

Sandslitasje på vannkraftturbiner

Slitasjetesting

RAPPORT 1984

Prosjektansvarlig:
**Vassdrags-
regulantenens
forening**



NORGES VASSDRAGS-
OG ENERGIDIREKTORAT
BIBLIOTEKET

SANDSLITASJE PÅ VANNKRAFTTURBINER

SLITASJETESTING

Komitteen for undersøkelse av
sandslitasje på turbiner 1983

FORORD

ORIENTERING OM PROSJEKTET SANDSLITASJE PÅ TURBINER

Bakgrunn

Sira-Kvina Kraftselskap tok våren 1977 kontakt med Servicekontoret for driftserfaringer og anmodet kontoret om å foreta en undersøkelse omkring sandslitasje på turbiner.

En komité som fungerte som en arbeidsgruppe arbeidet med spørsmålet i ca. 1 år og ga 19.6.1978 ut en rapport, SD nr. 9, "Sandslitasje på turbiner", som hadde til formål å kartlegge problemstillingen. Rapporten tok for seg forskjellige sider ved sandslitasje med spesiell vekt på følgende forhold:

- Geologi (mineralogi)
- Sandtransport i tunneler, sandfang
- Økonomi

Rapporten konkluderer med at problemet er for dårlig undersøkt, spesielt med hensyn til mineralogi og økonomiske konsekvenser. Samtidig er det begrenset hva man kan hente av opplysninger fra utlandet. Skulle man derfor kunne bidra til å forbedre forholdene ved norske kraftverk, ville det bli nødvendig å gjennomføre et forsknings- og utredningsprosjekt. RL sa seg villig til å stå bak et slikt prosjekt, og utarbeidet sammen med komitéen kostnadsoverslag og prosjektplan for et 3 års forskningsprosjekt.

Beskrivelse av prosjektet

Prosjektet kom i gang ca. 1.4.1980 og var forutsatt avsluttet i løpet av 3 år. I beskrivelsen av prosjektet er følgende angitt som formål:

Fremskaffe nødvendig grunnlag for rasjonell vurdering av sandslitasje på turbiner og annet mekanisk utstyr for teknisk/økonomisk prosjektering av kraftanlegg og utbedring av slitasjeproblemer ved eksisterende anlegg.

Arbeidsprogrammet er delt opp i 3 hovedområder. Målsettingen innenfor disse 3 områdene er:

1. Å kunne anslå sannsynlighet og utviklingshastighet for skadelig sandslitasje ut fra opplysninger om geologiske (mineralogiske) forhold (tunneltrasē, bekkeinntak, inntaksmagasiner etc.) og turbinkonstruksjoner.
2. Ut fra gitte forutsetninger å kunne vurdere sandtransporten gjennom tunnelsystemet, planlegge tiltak (sandfang e.l.), og kjenne tiltakenes virkning for å redusere turbinslitasje.
3. Etablere underlag for å kunne vurdere de totale kostnadmessige konsekvenser av turbinslitasje, dvs. redusert virkningsgrad, revisjonskostnader, driftstans og eventuelt vanntap.

Det ble i første rekke lagt vekt på å vurdere norske forhold og å komme fram til løsninger tilpasset våre kraftverk. Det skulle likevel i en viss grad etableres kontakt med utlandet, særlig alpelandene, der slitasjeomfanget synes å være vesentlig større enn hos oss.

For å få en oversikt over omfanget av sandslitasje i Norge, og for å få et inntrykk av flest mulige sider ved sandslitasje, ble det etablert kontakt med 10 - 15 kraftverk. Disse stilte seg alle meget positive til å samarbeide med prosjektet, og stilte sine anlegg til disposisjon for undersøkelser. I flere tilfeller ble også mannskaper og økonomiske midler stilt til rådighet.

Mye av arbeidet er lagt på geologien, både for å finne kildene for sanden og for å analysere den mineralogiske sammensetning. Fra tidligere forelå en god del erfaringer fra sandtransport i tunneler, sandfang o.l.

Spørsmålene er blitt bearbeidet av fagfolk i samarbeid med komitéens medlemmer. Blant annet til innhenting og bearbeiding av feltprøver har

diplomkandidater ved NTH vært til stor nytte.

Prosjektkostnader

Prosjektet har budsjettet med utgifter på ca. 1,5 mill. kr. i løpet av 3 år. De kilder som har bidratt er:

1. NTNF
2. Konesjonsavgiftsfondet
3. Kraftverkene
4. Egeninnsats komitémedlemmer og andre

Bidragene har dels vært pengebidrag, dels egeninnsats av komitémedlemmene og deres organisasjoner. Et vesentlig bidrag har også vært de undersøkelser som er utført i samarbeid med prosjektet, og som er betalt direkte av det enkelte kraftverk.

Styring av prosjektet

Den komité som utarbeidet den første rapporten, har fortsatt som prosjektets styringskomité.

Komitéens medlemmer er:

Dosent Ragnar Dahl, Geologisk Institutt, NTH
Sjefing. Rolf Dillner, Sira-Kvina Kraftselskap
Siv.ing. Svein Jenssen, Sivilingeniør Nybro Hansen A/S
Dr.ing. Dagfinn K. Lysne, Konsulent
Teknisk sjef Sigurd Pettersen, Vassdragsregulantenenes forening

Komitéens formann har vært Lysne, mens Pettersen har vært prosjektkoordinator og sekretær.

Følgende personer har vært knyttet til prosjektet som faglige medarbeidere:

Lab.ing. Torgeir Blindheim, Geologisk Institutt, NTH
Overing. Ragnar Hartmann, NVE-Statskraftverkene
Gruppeleder Kåre Tvinnereim, NHL/VHL

Fra 1.1.1982 da Blindheim gikk over i ny stilling, ble det meste av hans engasjement overtatt av siv.ing. Ola By, Geologisk Institutt, NTH.

En rekke diplomkandidater har dessuten utført undersøkelser i samarbeid med prosjektkomiteen.

INNHOLDSFORTEGNELSE	Side
1. SAMMENDRAG	2
2. INNLEDNING	4
3. METODEBESKRIVELSER	5
3.1. Geologisk Institutt's metode for måling av slitasjeverdi	5
3.2. Stauffer's metode for måling av slitasjetallet	6
3.3. Brinell hardhetsmålinger	8
4. ANALYSERESULTATER	9
5. ANALYSEMETODENE OG RESULTATENE SETT I FORHOLD TIL VIRKELIG TURBINSLITASJE	17
APPENDIX 1	

1. SAMMENDRAG OG KONKLUSJONER

Formålet med undersøkelsene var:

- om mulig å finne en egnet metode for å klassifisere ulike ståltyper med hensyn til abrasiv slitestyrke.
- å sammenligne Geologisk Institutt's metode for slitasjetesting med andre aktuelle metoder for måling av stålets slitestyrke.
- å teste forskjellige mineraler og mineralblandingers sliteevne på stål.
- å belyse hvordan slitepulverets kornstørrelsesfordeling og kornform innvirker på sliteevnen.

Det er utført abrasiv slitasjetesting på fire ulike ståltyper med flere typer slitepulver. De samme ståltypene er også testet med Stauffer's metode som er mye brukt i andre land, og det er også utført Brinell hardhetsmålinger. En av ståltypene er spesielt testet med flere forskjellige mineraltyper, blandinger av disse og naturlige sandprøver som slitepulver.

De samlede resultatene bekrefter at ulegert stål med lav hardhet, type Pos. 101, også har lav slitestyrke. Den lavlegerte konstruksjonstypen, GS-25 CrMo 4, har heller ikke spesielt stor slitestyrke, mens de to andre typene som er testet, CrNi 134 og CrNiMo 165, er mer motstandsdyktige mot abrasiv slitasje.

Alle metodene klassifiserer ståltypene i samme rekkefølge med hensyn til slitestyrke, men Geologisk Institutt's metode skiller dårligere mellom ståltypene enn Stauffer's metode og Brinell hardhetsmåling.

Testing av ulike pulvertyper viser at:

- kvarts sliter sterkest.
- feltspat sliter bortimot halvparten så mye som kvarts, noe varierende for forskjellige feltspattyper.
- hornblende og pyroksen virker også slitende, men ikke i samme grad som kvarts og feltspat.
- naturlige sandprøver, som har mer avrundede korn, sliter mindre enn nedknust materiale.
- det synes som om sliteevnen avtar når kornas midlere diameter minker.

