

PRIS KR. 2.00



Norges Geologiske
Undersøkelse

Nr. 93

TRYKTUNNELER OG GEOLOGI

AV

J. H. L. VOGT

MED ET AVSNIT

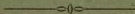
SPÆNDINGER I FJELDET
VED TRYKTUNNELER

AV

FREDRIK VOGT

INGENIØR

MED 20 TEKSTFIGURER OG „ZUSAMMENFASSUNG“



KRISTIANIA 1922

I KOMMISSJON HOS H. ASCHEHOUG & CO.

INDHOLD

	Side
Herlandsfossen tryktunnel (i Hosanger)	2
Svælgen tryktunnel (i Bremanger)	18
Skar tryktunnel (tilhørende Kristiansunds kommune)	32
Spændinger i fjeldet ved tryktunneler, av ingeniør Fredrik Vogt	47
Generelle bemerkninger	59
Zusammenfassung	73

I opdrag av „Norges Geologiske Undersøkelse“ foretok jeg sommeren 1921 en studiereise til de tre større tryktunneller i vort land, Herlandsfossen (i Hosanger indenfor Bergen), Svælgen (i Brømanger) og Skår (indenfor Kristianssund). Jeg skal i det følgende levere en teknisk-geologisk beskrivelse av disse tre tryktunneller og dertil knytte nogen generelle bemerkninger.

Jeg begrænser min fremstilling til disse tre norske tryktunneller og medtar ikke noget referat av analoge anlæg i utlandet. De to større tryktunneller, som yderlig kort omtales i A. LUDINS „Die Wasserkräfte (1913, bind II, s. 1180), nemlig ved Schnalstal nær Meran og en i Kalifornien, med trykhøide henholdsvis 310 og 270 m., er i sin helhet utmurede med beton og staaiblik (tykkelse fra 5 til 12 mm.), og en tredje tryktunnel, ved Bidschina i Tessin, med trykhøide i skakten paa 170 m., er utmuret med beton (med specialglatstrøg). Men da der ikke for nogen av disse anlæg foreligger geologisk beskrivelse, og heller ikke opplysning om, hvorvidt utmuringen har vist sig tilfredsstillende efter længere tids forløp, har jeg fra disse anlæg ikke kunnet høste nogen teknisk-geologisk erfaring, som kunde overføres paa norske forholde. Og den i Teknisk Ukeblad for 15. juli 1921 omhandlede tryktunnel ved Ritom i Schweiz, med maksimalt tryk kun 41 m., gaar gjennom yngre for en væsentlig del av kalksten bestaaende formationer, — altsaa i bergarter, som i teknisk henseende fjerner sig saa langt fra dem, vi i regelen har at gjøre med i vort land, at der, hvad de geologiske forholde angaar, er litet at lære for os av dette schweisiske anlæg.

Heller ikke fra andre utenlandske tryktunneller, for hvilke der er offentliggjort tekniske, men ikke detaljerte geologiske beskrivelser, har jeg lært noget nævneværdig om lækage-spørsmål o.s.v.

Vedrørende raasprængte tryktunneller — uten eller kun med lokal utmuring — blir vi saaledes i alle fald for en væsentlig del henvist til erfaring fra de større tryktunneller, med trykhøide ca. 135 à 150 m., i vort eget land.

Ingeniør FR. VOGT, for tiden byggeleder av Tromsø bys kraftverk, har vist mig den tjeneste at utarbeide til offentliggjørelse i denne avhandling en utredning om „Spændinger i fjeldet ved tryktunneller“.

Jeg sender ham herfor min bedste tak og benytter samtidig anledningen til at takke ingeniørerne ved de ovenfor nævnte tre norske tryktunneller for den venlighet, med hvilken jeg overalt blev mottat, og for de utførlige opplysninger, som stillede til min disposition.

Herlandsfossen tryktunnel (i Hosanger).

Der henvises angaaende denne tryktunnel til en beskrivelse av anlæggets byggeleder ing. H. SCHJERVEN, i Teknisk Ukeblad for 12. aug. 1921 (med tillæg i T. U. for 25. nov. 1921).

Herlandsfossen ligger nær Fotlandsvaagen paa Osterøen i Hosanger herred (i ret linje 25 km. NO for Bergen), og kraftanlægget tilhører „Hosanger—Haus—Hamre kommunale kraftverk“, altsaa en sammenslutning av tre landskommuner.

Indenfor bunden av Fotlandsvaagen kommer et ca. 1 km. langt vand, Herlandsvandet, 9.5 m. over havet. Kraftstationen er anlagt nær indenfor bunden av dette vand, i avstand ca. 1.3 km. fra den inderste vik av Fotlandsvaagen. Kraftstationens gulv ligger i høide 16.4 m. over havet.

Herlandselven rinder fra Stovandet ut i Løtvejtandet, hvorfra man har minert en tunnel (1400 m. lang og med 8 m² tversnit) frem til fordelingsbassinet.

Vandføringen er ca. 6 m^3 pr. sekund, og vandspeilet i fordelingsbassinet er ved høivand 151 m. og ved lavvand 141 m. o. h. Den maksimale vandtrykhøide er saaledes ca. 140 m. (hvorfra fragaar litt friktionstap).

6 m^3 pr. sekund gjennemsnittlig aargangs vand og ca. 135 m. gjennemsnittlig vandhøide gir litt over 8000 HK jevnt fordelt over det hele aar.

Der er i kraftstationen utbygget 4 aggregater à 3500 HK, tilsammen ca. 14000 HK levert paa turbinakselen.

Mit besøk paa stedet var 1.—4. aug. 1921.

De geologiske forhold.

Ved Herlandsfossen med omgivelser optræder krystalline skifre — hornblendeskifer og glimmerskifer, — tilhørende den saakaldte „ytre Bergensbue“, hvorom henvises til det geologiske rektangelkart (i maalestok 1:100 000, trykt 1880) og til et geologisk oversigtskart (i maalestok 1:200 000) av prof. C. F. KOLDERUP, trykt i Bergens Museums Aarbok for 1903.

Fotlandsvaagen med Herlandsvandet og dalen nærmest søndenfor dette vand danner en typisk strøgald, følgende næsten nøiagtig efter strøget av de skifrike bergarter. Disses strøk er ca. NV—SO og faldet i omgivelserne av fossen er ikke fuldt 50° mot SV. Paa dalens SV-side — det vil sige, paa den side, hvor fossen ikke ligger — optræder en mægtig sone av glimmerskifer, som er gjennemsat av mange og dype tversprækker og ganske tæt bevokset. Det er let at avgjøre, at denne glimmerskifer, med sine talrige og dype sprækker og med den sterke opsmuldring i dagen, vilde ha været en meget daarlig bergart for en tryktunnel.

Paa dalens NO-side, ved den øvre del av Herlandsfossens tryktunnel, ser man allerede i avstand en mindre bevokset bergart.

Fig. 1 gjengir et profil langs tryktunnellens skraaskakt med tilhørende horisontale parti, som begge ligger nøiagtig i samme plan, med retning O 23° N—V 23° S.

De skifrike bergarters strøg ved tunnelen er meget regelmæssig, nemlig ifølge mange maalinger V 45 à 50 N, med middel ca. V 48° N og faldet er 46 à 48° mot SV.

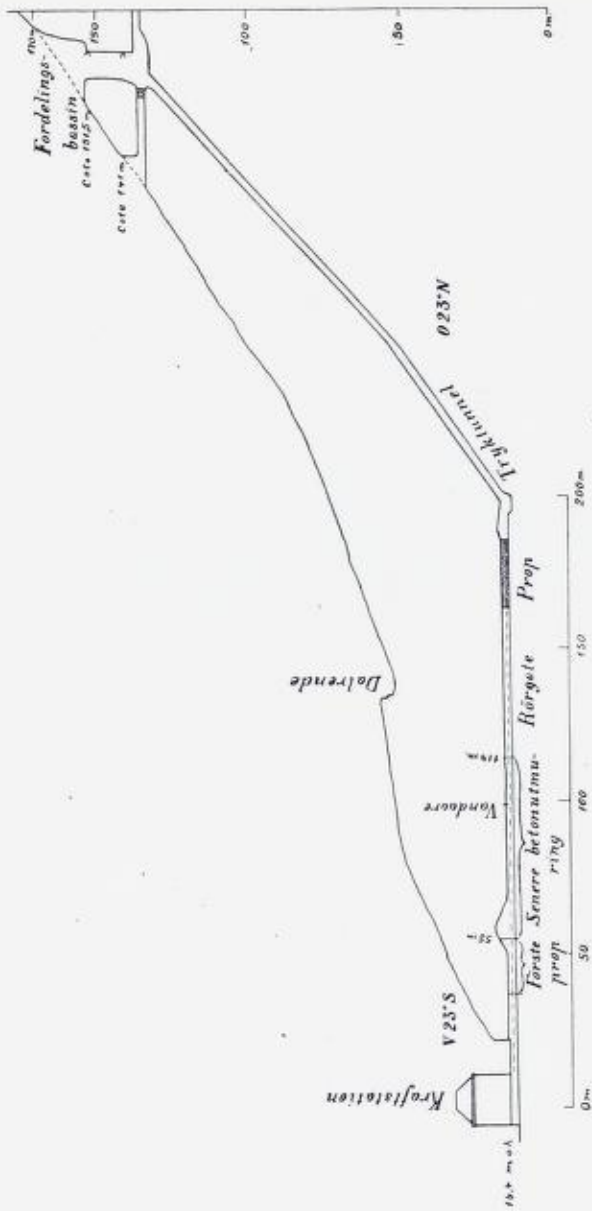


Fig. 1. Profil over Herlandsfossens tryktunnel

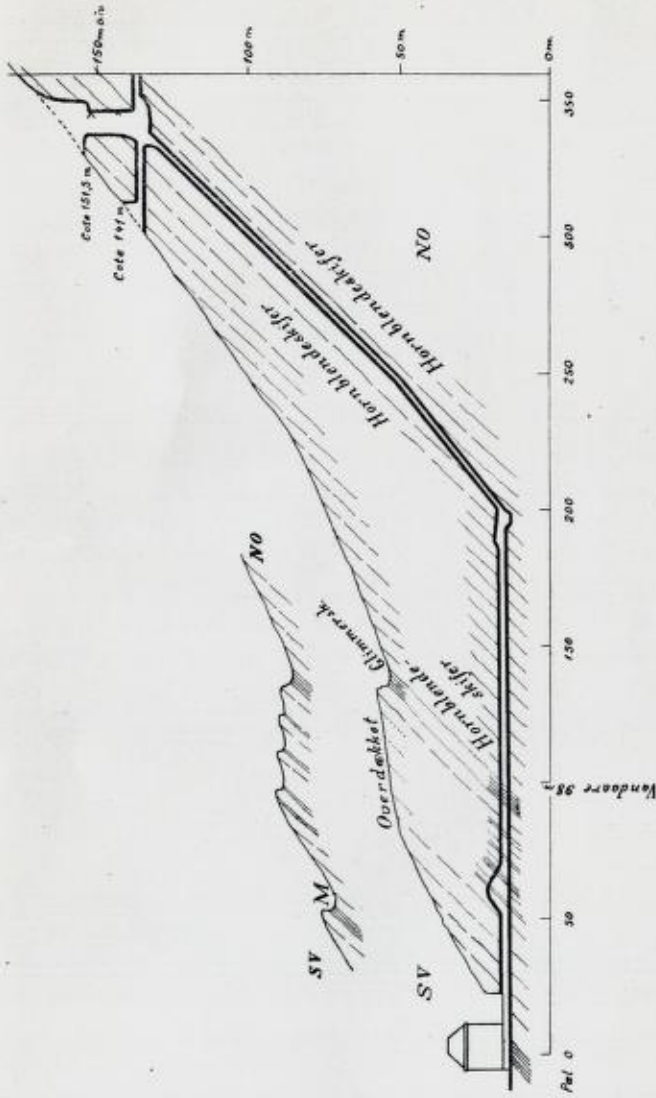


Fig. 2. Geologisk profil over Herlandsfossens tryktunnel. — Det øvre profil er trukket ca. 70 m. SO for tunnelleninjen

Dalen nærmest omkring tryktunnellen er, som allerede ovenfor nævnt, en strøgdal, det vil sige, høidekurvene langs fjeldsiden gaar — i alle fald ved tryktunnellens øvre del — i det hele og store parallelt med bergarternes strøg.

Tunnelprofilet danner en vinkel paa ca. 25° med bergarternes faldretning og altsaa ogsaa med overflatens faldretning, det sidste specielt gjældende for den øvre del av tryktunnellen.

For at faa et geologisk profil (fig. 2), som paa hvert eneste punkt staar vinkelret paa bergarternes strøg, har jeg gaat ut fra tunnelprofilet, idet jeg beholder høiden uforandret, men formindsker længden med $\cos 25^\circ$ (0.9026 eller med rundt tal 0.9).

Tryktunnellens skraaskakt har i den øvre del (se profil 1) et fald paa 46.7° og i den nedre del paa 40.1° . — Denne skraaskakt eller synk fulgte, ifølge de paa stedet mottagne oplysninger, næsten nøiagtig langs et bestemt skiferskikt, navnlig i den øvre del og kanske noget mindre utpræget i den nedre del. Herav beregnes, at de skifrike bergarters gjennemsnitlige fald ved skraaskakten ligger mellem 43 og 49.5° , nærmest det sidste tal; faldet skulde altsaa kunne sættes til 46 à 48° .

Som gjennemsnit av en række direkte avlæsninger av faldet ute i dagen blev fundet ca. 49° . — Et par grader mere eller mindre er uten nogensomhelst betydning, men vi skal fæste os ved, at baade strøg og fald er meget monotont ved tryktunnellen.

Der er ved tryktunnellen to forskjellige bergarter, hornblendeskifer og glimmerskifer, i teknisk henseende av høist forskjellig karakter. Hornblendeskiferen er „god“, glimmerskiferen derimot „daarlig“, idet det er den, som medførte de saa overmaade generende lækager, forinden man flyttede „proppen“ helt ind til bunden av den horisontale tunnel.

Hornblendeskiferen bestaar hovedsagelig av en middels jernrik hornblende, hertil noget kvarts, litt plagioklas (skjæv feldspat) med litt epidot og zoisit, desuten litt titanit og magnetit, hist og her ogsaa nogen krystaller av svovlkis, — men i de undersøkte prøver ikke biotit eller granat og heller ikke kalkspat. Bergarten ligner den vanlige hornblendeskifer fra diverse lokaliteter i Trøndelagen.

Glimmerskiferen (fra partiet ca. 55 til 98 m. ind i den horisontale tunnel) fører en hel del glimmer (biotit), optrædende i temmelig smaa blade og ofte noget omsat til klorit; kvarts i rikelig mængde (og tilstede i større mængde end biotiten); litt, dog kun nok saa litet plagioklas, samt hist og her litt epidot; litt titanit, magnetit og apatit, desuten et par pct. kalkspat, — men ikke kaliglimmer (muscovit) og heller ikke granat. Sammenlignet med diverse prøver av glimmerskifer karakteriseres glimmerskiferen fra Herlandsfossen navnlig ved finere kornstørrelse saavel for biotiten som for kvartsen. Glimmerskiferen fra Herlandsfossen er finskjællet og tyndskifrik, med smaabuklede skifrikhetsplaner. Selv frisk, uforvitret bergart fra partiet 55—98 m. ind i tunnellen er saa sterkt skifrik utviklet, at man nogenlunde let kan flise den op med fingrene.

I motsætning hertil er hornblendeskiferen fast og solid, kun med ganske svakt utviklet skifrikhet.

I hornblendeskiferen kan man paavise to konjugerte avsondringsplaner, som staar vinkelret paa skifrikhetsplanet, og som danner en vinkel paa 30 à 40° hver til sin side med bergartens faldretning. Disse avløsningsflater træder navnlig frem ved minering, men de er ganske godt sammenvokset (undertiden sammenkittet ved sekundært avsatte mineraler, som kalkspat og klorit), og de er selv ute i dagen aldrig aapne.

Ifølge en række undersøkelser fra Kristiania Materialprøveanstalt viste hornblendeskiferen trykfasthet:

ved tryk vinkelret (eller omtrent vinkelret) paa skifrikhetsplanet — 2095, 2082 (og en prøve 1335) kg. pr. cm²;

ved tryk parallelt med skifrikhetsplanet, — 1089, 920 og 718 kg. pr. cm².

Vandopsugning (ved raat tilhugne prøver, som kunde været blit litt opsprukne efter skifrikheten ved tilhugningen), for to prøver henholdsvis 0.179 og 0.316 0/0.

Rumvegt (sp.vegt av større stykker)	Sp.vegt (av pulverisert bergart)
3.084	3.115
3.073	3.101

Omkring fordelingsbassinet, i tverslaget (indslaget) paa kôte 133.5 m. og herfra langs den rensplejede fjeldoverflate ned

til den nedenfor omhandlede „dalrende“ iagttages kun hornblendeskifer, uten nogensomhelst indlagring av glimmerskifer. Længere ned i bakken fæster man opmærksomheten ved en liten dalrende, som gaar nøiagtig efter bergarternes strøk, og som i dagen følges meget markeret i en længde av 300 m. eller noget derover. Der henvises til specialprofil, fig. 3, næsten ret over tunnelaksen, og til profilerne, fig. 4, endvidere til ing. SCHJERVENS fotografi (fig. 5) i hans avhandling i Teknisk Ukeblad. Den horisontale bredde av den lille dalrende er i partiet nogenlunde ret over tunnellen 15 à 20 m. og dybden er i

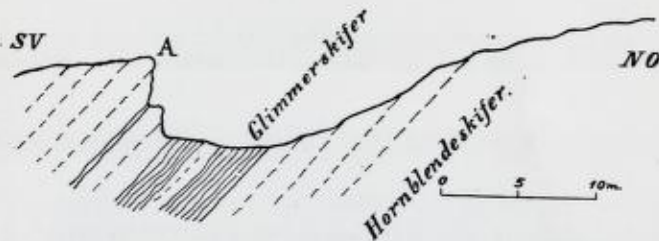


Fig. 3. Profil over den lille dalrende ret over tunneltracéen.

regelen 5 til 6 eller undertiden 7 m., regnet vertikalt under den markerte kant (A paa fig. 3 og paa fig. 4, I).

I bunden av dalrenden optræder et lag av glimmerskifer, som her paa de fleste steder er i den grad dekomponeret (forvitret), at bergarten falder fuldstændig i smaabiter selv ved et middels sterkt hammerslag. Jeg hadde endog møie med at slaa til nogen passelige haandstykker av den forvitrede bergart. Blot undtagelsesvis finder man i dalrendens bund nogen tynde striper av kun forholdsvis litet forvitret glimmerskifer, som her — likesom i det tilsvarende lag i tunnellen — fleresteds viser nogen tynde kvartslinser. Mellem de i alle fald nogenlunde friske lag av glimmerskiferen og den sterkt dekomponerte bergart kan man paavise gradvise overganger. Veksellagrende med glimmerskiferen optræder hist og her nogen tynde striper av nogenlunde frisk hornblendeskifer (se fig. 3).

Ikke nogetsteds kunde jeg i samme tverprofil finde baade det hængende og det liggende av glimmerskifer-laget fuldstændig

avrenset, idet dalrendens bund paa de fleste steder er dækket med større og mindre stenblokker. Lagets horisontale bredde (vinkelret paa strøget) kunde saaledes ikke maales med detaljert nøiagtighet, men det var let at avgjøre, at bredden i hvert fald ikke var under 5—6 m. og muligens litt derover, dog neppe mere end 7—8 m. Regner vi bredden til 6 m. og sætter vi faldet til 48° , skulde mægtigheten (maalt vinkelret paa lagflaten) av glimmerskiferen i dalrenden utgjøre ca. 4.5 m., men det er

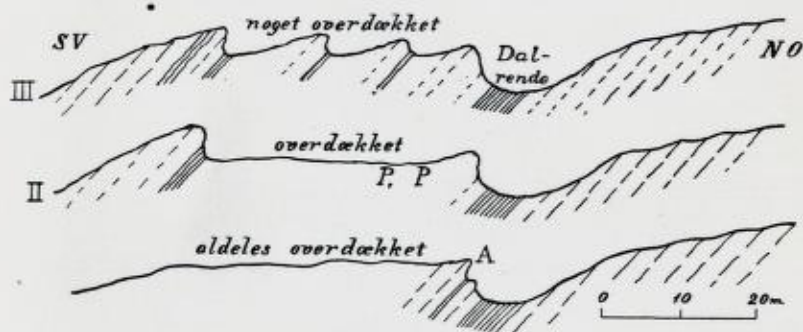


Fig. 4. Profil over dalrenden med omgivelser. I, ret over tunneltracéen (som fig. 3). II, ca. 50 m. og III ca. 70 m. mot SO for I.

sandsynlig, at den oprindelige mægtighet var noget større, idet erfaring lærer, at aldeles forvitret bergart gjerne blir trykket litt sammen av det hængende. Hertil kommer, at den horisontale bredde muligens er noget større end 6 m.

