inngår i beregningene er CTOD verdi, sprekkdybde og spenningsnivå.

For hvert punkt i figurene er det angitt en antatt CTOD verdi.

Når punktet ligger under kurven er tilstanden å betrakte som sikker, mens et punkt utenfor kurven indikerer at det er fare for brudd.

28-02-1991

Av figur 1, som gjelder for fallhøyde 300m og et trykkstøt som er 50% av fallhøyden, fremgår at nødvendig CTOD for å unngå brudd under disse forhold er:

- sprekkdybde 12mm: $CTOD_{krit}$ = 0,019mm
- sprekkdybde 18mm: $CTOD_{krit}$ = 0,050mm

Tilsvarende fremgår av figur 2, som gjelder for fallhøyde 300m og 20% trykkstøt:

- sprekkdybde 12mm: $CTOD_{krit}$ = 0,012mm
- sprekkdybde 18mm: $CTOD_{krit}$ = 0,029mm

Disse resultatene viser at initiering av sprøbrudd krever et sammenfall av ugunstige omstendigheter som hver for seg har liten sannsynlighet:

- lav CTOD verdi
- stor sprekkdybde
- høyt spenningsnivå

De to første parametrene er det lite å få gjort med. Disse materialene har i utgangspunktet dårligere seighetsegenskaper enn moderne materialer, og smisveisene vil inneholde defekter. Det viktigste virkemiddel for å hindre sprøbrudd vil derfor være å sikre mest mulig stabile driftsforhold, uten store og hyppige trykkstøt.

VERITEC

Veritas Offshore Technology and Services A/S

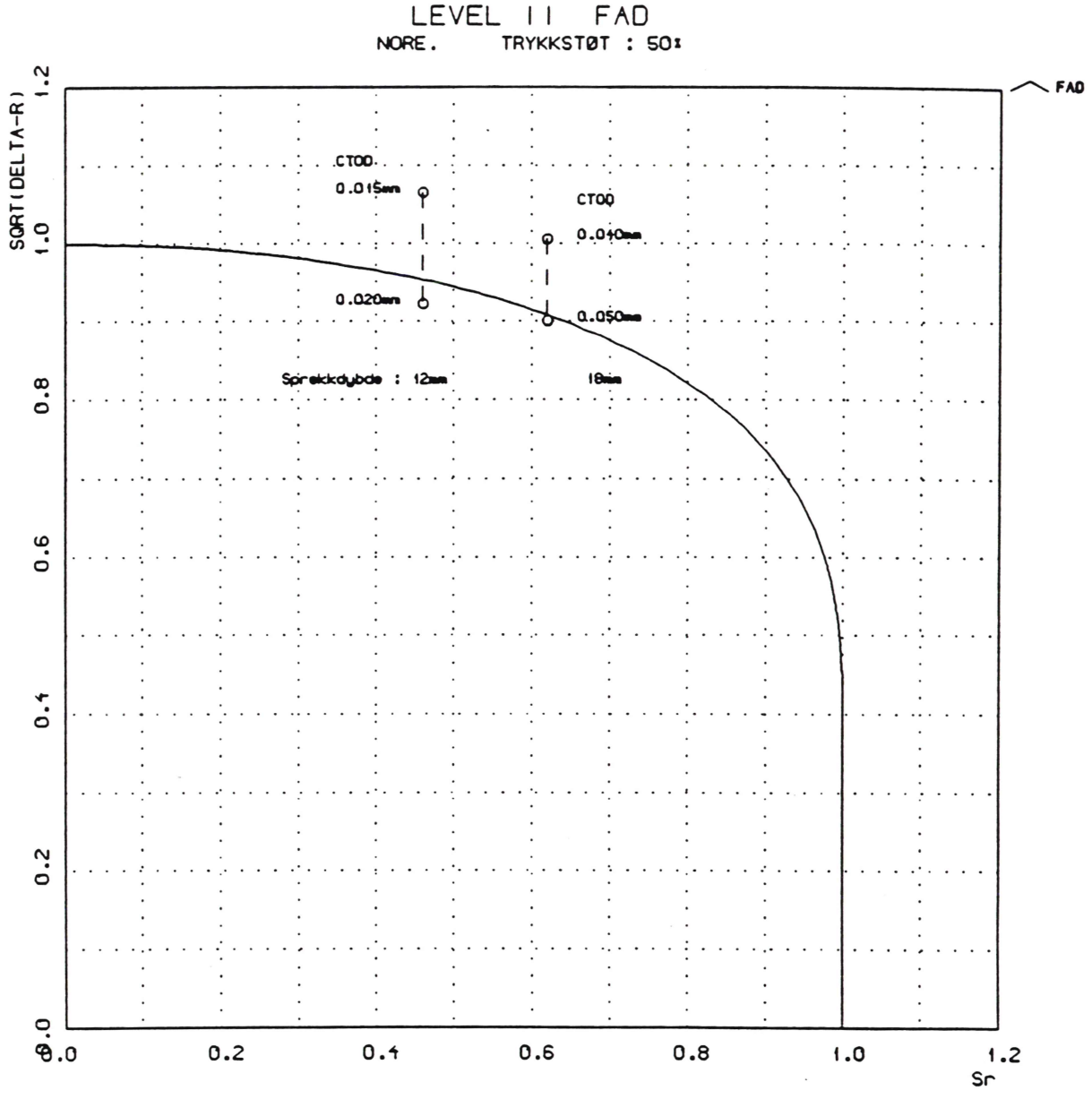

Fig. 1 Feilanalysediagram for
vanntrykk: 300 m
trykkstøt: 50%
veggtykkelse: 35 mm
diameter: 1,6 m

Kritisk CTOD-verdi for sprekkdybde a:
a = 12 mm : 0.019 mm
a = 18 mm : 0.050 mm

Gjengivelse i utdrag som kan virke misvisende, er ikke tillatt/
Reference to part of this report which may lead to misinterpretation is not permissible.