Det er ikke mulig å sammenligne disse forsøkene direkte med det som virkelig skjer ved sandslitasje på turbinstål. Forholdene med hensyn til sandmengde, kornfordeling, trykk, hastighet o.l. er for lite undersøkt til at det er mulig å si noe sikkert om sammenhengen. Ut fra de erfaringene som vi har til nå virker imidlertid tendensene i resultatene rimelige. Denne problemstillingen vil bli diskutert nærmere i sluttrapporten for prosjektet.

2. INNLEDNING

Slitasje på turbiner, f.eks. løpehjul, har vært et velkjent og stort problem i Mellom-Europa, hvor turbinleverandører har utført til dels omfattende undersøkelser for å klarlegge slitasjen på aktuelle materialer. Erfaringsmessig vil en rekke faktorer påvirke slitasjen, og innvirkningen av disse kan være svært forskjellige ved de ulike prøvemetodene. Det er derfor vanskelig å sammenligne resultater oppnådd ved ulike forsøksbetingelser. Et fellestrekk er at ingen av de vanligste metodene arbeider med de væske- og/sandhastigheter samt sandkonsentrasjoner som vanligvis forekommer på slitasjeutsatte turbindeler. Slitestyrken målt med slike metoder stemmer derfor ikke alltid med det man erfarer i praksis, og driftserfaringer er i så måte svært viktige.

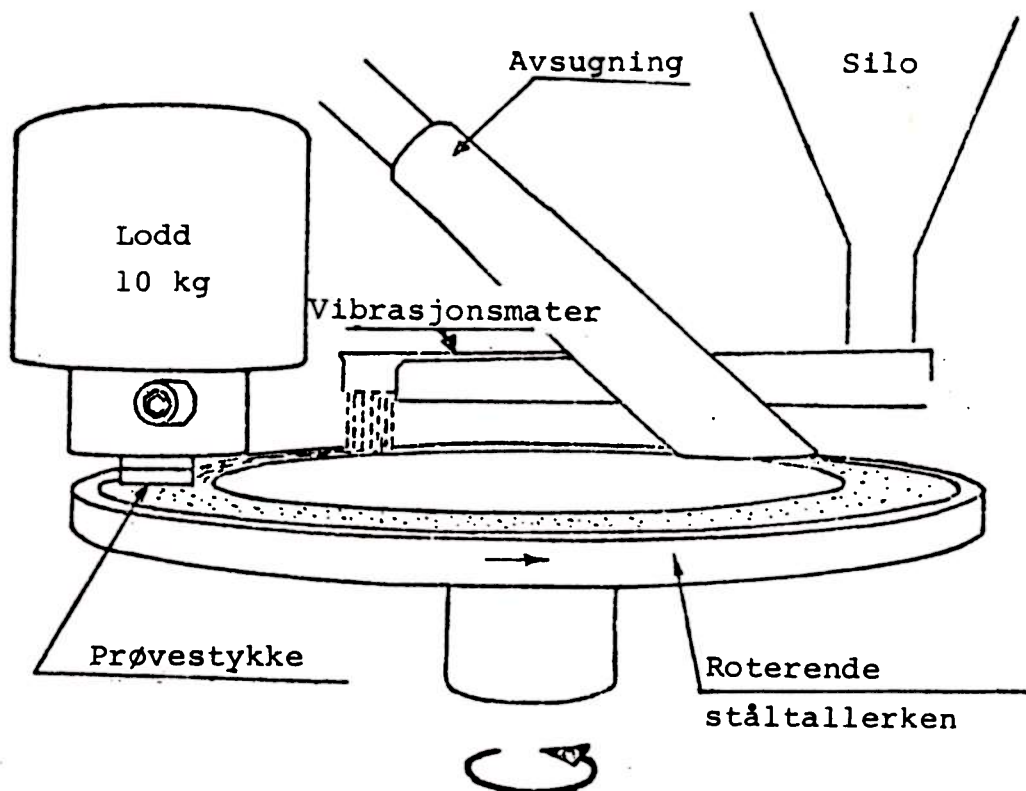
En svakhet ved de vanligste prøvemetodene, og erfaringsmateriale for øvrig, er at sandkvaliteten er mangelfullt beskrevet og slitasjen fra ulike sandtyper er lite undersøkt.

I forbindelse med de foreliggende undersøkelsene ble det vurdert som svært ønskelig å få belyst sliteevnen for de vanligste mineraltypene som opptrer i sandprøver ved norske anlegg. Dette ble gjort ved å prøve ulike mineraltyper, naturlige sandprøver, og aktuelle ståltyper i den prøverigg som benyttes ved Ingeniørgeologisk Laboratorium, Geologisk Institutt, NTH, for slitasjetesting for borbarhetsundersøkelser. Denne rigg ble valgt fordi den var lett tilgjengelig for prøvingen, man var godt kjent med metoden og fordi en annen prøverigg måtte bygges opp fra grunnen av.

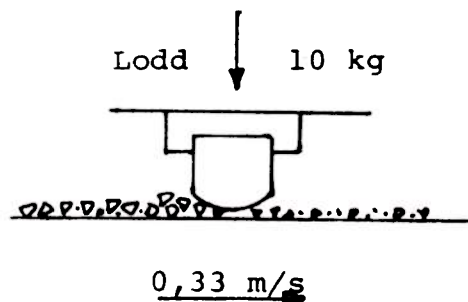
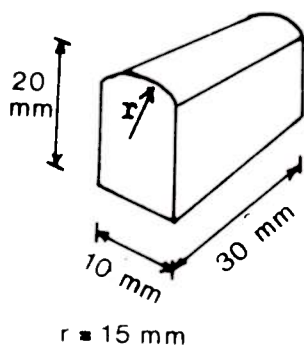
3. METODEBESKRIVELSER

3.1. Geologisk Institutt's metode for måling av slitasjeverdi

Prinsippet for bestemmelse av bergarters abrasive sliteevne på hardmetall og borverktøystål er vist i figur 1. Metoden er beskrevet i detalj i appendix 1.



20°/min. i 5 min.



Figur 1. Prinsippskisse for måling av slitasjeverdi, og prøvestykkets utforming og bruk

Bestemmelsen av slitasjeeverdi for å klarlegge ulike mineralers sliteevne på turbinstål foregår på samme måten. Endringene fra prosedyren som er beskrevet i appendix 1 er følgende:

- Det benyttes prøvestykker av stål. Disse er kaldsaget til 10 x 30 x 20 mm og flaten som skal utsettes for slitasje er slipt krum på en vannavkjølt diamantskive. Det er laget spesielle prøveholdere der prøvestykkene kan festes med en skrue. Stålstykkenes sammensetning og hardhet går fram av tabell 4, side 16.
- Analysen er anvendt for å bestemme ulike mineralers abrasive sliteevne på turbinstål.
- Det benyttes pulver i fraksjon 0,063 - 0,5 mm i stedet for materiale mindre enn 1,0 mm. Årsaken til dette er at det oppsto vibrasjoner i apparaturen når det ble benyttet pulver mindre enn 1,0 mm av kvarts og DA Corundum. Vibrasjonene forsvant når kornstørrelsesgrensene ble snevret inn.
- Forsøket pågår i 1 minutt i stedet for i 5 minutter som benyttes for hardmetall. Denne endringen er gjort for å få et passe stort vekttap å måle på.
- Mineralstykkene knuses ned i kjeftetygger og spindelkvern som beskrevet i appendiks 1, og fraksjonen 0,063 - 0,5 mm siktes ut. Det er ikke satt bestemte krav til kornfordelingen innenfor fraksjon 0,063 - 0,5 mm, men for å kontrollere at den er omtrent lik for alle pulvertypene, ble kornfordelingen etter nedknusing bestemt for de fleste mineraltypene, se figur 7, side 15.
- De naturlige sandprøvene ble ikke knust. Til testingen ble bare utsiktet fraksjon 0,063 - 0,5 mm anvendt.
- Det er utført 3 parallelle forsøk for hver pulvertype.