Det er den forvitrede og derfor i dagen litet motstandsdygtige glimmerskifer, som har git anledning til den markerte dalrenden og den i dalrenden gjennom aartusener rindende bæk har saa igjen bidrat til, at glimmerskiferen er blitt saa sterkt oppraatnet nær dagen.

Jeg maa — for at man kan forstaa forskjellen mellem den geologiske tolkning av aarsaken til lækagerne i tunnellen, som ing. SCHJERVEN, støttet til en geologisk utredning av prof. C. F. KOLDERUP, har git i Teknisk Ukeblad, og den tolkning, som jeg gir i det følgende — gjøre opmerksom paa, at dalrenden ikke skyldes en svakhetslinje beroende paa forkastning.

I profillinjen ret over tunnellen (fig. 3 og fig. 4, I) er marken aldeles tildækket paa partiet umiddelbart nedenfor (SV for) den lille dalrende. Men gaar vi til de geologiske tverprofiler fig. 4, II og III, trukne litt længere mot SO, iagttar vi, i de nærmeste 30 à 35 m. horisontalt regnet nedenfor (SV for) den lange dalrende, nogen andre indleiringer av glimmerskifer, ogsaa disse tildels karakterisert ved ganske smaa render langs glimmerskiferens utgaende og med markerte smaa-rygge av hornblendeskifer umiddelbart i det hængende for glimmerskiferen. Marken er vistnok her overalt ganske sterkt overdækket, men vi kan i alle fald gjøre den observation, at der inden en horisontal-bredde av ca. 35 m. (svarende til mægtighet ca. 26 m.) til SV for den lille dalrende, er indlagret inde i hornblendeskiferen mindst 3, antagelig 4 eller 5 særskilte lag av glimmerskifer, hvert enkelt lag av mægtighet op til et par m. eller antagelig for enkelte lags vedkommende noget derover.

Følger vi det geologiske profil endnu længere mot SV (eller ut mot dalen), møter vi først et lag av hornblendeskifer og derpaa (se profilet øverst paa fig. 2) paany et lag av glimmerskifer, langs hvilket sidste lag der igjen er utgravet en rendeformet fordykning (M).

Selve indslaget til tunnellen ligger i hornblendeskifer, men umiddelbart utenfor indslaget begynner mægtig glimmerskifer, som bl. a. optræder under den ydre del av kraftstationen.

Gaar vi nu til den horisontale tunnel, saa møter vi her fra proppen (med ytterkant ved pæl 165 m.) og frem til pæl 100 (eller 98) m. kun hornblendeskifer. Saavel observationerne i dagen som i tunnellen godtgjør altsaa, at skraaskakten og desuten hele den indre del av den horisontale tunnel, indenfor pæl 100 (eller 98) m. gaar i hornblendeskifer, uten nogen indlagring av glimmerskifer.

Inde i den horisontale tunnel optræder mellem pæl 98 m. og pæl 88 m. et lag av glimmerskifer, dog med et par ganske tynde striper av hornblendeskifer. Tunnellen overskjærer dette lag, der svarer til glimmerskiferen i den lille dalrende i dagen, i en længde av ca. 10 m., men da tunnellen danner en vinkel paa 25° med bergartens faldretning, blir lagets horisontale bredde kun $10 \text{ m.} \cos 25^\circ = \text{ca. } 9 \text{ m.}$, og mægtigheten blir

9 m. $\sin 48^\circ = 6.8$ m. — Oppe i dagen beregnet vi mægtig-
heten til ca. 4.5 m., hvortil dog kommer noget tillæg. Der er
altsaa i virkeligheden god overensstemmelse.

Grænsen mellem glimmerskiferen og den derunder lig-
gende hornblendeskifer, maalttes i profilet (fig. 2 og 3) langs
tunnellens tracé:

i dagen,	længdepæl 140 m.,	kôte 53.5 m.,
i tunnellen,	— 98 m.,	„ 14 m.,

(midt i tunnelhøiden).

Der er altsaa en høideforskjel paa 39.5 m. og en længde-
forskjel paa 42 m.

$$\text{Dette gir faldvinkel } \operatorname{tg} x = \frac{39.5}{42 \cdot \cos 25}, \text{ altsaa } x = 46^\circ$$

Der er saaledes god overensstemmelse mellem denne be-
stømmelse av faldet og de ovenfor omhandlede bestemmelser.
Herav følger bl. a., at der her ikke optræder nogen forkastning.

Mellem pæl 88 m. og pæl ca. 55 m. iagttages i tunnellen
en veksler av hornblendeskifer og glimmerskifer, den sidste op-
trædende i en hel række smaa-lag, hvert enkelt av tykkelse
op til et par m. eller tildels noget derover. — I den yderste
del av tunnellen har man derimot kun hornblendeskifer.

Om de store lækager, da man satte proppen i tun-
nellens ydre del (o: udenfor glimmerskifer-
indleiningerne).

Tversnittet av skraasynken og av den horisontale tunnel er, hvor der
ikke har fundet sted nogen senere utminering av hensyn til betonutforing
o.s.v. = ca. 8 m². — I bunden av skraasynken er utminert en liten kum for
at opfange eventuelt nedfaldende sten.

Da man drev ind tunnellen, fik man endel vandtilgang
ved pæl 92—94 m., altsaa i den midtre del av glimmerskifer-
laget. Man foretok her en beton-utmuring av et par m.s længde,
altsaa kun strækkende sig over en mindre del av glimmer-
skifer-laget.

Rørgate-indtaget blev først lagt med indre ende ved pæl 55 m. (paa fig. 1 betegnet som „første prop“).

I april 1919 blev vandet sat paa, i løpet av 15 timer, til trykhøide 123 m. Der viste sig straks nogen mindre lækager i den yderste del av tunnellen, og da vandet hadde staat paa med fuldt tryk i 5 — fem — timer, fik man ganske betydelige opkommer i den ovenfor omhandlede lille dalrende ret over tunneltracéen, endvidere paa flaten (ved P, P) i profil ca. 50 m. SO for tunneltracéen (fig. 4, II) samt ved den allerede ovenfor omtalte lille forsækning (M), med glimmerskifer i bunden, i en nærliggende profillinje (se øverste profil paa fig. 2).

Da vandet i tunnellen blev slaat av, strømmet en hel del vand tilbake til tunnellen, paa diverse steder mellem proppens indre ende og pæl 98 m., altsaa paa steder, hvor der er indlagring av glimmerskifer. Bl. a. viste der sig en nogenlunde horisontalt forløpende spræk i fjeldet, „strækkende sig fra rørindtaget og ca. 10 m. indover i tunnellen (se fotografi fig. 6 i ing. SCHJERVENS artikel i T. U.). Denne spræk hadde aapnet sig ca. 5 mm. Gjennem denne strømmet vandet tilbake. Aapningen avtok efter hvert, indtil den i løpet av et døgn, kun viste sig som en rids i fjeldet.“ (Citat efter SCHJERVEN.) Man drog herav den slutning, at det nedre fjeldparti over tunnellen og rørindtaget, begrenset opad ved den ovenfor nævnte lille dalrende, var blit løftet litt tilveirs, — en slutning, som jeg dog ikke finder berettiget. I et opkløftet fjeld vil vandtryk kunne presse en fjeldblok nogen faa mm. tilside eller op eller ned, navnlig derved, at visse sprækker, paa tilsammenlagt kun nogen faa mm., blir trykket mere sammen. Og 5 mm. er et litet maal.

Indenfor pæl 98 m. fik man ikke noget tilbakestrømmende vand. Den tidligere nævnte korte utminering ved pæl 92—94 m. viste sig ikke at være til nogensomhelst nytte.

Regnet langs lagflaten er der en avstand paa 50 à 55 m. mellem glimmerskifer-laget i tunnellen ved pæl 88—98 m. og det utgaaende av det samme lag i den lille dalrende ret over tunneltracéen. Bundens av denne dalrende ligger her paa kôte ca. 53 m., og trykhøide 123 m. svarer til kôte ca. 135 m. Ved denne trykdifferanse (av vertikal høide ca. 82 m., hvorfra maa

trækkes nogen friktionsmotstand for at faa det effektive tryk) tok det kun omkring 5 timer — eller noget over 5 timer (en brøkdels av 15 timer og hertil 5 timer) — for at vandet kunde trænge sig i ganske stor mængde op til bunden av dalrenden, og endvidere til flere nærliggende punkter ved det utgaaende av forskjellige glimmerskifer-lag.

Man skred derefter til utmuring av tunnellen fra pæl 55 til pæl 114 m., altsaa i en længde av 59 m., — idet man muret med beton i tykkelse 0.50 m. eller, hvor man hadde konstateret spræk i fjeldet i tykkelse 0.75 m. I betonen blev indlagt vertikal armering med jern, og der blev endvidere benyttet horizontal armering med 13 mm.s jern; desuten blev indlagt drænsrør, for at opta nedsildrende vand. Samtidig bedredes proppen, som fik en længde av 18 m. For detaljer henvises til den utførlige beskrivelse av ing. SCHJERVEN.

Forsøksvis paasattes vandet et døgn (17. aug. 1919) til trykhøide 120 m., hvorefter man foretok diverse smaa kompletteringsarbeider. Saa lot man vandet i tunnellen staa en maaned, uten at der indtraadte generende lækager. Paany blev vandet slaat av og de sidste avpudsningarbeider foretat.

15. okt. 1919 blev vandet paasat for godt og kraftanlægget sat igang. Der viste sig i tunnellens ydre del kun nogen mindre lækager, utgjørende 5 à 6 liter pr. sekund, svarende til ca. 8 HK.

Man arbeidet et par maaneder med manometertryk paa 119 til 128 m., tilsidst et døgn paa 132 m., — alt gik foreløbig godt. Men saa indtraadte, pludselig og uten nogetsomhelst varsel, natten til 22. dec. 1919 meget vidtgaende lækage. Ved inspektion 21. dec. kl. 3 efterm. viste alt sig at være i den normale gjænge, men 22. dec. kl. 6 om morgenen blev man opmærksom paa, at der begyndte at rinde vand nedover fjeldsiden ovenfor kraftstationen, og kl. 8¹/₂ om morgenen var disse bækker vokset betydelig. Man reducirte derfor trykket fra 131 m. til 115 m.

Vand i tilsammenlagt stor mængde trængte i dagen frem paa følgende steder:

a) Hovedsagelig i den ovenfor gjentagne ganger omtalte dalrende (med glimmerskifer i bunden), dels næsten ret over

tunneltracéen (profil fig. 3 og 4, I) og dels paa et par punkter indtil et snes m. længere mot SO.

b) I det jorddækkede terræn ca. femti m. SO for profil fig. 3 eller 4 I og her i flere huller (betegnet ved P, P paa fig. 4 II) i den jorddækkede mark 10 m. eller lignende SV for selve dalrenden. Den geologiske undersøkelse viser her diverse lag av glimmerskifer inde i hornblendeskiferen.

c) Nede i den lille forsænkning (dalgrøp) betegnet ved M paa profil øverst paa fig. 2, med glimmerskifer i dalgrøpens bund. Her kom op saavidt meget vand, at man fik en liten bæk, men ikke saa stor som ved a og b.

d) Litt vand, dog kun ganske litet, trængte ogsaa op i bunden av kabelkanalen i kjælderens under kraftstationen, — like ved grænsen mellem glimmerskifer og hornblendeskifer.

Endvidere lækket det betydelig i proppen, der var sprukket horisontalt ca. 1 m. over rørene.

Ved i det væsentlige at stænge tilløpet til tryktunnelen, idet man kun holdt aapent et 9 toms fylderør, som gav ca. 300 liter pr. sek., sank vandspeilet i tryktunnelen til trykhøide 108 m. De samlede lækager utgjorde altsaa ved denne trykhøide omkring 300 liter pr. sek. Ved større trykhøide økedes lækagerne meget betydelig, uten at man dog kunde angi nøiagtig maal. Ved at sænke trykhøiden til 90 m. avtok paa den anden side lækagerne i væsentlig grad. Til denne trykhøide svarer kôte ca. 100 m.; dalrenden over tunnelen ligger paa kôte ca. 53 m. og P, P paa „jordfladen“ ved profil fig. 4 II — med vandopkommer ovenfor opført under b — paa kôte ca. 65 m. Ved høideforskjel paa henholdsvis ca. 47 m. og ca. 35 m. mellem vandspeilet og opkommene a og b avtok altsaa lækagerne i væsentlig grad.

Paa grund av sterk kulde ved jule- og nyttaarstid 1919—20 lot man foreløbig kraftstationen arbeide med trykhøide 90 m., indtil man slog vandet av 20.—21. jan. 1920, hvorefter tunnelen blev besigtiget 21. og 22. jan. 1920 av en komité, bestaaende av ingeniørerne GUNDERSEN og JOHAN KINCK samt prof. C. F. KOLDERUP.

Beton-utmuringen indenfor proppen var tildels aldeles ødelagt. Navnlig var der et stort brudd, i ca. 9 m.s længde fra

pæl 70 m. til pæl 79 m. „Der var her opstaat store revner (i betonen) mellem 10 og 20 cm. brede paa begge sider av tunnellen i væggenes overgang til taket.“ Noget længere indover var der ogsaa en mængde sprækker og rids i betonen. Og fra alle disse sprækker fossed vandet ut i tunnellen.

Fjeldet paa indsiden av beton-utstøpningen, altsaa indenfor pæl 114 m., var derimot tørt, uten vanddryp, — fraregnet et litet fugtig parti langt inde i tunnellen, hvorom mere nedenfor.

Den nævnte komité skriver bl. a.:

„Det maa her nævnes, at den i dagen synlige forkastning, som viste sig længere inde i tunnellens horisontale del som en tynd sleppe, allerede før første vandpaasætning var utstøpt armert og indstøpt for fuldt vandtryk paa forsvarlig maate.¹ Saavidt man har kunnet konstatere har denne sleppes sammen-træf med tunnellen ikke nu hat nogen direkte forbindelse med den senere indtraadte skade længere ut mot tunnellens munding. Naar der imidlertid i fast fjeld saaledes som her en gang i tiden har fundet en bevægelse sted langs en forskyvningsspalte, vil fjeldmassen bli litt opknust paa begge sider av spalten, men disse opknuste partier vil igjen i tidens løp kittes saa godt sammen at bergarten atter blir hel og fast. Ved at vandet sattes paa før utforingen var foretat, er en del av de smaa gjenkittede sprækker utenfor den forsvarlig utstøpte forskyvningssleppe blit revet op, hvorved fjeldet er blit svækket. Den lokale ødelæggelse av tunnellen paa denne strækning maa utvilsomt skyldes denne svækkelse av fjeldet og bortskyldning av tætningsmaterialer, saaledes at der, selv efter at beton-utforingen har fundet sted, har kunnet foregaa mindre lokale brudd, der inden kort tid har utvidet sig sterkt, eftersom fjeldmassen ovenfor er sat under større og større tryk.“ —

Jeg maa gjøre opmerksom paa, at den her omtalte forskyvningsspalte ikke eksisterer, idet man har forvekslet et glimmerskifer-lag med en forskyvning. Og det forsøk, som ing. SCHJERVEN gjør paa at konstruere sleppernes forløp i fjeldet

¹ Nemlig ved pæl 92—94 m., altsaa kun for en mindre del av glimmerskifer-laget her (88—98 m.). Tilføielse av Vogt.

(hans fig. 2), er av hypotetisk natur. Forkastninger foreligger overhodet ikke.

Der indtraf i Nordhordland to ganske smaa jordskjælv, 21. dec. kl. 10.49 formiddag og 22. dec. kl. 12¹/₄ formiddag, og man har tænkt sig muligheten av, at disse jordskjælv skulde ha været medvirkende aarsak til bruddet. Denne formodning synes mig dog litet sandsynlig, — og et teknisk anlæg maa være konstruert saaledes, at det kan taale smaa jordskjælv, hvorav man hvert eneste aar har en hel del hertillands, navnlig paa Vestlandet.

Aarsaksforholdet maa ha været følgende:

Betonen blev litt efter litt angrepet under det herskende vandtryk (oftest 119 til 128 m.). Efter litt over 2 maanedes forløp — i tiden fra 15. okt. til 21. dec., altsaa i løpet av 67 døgn¹ — hadde vandet arbeidet sig tvert gjennom den — om end ikke særlig sterk — armerte beton-utforing (dels av 0.5 og dels av 0.75 m.s tykkelse). Da saa vand var kommet paa baksiden av betonen, fulgte det de daarlige glimmerskifer-lag som tildels maa staa i forbindelse med hinanden ved tversprækker, og trængte paa diverse steder op i dagen. Vi har ovenfor set, at disse lag her er saa daarlige, at der ved vandtryk 123 m. i april 1919 kun behøvedes 5 timer eller litt derover for at vandet kunde sprænge sig frem til dagen, efter en skraalængde av ca. 55 m. — Og da vandet i slutten av dec. 1919 og den første del av jan. 1920 i ganske rikelig mængde strømmed tvert gjennom betonen, vil sprækkene her ha utvidet sig, saa man tilslut kunde faa ganske aapne revner. Ved det senere tryk ovenfra, efterat vandet var slaat av, kan de næsten horisontale revner være blit presset litt sammen igjen.

Glimmerskifer-lagene fører en utallighet av smaasprækker, og i hornblendeskiferen mellem de forskjellige tynde lag av glimmerskifer vil det utvilsomt ogsaa ha været en del sletter i forskjellige retninger. Da vandet i løpet av en maanedes tid (22. dec. 1919—21. jan. 1920) strømmed gjennom disse fine sletter, vil litt material her være blitt utvasket, saa sletterne eller

¹ Man burde vel hertil ogsaa lægge den maaned, da vandet tidligere hadde staat paa med ca. 120 m.s tryk.

sprækkerne har aapnet sig litt. Herved vil enkelte fjeldpartier med tilhørende beton kunne være blit løftet litt op, med efterfølgende nedsynkning, da vandet blev slaat av. Men dette har ikke noget at gjøre med det i et efterfølgende avsnit diskuterte moment om „fjeldvegt mindst motsvarende vandtryk“.

Efter flytning av proppen til tunnellens indre del.

Da man ansaa det som haabløst at faa tættet de store lækager, forlænget man rørgaten næsten helt ind til den indre del (pæl 185 m.) av den horizontale tunnel, og man gav betonproppen her (pæl 165—185 m.) en længde av 20 m. Endvidere betonerte man omkring varegrinden og kummen ret under synken.

Tunnellens indre del, fra pæl 98 eller 100 m. til pæl 165 m., var ved mit besøk — under og efter langvarig regnperiode — tør, uten takdryp paa et eneste sted. Kun var der et par fugtige partier paa et par steder, ved pæl 162 m. (3 m. utenfor proppen) og like ved proppen. Men her hadde man ogsaa hat litt fugtighet — ikke rindende vand, men kun en umaalbar vandmængde, — allerede da tunnellen blev mineret ut. Litt fugt hadde man ogsaa mellem rørene paa utsiden av proppen.

Man hadde ved mit besøk adskillig vandtilgang (nogen liter pr. sekund) ved pæl 94—98 m., hvor glimmerskifer-laget fra den lange dalrende i dagen overskjæres. Der handles her ikke om nogen lækage fra tryktunnellen, men om et regulært dagvand, nedsunket langs glimmerskiferens utgaende i dagen og senere oppresset til aapningen i tunnellen. Vandaaren i tunnellen her kommer ikke ut i taket, men hovedsagelig nær bunden i den søndre væg. Man har her et av de mange eksempler paa, at dagvand først synker ned til ganske stort dyp, og at vandet saa, naar det ved det hydrostatiske tryk blir presset op, munder ut i aapningen (tunnellen) ikke i dens tak, men i dens bund eller sidevæg. Analoge forhold kjender man bl. a. fra Undergrundsbanen i Kristiania. — Videre er der i tunnellen litt vandsig paa flere steder mellem pæl 88 m. og ca. 55 m., hvor der optræder en veksling av glimmerskifer og horn-

blendeskifer. Ved tørveir er disse vandsig likesom ogsaa vand-aaren ved pæl 94—98 m. næsten borte. — Ogsaa i tunnellens yderste del, hvor taket er tyndt, er der litt vandsig under regnveir.

Mægtigheten (maalt vinkelret paa lagflaten) av hornblende-skiferen fra dens grænse mot glimmerskifer-laget (dalrenden til pæl 98 m.) frem til den indre ende av rørgaten er = 58 m. og frem til den nedre del av skraaskakten = 69 m. (se det geologiske profil). Denne tykkelse har hittil vist sig at være tilstrækkelig, idet der ikke er nogen lækage gjennom fjeldet.

Tryktunnellen, med rørgaten langt ind i den horisontale tunnel, blev sat igang i midten av nov. 1920. Indtil mit besøk i begyndelsen av aug. 1921 — altsaa 8¹/₂ maaned efter igangsættelse — hadde der ikke vist sig nogensomhelst lækage. Det samme gjælder efter mottagen meddelelse, dateret 20. okt. 1921 og 9. jan. 1922, ogsaa for den efterfølgende tid. Tryktunnellen har saaledes nu, med vandtryk paa ca. 135 m., staat litt over et aar uten lækage.