VERITEC

Veritas Offshore Technology and Services A/S

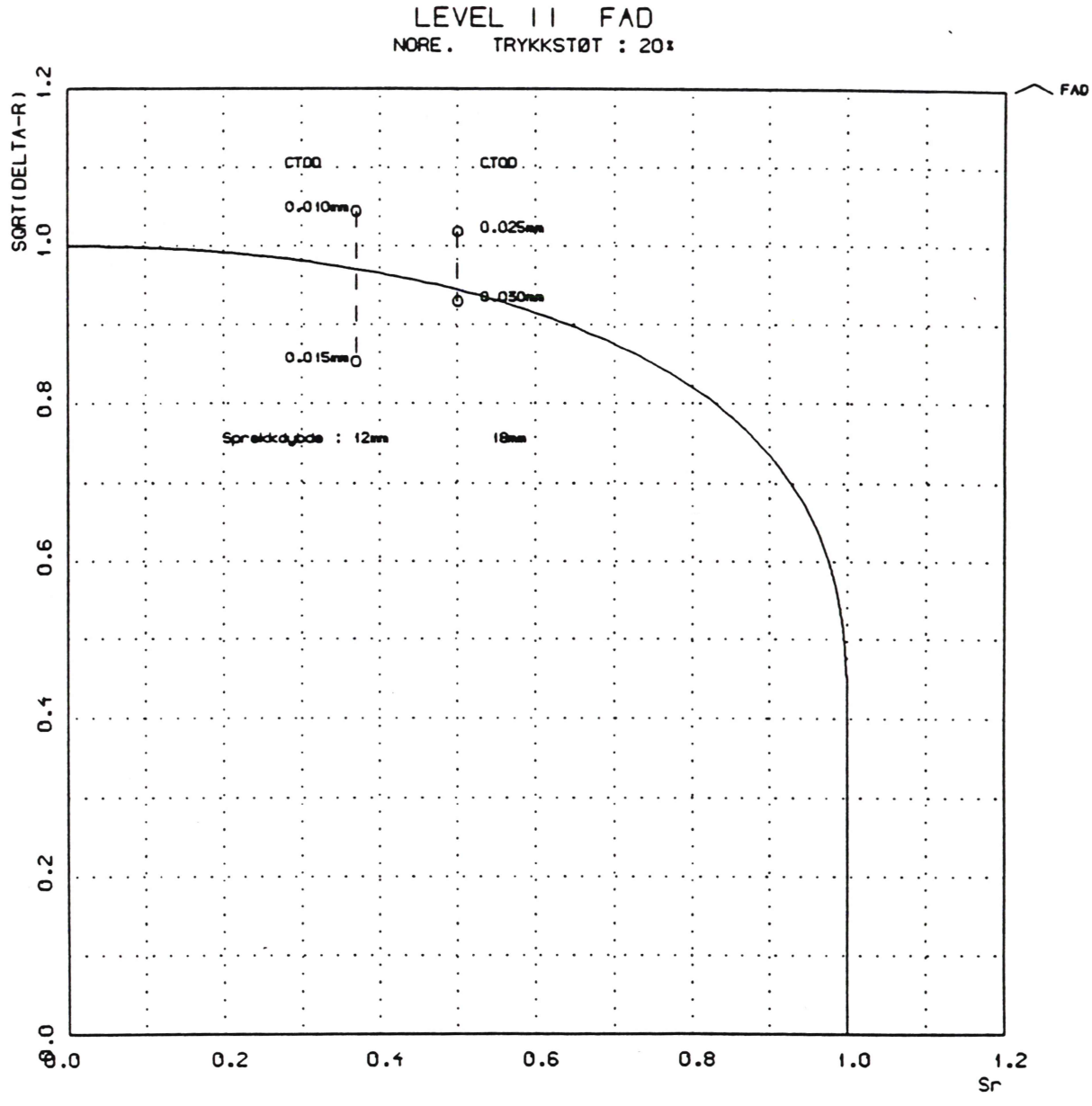

Fig. 2 Feilanalysediagram for
vanntrykk: 300 m
trykkstøt: 20%
veggtykkelse: 35 mm
diameter: 1,6 m

Kritisk CTOD-verdi for sprekkdybde a:
a = 12 mm : $CTOD_{kritisk}$ 0.012 mm
a = 18 mm : $CTOD_{kritisk}$ 0.029 mm

Gjengivelse i utdrag som kan virke misvisende, er ikke tillatt/
Reference to part of this report which may lead to misinterpretation is not permissible.