3.2. Stauffer's metode for måling av slitasjetallet

En sylindrisk stav av det materialet som skal undersøkes og en likedannet stav av et referansemateriale beveges gjennom en blanding av sand og vann, som befinner seg i en sylindrisk beholder. Begge stavene festes til en skive plassert på toppen av beholderen og skiven roteres ved hjelp av en

motor. Da begge stavene har samme avstand fra rotasjonsaksen, får de samme relative hastighet til sand- og vannblandingen, som for øvrig også følger med i rotasjonen.

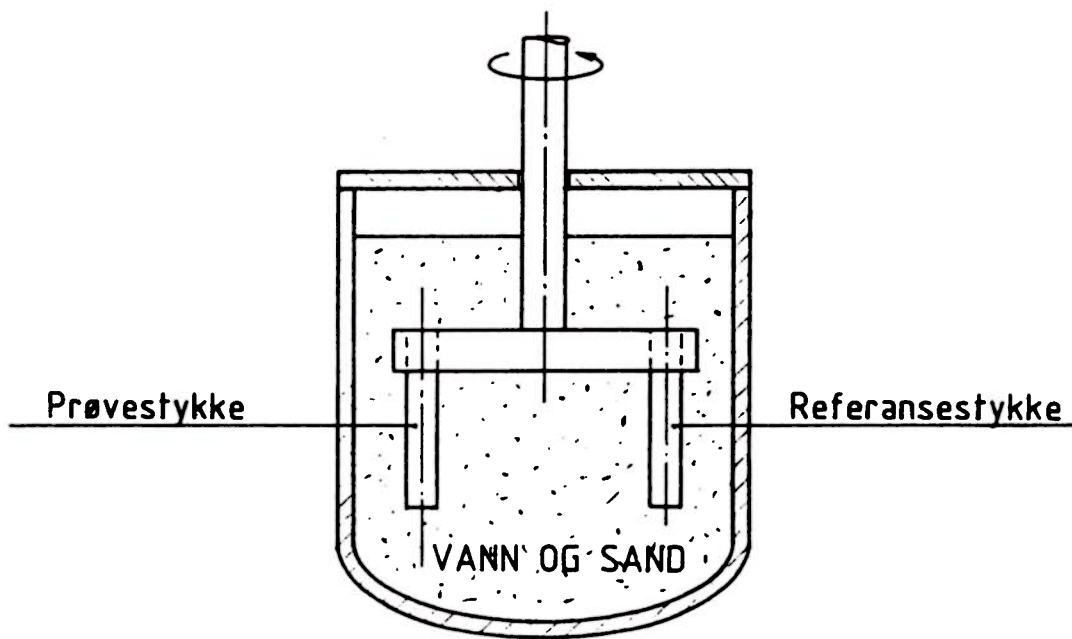


Fig. 2. Prinsippskisse av Stauffer's metode for måling av slitasjetallet

Vanlige prøvebetingelser for stål kan f.eks. være:

- Sand/vann i forholdet 2:1.
- Kornstørrelse 3 - 5 mm.
- Omrøringshastighet på prøven ca. 6 m/s.
- Prøvetid 15 timer.

Prøvingen stoppes etter 1,3 og 7 timer, sanden vaskes og ny etterfylles slik at konsentrasjonen holdes uforandret.

Ved hver stopp veies prøvene. Man beregner volumtapet, og forholdet mellom volumtapet for referansematerialet og prøvematerialet kalles slitasjetallet.

Metoden synes å gi bra reproduserbarhet (avvik fra middelværdi ca. $\pm$ 5 - 10%).

Hvis man som referansestål benytter et lavlegert kullstoffstål (med slitasjetall 1,0), vil slitasjetallet for vanlige brukte ståltyper ligge fra ca. 1 oppover mot 3, unntaksvis helt opp i ca. 6 for herdete spesialkvaliteter. Den velkjente sammenheng mellom hardhet og slitestyrke kommer godt fram når slitestyrken uttrykkes ved det nevnte slitasjetall.

3.3. Brinell hardhetsmålinger

Stålprøvenes hardhet er målt ved Brinell-metoden. Dette er en svært vanlig prøvemethode for metalliske materialer, som brukes når man ikke har ekstremt harde materialer.

Metoden går ut på at en herdet stålkule trykkes mot prøvestykket med en bestemt belastning. Brinelltallet, H_B , har dimensjon kp/mm^2 og fremkommer som forholdet mellom belastningen og arealet av den kulekalotten som dannes på prøvestykket. Metoden gir derfor et mål for materialets motstandsevne mot inntrengning.

Det foreligger resultater fra stålprodusentens målinger av slitasje og hardhet på 4 ståltyper. Slitasjen er målt med Stauffer-metoden (se avsnitt 3.2), men uten at alle forsøksbetingelsene er kjent. Hardheten er målt etter Brinell-metoden. Tre av de samme ståltypene har vært benyttet til forsøkene på Ingeniørgeologisk Laboratorium. For den fjerde ståltypens vedkommende, et ulegert kullstoffstål (GS-C25), har man ved Ingeniørgeologisk Laboratorium benyttet et ulegert stål fra en annen leverandør, men med meget nær den samme kjemiske sammensetning.

Hardhetsmålingene foretatt av stålprodusentene og Ingeniørgeologisk Laboratorium viser til dels betydelige forskjeller. Disse kan skyldes at målingene ikke er foretatt på de samme stålstykkene og eventuelle forskjeller i prøveprosedyre.

4. ANALYSERESULTATER

Testmetode Ståltype	Slitasjetest, Geologisk Inst. Vekttap i mg. Pulvertype:			Slitasjetest, Escher Wyss,	Brinell hardhet, HB	
	Kvarts	Kalifelt- spat	DA Corun- dum	Sveits. Vekt- tap i mg. DA Corundumpulv.	Oppgitt av stål- leveran- dørene	Målt av Geol. Inst.
POS. 101	104	63	100	170	200	140
GS-25 CR MO 4	95	59	95	140	280	210
G-X5 CR NI 134	102	57	94	95	260	250
G-X5 CR NI MO 165	96	55	87	90	250	290

Tabell 1. Resultater fra slitasje og hardhetsmålinger

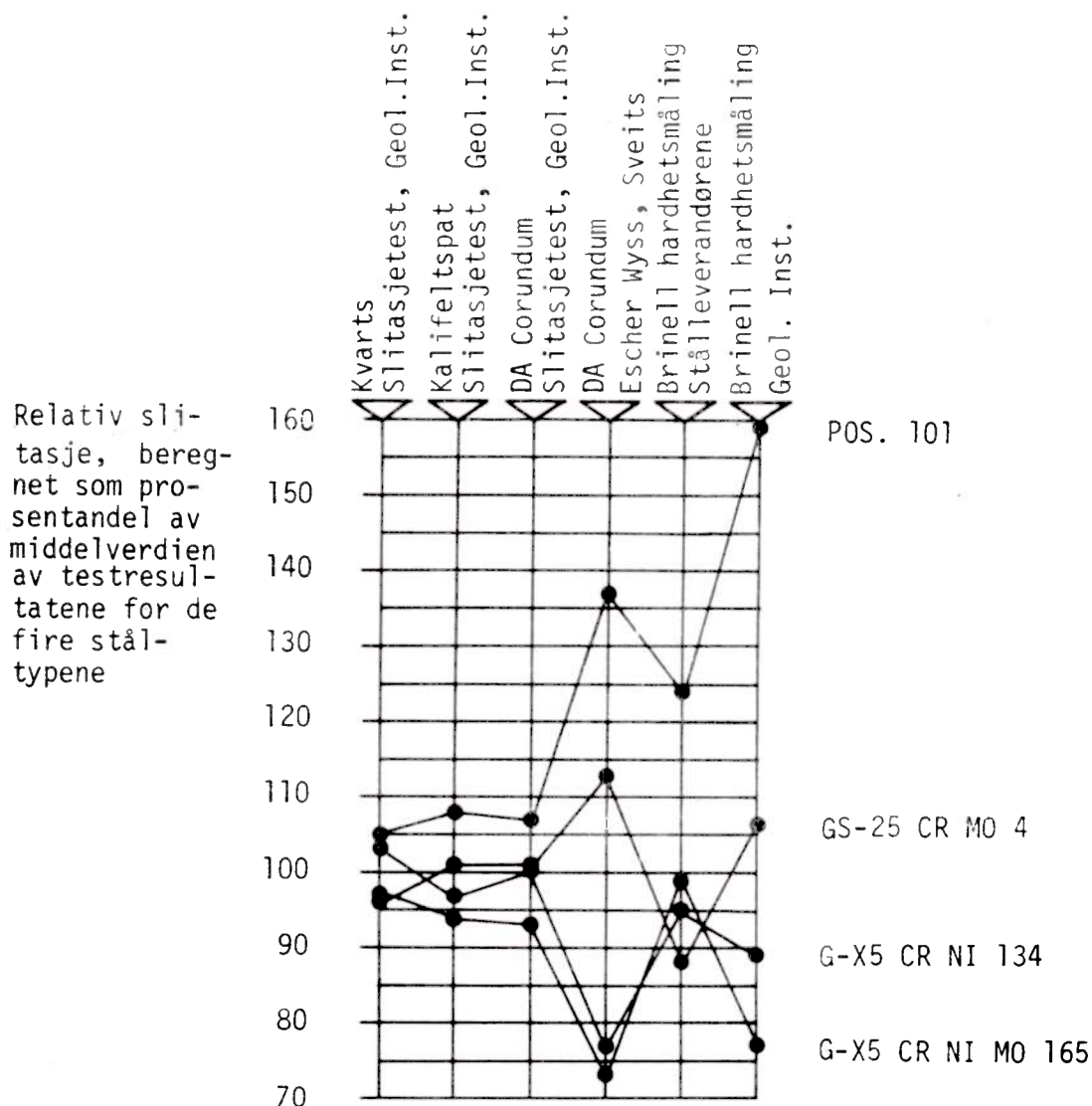
Testmetode Ståltype	Slitasjetest, Geologisk Inst. Pulvertype:			Slitasjetest, Escher Wyss,	Invers Brinell hard- het, 1/HB		Middel- verdi for alle metodene	Standard- avvik, %
	Kvarts	Kalifelt- spat	DA Corun- dum	Sveits. DA Corundumpulv.	Oppgitt av stål- leveran- dørene	Målt av Geol. Inst.		
POS. 101	105	108	107	137	124	159	123	±17
GS-25 CR MO 4	96	101	101	113	88	106	101	± 8
G-X5 CR NI 134	103	97	100	77	95	89	94	±10
G-X5 CR NI MO 165	97	94	93	73	99	77	89	±12