Svælgen tryktunnel (i Bremanger)

tilhører „A/S Bremanger Kraftselskab“ og er beliggende ved bunden av Nordgulen fjord, paa fastlandet i Bremanger herred, i den nordre del av Søndfjord og nær grænsen mot Nordfjord.

Kraftstationen, som ligger klods ved fjorden, faar sit vand fra Svælgsvand, ved en tunnel av længde 1600 m.

Turbinakselen er paa kôte 4.5 m. og den maksimale vandstand ved fuld regulering er i fordelingsbassinet paa kôte 229.5 m. Laveste vandstand er paa kôte 213 m., og den lange tunnel fra Svælgsvand ligger ved fordelingsbassinet paa kôte 202.6 m. (se tunnelprofillet fig. 5). Den gjennomsnitlige aarlige vandføring er ca. 6.5 m³ pr. sek. Der er i kraftstationen installeret maskiner for 15000 hestekræfter.

For 7 aar er utleiet 6000 HK til „Aalfotens interkommunale Kraftselskab“, som bestaar av en række (11) kommuner i Nordfjord og Søndfjord.

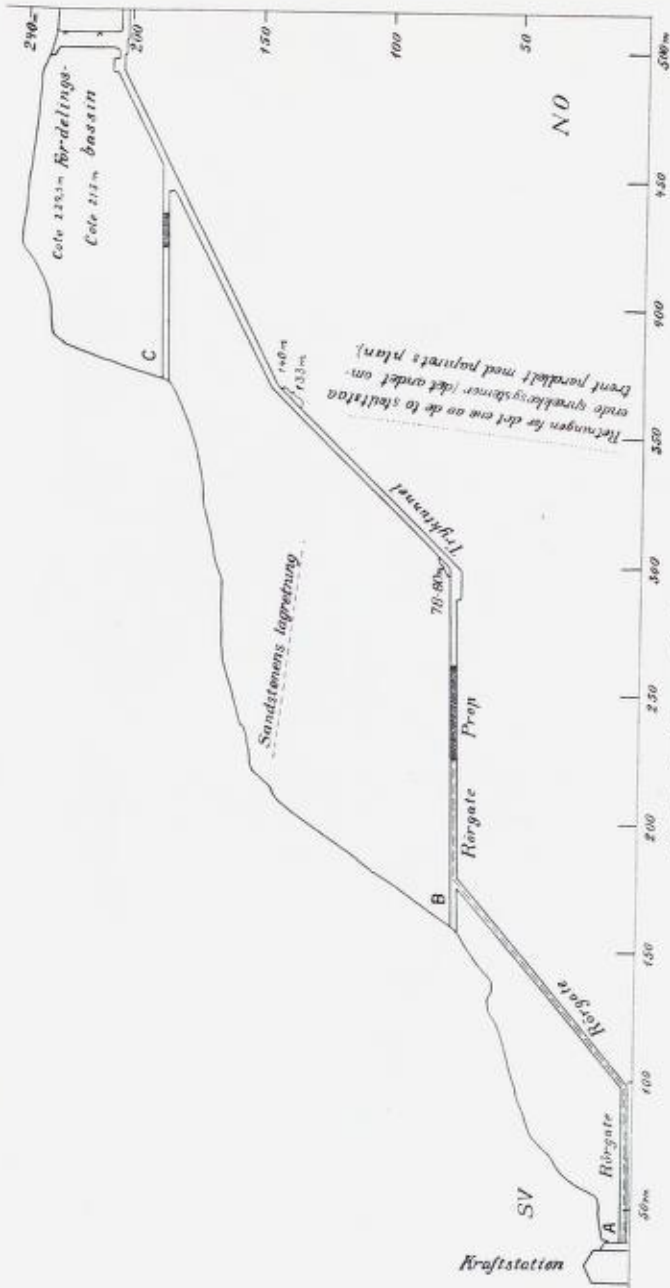


Fig. 5. Profil over Sveigen kraftanlæg.

Man har adgang til en ny utbygning, for hvilken allerede er gjort en hel del forberedende arbejder, fra Hjelmevand paa kôte 476 m., og denne nye utbygning kan levere med rundt al 30 000 HK.



Fig. 6. Fotografi fra det fjeld, i hvilket tennellen er anlagt.

Fjeldsiden fra fordelingsbassinet ned til kraftstationen danner (se profilene fig. 5 og 8) paa tre steder meget bratte stup — saaledes har man i den midtre del et tildels næsten steilt-staaende stup paa 80 m.s høide. Av konstruktive hensyn for selve rørgaten, tildels ogsaa av hensyn til risiko for stensprang, var man derfor nødt til at lede vandet i tunnel, nemlig enten i tryktunnel eller i rørgate indlagt i tunnel med tilhørende skraaskakt. Tildels paa grund av de høie rørpriser besluttet

man i mai 1918 at anvende tryktunnel. Oprindelig var planlagt at ta den hele høide — ved maksimalt vandtryk 225 m. — i tryktunnel. Men belært ved de vanskeligheter, som Herlandsfossen var utsat for, forandredes senere denne plan, idet man kun benyttet den øvre del (av høide ca. 150 m.) som tryktunnel, mens man anvendte rørgate i hele den nedre del.

Tryktunnellen gaar fra fordelingsbassinet (med maksimal vandhøide paa kôte 229.5 m.) først ned til tilledningskanalen (kôte 202.6 m.), derfra gjennom en i et rør indbygget trotleventil ind i den egentlige tryktunnel, som i den øvre del (efter faldet av 150 m.s længde) har fald 26.5° (eller 1 : 2) og i den nedre del (av længde 80 m.) fald 45° . Hertil slutter sig et horisontalt parti i indslag B av længde ca. 40 m., frem til den 34 m. lange prop, hvor rørgaten begynner. I bunden av skraaskakten er utminert en liten fordypning (kum), for at kunne opta eventuelt nedfaldende sten fra tryktunnellen.

Rørgaten ligger ved proppen paa kôte 78 m. Den maksimale vandhøide blir saaledes 151.5 m., eller, friktionstap medregnet, henimot 150 m., — altsaa ca. 15 m. mere end ved Herlandsfossen.

For at lette mineringsarbeidet blev der paa kôte 186.6 m. anlagt et indslag (C), nu gjenmuret ved en cementmur i 9 m.s længde.

Rørgaten gaar først i en længde av 72 m. (derav med prop i 34 m.s længde) i det horisontale indslag B, derfra i en 100 m. lang skraaskakt med fald 45° ned til indslag A, og tilslut i 66 m.s længde i dette horisontale indslag frem til kraftstationen.

Om de geologiske forhold.

Tunnellen gaar i sin helhet i sandsten, tilhørende Bremangerfeltets devon. Lagbygningen er overmaade regelmæssig, med næsten nøiagtig samme strøk og fald ved tunnellen og i det nærmest tilgrænsende terræn paa begge sider av Nordgulfjordens bund og herfra til litt øst for tunnelpartiet. Der henvises herom til den geologiske profilskisse (fig. 7) over fjeldene ved bunden av Nordgulen.

Strøket er næsten konstant, N 20 à 25° O og kan som resultat av flere observationer sættes til N 23° O.

Faldet er overalt mot OSO; en række maalinge vekslet mellem ca. 24° og ca. 29°, med gjennemsnit ca. 26°. — Kun yderlig sjelden iagttages nogen smaa bøininge i strøk og fald.

I den lagrække, som tunnellen gennemskjærer, fandt jeg ikke et eneste konglomerat-lag; derimot optræder inde i sandstenen i det nær tilgrænsende parti nogen tynde lag av konglomerat.

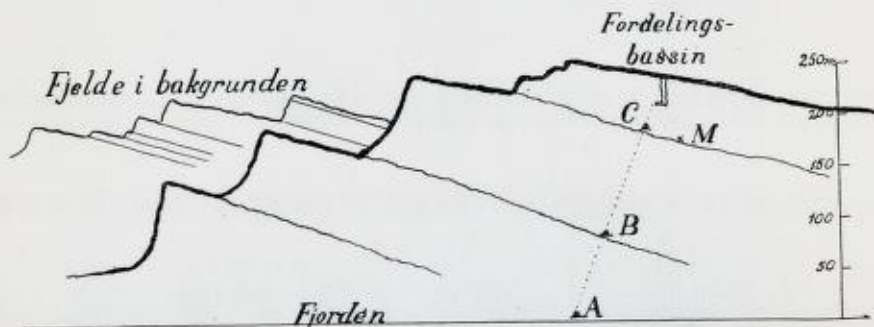


Fig. 7. Geologisk profilskitse (ikke tegnet nøiagtig efter faldet) over fjeldene ved Svælgen kraftverk (A, B, C) og forøvrig ved bunden av Nordgulen fjord.

I sandstenen, som har en karakteristisk graalig grøn farve, sees hist og her, saavel diagonalskiktning som bølgeslagsmerker, angivende avsætning paa grundt vand. Og sandstenen er gjennemgaaende forholdsvis grovkornig.

Bergarten bestaar ifølge mikroskopisk undersøkelse av kvartskorn — gjennemsnitlig regnet i mere skarpkantede korn end i en række andre til sammenligning undersøkte sandstener — med nogen korn av feldspat, navnlig plagioklas, som tildels er forbausende frisk; hertil nogen blade av muscovit samt nogen meget sparsomme og smaa korn av magnetit, titanit o.s.v. — I den særdeles godt og solid sammenkittende mellemmasse optræder talrige fine blade av klorit, som betinger bergartens graalig grønne farve, videre noget (nydannet) epidot samt i alle de undersøkte præparater noget kalkspat, det sidste mineral i mængde dels litt over og dels litt under 5 pct. — Bergarten er noget, men ikke særlig sterkt metamorfoseret.

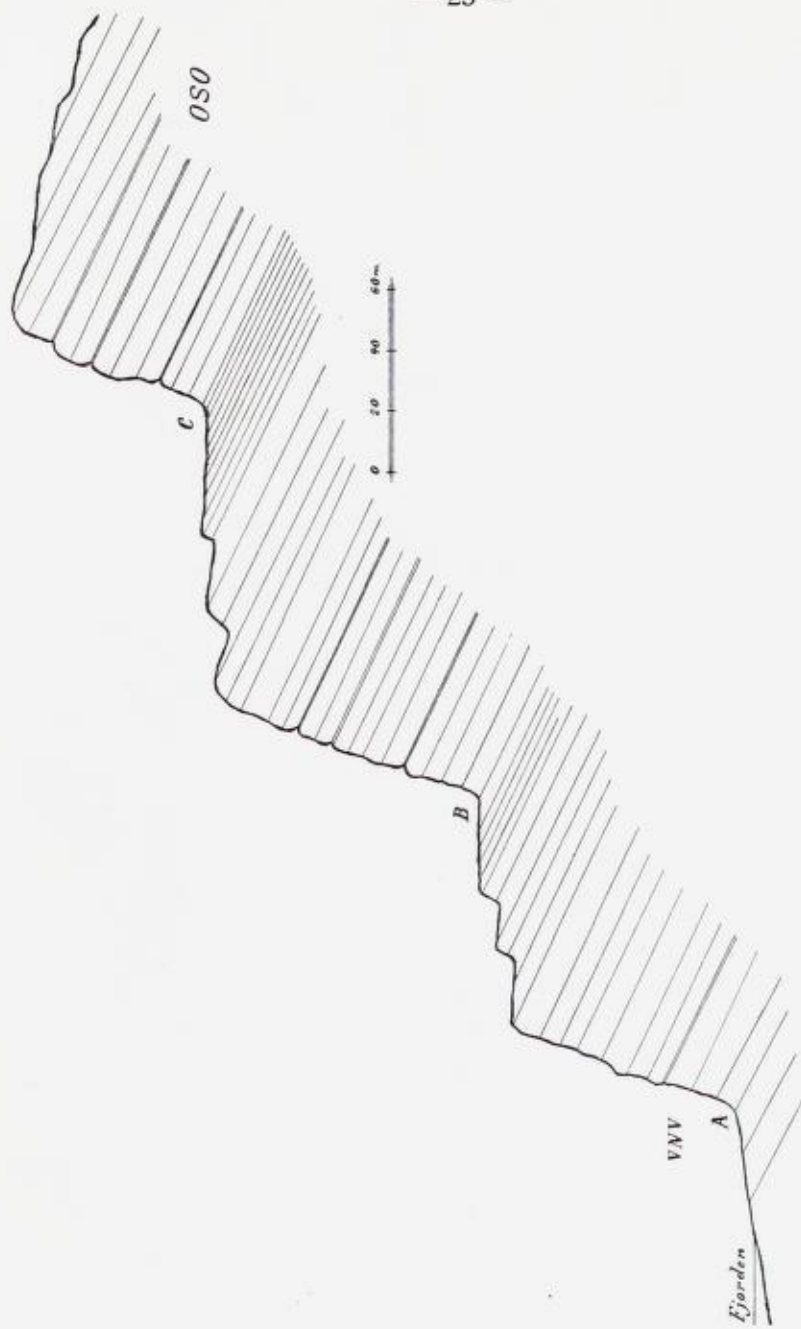


Fig. 8. Geologisk profil over fjeldet ved Svælgen tryktunnel.

Sandstenen er kompakt, tæt, kun yderlig litet porøs og gir ved slag jevnlig muslig brud, omtrent som en kvartsit. Bergarten motstaar forvitring udmerket godt, hvilket bl. a. viser sig derved, at man paa overflaten fleresteds ser friske skuringsstriper. Oftest er sandstenen meget tykbænket, og i mange bænker ser man kun en svak antydning til lagring. Andetsteds er sandstenen noget mere skifrig, og hist og her er den noksaa sterkt skifrig og nogenlunde tyndplanig.

Undertiden, dog meget sjelden, iagttages rødlig farvede, ganske tynde — nemlig oftest kun en eller et par cm. tykke — lag av en sandholdig lerskifer eller av næsten ren lerskifer, som er tæt, haard og temmelig kompakt. Leilighetvis kan man ogsaa finde nogen ganske tynde skiferfiller, paa et par cm.s tykkelse, inde i sandstenen.

Sandstenen danner ved bunden av Nordgulen — likesom ogsaa paa mange andre steder i devonfeltet — trappetrinsformede steile stup (se profilerne fig. 5, 7, 8 og fotografi fig. 6), og selve stupene er jevnlig saa steile som 70° ; hist og her er væggen endog næsten vertikal. Mellem stupene optræder der flattere avsætter, som i alle fald tildels følger sandstenslagenes fald (se fig. 7 og 8).

Ved tunnelprofilet (fig. 8) er sandstenen paa de fleste avsætter noget mere finskifrig end i de bratte stup, og jeg antar, at aarsaken til konfigurationen med de karakteristiske trappe-trins-stup og -avsætter i alle fald tildels er at søke i en noget mindre motstandskraft mot denudation av de relativt skifrige partier av sandstenen. Men ogsaa i de bratte stup finder man fleresteds indlagret tyndskifrig sandsten, tildels i ganske tynde skikt, som tegner sig i lang avstand ved litt vegetation, beroende paa en tynd rendiformig utgravning efter det utgaaende.

Ikke paa et eneste sted kunde jeg finde nogen forkastning av lagene, — og da det utgaaende av enkelte lag ofte kan følges i stor længde, endog i flere hundrede m.s længde dels efter strøket og dels efter faldet, er jeg temmelig sikker paa, at forkastninger fuldstændig mangler.

I sandstenen optræder en utallighet av nogenlunde steiltstaaende spalter, i alle mulige strøkretninger, men dog saaledes,

at de fleste spalter samler sig til to (konjugerte) bundter av retninger (se fig. 9).

For den ene bundt maales paa en række steder, dels i dagen nær tunnellen og dels inde i tunnellen, strøk: N 10, 10, 15, 25, 25, 25—30, 30, 30, 30, 35 og 40° V, altsaa gjennemsnittlig omkring N 25° V. — Og den anden bundt av spalter samler sig om retning N 35—40° O.

Disse to sæt av spalter staar tilnærmelsesvis vinkelret paa sandflatens lagflater, og de er dannet ved sandstenens foldning (eller indsynkning). De maa saaledes fortsætte, saalangt som sandstenen vedvarer mot dypt.

I dagen har forvitringen fulgt spalterne, saa disse like ute i overflaten ofte er aapne eller gapende. Mellempartiet mellem et par saadanne aapne sprækker er ofte gravet bart, og derfor

ser man fleresteds trange kløfter eller gjæl, undertiden ogsaa bækeløp følgende langs sprækkerne oppe paa den flate fjeldmark; bakenfor tunnellen kan man hist og her endog se halvveis løstliggende blokker, omtrent som ved en kvadersandsten — begrænset ved de fladtliggende lagflatespalter og paa siderne av det steiltstaaende dobbeltsæt av spalter.

De bratte stup i tunnelfjeldet gaar tilnærmelsesvis i retning N 30—40° V, følger altsaa langs det førstnævnte sæt av spalter, mens det andet sæt av spalter i strøk danner en vinkel paa 60—65° med stupretningen.

*De to konjugerte
sprække-
systemer.*

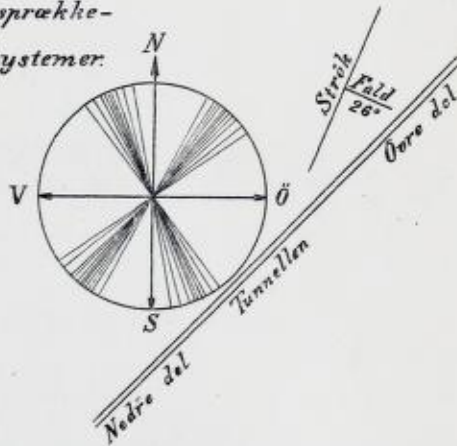


Fig. 9. Angivende sandstenens strøk og fald samt horisontal-projektion av tryktunnellen og av de to konjugerte sprækkesystemer.

Om tunnelen og bergarten.

Sandstenen er kompakt og ikke porøs, det vil sige, bergarten er ikke mere porøs eller i alle fald ikke nævneværdig mere porøs end tilfældet er med vore vanlige krystalline bergarter, som granit o.s.v. Vedrørende risiko for lækage ved tryktunnelen er, bergartens porøsitet av underordnet betydning. Farligere er opspaltningen, dels de flatliggende lagflater og dels — og navnlig — de netop omhandlede steiltstaaende spalter oftest nogenlunde vinkelret paa lagflaterne.

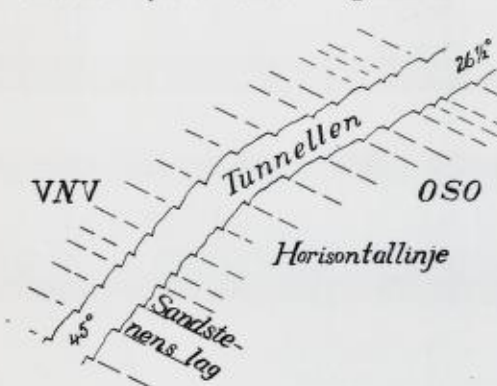


Fig. 10. Detaljprofil fra tryktunnelen (ved knækken mellem tunnelens fald $26\frac{1}{2}^\circ$ og 45°).

Inde i skraaskakten ser man, at sandstenen ved mineringen ofte er sprængt løs efter lagflatene saaledes, at lagflatene danner ganske smaa trappetrin i skaktens saale. Jeg fæstet mig — jeg kan godt sige, noget humoristisk — herved, idet disse smaa trappetrin gir godt fotfæste, naar man gaar op og ned i skraaskakten.

Tunnelen danner (se fig. 9 samt fig. 5) kun en liten vinkel med det gennemsnitlige strøk av det ene sæt av de steiltstaaende spalter (N $35-40^\circ$ O, mens tunnelretningen er N 45° O). I overensstemmelse hermed ser man, at tunnelens sidevæg ofte i en eller flere m.s længde ved mineringen har løsnet efter disse spalter.

Det andet sæt av spalter (retning N 25° V) sætter næsten tvert over tunnelen.

Inde i tunnelen — med de tre indslag og med fordelingsbassinet — er saavel lagflatespalterne som de steiltstaaende sprækker paa de fleste steder meget godt sammenvokset. Undertiden, om end sjelden, finder man avsat litt kvarts — eller kvarts med noget kalkspat — paa spalterne, som herved

blir godt sammenkittet. Spalterne tegner sig inde i tunnellen i sin almindelighet kun derved, at mineskuddene ofte fik fjeldet til at gaa løs langs efter spalterne.

Ved utmineringen av tunnellen (med indslag A, B og C paa kôte henholdsvis 2, 77 og 185 m.) hadde man, navnlig under regnveir, en del takdryp i de ydre deler av indslagene. Ved mit besøk (7.—9. aug. 1921), efter næsten stadig regnveir i lang tid, var der dog kun noksaa litet takdryp.

Da man fra indslag C drev ned skraasynken (med fald 26.5°) i længde ca. 70 m. før gjennomslag (paa kôte 150 eller 155 m.) med stigorten fra indslag B, fik man ikke mere vand end ekvivalerende 12 tønder à ca. 90 liter pr. 24 timer, eller $\frac{3}{4}$ liter pr. minut, altsaa kun ca. 0.0125 liter pr. sekund (under sterkt regnveir noget mere, under tørveir noget mindre) — det vil sige, kun yderlig litet vand.