Tabell 2. Relativ slitasje, beregnet som prosentandel av middelverdien for de fire ståltypene for hver testmetode og pulvertype

Tabell 1 og 2 viser resultatene fra forsøkene som er gjort for å bestemme 4 turbinståltypers motstandsevne mot abrasiv slitasje. Dette er forsøkt testet med flere ulike metoder. Metodene rangerer ståltypene omtrent i samme rekkefølge, men de relative forskjellene mellom ståltypene varierer svært mye.

Det må bemerkes at Escher Wyss har utført slitasjetester etter Stauffers metode, men at det her er vekttapet i mg som er oppgitt og ikke slitasjetallet som beskrevet i avsnitt 3.2.

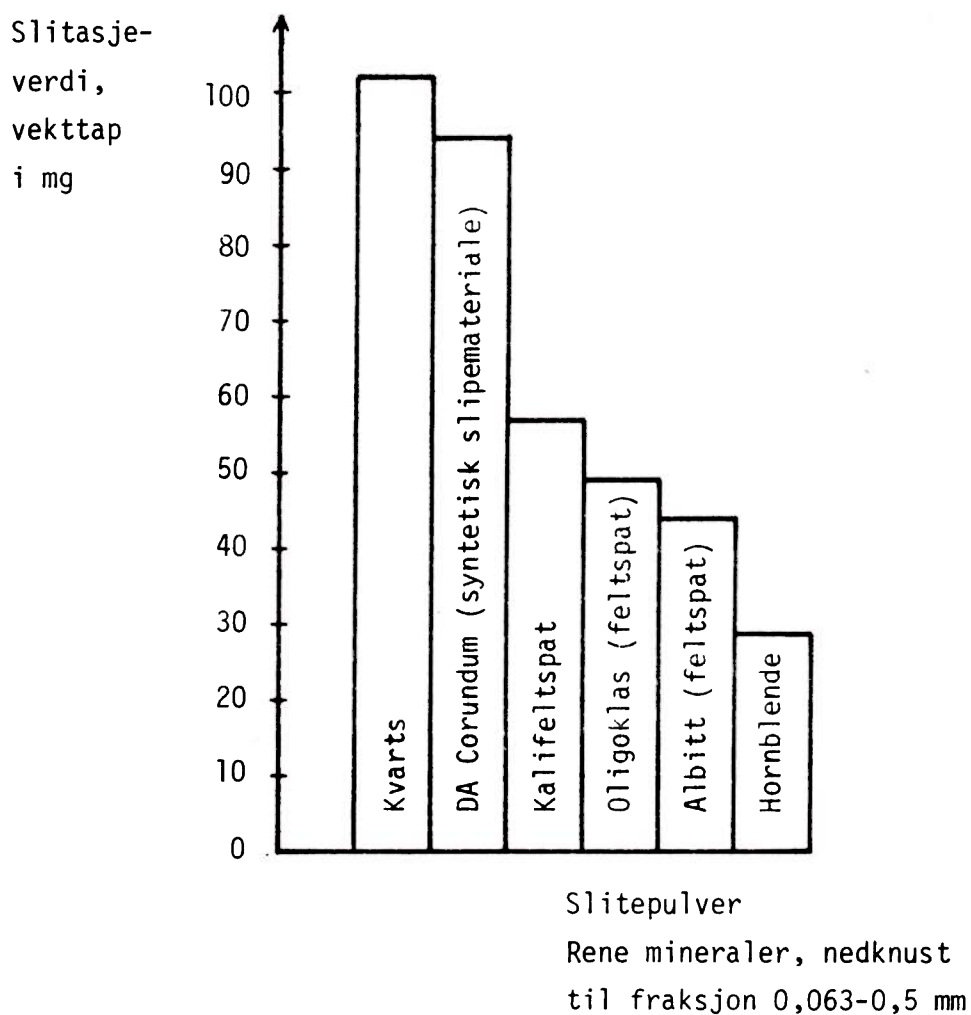
Figur 3 viser at Geologisk Institutt's slitasjetest gir liten spredning i slitasjeverdi for de ulike ståltypene, mens Escher Wyss' test og Brinell hardhetsmålinger gir større spredning og skiller derved bedre mellom de forskjellige kvalitetene.



Figur 3. Grafisk framstilling av tabell 2

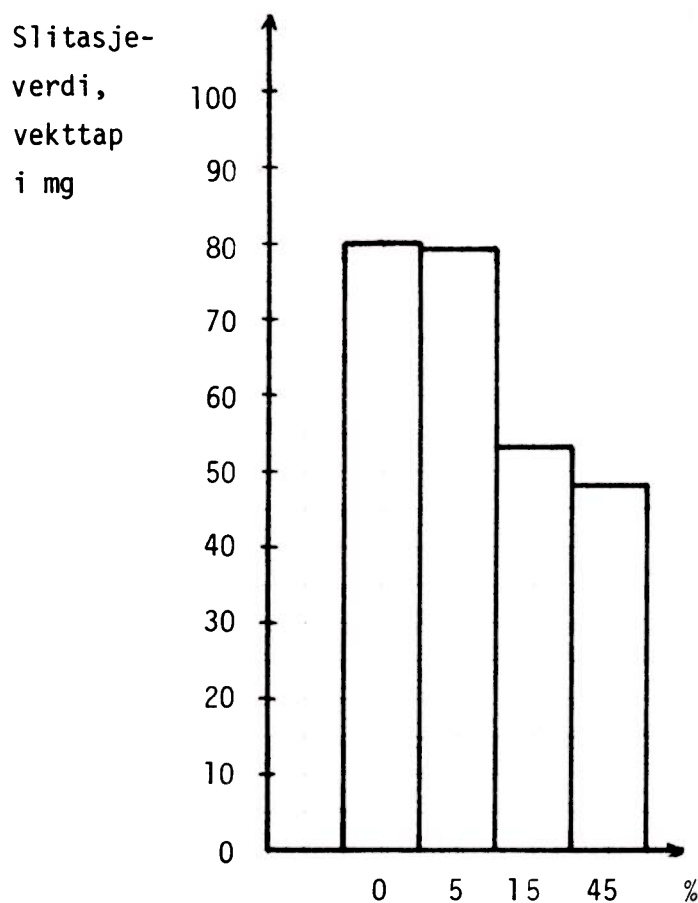
Sliteevne til forskjellige pulvertyper på én ståltypen er vist på figur 4. Til resultatene bemerkes:

- DA Corundum: Vibrasjoner i apparaturen kan ha medført for lav slitasje-verdi.
- Kalifeltspat: Dette pulveret er noe mer finkornet enn de andre pulver-typene. Det skulle normalt tilsi at den slitasje-verdien som er bestemt er for lav, men det er usikkert hvor stor innvirkning kornfordelingen har.
- Hornblende: Den lave verdien kan være forårsaket av at korna var steng-lige og at den rene hornblendens som var skaffet til veie, virket noe bløtere enn den hornblendens vi finner i de naturlige sandprøvene som er undersøkt.