Under driften av stigorten (ca. 120 m. lang) fra indslag B traf man to fugtige partier, — det ene (paa kôte 78—80 m.) ved et par sprækker i kummen (sumpen) ved den indre ende av indslag B, hvor man dog kun hadde yderlig litet vand (se herom nedenfor) — og det andet ved kôte 133—140 m., hvor der kom frem litt rindende vand, efter opgivende anslagsvis $\frac{1}{4}$ liter pr. sekund (se nedenfor under III).

Om den første prøve av tryktunnellen.

For at prøve tryktunnellen blev denne fyldt med vand i løpet av 4 timer den 27. juli 1921 og stod saa under vandtryk, til kôte 223 m., i 5 døgn, hvorefter man lot vandet rinde ut.

Min befaring av tryktunnellen fandt sted 8. aug. samme aar, altsaa 6 dage efter at tunnellen var blit tømt.

For at maale de samlede lækager blev vandtilførselen ved slutten av prøven slaat av og synkningen av vandspeilet maalt i løpet av 2 døgn (1. og 2. aug.), hvorved vandspeilet sank til kôte 160 m. Herved beregnedes — ved tversnit ca. 7 m^2 vinkelret paa tunnelaksen, — at den gjennomsnitlige lækage beløp sig til ca. 9 sekundliter. Paa slutten sank vandspeilet litt langsommere end i begyndelsen, saa lækagen ved vandtryk til

kôte 223 m. med rundt tal kunde sættes til 10 liter pr. sekund, mens lækagen ved vandtryk kun til kôte ca. 160 m. skjønsmæssig maa ha utgjort 8—9 liter pr. sekund. Da den gennemsnitlige vandføring beløper sig til ca. 6500 liter pr. sekund, utgjorde lækagen kun ca. $\frac{1}{7}$ pct., altsaa en negligabel ubetydelighet. Dette dog kun gjældende, efter at tryktunnellen bare hadde staat i 5 døgn fuld av vand.

Da tryktunnellen var blit fylt med vand, iagttok man paa skraaflaten nedenfor (SO for) indslag C to smaa-bækker med blakket vand. Disse smaa-bækker viste sig at stamme fra et par nye, nær hinanden beliggende opkommer paa „Mittkupa“ (angit ved et kryds og M paa fig. 7), det ene paa kôte ca. 155 m. og beliggende ca. 35 m. utenfor (SV for) den bratte fjeldvæg nær indslag C, — og det andet paa kôte ca. 160 m. og ca. 15 m. utenfor den bratte fjeldvæg; begge med rundt tal horisontalt regnet ca. 30 m. SO for tunneltracéen. Grumsningen i vandet fra de to opkommer avtok noksaa snart, og opkommene mindsket først betydelig og forsvandt derefter helt, da tunnellen var blit tømt for vand. Av flere grunde, bl. a. samtidig indtrædende regnveir, var det ikke mulig at maale opkommenes størrelse nøiagtig; denne blev anslaat til 3—4 liter pr. sekund.

I ventilkammeret (under ca. 20 m.s vandtryk) var der kun et uvæsentlig vandsig ved betonen, — likeledes paa utsiden av den 9 m. lange betonprop i indslag C (paa kôte 188 m.). — Ved utsiden av den 34 m. lange betonprop i indslag B (paa kôte 77 m.) var der en liten lækage i fjeldet, ifølge maaling med bøtter dog kun paa 5 liter pr. minut eller ikke fuldt 0.1 liter pr. sekund.

Andre lækager — inde i tverslagene og ute i dagen, hvor man paa de fleste steder har nakne fjeldvægger — kunde trods nøiagtig undersøkelse ikke opdages.

Vi gaar saa over til observationerne inde i tunnellen, efter at vandet var blit slaat av.

1) Inde i tunnellen saa jeg kun paa et eneste sted en aapen spræk, nemlig i tryktunnellen nær over indslag C, paa kôte 193 i bunden eller 195 m. i taket, altsaa ved maksimalt vandtryk ca. 36 m. Den korteste avstand til dagen er her ca.

45 m. Denne spræk, som satte omtrent ret over tunnellen, hadde en aapning paa ca. 1.5 cm., men den var aldeles fuld av lere. Dens siksakformede forløp viste, at der her ikke handledes om nogen forkastning. Til overflod anføres, at der optraadte samme sandstensskikt paa begge sider av sprækken. — Ved utmineringen av tunnellen leverte denne spræk ikke noget vand, og den gav heller ikke anledning til nogen lækage. Der randt saaledes, efter at tunnellen var blit tømt, ikke noget vand tilbake i sprækken. — For at hindre utvaskning av lere i sprækken er denne senere blit cementert.

II) Paa kôte 170 m. saaes en typisk slette langs lagene, i et sterkt skifrigt parti inde i sandstensskiferen — altsaa en lagslette — av tykkelse et par cm. og op til ca. 3 cm. Denne slette førte ler og desuten en tynd kvartsaare (sekundær). Denne spræk, hvor der ikke var spor av utvaskning at iagttå, gav ikke anledning til nogen lækage. Baade før og efter at tryktunnellen var fyldt med vand, var partiet omkring denne slette tørt.

III) Et vandaareparti begyndte oventil ved kôte 142 i taket (eller 140 m. i bunden) og fortsatte nedad til kôte 133 m. (i bunden), strakte sig altsaa ca. 7 m. regnet efter tunnellens akse. Under utmineringen av tunnellen hadde man her, som ovenfor nævnt, et vandsig, anslaat til omkring $\frac{1}{4}$ liter pr. sekund.

Efter at tunnellen var tømt for vand, strømmet vand ut fra spalterne her. Den tilbakestrømmende vandmængde, straks efter at vandet var slaat av, ansloges til omtrent 2 liter pr. sekund, men avtok senere og utgjorde ved mit besøk, 6 dage efter at tunnellen var blit tømt, noget under 1 liter pr. sekund. — Vandet kom her ut av nogen steiltstaaende spalter, som skjærer over tunnellen med retning omkring NNV, og som tilhører det ovenfor omhandlede spaltesystem med midlere retning N 25° V.

Overkanten (kôte 142 m.) av dette vandførende parti ligger 35—40 m. vertikalt under dagen.

De to ovenfor nævnte, nær hinanden beliggende opkommer, som viste sig paa Mittkupa paa kôte 155—160 m., da tryktunnellen var blit fyldt med vand, ligger — da fjeldoverflaten her skraaner mot SO (se fig. 7) — kun 15 à 20 m. vertikalt

over det vandførende parti i tunnellen, og skjønsmæssig ca. 30 m. horisontalt regnet længere mot SO. Avstanden mellem opkommene og overkanten av det vandførende parti paa kôte 140 m. blir saaledes kun ca. 35 m., muligens endog snaut 35 m. — Det inderste av de to opkommer ligger omkring SSO og det yderste omkring ret S for det vandførende parti i tryktunnellen, altsaa omtrent i sprækkesystemets retning. Tar man endvidere med i betragtning, at de to nær ved hinanden beliggende opkommer var de eneste, som man kunde opdage, da tunnellen var blit fyldt med vand, og at partiet paa kôte 133—140 m. er det viktigste vandførende parti i tunnellen, kan man være sikker paa, at det er vandet fra spalterne paa kôte 133—140 m., som trængte sig frem i dagen ved de to opkommer (efter 5 dages forløp med vandfyldt tunnel til kôte 223 vistnok kun 3—4 liter pr. sekund).

Ifølge tunnelprofilen (fig. 5) maa tryktunnellens mest „saarbare punkt“ ligge paa kôte omkring 130 til 140 m. Høiere oppe har man lavere vandtryk og desuten større fjeldtykkelse. Lavere ned stiger vistnok vandtrykket, men samtidig vokser ogsaa avstanden fra dagen. —

IV) Videre maa nævnes partiet like ved kummen, i skraasynkens bund paa kôte 78—80 m. Dette var ved mit besøk ikke tilgjengelig. Som ovenfor nævnt, merket man her ved utmineringen en yderlig liten vandtilgang (se herom nedenfor s. 31). Da tunnellen hadde staat fuld av vand og derefter blev tømt, randt der her ut vand, omkring 1 liter pr. sekund, fra et par steiltstaaende sprækker, som gik omtrent vinkelret paa tunnellen, og ogsaa disse sprækker maa — ifølge den mig leverte beskrivelse — tilhøre det karakteristiske spaltesystem med midlere retning N 25° V. Efter nogen dages forløp var mængden av det tilbakestrømmende vand gaat betydelig tilbake, til adskillig under 1 liter pr. sekund. — Her skal der ogsaa være en lagsleppe paa et par cm. fyldt med ler, som ved kôte 170 m. (se ovenfor under II).

Partiet ved kummen ligger ca. 85 m. vertikalt under dagen og ikke i nogen retning med kortere avstand end ca. 80 m. fra fjeldoverflaten. Man kunde ikke konstatere noget punkt i overflaten, hvor vandet fra dette parti kom ut i dagen. — I

den indre del av indslag B, av ca. 30 m.s længde mellem propens inderkant og vandsumpen, randt der ikke noget vand tilbage, da tryktunnellen blev tømt.

Like ved den ydre ende av den 34 m. lange prop i indslag B viste der sig, da tryktunnellen stod fuld av vand, et ganske litet vandsig, som ovenfor nævnt snaut 0.1 liter pr. sekund. Det er mulig, at dette vand har passert gjennom sprækker i fjeldet fra det ca. 70 m. indenfor proppens ytterkant beliggende parti ved kummen, — nemlig i et zikzakforløp dels efter de fladtliggende lagsletter og dels efter de steiltstående sletter.

Da tunnellen hadde staat fuld av vand i 5 døgn og vandtilledningen saa blev avstænget, angav synkningen av vandspeilet et tap (lækage osv.) paa 9 liter pr. sekund, mens de ydre lækager ikke utgjorde mere end 4 eller i høiden 5 liter pr. sekund, — altsaa meget mindre. Differancen maa være blit optat av fjeldet, og i alle fald en hel av dette vand strømmet senere tilbake til tunnellen, nemlig ved III og IV, straks efter at vandet var slaat av, i alt ca. 4 liter pr. sekund og efter nogen dages forløp omkring 2 liter pr. sekund. — Litt vand, dog vistnok meget litet, vil ogsaa være blit opsuget dels i ganske tynde sprækker og dels i sandstenens kapillarporer, langs den i alt 370 m. lange tryktunnel.

Om det senere foretagne utmuringsarbeide o.s.v.

Fra anlæggets bestyrer, ing. D. H. LUND har jeg herom faat følgende meddelelse.

27. sept. 1921 blev maskineriet (aggregat no. 1) prøvekjørt med fuld belastning og spænding (4500 KW, 12000 volt). Alt var i orden.

Og specielt om tryktunnellen. — Vedrørende slepperne eller spalterne i og like ved kummen, paa kôte 78—80 m. (ovenfor betegnet som no. IV) var man i Svælgen mest tilbøielig til at anta, at de ikke stod i direkte forbindelse med dagen. Det viste sig dog ved nærmere undersøkelse, at den i og for sig ganske ringe vandtilgang her vokset ved nedbør og avtok ved tørveir paa overflaten, idet der var en forsinkelse paa 20

timer. — Saavel ved dette parti som paa kôte 133—140 (ovenfor betegnet som no. III) slog man rundt tunnellen et 0.5 m. tykt betonhvelv, armeret mot vandtryk fra fjeldet. Mellem betonen og fjeldet, ind i slepperne, pressesedes cementvelling under 7 atm.s tryk.

14. sept. 1921 blev tunnellen fyldt med vand, i løpet av 4 timer. — 7 timer efter tilendebragt fyldning merkedes en ganske svak økning av vandføringen i de to ovenfor nævnte smaabækker ved Mittkupa, muligens 1 liter pr. sekund; vandet var ganske klart. Ellers merkedes spor av lækage som tidligere i fjeldet umiddelbart utenfor betonproppen i indslag B (maalt til 8 liter pr. minut, lik ca. 0.13 liter pr. sekund). Forøvrig intet.

Vandet stod nu paa til 28. sept., da man foretok en sänkingsprøve og inspektion av tunnellen. Vandtilførselen blev avstængt og av vandspeilets synken i løpet av et døgn beregnedes de samlede lækager i tunnel, rørledning og turbiner til 2 — to — liter pr. sekund, mot tidligere (før de netop to nævnte utmuringer) 9 liter pr. sekund. Tapperørene blev saa aapnet og tunnellen tømt i løpet av 3 kvarter. Ved inspektion av tunnellen fandt man alt iorden, ingen sten løsnet. Tilbakestrømningen av vand fra fjeldet og gjennom betontætningerne var minimal, neppe maalbar. — 30. sept, blev saa tunnellen fylt for godt; trykket har siden (i brev datert 10. nov. 1921 og senere brev datert 12, jan. 1922) staat paa og stationen været i drift uten at man har merket økning av lækagen eller andre fænomener.

Skar tryktunnel

tilhørende Kristianssunds kommune.

Skar kraftstation ligger i Tingvold herred, ved det korte og lave Fjøseid (eller Hanemseid) mellem Sundalsfjorden (Tingvoldfjorden) i vest og Meisingset-viken ved Halse- eller Surendalsfjorden i øst. Kraftledningen frem til Kristianssund er 45.5 km. lang.

Kraftstationens gulv ligger 21.9 m. og avløpskanalen 19 m. over havet. — Elven eller bækken kommer fra Hafstadvandet,

som kan dæmnes til 167 m. o. h.; lavvandsstanden er 153 m. og bunden av sænkingskanalen er paa kôte 151 m.

Den gjennemsnitlige vandføring er omkring 1 m.³ pr. sekund. Ved midlere vandstand 161 m. og avløp ved kraftstationen 19 m. o. h. faar man bruttofaldhøide 142 m.; ved faldtap 3 m. altsaa nettofaldhøide 139 m. Dette svarer jevnt fordelt paa det hele aar til ca. 1480 HK paa turbinakselen — eller ved 7 0/0 tap i generatorer og transformatorer til ca. 1375 elektriske HK eller temmelig nøiagtig 1000 KW. leveret ved stationsvæggen.

Der er i kraftstationen installeret to aggregater, hvert paa 2100 HK paa turbinen.

Nedslagsdistriktet er beregnet til 25.3 km.² og magasinet til 15.3 mill. m.³.

De geologiske forhold.

Undergrunden bestaar av vanlig grundfjelds gneisgranit (stripet eller presset granit) med nogen ganger dels av granitpegmatit (grovkornig granit) og dels av aplit (finkornet granit), hist og her ogsaa med nogen, en eller nogen faa m. tykke indleininger av hornblendeskifer.

Gneisgraniten, hvis foliation (stripning) i regelen kun er noksaa litet markeret, er i frisk tilstand lysegraa eller svagt rødlig graa. Den er forholdsvis rik paa sort glimmer (biotit), som ofte er noget kloritiseret; i en enkelt prøve blev ogsaa fundet litt hornblende. Av feldspaterne er oligoklas vistnok altid tilstede i større mængde end kalifeldspat (mikroklin), og bergartens kvartsmængde er oftest litt mindre end gjennemsnitlig hos graniter. Der handles saaledes om et forholdsvis basisk led inden granitrækken. — Litt sekundær-dannet epidot sees hist og her.

Hornblendeskiferen bestaar av meget hornblende, litt biotit, litt granat, litt sort jernertsmineral, en hel del av en middels sur plagioklas, undertiden litt kalifeldspat (mikroklin), noget kvarts, og hertil titanit og apatit i ringe mængde; desuten litt kalkspat.

Granitens strukturplan (skifrihetsplan) ligger temmelig flatt, med fald kun 15, 20, 25 eller undertiden op til 30 à 40° mot øst, altsaa i retning ind mot tunnellen faldretning.

Marken i dagen over tunnellen er paa de allerfleste steder sterkt tildækket med skov o.s.v., og jorddækket med dets humus har jevnlig en tykkelse paa et par m. eller fleresteds adskillig derover.

Nær dagen er gneisgraniten paa talrige steder temmelig sterkt dekomponeret (forvitret), og i visse soner strækker overflade-forvitringen sig til stort dyp. Ved forvitringen er graniten bleven brunlig rød av utskilt jernokker. Eksempelvis nævnes, at like ved nordsiden av det gamle bække- eller elveleie, umiddelbart utenfor dammen, var graniten mineret ned til 5 m.s dyp, og selv i bunden her var bergarten i den grad sterkt forvitret, at man kunde plukke biter ut med lillefingeren. — Men paa sydsiden av det samme bækkeløp, bare i ti m.s avstand, var graniten nogenlunde frisk helt oppe i dagen, dog stærkt opsprukket saavel efter de flattliggende bænkesletter som efter vertikale sletter.

I de nærliggende stenbrud, hvor man har mineret sten til dammen, ser man fleresteds daarlige, forvitrede partier ned til bruddets bund, 3 à 4 m. under dagen. Hovedmassen er dog her god bergart, fuldt ut brukbar til damsten.

— Paa berghalden ved kraftstationen, hvor der ligger sten fra den nedre del av tunnellen, utmineret paa de fleste steder i dyp 20 til 30 m. under dagen, sees dels frisk, solid gneisgranit, — dels litt forvitret bergart, paa spring og sprækker med brunlig rød farve, — dels mere forvitret bergart, — og dels aldeles dekomponeret, raadden og løs gneisgranit og pegmatitgranit, av noksaa intensiv rødbrun farve. Den dekomponerte bergart er paa tippen (berghalden) tilstede i næsten likesaa stor mængde som den friske bergart. Vistnok blev en hel del av den sidste anvendt til betonstrøpning o.s.v. ved den store kraftstationsbygning. Men selv om vi tar hensyn hertil blir der aldeles forbausende meget av mere eller mindre sterkt forvitret bergart — utmineret i dyp oftest mellem 20 og 30 m. under overfladen. Det vil sige, forvitringen har her paa adskillige steder strukket sig sonevis ned til mindst det nævnte dyp.

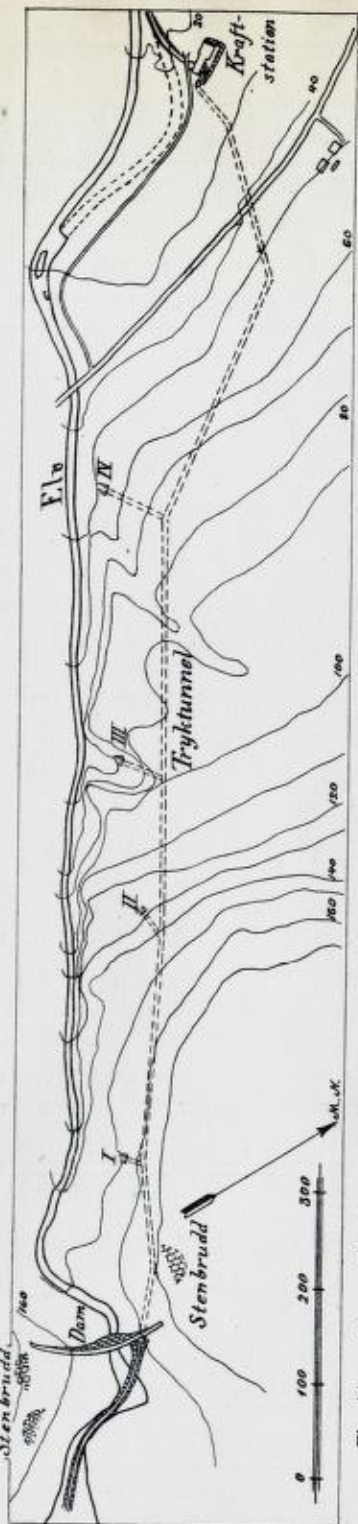
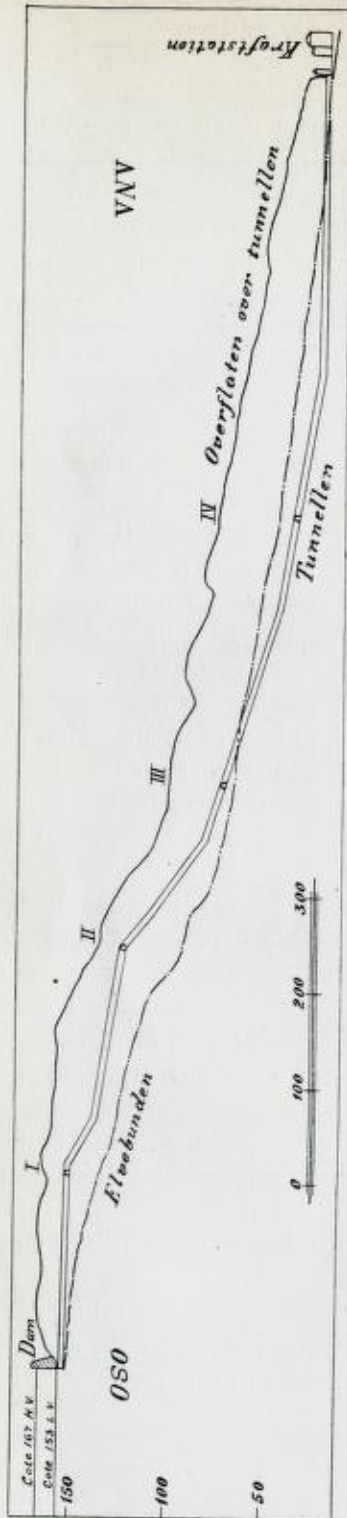


Fig. 11 og 12. — Fig. 11 kart og fig. 12 profil over Skar tryktunnel. Paa profillet, hvor ogsaa elvøbunden er indprojiceret, er høiden tegnet dobbelt saa stor som længden.