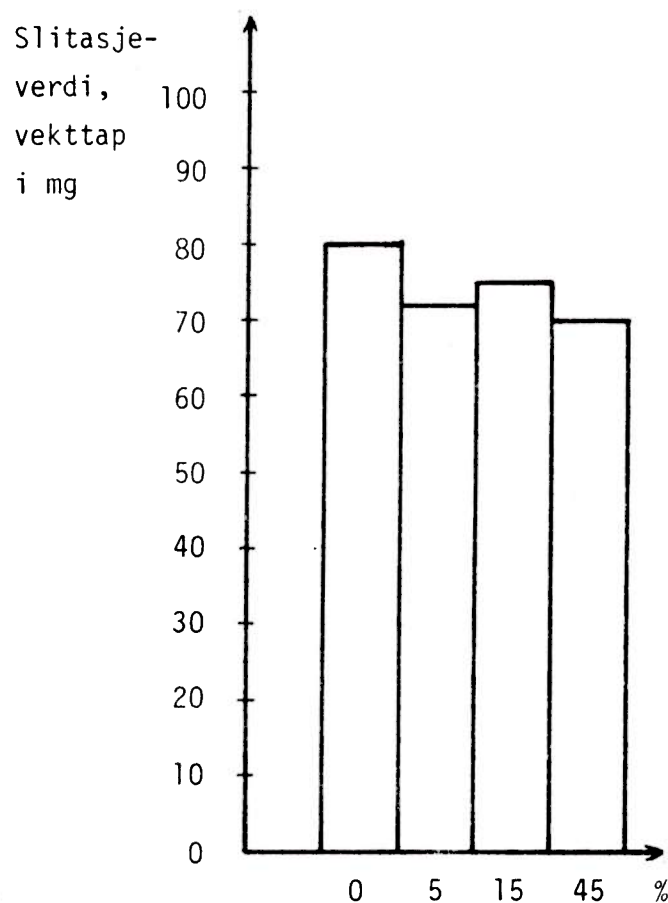
Figur 4. Rene, nedknuste mineralprøvers sliteevne på turbinstål G-X5 CrNi 134, Geologisk Institutt's metode

Resultatene i figur 4 viser at feltspat har ca. 50% av sliteevnen til kvarts. De ulike feltspattypene har ikke like stor sliteevne. Hornblendens sliter ca. 1/3 av det kvarts gjør.



Prosent biotitt-glimmer som er tilsatt kvarts/kalifeltspat-blandingen.

Fraksjon 0,063-0,5 mm



Prosent hornblende som er tilsatt kvarts/kalifeltspat-blandingen.

Fraksjon 0,063-0,5 mm

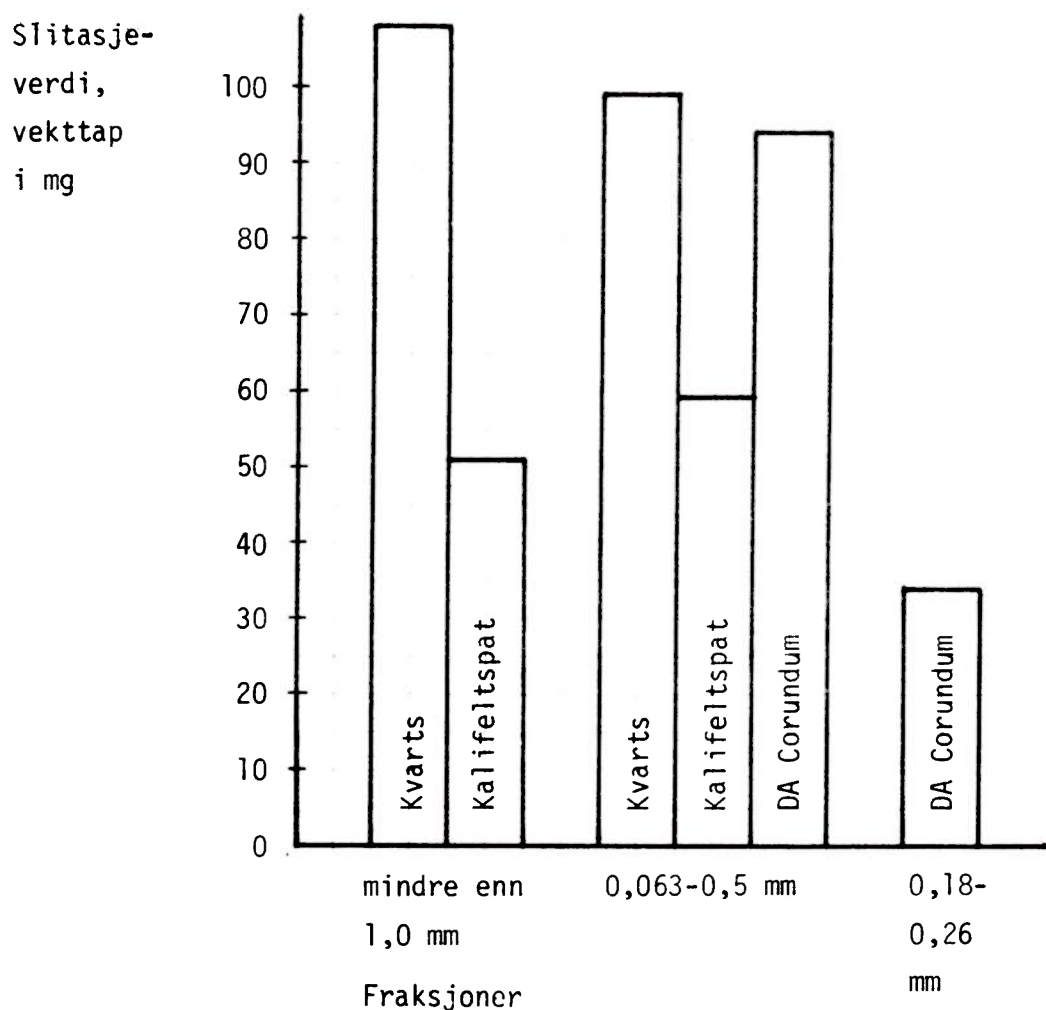
Figur 5. Sliteevnen til blandinger av nedknuste mineraler på turbinstål G-X5 CrNi 134, Geologisk Institutt's metode. Proven med 0 prosent tilsetning består av 30% kvarts og 70% kalifeltspat. Denne blandingen er så tilsatt henholdsvis biotittglimmer og hornblende slik det går fram av figuren

I Geologisk Institutt's slitasjeforsøk virker glimmer dempende på slitasjen. Det er tvilsomt om dette kan overføres direkte til det som foregår i turbinene. Det er ikke registrert at innhold av hornblende har særlig innvirkning på sliteevnen til en sandprøve som for øvrig består av kvarts og feltspat. Se figur 5.

Naturlige sandprøver:							Slitasjeverdi, vekttap, mg
Prøve	Prosentvis mineralsammensetning						
	Kvarts	Felt- spat	Pyrok- sen	Horn- blende	Glim- mer	Granat	
Fortun, pr. 14	1	66	33				43
Fortun, pr. 15	1	77	22				38
Røld./Suld.B/G1	32	63		2	3		53
Røld./Suld. Sk2	40	51			3	5	58
Bjerka, pr. 2	23	67		4	5		54
Bjerka, underv.	34	40		6	12	9	52

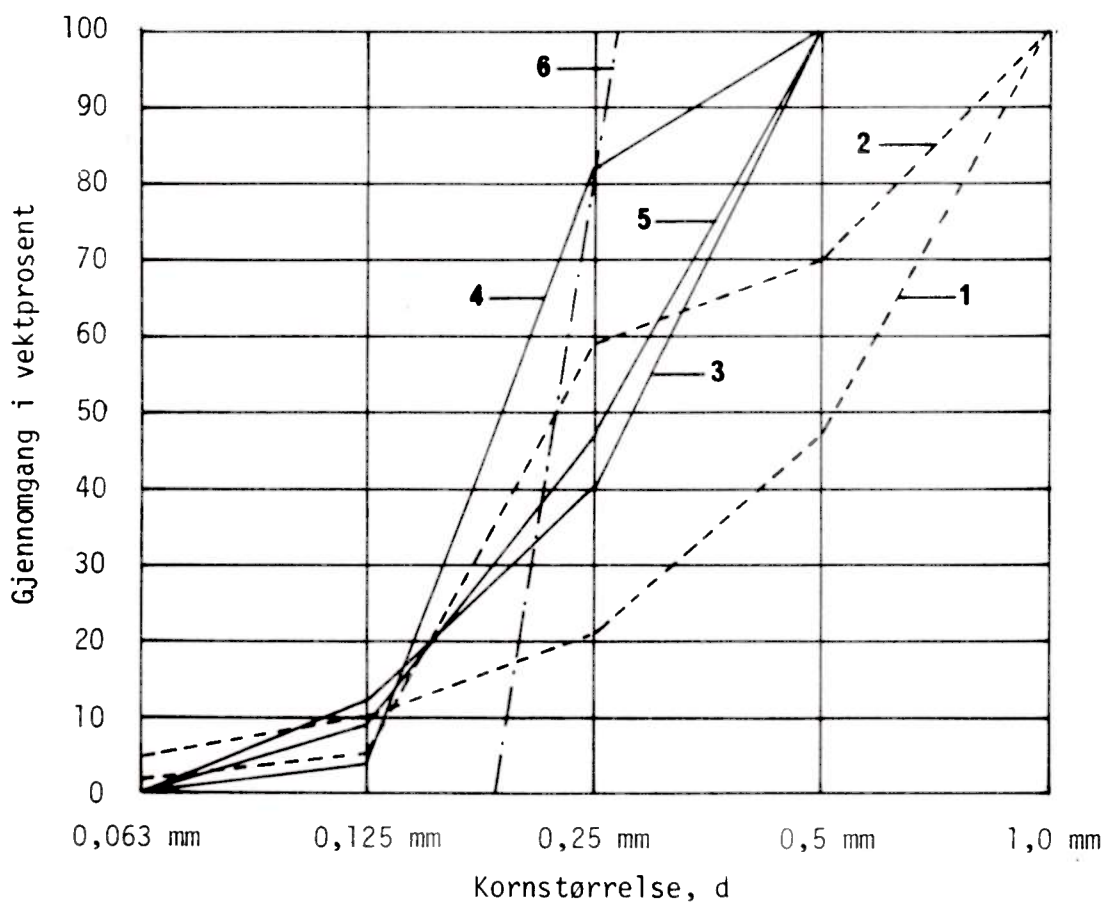
Tabell 3. Naturlige sandprøvers sliteevne på turbinstål G-X5 CrNi 134, Geologisk Institutt's metode. Pulveret er ikke nedknust, men bare siktet til fraksjon 0,063 - 0,5 mm

Naturlige sandprøver har ca. 30% lavere sliteevne enn pulver av nedknuste mineraler. Dette skyldes sannsynligvis rundingsgrad og kornform for øvrig. Sand som hovedsakelig består av feltspat og pyroksen virker også sterkt slitende på turbinstål.



Figur 6. Slitasjeverdien bestemt på ulike fraksjoner av nedknuste mineralprøver. De oppgitte verdiene er middelerdien for de fire ståltypene som er med i undersøkelsene

Som det går fram av figur 6 synes resultatene å vise at grovere slitasjepulver sliter mer enn fint pulver, men dette er ikke entydig bestemt. Vibrasjoner i apparaturen og diverse problemer i oppstartingsfasen av forsøkene kan ha virket inn på resultatene. Analysene som er utført på pulver i fraksjon 0,063 - 0,5 mm er gjort under stabile og sammenlignbare betingelser. Det er nødvendig å gjøre supplerende forsøk dersom innvirkningen av pulverets kornfordeling skal bestemmes nøyaktig. Det er viktig å være klar over at disse resultatene ikke kan overføres direkte til det som skjer i en turbin.



Prøve	Mineral
1	Kvarts, mindre enn 1,0 mm
2	Kalifeltspat, mindre enn 1,0 mm
3	Kvarts, 0,063-0,5 mm
4	Kalifeltspat, 0,063-0,5 mm
5	DA Corundum, 0,063-0,5 mm
6	DA Corundum, 0,18-0,26 mm

Slitasjepulverene av oligoklas- og albitt-feltspat har omtrent samme kornfordeling som prøvene 3 og 5 ovenfor.

Figur 7. Slitasjepulvernes kornfordelingskurver

Figur 7 viser slitasjepulvernes kornfordeling. Av pulvertypene i fraksjon 0,063 - 0,5 mm er det bare kalifeltspat som har avvikende kornfordeling. Dette kan ha medført at kalifeltspaten har fått for lav slitasjeverdi. Se også figur 4.

passerer under prøvestykket og sliter på dette før det suges vekk. Doseringen av pulver er ca. $50 \text{ cm}^3/\text{min.}$, dvs. ca. 80 g/min. ved en spesifikk vekt (tetthet) på $2,7 \text{ g/cm}^3$.

Slitasjen skjer ved en hastighet av $0,33 \text{ m/s}$ og over en lengde av 100 m . Prøvestykket belastes med 10 kg ved hjelp av et lodd.

Prøvestykkets hardmetall er slipt til som en sylinderflate, formen går frem av fig. 2. Slippingen skjer med en diamantslipeskive før hvert forsøk. Hardmetallet som består av en sintret blanding av wolfram-carbid og kobolt, er av vanlig kvalitet brukt i borskjer for slaghammerboring. Det har en Vickers hardhet $Hv_{40} \approx 1300$.

PREPARERING.

1. En representativ bergartsprøve på ca. 2 kg knuses ned til $- 1 \text{ mm}$ i flere trinn. Først brukes kjeftetygger med innleggsplater til ca. $- 10 \text{ mm}$, dernest knuses i to trinn i laboratoriespindelkvern. Sikterest $+ 1 \text{ mm}$ knuses om.
2. Kornstørrelsen på pulveret kontrolleres ved sikting. Pulveret skal ha 15% større enn $0,85 \text{ mm}$. Det vil medgå ca. 250 cm^3 til hvert forsøk.
3. Prøvestykkene av hardmetall slipes forsiktig på en diamantslipeskive til de får en jevn overflate. Det er viktig at formen er den nøyaktig riktige; en enkeltkrum sylinderflate.

FREMGANGSMÅTE.

1. Etter slipping tørkes hardmetall-prøvestykket omhyggelig rent for støv. Det veies med en nøyaktighet på $\pm 0,5 \text{ mg}$.
2. Prøvestykket spennes fast under loddet. Kontroller at innspenningen ikke er skjev ved å senke det forsiktig ned mot den stillestående ståltallerkenen. Loddet heves igjen.

3. Bergartspulveret has opp i siloen, vibrasjonsmateren settes i gang så en får en jevn og rolig strøm av bergartspulver. Matehastigheten må bestemmes ved forsøk. (Se pkt. 6).
4. Ståltallerkenen settes i rotasjon, avsugingen settes i gang og kontrolleres.
5. Loddet med prøvestykket senkes forsiktig ned på strømmen av bergartspulver. Tiden noteres.
6. Forsøket kjøres i 5 min. før prøvestykket heves. Kontroller at fremmatingen av bergartspulveret er tilstrekkelig, men ikke for stor. Det skal ikke dannes noen stor haug av pulver foran prøvestykket. Pass på at prøvestykket holder seg midt i sporet, og at det ikke er noen hvining eller risting i apparaturen. Pass også på at hardmetallstykket ikke hviler direkte mot ståltallerkenen på et enkelt punkt.
7. Hardmetall-prøvestykket tørkes rent og veies. Vekttapet i mg er slitasjeverdien.
8. Kjør flere parallelle forsøk for hver bergart, minimum 2.