Ved tverslag eller indslag IV (det nederste indslag ovenfor tunnelmundingen, der betegnes som V), er bergarten ute i dagen aldeles opraatnet, og det daarlige parti fortsætter et snes m. ind i tverslaget. Endnu længere ind kommer uforvitret bergart, men sterkt opsprukken. — Berghalden ved dette indslag like-som ogsaa ved indslag III viser en stor kvantitet forvitret berg-art, omtrent som berghalden ved kraftstationen. Saavel mellem indslag IV og III som mellem III og II iagttar man i dagen en veksel av forvitret og nogenlunde frisk bergart.

Ved indslag II har man temmelig frisk og solid gneisgranit like ut i dagen. Paa berghalden her ligger der mere horn-blendeskiifer — dels frisk og dels opraatnet — end paa berg-haldene ved V, IV og III. Paa berghalden ved II sees kun noksaa litet av aldeles raatten gneisgranit, men en hel del av bergarten viser brunrød-farvede sletter, angivende begyn-dende forvitring. Det samme gjælder ogsaa for berghalden ved indslag I.

Ved tunnelmundingen (V) like ved kraftstationen ser man skuringsstriper i behold paa gneisgranitens overflate. Men paa andre steder, hvor jorddækket er fjernet — saaledes specielt ved stenbruddene nær dammen — iagttar man kun den av isen avglattede overflade (roches moutonnées), mens forvitringen har visket selve skuringsstriperne bort.

Jeg har i aarenes løp studeret en utallighet av granitfelter i vort land og har besøkt en mængde granitbrudd og andre mineringer paa granit. Men jeg erindrer ikke nogetsteds ellers at ha set saa meget av daarlig, forvitret granit oppe i dagen som ved Skar. Og specielt vil vi fæste os ved, at forvitringen her fleresteds fortsætter i visse soner i alle fald til 20, 25 eller 30 m. under dagen.

Prof. J. SCHETELIG, som var anlæggets geologiske konsu-lent, uttaler i sin indberetning, at forvitringen her maa være ældre end istiden. Dette anser jeg dog tvilsomt, bl. a. fordi de glaciale skuringsstriper selv paa forholdsvis frisk bergart paa mange steder er utvisket ved forvitring, efter istiden.

Ved Skar optræder paa de fleste steder et tykt dække med skovmark, torvdannelser o.s.v., og jeg anser det som sand-synlig, at det er jorddækkets indhold av humussyre, som har

foranlediget den sterke forvitring. Ogsaa andetsteds i vort land har jeg set noksaa forvitret granit (og syenit) under skov- og myrdække, mens nærliggende partier av den samme bergart, hvor den stak op i dagen — altsaa uten noget jorddække — var frisk og uforvitret.

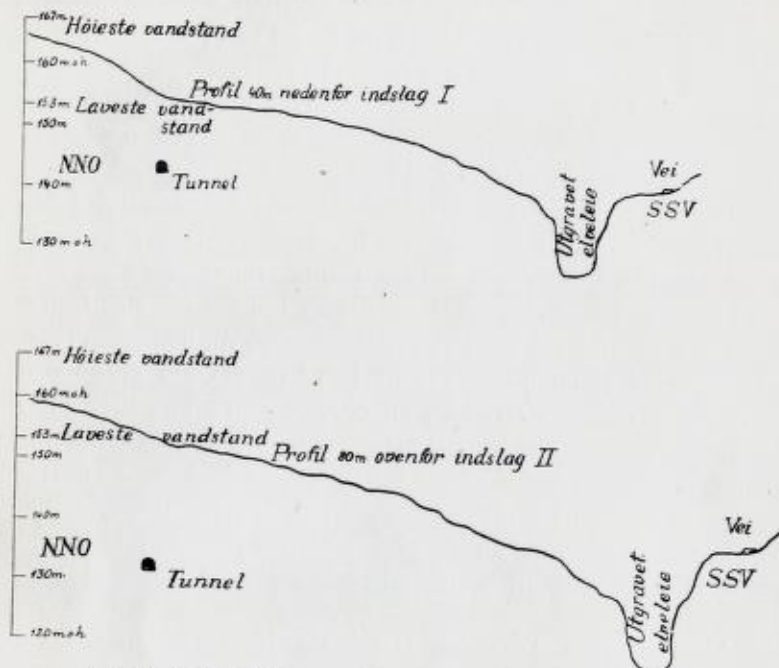


Fig. 13. Tverprofiler over terrænet mellem indslag I og II.

— Ved Skar iagttar vi, saavel i dagen som inde i indslagene til tunnellen, en mængde sprækker i gneisgraniten, dels nogenlunde flatliggende bænkesletter, med svagt fald omtrent parallelt med skifrihetsplanet — altsaa med retning mot øst eller ind mot tunnellen — og dels spring og sprækker i alle mulige retninger. Ute i dagen kan iagttages, at mange av disse sprækker er aapne (gapende) mindst et par m. ind i fjeldet. Endnu længere ind kan man fra dagen av i sin almindelighet ikke følge sprækkerne med øiet.

Videre fæster vi oppmerksomheten ved det erosionsarbeide, som bækken fra Hafstadvandet — som ovenfor nævnt med

gjennemsnitlig vandføring kun ca. 1 m.³ pr. sekund — i tidens løp har utført. Længden av elven fra Hafstadvandet til utenfor kraftstationen er 1360 m. og høideforskjellen (før reguleringen) 133 m., hvilket gir gjennemsnitlig fald 1:10.2.

I elvens nedre del, nær erosionsbasis ved Hanemovandet, er faldet mellem kôte 20 og 70 m. saa flatt som 1:15 à 16; mellem kôte 70 og 80 m. er elvens fald 1:7.5; saa kommer i det trange gjæl mellem kôte 80 og 110 m. et meget steilere fald, nemlig 1:3.3, (se længdeprofilen over elvebunden, fig. 12) — og derefter i den øvre del, mellem kôte 110 og 150 m. igjen et fladere løp, med fald 1:8.3.

Paa hele partiet mellem indslag I og næsten til indslag III har elven — i en længde av ca. 400 m. — indskaaret en dyp rende (se tverprofilerne fig. 13). Denne rende er mest markeret nær utenfor tverslag II og herfra opimot tverslag I, hvor elven har skaaret sig med rundt tal et snes m. ned. — For en liten elv med gjennemsnitlig kun 1 m.³ pr. sekund er en nedgravning av denne størrelse i en bergart som granit eller gneisgranit ganske usedvanlig betydelig. Og dette staar efter min mening i forbindelse med, at gneisgraniten ved Skar er daarligere — mere forvitret nær dagen og dertil likeledes nær dagen sterkt opsprukken — end tilfældet pleier at være med granit eller gneisgranit hertillands.

Ved „Norges Tekniske Høiskoles Prøvningsanstalt“ blev juli 1919 utført en række undersøkelser av prøver av den vanlige bergart (gneisgranit) fra Skar, med resultat for 6 prøver av bergarten:

Trykfasthet, kg. pr. cm ²	1980	1470	1400	1390	1350	1280
Vandoptagning i vektprocent	0.14	0.25	0.47	0.25	0.44	0.28

Den sidste undersøkelse blev utført paa den maate, at stenprøverne først tørredes til konstant vekt (48 timer) og senere neddyppedes i vand til konstant vekt.

Prøverne viser noget lavere trykfasthet og noget høiere vandoptagning end vanligvis ved granit.

En enkelt prøve, med signatur „fra de røde granitgange“ (hvilken betegnelse angir en forvitret bergart) viste:

Trykfasthet 345 kg. pr. cm.².

Vandoptagning 4.4 0/0,

altsaa meget daarlig trykfasthet og en ekseptionel stor porøsitet.

Anlæggets geologiske konsulent, prof. J. SCHETELIG, som foretok en befaring paa stedet for at uttale sig om fjeldets beskaffenhet, da tracéen var fastslaaet og det væsentlige av tunnelen allerede utsprængt, ender sin utredning (dateret 11. sept. 1919) med følgende konklusion:

„Om tryktunnelanlægget i sin helhet vil jeg ha uttalt, at fjeldet gjennemgaaende er godt og sterkt, at med den valgte tracé er der overalt tilstrækkelig fjeldhøide over tunnelen og tilstrækkelig tykkelse ut mot bækkedalen til at motstaa vandtrykket.

Fjeldet er saa solid og godt, at man ikke behøver at frygte nogen katastrofe.

Jeg lægger særlig vægt paa at fjeldets motstandsdygtighet og vandgjennemtrængelighet blir omhyggelig undersøkt ved prøvebelastninger i den øvre del av tunnelen, hvorved erfaring vindes for i hvilken utstrækning utmuring er nødvendig i den nedre del av tunnelen, forat den skal holde tèt, naar det fulde vandtryk sættes paa.“

Dette var et for optimistisk syn paa bergartens soliditet.

Om tryktunnelen og dens lækager.

For at faa korte indslag blev tunnelen lagt noksaa nær ut mot bækkefareten eller elven, — nemlig paa partiet mellem IV og I ca. 90 til ca. 65 m., oftest ca. 80 m. indenfor elven — og git et trappetrinsprofil som illustreret ved længdeprofilet (fig. 14). Regnet fra indslag I (med maksimalt vandtryk ca. 17 m.) og til tunnelmundingen ved kraftstationen er tunnelens samlede længde ikke fuldt 1200 m.

Rørgaten ender ca. 170 m. ind i tunnelen (og der er her en betonprop mellem 4.5 og 5 m. lang). Selve tryktunnelen, regnet fra indslag I til den indre ende av rørgaten, er altsaa næsten nøiagtig 1 km. lang.

Tykkelsen av taket (avstanden mellem tunnelens overkant og overfladen, der ofte har jorddække paa omkring et par meter), er:

ved indslag I (med maksimal trykhøide ca. 17 m.) ca. 10 m.;

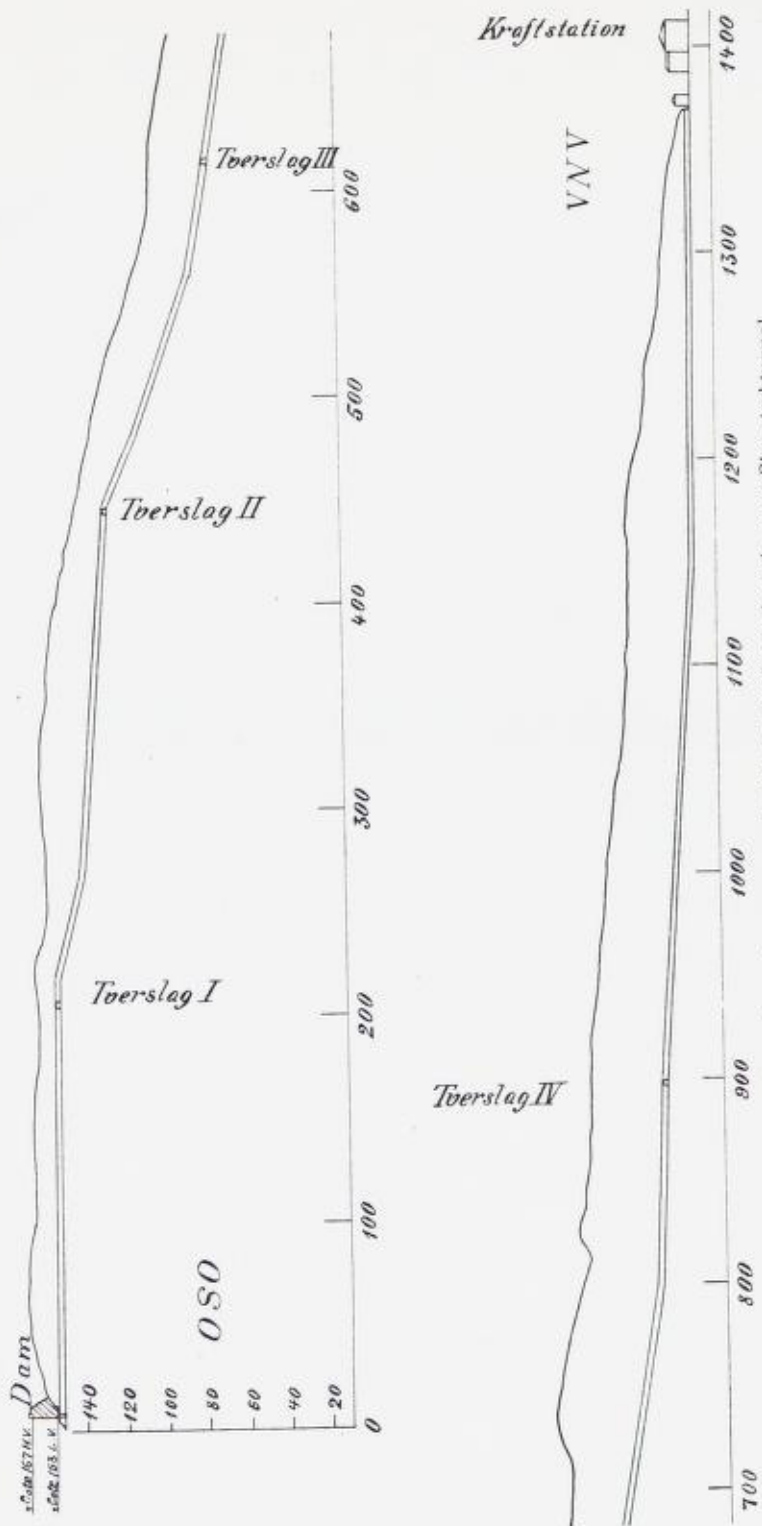


Fig. 14. Længdeprofil med samme maalestok for høide og længde over Skar tryktunnel.

ved indslag II (med maksimal trykhøide ca. 42 m.) ca. 13 m. (NB. til overkant av fast fjeld);

ved indslag III (med maksimal trykhøide 92 m.) ca. 23 m.;

og herfra ned til den indre ende av rørgaten, neppe nogetsteds under ca. 23 m., og paa de fleste steder 25—30 m.

Fraregnes jorddækket faar man for det sidste parti ifølge detaljprofilen en tykkelse av fjeld neppe nogetsteds under 21 à 22 m. og oftest paa omkring 24 m.

De ovenfor opførte „maksimale trykhøider“ vilde gjælde for høivand, naar dammen blir færdig. Det indskytes, at tunnelen hittil, fraregnet en ganske kort tid, aldrig har været fyldt med vand høiere end til indslag II, saa man hittil ved indslag III, IV og ved rørgatens ende kun har arbeidet med trykhøide paa henholdsvis ca. 50, 75 og 103 m. — Ved mit besøk, i slutten av aug. 1921, var dammen endnu ikke helt færdig.

— Ved utmineringen av tunnelen blev etsteds mellem tverslag III og II paatruffet nogen vandaarer, hvorfor tunnelen her blev utført med beton i længde av ca. 7 m.

Om de foretagne prøver av tunnelen.

Forinden man hadde gjort gennemslag mellem stigorten over tverslag IV og skraasynken under tverslag III, blev den øvre del av tunnelen — i overensstemmelse med det av anlæggets geologiske konsulent givne raad — underkastet en vandtrykprøve. Man avstængte indslagene ved I, II og III med træspundvægger, hvilken sidste ved III forøvrig ikke holdt sig tilstrækkelig godt, saa den blev erstattet med betongjenmuring. Saa lot man tunnelen gaa fuld med vand (ned til det endnu ikke utminerte parti mellem III og IV). Vandtrykket i det nederste parti, ved nr. III, var 81 m. — Ved at tilføre ca. 60 liter pr. sekund maales, efter at trykket hadde staat paa i 4 døgn (11.—16. jan. 1920) 37 sek.-liter spildtap gennem de ikke ganske tætte avsperringer i de tre indslag (I, II og III) og som differance ca. 23 sek.-liter repræsenterende diverse lækager gennem fjeldet.

Efter tømning av vandet blev dette paany sat paa, natten til 20. jan. 1920, hvorefter lækagerne i fjeldet om formiddagen 20. jan. var øket til ca. 30 sek.-liter.

„Ved halvfjretiden om eftermiddagen 20. jan. viste sig en større lækage i dagen like ovenfor tverslag III, samtidig som der i luftskakten ved dammen merkedes et heftig lufttryk og vandstanden ved damluken begyndte at synke hurtig, hvilket viste, at lækagen i fjeldet nu var større end tilløpet.“¹ — „Der viste sig nu ogsaa lækager i dagen ved forskjæringen til indslag III, likesom mindre stene begyndte at løsne av hængen i indslaget.“ — Ved inspektion viste der sig ca. 15 m. ovenfor utforingen mellem III og II en aapning paa den nordre tunnelvæg i ca. 80 cm.s længde og 4 cm.s bredde, hvorigjennem vandet strømmet tilbage til tunnellen. Der var her en sleppe med raattent fjeld. — Videre var der større lækager ret ind for III, likesom der her hadde løsnet endel sten i hængen. — I den nordre væg av den ovenfor nævnte 7 m. lange betonutmuring, „viste der sig en fin revne i hele utforingens længde, uten at der dog kunde konstateres nogen væsentlig lækage gjennem revnen.“ — Jeg (VOGT) indskyter her den bemerkning, at betonen paa det nævnte sted, ved omkring 70 m.s vandtryk, hadde lidt i alle fald nogen skade efter at vandtrykket alt-i-alt kun hadde staaet paa en ukes tid eller lignende. — „I gjenstøpningen av tverslag III fandt man en revne i bunden av betonproppen. Revnen gik helt gjennem støpen, og fjeldet, hvorimot proppen satte sig, var blit „bom“, d. v. s. hadde løsnet sig. — Omkring tverslag III viste sig forøvrig, at fjeldet paa enkelte steder var trykket ind i tunnellen av det utvendige vandtryk, idet tunnellen tømtes.“ — Fra damluken til indslag II og i den øvre del av strækningen mellem II og III fandtes ingen nævneværdig lækage.

— Resultatet av prøven fortolker jeg saaledes, at der efter at tunnellen ned til indslag III hadde staaet i en ukes tid eller lign. under vandtryk, med 81 m.s trykhøide i den nederste del, indtraf der ganske betydelige lækager i den nedre del. —

¹ Jeg gjengir her og i det følgende et utdrag av den utførlige, av driftsbestyreren, ing. KJELDSET, leverte beretning.

Da man ogsaa hadde faat gjennomslag mellem IV og V, foretok man „en utforing bestaaende av trærør indstøpt i beton for de nedre 650 m.s længde av tunnellen, hvilket svarer til partiet fra konus (hvor rørgaten ender i V) og til litt ovenfor III.“ Trærøret blev git indvendig diameter 1.6 m. „Naar undtages paa ca. 50 m.s længde omkring tverslag III, hvor trærøret blev armeret for en strækpaakjending motsvarende jernets elasticitetsgrænse, blev trærøret ikke armeret, idet man gik ut fra, at trærøret ved svelling vilde bli saa tæt at intet vand fra tunnellen vilde naa ut i slepper i fjeldet og derved bevirke opdrift paa dette. Desuten blev der ogsaa anordnet tilstrækkelig drænage i utforingen til at kunne føre væk det vand, som kunde tænkes at trænge gjennom utforingens porer. Naar saadan tæthet opnaades, maatte man forutsætte, at fjeldoverdækningen var tilstrækkelig til at motstaa vandtrykket paa en flade motsvarende trærørets diameter (1.6 m).“ — „Nedenfor tverslag III blev trærøret (derfor) kun forsynet med baand i 40—50 cm.s avstand, nemlig tilstrækkelig til at presse staverne sammen før indstøpningen.“ Plankelængden i trærøret var 2.5—3 m. Man forutsatte kompakt, solid betonutforing mellem trærøret og tunnelvæggen.

Efter at dette arbeide var færdig, blev driften sat igang i midten av dec. 1920, idet man foreløbig holdt tunnellen kun fylt til indslag II, motsvarende et maksimalt tryk paa turbinen av 103 m. — Paa grund av et uheld med styringen av fylde-luken steg vandet 31. jan. 1921 op til tverslag I, svarende til et maksimalt tryk paa turbinen av 129 m. Efter at tunnellen hadde staat under dette tryk $\frac{1}{2}$ time, merket man en større lækage i et litet bækkedar i nærheten av indslag IV, samtidig som ogsaa lækagen i selve indslag IV øket temmelig meget. — Trykket blev hurtigst mulig nedsat til 80 m.

Det av drænsrørene optagne lækagevand, som blev ført ut gjennom betonproppen i indslagene III, IV og V, utgjorde fra 10. dec. 1920 til 25. jan. 1921 ved nogenlunde konstant tryk av 103 m. ialt 51.6 til 64.5 liter pr. sek.

To dage efter uheldet i jan. 1921 maalttes de samlede lækager, altsaa de netop nævnte og hertil ogsaa lækagerne

gjennem fjeldet, ved tryk paa kun 80 m. til 80—100 liter pr. sek., men senere avtok lækagerne.

Ved inspektion av en sakkyndig komité, bestaaende av prof. J. SCHETELIG og ingeniørerne E. MONSEN og H. SCHJERVEN paasketid (23.—25. mars) 1921 undersøktes opkommene i dagen nær IV. Man har her ialt hat fire forskjellige opkommer, beliggende nogenlunde nær over tunneltracéen og paa kôte ca. 60 til ca. 70 m. over havet, svarende til omkring 22 m. høiere end tunnellens tak. Ved det opkomme, som laa lavest i terrænget, observertes av komitéen, forinden trykket var slaat av, et „sterkt opkomme“, som forsvandt, da tunnellen blev tømt for vand. — Ogsaa ved mit besøk paa stedet, 11. og 12. aug. 1921, da tunnellen stod med tryk ca. 100 m., saaes her et ganske sterkt opkomme. Oprindelig hadde man her fire forskjellige opkommer paa litt forskjellig høide, men alle disse opkommer hadde samlet sig til et enkelt, beliggende lavest i terrænget. — Et stykke borté fandtes et nyt, altsaa et femte opkomme, som dog var noksaa litet.

Komitéen gjør opmerksom paa, at de netop nævnte lækagepunkter „ligger i strøket av en rød forvitringssone (raata-sleppe) som tunnellen har gjennomskåret ca. 35 m. nedenfor tverslag IV, og som antagelig munder i dagen ved de punkter, hvor vandet brøt frem.“ — „I tverslagene III, IV og V viste der sig i fjeldet smaa lækager. De i tverslagene utmundende drænsrør førte temmelig meget vand. Særlig var dette tilfældet i V.“ — „Det samlede vandtap fra tverslagene før tømningen var 75 liter pr. sek.“ Hertil kom lækagerne i dagen.

Efter tømningen viste sig en række brudsteder paa trærøret, navnlig ved 1180, 1090, 1060, 835. 772 og 717 m., — de tre første liggende mellem V og IV, og de tre sidste noget ovenfor IV, altsaa gjennomgaaende paa steder, hvor røret hadde været utsat for relativt stort tryk.

„Forøvrig viste tunnellen paa flere steder mindre vandlækager med delvis sprikning mellem plankerne.“ — „Paa et sted var endog en fisk presset ind mellem to planker.“ — „Ved bankning paa trærøret rundt hele profilet viste det sig, at trærøret paa flere steder ikke laa an mot betonen. Betontufingen paa opsidens av trærøret ret ovenfor indslag III viste

sig at være giennemsat av sprækker i alle retninger. I enkelte sprækker viste betonen sig at være utvasket paa grund av gjennemstrømmende vand.“ — „Fjeldet i tunnellen mellem tver-slag II og III var daarlig og fuldt av sprækker, idet det viste sig fugtig av indsvivende vand.“

For at kunne levere i alle fald en del kraft, indtil man har faat færdig den senere vedtagne rørgate hovedsagelig i dagen, har man senere latt kraftstationen arbeide med vand i tunnellen fyldt til indslag II, ekvivalerende tryk paa ca. 103 m., idet man ikke har vovet at sætte paa mere tryk av fare for aldeles at ødelægge trærørene inde i tunnellen og derved faa endnu mindre disponibel kraft.

Angaaende aarsaken til de store lækager, som har kostet Kristianssunds kommune mange penger, vil jeg paapeke som det egentlige hovedmoment, at tunnellen er lagt altfor nær mot dagen. Jeg kan ikke tænke det mulig, at en tryktunnel med trykhøide med omkring 135 m. kan klare sig uten ødelæggende lækager selv om den gaar i det bedst mulige fjeld, naar taket i den nedre del kun er omkring 25 m. tykt. Hertil kommer, at ved Skar optræder en usedvanlig daarlig granit (eller gneisgranit), lokalt med dype forvitringssoner og med talrige og dypt-gaaende sprækker. Det viste sig ogsaa allerede ved de første prøver, at tunnellen fik meget betydelige lækager ved vandtryk paa kun ca. 80 m. Man var nødt til at gaa til utmuring, men det anvendte system — trærør og betonfyldning mellem røret og fjeldvæggen — var ikke tilstrækkelig effektiv. — Jeg gaar ikke ind paa et i det foreliggende tilfælde omtvistet spørsmål, om denne betonfyldning blev utført med den størst mulige agt-paagivenhet. Men jeg vil paapeke, at beton erfaringsmæssig ikke er et sikkert utføringsmateriale for meget høit tryk. Naar trærør, som ikke er aldeles solid jernarmeret, utsættes for tryk paa 100 m. eller noget derover, pibler der hist og her litt vand gjennom. Dette vand vil da ved det store tryk, om end lang-somt angripe betonen, og har vandet først hist og her arbeidet sig gennem betonen, vil det ved raattent og opsprukket fjeld presse sig frem til dagen. Betonen vil herved paa enkelte steder bakenfor trærøret bli vasket ut, — trærøret taper sit

fæste og vil paa enkelte steder bli presset ut. Man vil derved faa vand rislende tvert gjennom baade trærøret og betonen, og er dette først begyndt, vil betonen snart bli noksaa sterkt ødelagt.

— Man har nu ved Skar bestemt sig til i det væsentlige at forlate tunnellen og gaa over til utvendig rørgate. For at kunne nyttiggjøre den allerede i den nederste horisontale tunnelgren (V) indlagte rørgate av ca. 170 m.s længde skal man minere en skraaskakt fra dagen og ned til litt utenfor konus, saa fortsætte rørgaten gjennom denne skraasynk, — og forøvrig lægge rørgaten i dagen frem til et gjennomslag med tunnellen i dennes øverste del.

Et av driftsbestyreren utarbeidet og av den ovennævnte komité tiltraadt forslag gaar ut paa, at forbindelsen mellem rørgaten og den øvre del av tunnellen skal finde sted ca. 40 m. ovenfor indslag II, idet man i saa fald skulde benytte den øvre del av tunnellen som tryktunnel, nemlig ovenfor kôte 130 m., hvortil vil svare tryk maksimalt 37 m., minimalt 23 m. og gjennemsnittlig ca. 31 m.

Det er mulig, at dette kan gaa bra, og at man derved kan indspare en del længde i rørgate og dermed ogsaa i kontant utlæg.

Tykkelsen av fjeldet paa dette parti er ved 37 m.s maksimalt tryk kun 17 à 18 m., — litt længere oppe ved 27 m.s maksimalt tryk kun 14 m., og nedenfor tverslag I, ved ca. 20 m.s maksimalt tryk ifølge detaljprofilen lokalt kun ca. 8 m. Man har saaledes her overalt saavidt „fjeldtryk større end vandtryk“. Dette er dog i det foreliggende tilfælde uten betydning, idet risikoen betinges ikke ved fjeldvegten, men ved sprækker i fjeldet og ved forvitringssonerne. — Man maa ta med i betragtning, at tunnellen har, som illustreret ved tverprofilene fig. 13, ligger noksaa nær ut mot dalsiden, og tunnellen ligger paa hele det her omhandlede parti adskillig høiere end elvebunden. Berghalden ved indslag I og II viser heldigvis, som allerede ovenfor omtalt, ikke saa sterkt forvitret fjeld som ved berghaldene III, IV og V. Men ogsaa paa berghaldene ved I og II ligger der adskillige stener utvisende begyndende for-

vitring paa sprækkerne. Naar man saa endvidere tar hensyn til de mange og dype, ofte noksaa flatt liggende sprækker, som viser sig i fjeldsiden nær elvebunden, anser jeg at der vil være risiko for lækager, hvor trykket er saa meget som 20, 25, 30 eller 35 m., — muligens ikke saa meget ret op mot dagen, men snarere ut mot elvesiden til. Vælger man her tryktunnel til maksimalt tryk 37 m., bør man i hvert fald foreta en meget omfattende utmuring — for at gardere sig ikke alene mot de sprækker, som man observerer inde i selve tunnellen, men ogsaa mot nær tilgrænsende, tildels noksaa flattliggende sletter baade over og under selve tunnellen.

Naar man veier mot hinanden, paa den ene side den netop nævnte risiko og paa den anden side, den med nogen forlængelse av rørgaten uundgaelig forbundne økelse av anlægskapitalen, vilde jeg ha foretrukket det sidste i og for sig meget ubehagelige alternativ.

Spændinger i fjeldet ved tryktunneller.

Av ingeniør Fredrik Vogt.

En idé om spændingerne i fjeldet ved en tryktunnel faar man bedst ved at omgjøre den kjendte beregning for tykvæggede rør. Men da en tunnel saalænge den ikke er utforet vil ha et uregelmæssig tversnit, og da fjeldet altid har slepper og stik, maa man for at faa et anvendelig beregningsgrundlag til at begynde med, gaa ut fra et idealiseret tilfælde, og jeg forutsætter i de efterfølgende beregninger:

1. Cirkelformet tunneltversnit.
2. Homogent fjeld, altsaa uten slepper etc.
3. Forholdet mellem tykkelsen av utenforliggende fjeldlag og tunnelradien saa stort at det uten synderlig feil kan sættes lik uendelig stort.
4. Deformationerne proportionale med spændingerne, idet der dog forutsættes forskjellig elasticitetsmodul for stræk og tryk. Poissons konstant for deformationer tvers av spændingsretningen forutsættes at være den samme for stræk og tryk.

5. Spændinger i retning langs tunnelaksen = 0.

Forutsætningerne 3—5 dækker de i et virkelig tilfælde forekommende forholde saa nær at feilen kan sættes ut av betragtning, se senere kontrolberegning. Selvfølgelig vilde det været enklere om man kunde sat elasticitetsmodulen lik for stræk og tryk, men dette er som bekjendt langfra tilfældet for sten, og feilen i beregningen vilde blit for stor, hvorfor jeg har

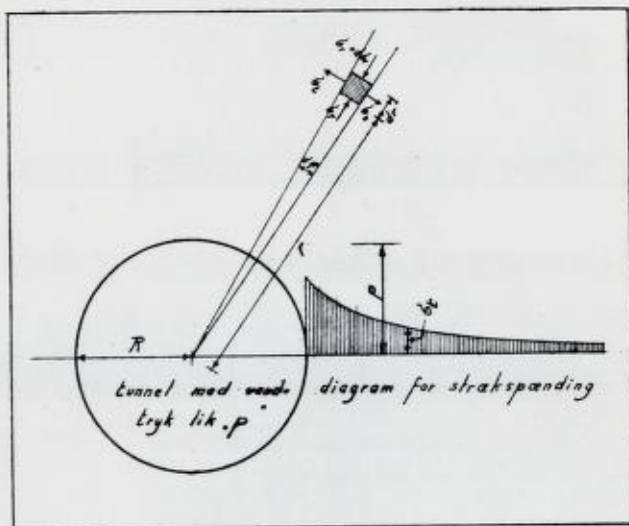


Fig. 15.

valgt den noget omstændeligere beregning paa grundlag av forutsætningen i punkt 4.

Forutsætningerne 1 og 2 er det derimot som gjør at beregningsgrundlaget maa betegnes som idealiseret, og jeg skal senere komme tilbake hertil.

I fig. 15 er tegnet tversnit av tennellen paa et sted med vandtryk = p , f. eks. maalt i kg./cm.^2 . Med en vinkel $d\varphi$ skjæres ut et fladeelement av længde dr i avstand r fra centrum. De paa dette angripende kræfter er de radielle og tangentielle spændinger σ_r og σ_t der i fig. 15 er angit som henholdsvis tryk og stræk. Man faar da idet der er symmetri om tunnelaksen følgende likevegtsbetingelse:

$$(\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) \cdot d\varphi + \sigma_t \cdot dr \cdot d\varphi - \sigma_r \cdot r \cdot d\varphi = 0$$

eller idet led der er uendelig smaa av anden orden sløifes og ligningen divideres med $d\varphi$ og dr :

$$(1) \quad \sigma_r + \sigma_t + \frac{d\sigma_r}{dr} \cdot r = 0$$

Er E_r og E_t elasticitetsmodulen henholdsvis i radiel og tangentiell retning, og forholdet mellem dem $\frac{E_r}{E_t} = k$, samt Poissons konstant = m , faaes for en ring med radius r følgende økning av radien som følge av ringens forlængelse:

$$\Delta r = \left(\frac{\sigma_t}{E_t} + \frac{\sigma_r}{m \cdot E_r} \right) \cdot r$$

og da differencen mellem økningen av radien for to ringer med radius $(r + dr)$ og r er lik forlængelsen tvers paa ringen faaes samtidig:

$$\frac{d(\Delta r)}{dr} = \div \left(\frac{\sigma_r}{E_r} + \frac{\sigma_t}{m \cdot E_t} \right)$$

idet fortegnet \div vælges da kræfterne som de er tegnet paa fig. 15 ikke gir forlængelse men sammentrykning tvers paa ringen. Herav faaes ved utregning:

$$(2) \quad \sigma_r + k \cdot \sigma_t + \frac{1}{m+1} \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} \cdot r + \frac{k \cdot m}{m+1} \cdot \frac{d\sigma_t}{dr} \cdot r = 0$$

Av ligningerne 1 og 2 kan σ_t og dens deriverte bortelimineres saaledes at man faar følgende ligning der kun har σ_r som avhengig variabel:

$$(3) \quad r^2 \cdot \frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + c_1 \cdot r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} + c_2 \cdot \sigma_r = 0$$

hvor $c_1 = \frac{3 \cdot k \cdot m + (k-1)}{k \cdot m}$ og $c_2 = \frac{(k-1) \cdot (m+1)}{k \cdot m}$

Denne ligning løses av $\sigma_r = K \cdot r^n$ hvor K er integrationskonstanten og n bestemmes av følgende ligning der faaes ved indsætning av nævnte løsning i ligning 3:

$$n^2 + (c_1 - 1) \cdot n + c_2 = 0$$

hvorav n ved indsætning av værdierne for c_1 og c_2 faaes:

$$(4) \quad n = \div \left[1 + \frac{k-1}{2k \cdot m} \pm \sqrt{\frac{1}{k} + \left(\frac{k-1}{2k \cdot m} \right)^2} \right]$$

og det almindelige integral er:

$$(5) \quad \sigma_r = K_1 \cdot r^{n_1} + K_2 \cdot r^{n_2}$$

hvor n_1 og n_2 er de to værdier av n .

Ved indsætning i ligning 1 faaes videre:

$$(6) \quad \sigma_t = \div K_1 \cdot (1 + n_1) \cdot r^{n_1} \div K_2 \cdot (1 + n_2) \cdot r^{n_2}$$

Størrelserne k og m er ifølge sin natur altid positive og m desuten større end 2. Ved sammenligning findes da for de to værdier av n uanset hvilke værdier k og m faar (indenfor ovennævnte ramme) at n_1 er større end $\div 1$ og at n_2 er mindre end $\div 1$, begge negative undtat hvis k er mindre end 1, idet da n_1 ogsaa blir større end 0.

Integrationskonstanterne kan da bestemmes paa følgende maate:

Lægges et snit gennem tunnelaksen vil man ha som likevegtsbetingelse at $p \cdot R = \int_R^\infty \sigma_t \cdot dr$, altsaa maa dette integral være av endelig størrelse. Integralet $\int_R^\infty r^{n_1} \cdot dr$ som indgaar heri vil dog bli uendelig stort, idet $n_1 > \div 1$, og følgelig maa K_1 være = 0 hvorved dette integralled bortfalder. For det andet led hvor $n_2 < \div 1$ faaes derimot endelig værdi saalænge K_2 er endelig, og hvis man betegner talværdien av n_2 med n faaes herav $K_2 = p \cdot R^n$ hvorav:

$$(7) \quad \sigma_r = + p \cdot \left(\frac{R}{r} \right)^n = \text{tryk}$$

og
$$\sigma_t = p \cdot (n - 1) \cdot \left(\frac{R}{r} \right)^n = \text{stræk}$$

hvor
$$n = 1 + \frac{k-1}{2k \cdot m} + \sqrt{\frac{1}{k} + \left(\frac{k-1}{2k \cdot m} \right)^2}$$

Retningerne av σ_r og σ_t er da som antydnet paa fig. 15 henholdsvis tryk og stræk, idet beregningen paa dette grundlag gir begge positive, altsaa med andre ord: *Der opstaar ved vandets tryk i en tunnel radielle tryk- og tangentielle strækspændinger.* Størrelsen av σ_r er for $r = R$ lik vandtrykket p , hvilket ogsaa som grænsebetingelse kunde været anvendt til bestemmelse av K_2 . Størrelsen av σ_t er paa samme sted $= p \cdot (n - 1)$.

Følgelig er E_r elasticitetsmodulen for tryk og E_t for stræk. Som bekjendt er forholdet mellem disse for alle stensorter

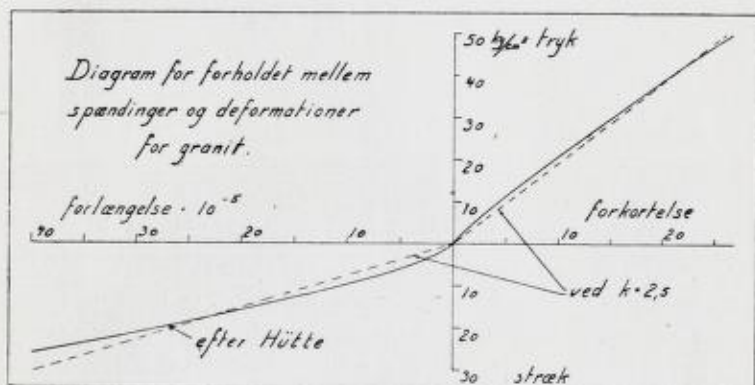


Fig. 16.

større end 1, altsaa $k > 1$, men kan forøvrig variere noget.

For granit er efter formelen i „Hütte“ optegnet diagram (fig. 16) som viser forholdet mellem spænding og deformation. Hvis man her sammenligner elasticitetsmodulen for tryk med den for stræk for spændinger der svarer til hinanden efter ligning 7, vil man finde at k ligger mellem 2,1 og 2,9 for trykspændinger fra 10 til 40 kg./cm.². Poissons konstant kan for sten vanskelig bestemmes helt eksakt, men maa efter diverse undersøkelser som her ikke nærmere refereres, antages at ligge mellem 4 og 5. Der haves praktisk talt ingen maalinger til bestemmelse herav, men den nøiagtige værdi av m spiller ogsaa i foreliggende tilfælde liten rolle, da den influerer litet paa værdien av n . Herav findes omtrentlige ydergrænser for værdierne av n : for $k = 2,1$ og $m = 4$ faaes $n = 1,76$ og for $k = 2,9$ og $m = 5$ faaes $n = 1,66$. At der under utviklingen av lignin-

gerne 1 til 7 er forutsat E_r og E_t konstante for de forekomende spændinger resulterer altsaa i at man faar formler, der ikke dækker de virkelige forhold helt eksakt, men dog saa tilnærmet at man uten at begaa nogen væsentlig feil kan anvende dem og anta som en middelværdi $n = 1,7$ (svarende til $k = 2,5$), og kan skrive formlerne 7 saaledes:

$$(8) \quad \sigma_r = p \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^{1,7} = \text{tryk}$$

$$\text{og} \quad \sigma_t = 0,7 p \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^{1,7} = \text{stræk}$$

og de maksimale spændinger vil bli henholdsvis:

$$\text{tryk} = p \text{ og stræk} = 0,7 p \text{ i tunnelperiferien (} r = R \text{).}$$

(p er vandtrykket)

Hvis man istedetfor en tunnelvæg der er uendelig tyk i forhold til tunnelradien har en væg av endelig tykkelse og like stor i alle retninger, altsaa som et tykvægget rør, vilde man hat samme utvikling av ligningerne indtil nr. 6, men maatte for bestemmelse av integrationskonstanterne ha gaat ut fra grænsebetingelserne $\sigma_r = p$ og $= 0$ for r lik henholdsvis indre og ydre radius i røret. Det er ingen grund til nærmere gjennomgaelse herav her, men skal kun nævnes at man for ydre radius henholdsvis $= 5$ og 20 gange indre vilde faat henholdsvis 23 og 40% større maksimal strækspænding. I virkeligheten vil man ha et mellemtilfælde mellem det oprindelig forutsatte og dette, idet man iallefald i de fleste retninger vil ha uendelig tyk tunnelvæg. Da man desuten av andre grunde maa la tunnelvæggen bli betydelig i forhold til tunnelradien, sees det let at feilen ved at gjennomføre beregningerne med de oprindelige forutsetninger blir uten betydning.