VURDERING.

Slitasjeverdien varierer fra 0 til opp i mot 100 for de forskjellige bergartene, høyest for de mest slitende.

Slitasjen forårsakes for en stor del av kvarts og andre like harde mineraler, men kornform og binding spiller en vesentlig rolle. En får f.eks. en stor forskjell i slitasjeverdi for sandsteiner og metamorfe bergarter med likt kvartsinnhold. Slitasjeverdien inngår i beregningen av borslitasjeindeks, se Lien (1961) og Selmer-Olsen & Blindheim (1970).

Metodens reproduserbarhet er ganske god, spredningsområdet ligger vanligvis i størrelsesorden $\pm 5\%$. Det vil være vanlig med noe høyere spredning for små verdier, bl.a. p.g.a. veienøyaktigheten. Ellers er følgende faktorer vesentlige for

resultatet av forsøket og reproduserbarheten:

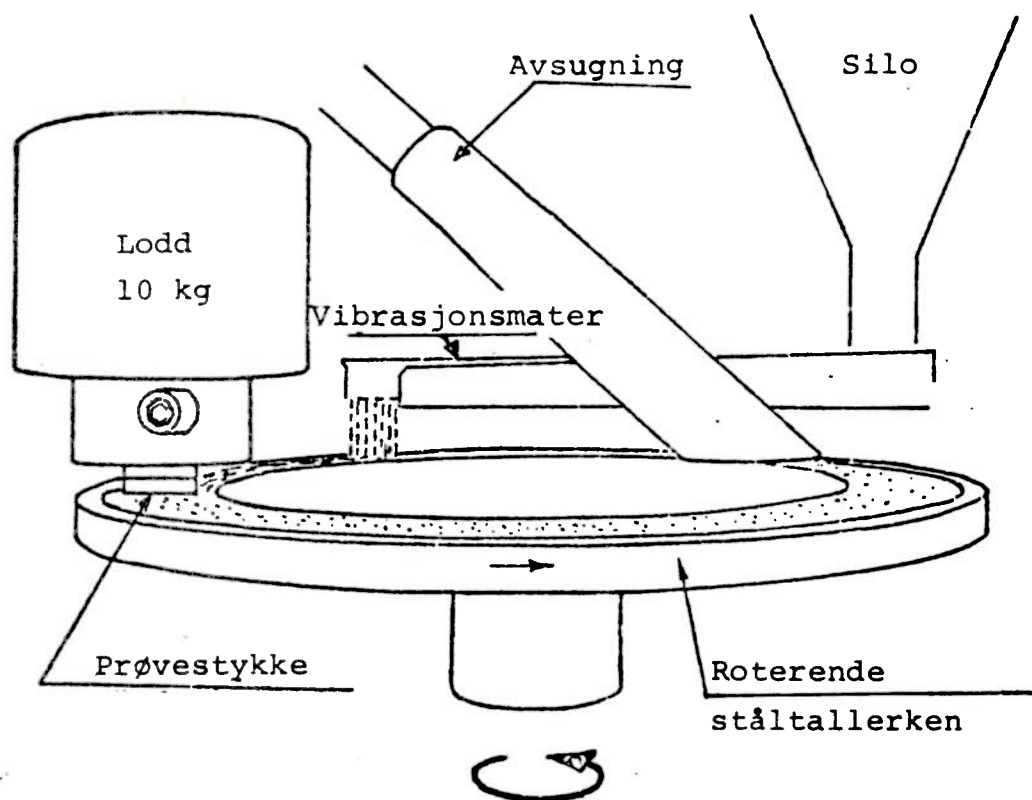
- Hardmetallstykkets kvalitet som kan karakteriseres ved bl.a. Vickers hardhet og tetthet holdes konstant. Formen og kvaliteten på slipeflaten er avhengig av at slipingen utføres korrekt.
- Nedknusingsprosessen vil for de forskjellige bergarter gi forskjellig kornfordeling. Det er foreløpig ikke fastsatt ytterligere krav til kornfordelingskurven. Dette kan gjøre det vanskelig å få samme mengde pulver til å passere under prøvestykket.

REFERANSER.

LIEN, R. (1961): "En indirekte undersøkelsesmetode for bestemmelse av bergarters borbarhet." Avhandling for den tekniske licentiatgrad i Ingeniørgeologi, Geologisk Institutt, N.T.H.

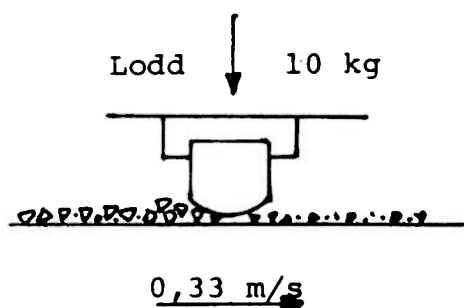
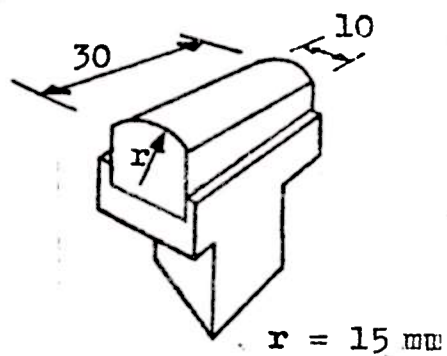
LIEN, R. (1971): "Klassifisering av bergarter med henblikk på borbarhet." Bergmekanikkdagen, Oslo.

SELMER-OLSEN, R. og BLINDHEIM, O.T. (1970): "On the Drillability of Rock by Percussive Drilling." Proc. 2nd Congress Int. Soc. Rock Mechanics, Beograd.



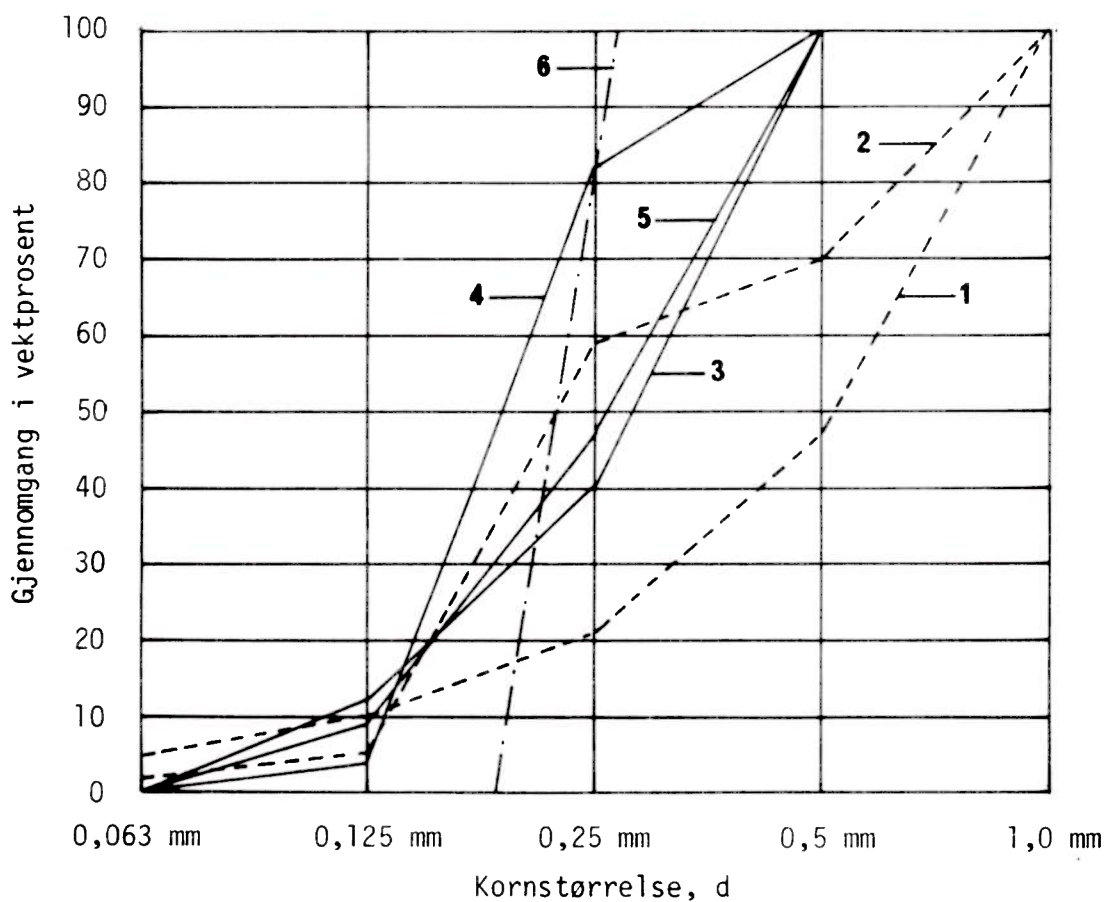
20°/min. i 5 min.