I retning av tunnelaksen vil man som følge av spændingerne i ligning 7 faa en forkortelse:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma_t}{m \cdot E_t} - \frac{\sigma_r}{m \cdot E_r}$$

og for at ophæve denne maa der i denne retning være et stræk $= \text{ca. } 0,06 p$ for $r = R$, — mens spændingen i denne retning

tidligere er forutsat = 0. Dette stræk vil vistnok igjen virke noget tilbake paa σ_r og σ_t ved de deformationer det fremkalder i disses retninger, men det sees let at denne virkning blir saa forsvindende at feilen i utviklingen ved at sætte spændingerne i tunnellenes længderetning = 0 blir uten betydning.

Paa forhaand vil der altid i fjeldet være en trykspænding paa grund av fjeldets vegt, ikke alene vertikalt men delvis ogsaa horisontalt, og det er indlysende at den virkelige spænding i fjeldet vil bli resultanten av denne og de spændinger vandtrykket fremkalder, altsaa med andre ord at vandtrykket først maa ophæve disse forhaandstrykspændinger før det kan fremkalde strækspændinger. Da elasticitetsforholdene er forskjellige for tryk og stræk kan dog spændingerne ikke uten videre sammenlægges, og en eksakt beregning er vanskelig, men tilnærmet kan man regne saaledes: Indtil forhaandstrykket er ophævet, altsaa saalænge man har tryk baade i radiel og tangential retning, blir i foranstaaende utviklinger $k = 1$, hvorav $n = 2$ og $\sigma_r = p$ for $r = R$, altsaa til ophævelse av forhaandstrykket her kræves et vandtryk lik fjeldtrykket. Med andre ord: *De virkelige strækspændinger maa beregnes av vandets overtryk i forhold til fjeldtrykket paa vedkommende sted i strækkets retning.*

Fjeldets forhaandstryk i andre retninger end vertikalen er det dog vanskelig at ha nogen sikker mening om. Naar man kommer paa saa store dyp at fjeldtrykket *overstiger* fjeldets fasthet, vil der — efter undersøkelser av prof. Albert Heim, Zürich¹ — bli forholde tilsvarende tryk i en væske, likt i alle retninger, men dette er uten aktuel interesse for tunneller i bergarter av den art man har at gjøre med i vort land og hvori vandtryktunneller kan tænkes lagt.

Man maa derimot anta at det i almindelighet ved de tryk det her er tale om (langt under fjeldets trykfasthet) er betydelig mindre horisontalt end vertikalt tryk. *Selv om fjeldtrykket vertikalt er lik vandtrykket, vil man derfor maatte regne med strækspændinger i horisontal retning.*

Ved alle foranstaaende beregninger er det gaat ut fra sirkelversnit paa tunnellen, altsaa forhold som man f. eks. kan op-

¹ Vierteljahrsschrift d. Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 1905 og 1908.

naa ved en utforet tunnel. I modsat tilfælde vil man altid ha et uregelmæssig tværsnit, og selv om spændingsfordelingen i sine hovedtræk maa antages at bli som beskrevet, vil detaljerne bli uregelmæssige; ved fremspringende partier i tunnelvæggen vil man faa reducerede strækspændinger, mens man til gjengjæld vil faa økede strækspændinger i indspringende partier.

I det ekstreme tilfælde at man i et „strækfelt“ har indspringende skarpe hjørner, og specielt for enden av slepper og begyndende sprækker, skulde man som bekjendt teoretisk faa „uendelig“ store strækspændinger under forudsætning av at Hookes proportionalitetslov gjaldt uindskrænket helt til disse. Som bekjendt er dog forholdet det at forlængelsen efterhvert som strækspændingen vokser øker betydelig raskere end denne, og man vil derfor ikke faa „uendelig“ store, men dog „meget“ store strækspændinger i slike punkter uten at disse paa nogen maate lar sig beregne. Dette vil med andre ord si at vandet vil virke som en sprængkile ind i slepperne.¹

Konklusionen av disse utredninger bli da:

Vandtryk i en fjeldtunnel vil fremkalde strækspændinger i det omgivende fjeld med gjennemsnittsstørrelse noget mindre end vandets overtryk i forhold til fjeldets forhaandstryk i strækretningen paa vedkommende sted.

I detaljerne vil strækspændingen bli ujevnt fordelt saasandt tunnellen ikke har eksakt cirkeltværsnit, og vil specielt naa betydelige værdier for enden av slepper og begyndende sprækker, idet vandet virker som en sprængkile her. Man maa derfor regne med at vandet vil utvide alle forhaandenværende slepper og eventuelt sprænge nye.

Utforing av tryktunneller. Har man fjeld som er tilstrækkelig sterkt til at en tunnel ikke trænger utforing paa grund av det ytre tryk (fjeldtrykket), men hvor den maa utfores av hensyn til det *indvendige* vandtryk (fare for lækage), maa utforingen beregnes uten hensyn til at fjeldets forhaands-

¹ Analogt med isens sprængning av fjeld, der vel ogsaa for en stor del beror paa at det ikke frosne vand kommer under tryk ved at det lukkes inde av isen og ved fortsat frysning faar indskrænket den disponible plads.

tryk skal kunne motstaa nogen del av vandtrykket. I det øieblik tunnellen er utsprængt vil nemlig fjeldtrykket mot tunnellen optas av tunneltaket (og væggene) som om et hvælv, og den utforing som efterpaa anbringes vil da ikke faa overta noget av dette tryk, \therefore den faar ikke nogen forhaandstrykspænding før vandet paasættes tunnellen. En forhaandstrykspænding i utforingsmaterialet kan kun tænkes at opstaa naar fjeldet er i „flytende“ tilstand, altsaa naar fjeldtrykket er saa stort at fjeldmassen optrær mere som en seig vædske end som fast fjeld, og hvor derfor fjeldet efterhvert som det „siger til“ vil øve et *utvendig* tryk paa betonutforingen.

Men selv om det i saadanne tilfælde med daarlig fjeld kan være en mulighed for at man faar utnyttet fjeldtrykket til at motvirke vandtrykket, kan man ikke være sikker, og *en utforing av en tryktunnel maa derfor beregnes for det fulde vandtryk som om der ikke var noget utvendig fjeldtryk.*

Har man en ren betonutforing, og denne har nogenlunde samme elasticitetsforhold som det omgivende fjeld (hvad der i almindelighet vil slaa nogenlunde til), vil man da kunne betragte det hele som en enhet, og vil altsaa *i utforingsmaterialet uafhængig av fjeldtrykket faa en maksimal strækspænding noget mindre end vandtrykket (ca. 0,7 gange dette) ved cirkeltversnit og ogsaa større stræk ved uregelmæssig tversnit.* I det omgivende fjeld derimot vil strækspændingen foruten at være mindre paa grund av større afstand fra tunnelcentret ogsaa bli reduceret med fjeldets forhaandstryk.

Er elasticitetsmodulen forskjellig for fjeldet og for betonen, vil virkningen herom kunne beregnes ved fastsættelsen av tilsvarende grænsebetingelser for ligningerne 4—6, uten at jeg her finder grund til at gaa i detalj hermed. Jo større betonens elasticitetsmodul er i forhold til fjeldets, desto mindre del av vandtrykket vil fjeldet overta ved samme strækspænding i betonen, og desto større strækspænding vil følgelig betonen faa. Under almindelige forhold vil dog ikke differensen i elasticitetsmodulerne være saa stor at den har nogen avgjørende betydning hverken i den ene eller anden retning sammenlignet med alle de andre usikre faktorer som her foreligger.

Disse betragtninger forudsætter dog solid fjeld hvor man kun har elastiske deformationer, og at man faar utført beton-utforingen slik at den virkelig ogsaa kan arbeide sammen med fjeldet som en enhet. Hvis man — som f. eks. antat ved Ritom kraftanlæg¹ — har saa løse og opsprukne bergarter at allerede et relativt litet tryk paa dem bevirker varige deformationer, plastiske sætninger, vil selv en tilnærmet beregning om hvordan vandtrykket overføres til det omgivende fjeld maatte opgis, og man maa særlig ved vekselvis fyldning og tømning av tunnelen anta at betonutforingen *alene* maa overta det hele vandtryk, — og altsaa faa en dertil svarende strækspænding.

Nu vil man altid ved selve tunnelskytningen faa en rystning av den omgivende fjeldmasse som i større eller mindre grad vil øke forhaandenværende sprækdannelser etc., og dermed gjøre fjeldet mere mottagelige for denslags sætninger. Samtidig er det altid særlig i tunneltaket vanskelig at faa en helt tilfredsstillende sammenhæng mellem betonen og fjeldet. Man maa derfor regne med at betonen let vil kunne faa større strækspændinger end foran angit, særlig hvor man har løst og opsprukket fjeld.

I forværende retning virker det ogsaa at al beton som hærder i luft (ikke under vand) vil svinde hvorved der opstaar strækspændinger naar den som her hænger fast i det omgivende fjeld, og at der ogsaa kan opstaar strækspændinger som følge av avkjøling under støpetemperaturen fra vandet. De strækspændinger som kan opstaar paa denne maate ved hærningssvind og ved avkjøling kan i ugunstige tilfælde bli meget betydelige, og man maa ialfald ha sin opmerksomhet henvendt derpaa saa man bedst mulig kan gardere sig derimot.

Men selv om man har solid fjeld som ikke kan antas at sætte sig noget utover de elastiske deformationer under belastning, og selv om man ved utførelsen faar sikret sig godt samarbeide mellem beton og fjeld og sikret sig mot strækspændinger fra hærningssvind i betonen, vil man som det fremgaar av ovenstaaende allerede ved beskjedne trykhøider faa betyde-

¹ Se: Gutachten der Experten Rothpletz, Rahn und Büchi über die Rissbildung im Druckstollen des Ritomwerkes. Schweizerische Bundesbahnen.

lige strækspændinger i betonutforingen. Ved 100 m. vandtryk vil man saaledes under de allergunstigste forhold faa mindst et stræk paa 7 kg/cm^2 , og i almindelighed vil man faa betydelig mere paa grund av de mange ekstra belastninger som kan faas. Da betonens strækfasthet jo ikke er stor, alm. fra 10 til 20 kg/cm^2 , indsees det let at en ren betonutforing ikke er sikker hvor man kommer op i nogenlunde store tryk.

En armering av betonen maa derfor i almindelighed anvendes ved større trykhøider. Armeringen maa da beregnes paa den maate at armeringsjernet utnyttes med en trækspænding lik betonens gange forholdet mellem elasticitetsmodulerne for jern og beton. Til en bestemt betonspænding som man finder at kunne tillate sig, svarer da et noget større vandtryk (øket i forholdet 1,0 til 0,7), resten av vandtrykket maa optas av armeringsjernet idet dette dog kun kan utnyttes med den foran angivne strækspænding.

Man vil dog paa denne maate ved store trykhøider hurtig komme op i betydelige mængder armeringsjern, idet dette utnyttes daarlig, og vil snart komme til saadanne forhold at det vil være mere fordelagtig at anvende jernrør, idet man da gjør sig mere uavhengig av betonens strækfasthet. Om en betonutforing mellem jernrøret og fjeldvæggen skulde faa noget for stor strækspænding, vil jo ha liten betydning idet jernrøret i sig selv holder tæt. Jernrøret behøver neppe dimensioneres for det fulde tryk, idet endel av trykket kan beregnes overført gjennem betonen til fjeldet, — hvor meget blir avhengig av de lokale forhold.

Som en utvikling efter denne linie, kan man ogsaa hvor man har godt fjeld anvende tryktunneller ogsaa ved meget store tryk med utforing av jernrør, men av relativt tynde plater (kun beregnet til tætning). Naar vandet holdes indenfor jernrøret som tættende konstruktionsdel, vil vandtrykket ved en betonutforing kunne overføres til fjeldet utenat man behøver at lægge særlig vekt paa at betonens egen strækfasthet ikke overskrides, idet betonens trykfasthet ialfald blir tilstrækkelig til at overføre trykket selv ved flere hundre meter vandtryk (400 m. gir 40 kg/cm^2), og strækspændingerne i fjeldmassen avtar meget hurtig ved tiltagende avstand fra tennellen. En fundamental

forutsætning for denne byggemaate er dog at tunnelutforingen dræneres godt saa der ikke paa nogensomhelst maate kan bli staaende vand under tryk *uterfor* jernrøret, idet dette for det første vil virke som en tryktunnel uten utforing og med sin sprængkilevirkning ødelægge fjeldet, og for det andet vil et saadant trykvand meget let kunne klappe sammen jernrøret, som ogsaa som ekstra sikkerhet derfor bør avstives.

Enhver utforing for at motstaa indvendig tryk, enten den utføres paa den ene eller anden maate, *bør gis cirkeltversnit*, idet dette tversnit betinger de mindst mulige strækspændinger i utforingen. Enhver avvigelse fra cirkeltversnittet vil bevirke at der paa de omraader som har mindst krumningsradius opstaar større strækspændinger end de som faas ved cirkeltversnittet. Meget betegnende herfor er sprækdannelsen ved Ritom-tunnellen: alle sprækker er samlet dels i tunneltaket men væsentligst i overgangen mellem sidevæggene og bunden, hvor der begge steder er sterkt krummet overflate, mens sidevæggene og selve bunden som er henimot plane ikke har merkbar sprækdannelse. Til overflod var forøvrig her ogsaa de paa grund av profilet svakeste punkter yderligere svækket ved en støpeskjøt.

Skarfjord pr. Tromsø 31. okt. 1921

Fredrik Vogt.

Generelle bemærkninger.

Vi skal begynde med et resumé angaaende de tre større norske tryktunneller

Ved *Herlandsfossen* (i Hosanger) optræder to forskellige bergarter, — hornblendeskifer som er solid, og glimmerskifer som er sterkt skifrik og som let slipper vand gennem. Skraaskakten og den indre halvdel av den horisontale tunnel gaar i den „gode“ hornblendeskifer. I den midtre og ydre del av den horisontale tunnel optræder derimot flere indleininger av den „daarlige“ glimmerskifer. Forkastninger findes ikke. Vandføringen er ca. 6 m³ pr. sekund. Da man til en begyndelse placerte proppen i den ydre del av tunnellen, utenfor glimmerskifer-lagene, indtraadte der, ved vandtryk ca. 120 m. efter kun 5, eller litt over 5 timers forløp meget betydelige lækager, i det væsentlige langs glimmerskifer-lagene. En senere foretagen, 59 m. lang og 0,5—0,75 m. tyk beton-utmuring av det daarlige fjeldparti var ikke til nogen hjælp, idet betonen for en stor del blev ødelagt efter at vandet hadde staaet paa, med vandtryk 119—132 m. i løpet av ca. 3 maaneder. Vand i stor mængde sivet gjennom betonen og langs glimmerskifer-lagene op i dagen. Efter at proppen senere (nov. 1920) var blit flyttet ind til enden av den horisontale tunnel — saa tryktunnellen kun gaar gjennom hornblendeskiferen, — har der ikke vist sig nogen lækage, og tryktunnellen har nu, med trykhøide paa omkring 135 m. *fungeret til fuld tilfredshet i løpet av litt over et aar.*

Ved *Svælgen* (i Bremanger) har man en tryktunnel med maksimal vandhøide ca. 150 m.; derunder følger rørgate indlagt i en skraaskakt, med vertikal høide ca. 75 m. Tryktunnellen gaar gjennom en kompakt og sterk, kun yderlig litet porøs og oftest temmelig tykbænket sandsten, som ligger med flatt fald, paa ca. 26°. Sandstenens lagflader er i regelen godt sammen-vokset. Bergarten er gjennemsat av en hel række sprækker, de fleste samlende sig til to sprækkesystemer, som staa omtrent vinkelret paa lagfladene. Det ene sæt av sprækkene gaar omtrent parallelt med tunnelaksen, mens det andet sæt skjærer tunnelaksen under en ret vinkel. Da man til en prøve lot tunnellen staa fuld av vand i 5 døgn, viste der sig et ubetydelig vandtap, paa kun ca. 9 liter pr. sekund, mens den disponible vandmængde er ca. 6,5 m³ pr. sekund. Den væsentligste lækage stammet fra et parti (se fig. 5) paa tryktunnellens mest „saarbare“ punkt, hvor avstanden fra dagen kun er omkring 35 m. Litt vand, dog kun ca. 3 eller 4 liter pr. sekund, trængte her

op i dagen, følgende nogen av de steiltstaaende sletter. Desuten var der en liten lækage nær kummen (sumpen) av tryktunnellen. Efter at disse to partier i tunnellen var blit utmurte med beton, blev det samlede vandtap formindsket til kun 2 liter pr. sekund. Denne opgave gjælder for den første tid paa ca. 4 maaneder efter at beton-utmuringen var blit foretat. Man har her endnu ikke erfaring for længere tids drift.

Tryktunnellen ved *Skar* (tilhørende Kristianssunds kommune) gaar i gneisgranit (med litt hornblendeskifer o. s. v.), som paa mange steder er forvitret til ganske stort, lokalt mindst 25 m.'s dyp. Bergarten maa saaledes en-bloc regnet siges at være temmelig daarlig. Tryktunnellen (med vandføring ca. 1 m³ og med midlere bruttofaldhøide 142 m.) blev for at spare paa længde av indslag og for at vinde tid anlagt i trappetrinsavsatser, kun omkring 25 m. under overfladen. Da tryktunnellen blev prøvet, uten utmuring, med vandtryk paa ca. 80 m., indtraf der store lækager. En senere foretat utmuring, med kun svakt jern-armert trærør og endvidere med beton mellem trærøret og fjeldvæggen, viste sig ikke holdbart, idet man efter kort tids forløp fik store lækager. Tryktunnel-anlægget har saaledes her i sine hovedtræk vist sig at være mislykket. Man skal derfor nu lægge rørgate, hovedsagelig oppe i dagen, for hele den nedre del av trykket og kun beholde tryktunnellen for den øverste del, med maksimal trykhøide paa 37 m.

Aarsaken til at man ved de tre her omhandlede anlæg bestemte sig for det hittil næsten uprøvede system med tryktunnel, hvor der kun var forutsat lokal utmuring, var for en væsentlig del at da arbeidet skulde utføres under den senere del av verdenskrigen (1917—1918), hersket der frygt for usikkerhet med hensyn til leverance av sveisede jernrør (fra Tyskland). Og klinkede jernrør, forarbeidet i Norge, stod i en abnorm høi pris. — Man mente fleresteds, at man stod like over for alternativet, enten at risikere utsættelse av det hele anlæg, dersom man skulde anskaffe meget lang rørgate, — eller at vælge tryktunnel. Og saa tok man risikoen med tryktunnel. — For Svælgen kom hertil endnu et moment, nemlig de steile fjeldstup (se fig. 5—8), saa man ikke kunde lægge rørgaten ute i dagen. Man var her nødt til at utmure tunnel (eller skakt-tunnel), selv om man ikke vilde anvende denne som tryktunnel.

Vi skal forsøke at lære av de tre tryktunneller, med vandtryk paa 135 til 150 m. baade i negativ retning, hvorledes man ikke bør ordne sig, og i positiv retning, hvorledes man i visse tilfælde efter min mening med fordel kan benytte tryktunnel-systemet.

For en (raasprængt) tryktunnel gjælder det først og fremst at undgaa lækager — eller i hvert fald, lækager av nævneværdig størrelse.

Lækage kan bero paa følgende:

Bergartens porøsitet (*kapillær-porøsitet*);

„daarlige“ partier i fjeldet, og da navnlig bestemte *bergartlag* (*skiferlag* o. s. v.), *forvitrede bergartsoner* m. m., som let slipper vandet gennem,

specielle sprækker, nemlig de *normale avsondringsflater* (lagflader, bænkeflader, diverse opspaltningsflader), som man møter praktisk talt i hver eneste bergart; desuten *forkastningsplaner* (med opknust bergart) o. s. v.;

vandets kemiske og under vore forholde navnlig dets *mekaniske* indvirkning paa bergarten.

Videre maa tages hensyn til længden av beton-utmuringen (proppen) ved rørgatens begyndelse.

De allerfleste bergarter i vort land er kun yderlig litet porøse (*kapillær-porøse*). Naar en tryktunnel har været i bruk i fornøden lang tid, vil kapillær-porene i den omgivende bergart fyldes med vand; dette kræver dog kun en ubetydelig konstant engang for alle. En permanent lækage paa grund av kapillær-porøsitet vil i bergarter i vort land, hvor der kan være tale om at anlægge tryktunnel, neppe nogensinde komme paa bane.

I diskussionen angaaende tryktunneller er det ofte blit fremholdt, at man skulde være omtrent paa den sikre side, naar „fjeldvegten er større end vandtrykket“. Og skulde man træffe daarlige partier i fjeldet, saa kunde man hjælpe sig med en kort og billig utmuring. Saa enkel og liketil er dog saken ikke.

Vore fleste bergarter har sp. vegt mellem 2,65 og 3,1 eller 3,2. Vælger vi eksempelvis en bergart med sp. vegt 2,8, vil vandtryk og fjeldvegt ekvivalere hinanden ved:

Vandtryk	50 m.	100 m.	150 m.	200 m.
Fjeldtykkelse . .	18 „	36 „	54 „	72 „

Det er leilighetsvis blit antat, at ved endnu lavere fjeldvegt eller fjeldtykkelse vilde hele tunneltaket kunde bli løftet op og det hele anlæg derved ødelagt. En hævnning eller op-

løftning av fjeldet eller tunneltaket vil dog ved for lav fjeldtykkelse kun rent undtagelsesvis kunne indtræde, nemlig naar fjeldet over tunnellen er gjennemsat av delvis aapne eller i hvert fald daarlig sammenvokset og desuten kileformige sprækker, med kilens aapning opad. Men da vilde man paa grund av sprækene allikevel ha faat ødelæggende lækager.