Fig. 1. Prinsippskisse for måling av slitasjeverdi.



Hardmetall-prøvestykke

Fig. 2. Prøvestykkets utforming og bruk.



Prøve	Mineral
1	Kvarts, mindre enn 1,0 mm
2	Kalifeltspat, mindre enn 1,0 mm
3	Kvarts, 0,063-0,5 mm
4	Kalifeltspat, 0,063-0,5 mm
5	DA Corundum, 0,063-0,5 mm
6	DA Corundum, 0,18-0,26 mm

Slitasjepulverene av oligoklas- og albitt-feltspat har omtrent samme kornfordeling som prøvene 3 og 5 ovenfor.

Figur 7. Slitasjepulvernes kornfordelingskurver

Figur 7 viser slitasjepulvernes kornfordeling. Av pulvertypene i fraksjon 0,063 - 0,5 mm er det bare kalifeltspat som har avvikende kornfordeling. Dette kan ha medført at kalifeltspaten har fått for lav slitasjeverdi. Se også figur 4.

Brinell hardhet, HB Ståltype	HB, oppgitt av stål- leveran- dørene	HB, målt av Geologisk Institutt på:			
		store, ube- arbeidede stålstykker fra leve- dørene	slitasje- stykkene etter til- saging	slitasje- stykkene etter at overflaten er tilslipt for sli- tasjete- ting	slitasje- stykkene etter at slitasje- testen er utført
POS. 101	ca 200		140	135	140
GS-25 CR MO 4	280	210	220		
G-X5 CR NI 134	260	250	255		
G-X5 CR NI MO 165	250	290	290		

Geologisk Institutt har utført 2-3 parallellmålinger, og verdiene ovenfor er gjennomsnittet av disse.

Tabell 4. *Brinell hardhetsmålinger på turbinstål og kontroll av prepareringens innvirkning på prøvestykkene*

Resultatene av Brinell hardhetsmålinger på ståltypene er gitt i tabell 4. Her fremgår de til dels store tilfeldige avvikene mellom de HB-verdiene som er oppgitt av leverandørene og de som er målt av Geologisk Institutt på prøvestykkene.

Bearbeidingen av prøvestykkene som er gjort i forbindelse med slitasjetesten har hatt ubetydelig innvirkning på stålets hardhetsegenskaper.

5. ANALYSEMETODENE OG RESULTATENE SETT I FORHOLD TIL VIRKELIG TURBINSLITASJE

Sammenhengen mellom abrasiv slitasje, korrosjon og kavitasjon er meget uklar, men man vet at en avhengighet eksisterer og at det kan være svært vanskelig å holde de enkelte slitasjeårsaker atskilt (med "slitasje" i denne forbindelse menes utilsiktet materialtap).

Sandslitasjen skjer i praksis under spesielle forhold, hvorav spesielt bør nevnes:

- Stor relativ hastighet mellom de slitasjeutsatte deler og sanden i vannet.
- Lave konsentrasjoner av sand.

På denne bakgrunn er det åpenbart at de prøvemetoder som her er benyttet gir betingelser som er vesensforskjellige fra de som særpreger den slitasje man erfarer i praksis.

Slitasjeforsøkene bekrefter allikevel i det vesentlige det som er en generell erfaring, nemlig at ulegert stål med lav hardhet (av typen Pos. 101 med ca. 0,25% kullstoffinnhold) er lite motstandsdyktig mot sandslitasje. Forskjellen mellom denne ståltype og f.eks. CrNi 134 er erfaringsmessig betydelig, og vesentlig større enn slitasjeprøvene ved Ingeniørgeologisk Laboratorium gir uttrykk for. Resultatene fra stålprodusentens forsøk gir nok i så måte et riktigere bilde. CrNi 134 er et stål som brukes svært meget f.eks. til løpehjul, og det vil være naturlig å foreskrive dette materialet dersom man forventer sandslitasje.

Et stål av typen CrNiMo 165 regnes også å ha gode sliteegenskaper selv om det her foreligger vesentlig mindre erfaringsgrunnlag enn for 134-kvaliteten når det gjelder utsatte komponenter som Pelton-hjul.

Interessant er det at både stålleverandørens målinger og resultatene fra Ingeniørgeologisk Laboratorium stemmer svært godt overens, og viser at dette stålet er litt mer slitesterkt enn CrNi 134.

Ståltypen GS-25 CrMo 4 er et lavlegert konstruksjonsstål, som kan varmebehandles til stor hardhet og strekkfasthet.

Denne kvaliteten har likevel ikke utmerket seg som en spesielt slitesterk kvalitet i turbinsammenheng og stålprodusentens målinger bekrefter for så vidt denne generelle erfaring.

Undersøkelsen av forskjellige mineraltypers slitasje på en og samme ståltype (CrNi 134) bekrefter erfaringen med hensyn til kvarts som det mineral som gir sterkest slitasje.

Prøvene utført med naturlige sandprøver indikerer at kvartsinnholdet kan variere forholdsvis mye uten at dette endrer særlig mye på slitasjen. Videre synes det som om også feltspat gir sterk slitasje, og at det langt på vei er det samlede innhold av kvarts og feltspat som vil bestemme slitasjen.

Feltspat alene synes å slite omtrent halvparten av hva kvarts gjør, om man legger Ingeniørgeologisk Laboratoriums målinger til grunn. Det kan nok regnes med at sliteevnen også i praksis er svært forskjellig for disse mineraltypene, men uten at det er mulig å si noe bestemt om hvor stor forskjellen er.

Forsøkene viser også at grovkornete mineraler gir sterkere slitasje. Slitasjen slik den erfares f.eks. på turbinhjul bekrefter dette forholdet, til tross for at forholdene er vesensforskjellige fra de man har i laboratoriet.

Det er for øvrig verdt å merke seg at for samtlige mineralprøver og kornstørrelse gir CrNiMo 165 gunstigere verdier enn CrNi 134-kvaliteten.

GEOLOGISK INSTITUTT, N.T.H. INGENIØRGEOLOGISK LABORATORIUM	Dato: 2/5 1974 Sign.: OTB
SLITASJEVERDI	Side: 1

PRINSIPP.

En bergarts slitasjeverdi er en parameter som gir et mål på dens evne til å slite på hardmetall. Slitasjeverdien fremkommer som vekttapet i mg for et prøvestykke av hardmetall, som utsettes for en slitasjepåkjennning fra bergarten i pulverform i en bestemt apparatur.

ANVENDELSESOMRADE.

Metoden er utviklet for å uttrykke bergartenes evne til å slite på borskjær av hardmetall, R. Lien (1961). Den inngår som en faktor i beregningen av borslitasjeindeks for vurdering av bergarters borbarehet ved slaghammerboring.

UTSTYR.

Slitasjeapparatur.

Hardmetall prøvestykker.

Slipemaskin for prøvestykkene.

Vekt, veienøyaktighet $\pm 0,5$ mg.

Vekt, ---- " ---- $\pm 0,1$ g.

Kjeftetygger og spindelkvern.

Sikt, lysåpning 1,0 og 0,85 mm.

Bakker.

UTSTYRETS VIRKEMÅTE.

Se prinsippskisse for den nåværende utforming av apparaturen, fig. 1 og 2.

Tørt bergartspulver mindre enn 1 mm mates via en silo og vibrasjonsmater ned i et bredt spor på en roterende stål-tallerken og frem under prøvestykket av hardmetall. Pulveret