Nu er det ikke min mening at tilraade lavere fjeldtykkelse end de for de netop opregnede vandtryk-høider opførte tal, — dette dog ikke av hensyn til „for lav fjeldvegt“, som kunde foranledige opbulning av tunneltaket, men av hensyn til, at sprækker o. s. v. i fjeldet kan fortsætte til meget stort dyp.

Dogmet om, at man skulde være praktisk talt betrygget, naar kun fjeldvegten mindst ekvivalerer vandtrykket, er misvisende og kan føre til katastrofale tap, paa million eller millioner av kroner. Og jeg skriver denne avhandling for en stor del for at faa dette ulykkelige dogme ut av verden.

Risikoen ved tryktunneller betinges først og fremst ved „daarlige“ fjeldpartier (skrøpelige lag, forvitrede soner, sprækker o. s. v.), som let slipper vandet gjennom. Og hertil kommer, navnlig hvor der handles om større vandtrykhøide, vandets mekaniske indvirkning paa bergarten.

Fra vore gruber har vi noksom erfaring for, at overfladevandet i ikke saa ganske liten utstrækning kan passere gjennom den ovenfor liggende fjeldmasse — selv om der ikke foreligger forkastninger eller andre tektoniske flader — ned til nogen hundrede m.'s dyp. Ved endnu større dyp, paa mere end 400—500 m. faar man i vort fjeld i regelen kun en temmelig liten vandtilgang. Eksempelvis er saaledes vandtilgangen i de Kongsberg'ske gruber paa dyp mere end 500 eller 600 m. yderlig liten. Her maa dog tages med i betragtning, at vandet i fjeldet paa Kongsberg delvis blir dræneret bort ved lange stoller. — Fra utlandet har man i fjeld, som svarer til det vi oftest har at gjøre med i vort land, truffet betydelige vandaarer paa endnu meget større dyp. Eksempelvis henvises til den saa meget omskrevne malheur ved Simplon-tunnellen.

Hvor der i en tunnel eller en skakt overskjæres fjeldpartier som avgir vand — fugtige fjeldvægger uten paaviselig rindende vand, fint vandsig eller ved større kvantitet, specielle

vandaarer — saa godtgjør dette, at noget overfladevand har trængt ned gjennom fjeldet til vedkommende parti i tunnel eller skakt. Der maa saaledes her foreligge et belte i fjeldet, som kan slippe vand *ned* gjennom fjeldet, — og kan dette belte slippe vandet *op* (eller ut) gjennom fjeldet, naar en tryktunnel blir fylt med vand; og fjeldets overflade ligger lavere end overkanten av vandet i tryktunnellen.

Eksempelvis nævnes, at man ved utmineringen av den horisontale tunnel ved Herlandsfossen fik en større vandaare ved pæl 98 m., i et lag av glimmerskifer, og nær utenfor, i en bergartsone bestaaende av en veksel av hornblendeskifer og glimmerskifer, diverse mindre vandsig. Og det var netop dette parti, som senere foranlediget de store lækager. — Man kan være sikker paa, at om terrængforholdene her hadde medført, at den horisontale tunnel hadde ligget f. eks. 100 m. lavere, saa man hadde faat fjeldtykkelse paa 140 m. istedenfor paa 40 m., vilde man allikevel ha faat yderst generende lækager.

Ved Svælgen overskar man et vandsig-parti paa kôte 133—140 m. og et parti med fugtige fjeldvægger paa kôte 78—80 m., og det var netop disse partier, som foranledigede de her forøvrige ganske ubetydelige lækager. — Ved det sidstnevnte parti (paa kôte 78—80), beliggende 70 m. under overfladen, vokset det lille vandsig med regnveir og avtok med tørveir, idet der var en forsinkelse paa ca. 20 timer. Det vil si, den lille kvantitet vand behøvde ca. 20 timer for at passere ned gjennom det ca. 70 m. tykke fjeldtak.

Hvor man i en tryktunnel paatræffer vandaarer, vandsig eller fugtige fjeldvægger, maa man foreta utmuring, hvorom mere nedenfor. Men ogsaa for et tunnelparti med aldeles tørre vægger kan der under uheldige omstændigheter være en mulighet for lækager. Der kan tænkes det tilfælde, at der i nærheten av tunnellen gaar et daarlig belte (f. eks. dypt indgaende spalter eller et dobbeltsæt av konjugerte spalter) gjennom fjeldet. Det fra dagen stammende vand, som bevæger sig langs det daarlige belte, behøver ikke at trænge frem til tunnellen. Men staar denne fuld av vand med *stort* tryk, kan dette bli presset fra tunnellen hen til det daarlige belte, og har vandet først naadd

hen til dette, vil det kunne bli trykket op til overfladen. Det vil si, man faar en lækage.

En begyndende lækage vil medføre en utvidelse av aapningen i fjeldet. Det vil si, *en lækage vil i aarenes løp bli stadig større og større*. Man maa derfor være paa vakt selv like over for kun ganske smaa lækager.

Mangfoldige bergarter i vort land er saa daarlige — saa opsprukne eller opkløftede, — at de er aldeles uskikket til tryktunnel, uanset den overliggende fjeldtykkelse. Men paa den anden side har man ogsaa mange solide, litet opsprukne bergarter, som — i alle fald til en viss maksimal trykhøide — kan egne sig for tryktunnel.

Den bedste maate for at sikre sig mot lækage er ved at lægge tunnellen saa langt ind i fjeldet som mulig, — med den størst mulige avstand fra dagen ikke alene i profilet ret over tunnellen, men ogsaa mot sidene til.



Fig. 17.

Jeg vil her indskytte en økonomisk betragtning. — Utminering og godstransport pr. løpende m. er mindre i en (horizontal) tunnel end i en synk (skakt). Skål man

gjøre gjennemslag mellem a og nivaa bc (fig. 17), vil man ved at vælge skraaskakt ac istedenfor vertikalskakt ab indspare tunnellængden $bc = ac \cdot \cos \alpha$, og samtidig øke skaktlængden med $ac - ab = ac (1 - \sin \alpha)$.

Sætter vi utgiften pr. løpende m. i den horisontale tunnel som enhet, og i synken = K ganger enheten, faar vi, ifølge en minimumsberegning, minimum av samlet utgift for tunnel og synk ved følgende vinkel (α) for synken, naar vi gik K veksellende størrelse:

K = 1,33	1,5	1,75	2	2,25	2,5
$\alpha = 41,3^\circ$	$48,2^\circ$	$55,2^\circ$	60°	$63,6^\circ$	$66,4^\circ$

Dette vil i praksis si, at man vil spare ind i penger — og i tid — ved at gi synken (regnet nedover fra a) et fald paa oftest ca. 60° og stigorten (regnet opover fra c) paa ca. 50° . — Lokale momenter kan naturligvis ofte modificere disse tal noget.

Jeg har medtat denne korte utredning navnlig fordi jeg hos adskillige ingeniører har merket en tendens til at ville

foretrække synk med noksaa flatt fald. — Ved flatt fald faar man litt kortere samlet længde og altsaa litt mindre friktions-tap; dette spiller dog meget liten rolle.

Vi skal illustrere dette med Svælgen som eksempel. — Dersom man her hadde beholdt fordelingsbassinet med tilbehør uforandret, men latt synken herfra (og fra indslag C) gaa med fald paa 60° (fra horisontalen) og (stigorten) fra B med fald paa 50° , vilde man ha faat en økelse i længde av ort (horizontal tunnel) for $C = 31$ m. og for $B = 100$ m., sum 131 m. Istedenfor den nuværende synk av længde $136 + 96 = 232$ m.

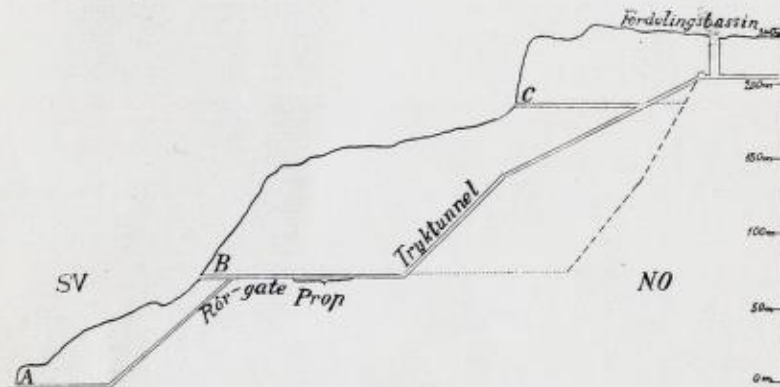


Fig. 18.

vilde man ha faat en synk av længde $83 + 72 = 155$ m. Altsaa en besparelse i skaktlængde paa 77 m., men en økelse i ort paa 131 m., endskjønt man her maatte forlænge ikke bare en, men to forskjellige orter (baade B og C). Utgift og tid vilde i begge tilfælde bli tilnærmelsesvis den samme, men man vilde ved det av mig skisserte profil (paa fig. 18 angit ved punktert linje) opnaa en meget bedre betryggelse mot lækage.

Det kan ved fremtidige anlæg muligens hist og her komme paa bane at placere tryktunnel ret under en forhøining (aasryg eller lign.) i terrænet, for at faa størst mulig avstand fra dagen, baade i vertikal og i horisontal retning.

Hvor der ovenfor er brukt utrykket fjeldoverfladen, maa man ta med i betragtning, at der selv i ganske godt fjeld kan *optræde lokale fordypninger*, aapne sprækker o. s. v., som kan

fortsætte til mange m.'s dyp. Og fjeldoverfladen maa regnes ned til bunden av slike fordypninger o. s. v. Som eksempel henvises til den bekjendte dype forsænkning, som man traf paa i en dioritisk eller granitisk bergart¹ ved Orkla-tunnellen. Jeg citerer herav efter den officielle brochure som blev utsendt (sept. 1921) ved aapningen av Dovrebanen (s. 53):

„Ved den 765 m. lange *Orkla* tunnel, hvor man var sikker paa at ha tilstrækkelig fjeld, gik der hul i taket, da man fra søndre indslag med fuldt profil var kommet ca. 75 m. ind. Det viste sig at den overliggende masse i 25—30 m.'s høide bestod av meget vandførende kviksand og kampestener. Partiet maatte under store vanskeligheter og med den yderste forsigtighet avstemples og utmures i en længde av 61 m. Utgiftene hermed androg til ca. 85 000 eller ca. kr. 1400 pr. løpende m.“

Ved projekt om tryktunnel maa fjeldets overflate undersøkes overmaade nøiagtig. Og der bør altid optages et detaljert geologisk kart.

Om *utmuringen*. — I de forskjellige projekter om tryk-tunneller har det været paapeket, at daarlige partier i fjeldet, som kunde formodes at foranledige lækager, skulde utmures.

Hvad *længden av utmuringen* angaar, har jeg set flere steder i vort land, hvor man — for at spare penger („spare paa skillingen, men la daleren gaa“) — har indskrænket sig til at mure ut kun et par m., etsteds endog kun en eneste m. forbi det „daarlige“ parti. Men vandet har efter kort tids forløp fundet sin vei utenom hjørnet av utmuringen.

Vedrørende *utmurings-materialet* maa jeg begynde med at paapeke, at studiet herav ligger utenfor mit fagomraade. — Man henviser for mindre og middels store tryk gjerne til beton (eventuelt armert beton) av tykkelse 0,50 eller lokalt 0,75 m. Men herom er at bemerke, at *beton ikke er et paalidelig material, hvor der handles om vandtryk over en vis størrelse*. — Grænsen for den trykhøide, hvor beton kan anvendes med fuld sikkerhet, avhænger i høi grad av betonens kvalitet og arbeidets utførelse. Men forøvrig er der inden specialistene paa dette omraade adskillig dissens angaaende detaljer. Enkelte mener, at beton ikke med sikkerhet kan anvendes i tryktunnel, naar vandtrykket

¹ Jeg har ikke hat adgang til at undersøke bergarten.

blir saa stort som 70 à 80 m. Andre antager, at man muligens kan gaa helt til den dobbelte trykhøide. Endvidere har man forsøkt at øke betonens uigjennemtrængelighet for vand ved at indlægge uldfilt-membraner med asfalt eller tjære o. s. v.

Som jeg ovenfor har omhandlet, holdt beton-utmuringen ved Herlandsfossen, ved tryk paa ca. 125 m. sig kun i ca. 3 maaneder. Dette kan jeg ikke fortolke paa anden maate, end at det under det netop nævnte tryk tok ca. 3 maaneder for vandet til at trænge gjennom kapillær-porer, haarrids o. s. v. i betonen. Og da vandet hadde banet sig vei tvers gjennom betonen, begyndte det i det daarlige fjeld at trænge sig helt op i dagen. Man fik saaledes en hel del vand strømmende gjennom betonen, og da dette hadde fortsat en stund, blev betonen for en stor del ødelagt. — Om det litet opmuntrende resultat vedrørende betonens holdbarhet ved Skar henvises til den ovenfor givne fremstilling.

Erfaring fra vort land tilsiger — efter det kjendskap jeg har til dette vanskelige spørsmal, — at vanlig beton ikke er paalidelig som utforingsmiddel i tryktunnel, naar trykket blir saa stort som 70 à 80 m. — I hvilken utstrækning man kan øke betonens soliditet likeoverfor vandtryk ved membraner med asfalt, tjære o. s. v., kan jeg ikke uttale mig noget om. — For tunneller, som undergrundsbaner i byer, hvor vandet fra fjeldet skal hindres fuldstændig fra at sive ind i tunnelen, er beton ikke paalidelig selv ved meget betydelig mindre fjeldtryk eller vandtryk end 70—80 m.

Hvor der i tryktunneller handles om utmuring for betydelig tryk, vil man — efter hvad specialister paa dette omraade har meddelt mig — være henvist til at anvende for stort tryk dimensionerte jernrør, med beton-utforing mellem jernrøret og fjeldvæggen, og med indlagte plader av bly eller andet metal for at hindre vandet fra at passere langs efter betonen utenom jernrøret. Men en saadan utmuring, som — naar ogsaa sprængningen av tunnelen medregnes — blir kostbarere pr. m. end en i dagen fritliggende rørgate, blir for en tryktunnel kun en nødhjælp for en kortere strækning.

Istedenfor tryktunnel, for hvilken kun er forutsat lokal utmuring, har man som bekjendt fleresteds projektert at lægge

hele rørgaten inde i en skakt, og saa spare ind noget i jernrørets godstykkelse ved at utføre med beton mellem jernrøret og fjeldet. Disse projekter gaar jeg ikke ind paa, idet de ligger utenfor rammen av den opgave, jeg har stillet mig ved den teknisk-geologiske utredning i denne avhandling.

Angaaende *længden av proppen.*

Ved Herlandsfossen og Svælgen har man benyttet betonprop av længde:

	Maks. trykhøide	Prop-længde
Herlandsfossen	137 m.	20 m.
Svælgen {	rørgaten B.. 151 "	34 "
	indslag C... 43 "	9 "

Man kan hindre vand fra at passere gjennom betonen ved med passende mellemrum at indlægge plater av bly, jern eller lign., som dækker over det hele tversnit.

Faren for lækage ligger bl. a. deri, at under høit tryk staaende vand kan bane sig vei gjennom fjeldet *utenom* betonproppen, f. eks. langs et dobbeltsæt av (konjugerte) avløsningsflader, som antydnet ved hosstaaende skisse. Vandet kan tænkes at kunne arbeide sig frem tilmed efter et noksaa komplicert zik-zak-forløp. Risikoen for lækage vil naturligvis være størst like ved den ydre ende (p) av proppen, men der kan ogsaa være en mulighet for lækage længere ute i tunnellen (antydnet ved n paa fig. 19).

Den indre del av tunnellen, utenfor proppen, blir med hensyn til risiko for lækage til en viss grad at sidestille med

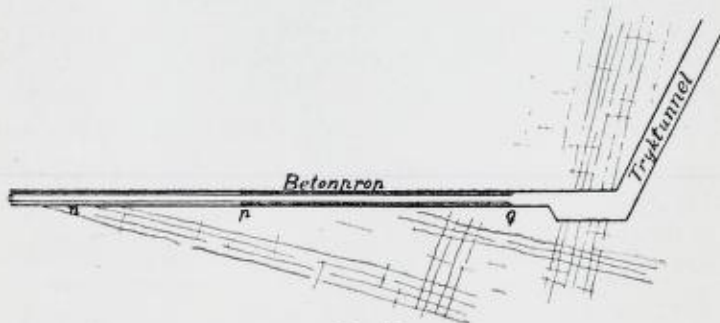


Fig. 19.

fjeldoverfladen, — dog med den forskjel i forværende retning at man ute i tunnellen (ved p-n) savner det mottryk av vand, som — ved kommuniserende rør — gjør sig gjældende høiere op i fjeldet.

Proppens længde vil avhænge av vandtrykket og bergartens beskaffenhet. — Hittil mangler man næsten fuldstændig empirisk erfaring angaaende den fornødne længde. Derfor maa man ved nyanlæg tage godt i med længde.

Vandets *kemiske* indvirkning paa de tunnellen omgivende bergarter vil ved vore bergarter, — kalksten og paa kalkspat rike bergarter fraregnet — i sin almindelighet være saa uvæsentlig, at den praktisk talt kan sættes ut av betragtning.

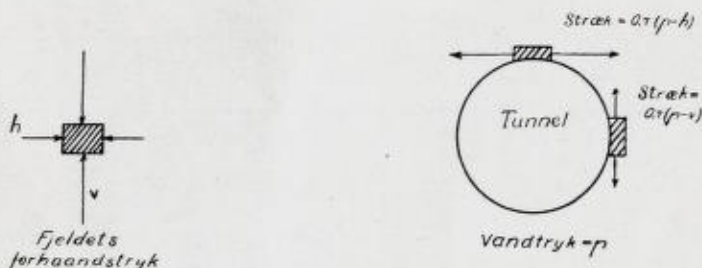


Fig. 20.

Mekanisk virkning. Som utredet i det av ing. FREDRIK VOGT leverte avsnit medfører vandtrykket i det fjeld som omgir tunnellen dels et tryk i radiel retning og dels et stræk med retning langs tunneltversnittets periferi. Forinden man faar virkelige strækspændinger i fjeldet, maa dog vandtrykket naa en værdi der ækvivalerer det tryk man paa forhaand (p. g. a. den ovenforliggende fjeldmasses vegt) har i fjeldet paa angjældende sted og i strækspændingens retning. I vertikal retning er fjeldets forhaandstryk let at beregne, idet det er lik vegten av den ovenforliggende fjeldmasse. I horisontal retning vil man derimot ha et forhaandstryk i fjeldmassen, om hvilket man kun vet sikkert at det er mindre end det vertikale tryk men større end nul (se fig. 20). I en horisontal tunnels tak og bund, altsaa paa de omraader hvor tunnellens begrænsning er tilnærmet horisontal, vil man altsaa ikke kunde sikre sig mot strækspæn-

dinge ved at lægge tunnellen saavidt dypt at fjeldvegten ækvi-
valerer vandtrykket, men maa isaafald ha anslagsvis f. eks. 2 til
3 ganger saa stor fjeldvegt som vandtryk. Ved nøiagtig cirkel-
tversnit blir de *virkelig forekommende strækspændinger* ca. 0,7
ganger differensen mellem vandtrykket og fjeldets forhaandstryk
i vedkommende retning. Er f. eks. *vandtrykket* = p kg./cm.²,
fjeldets forhandstryk i *vertikal* retning = v og i *horisontal*
retning = h kg./cm.², vil man i tunnellens sidevægger (tilnærmet
vertikale) først faa strækspændinger hvis p er større end v , i
tak og bund (tilnærmet horisontale) derimot allerede hvis p er
større end h , og isaafald blir strækspændingen = $0,7 (p \div h)$.
Dette gjælder for en tunnel med cirkeltversnit. For en raa-
sprængt tunnel kan man, uten at eksakt beregning lar sig
gjennemføre, slutte sig til at strækspændingene i *alle indsprin-
gende hjørner* vil vokse meget væsentlig utover det beregnede,
og vandet vil spesielt *virke som sprængkile i slepper og spræk-
ker*, utvide disse og eventuelt sprænge nye. At der overhodet
opstaar strækspændinger forutsætter dog at vandtrykket er større
end det *horisontale* fjeldtryk.

Bergartenes trykfasthet er i sin almindelighet meget betydelig,
saa vore gode bergarter i regelen godt taaler et tryk svarende
til flere km.'s vandtryk. Men deres *strækfasthet* utgjør kun en
liten brøkdel av trykfastheten. For prøver tat av *helt* fjeld
(sprækkefrit) gives der herom i MAX FOERSTER: Lehrbuch der
Baumaterialienkunde, Heft I, Die Natürlichen Gesteine (1903,
s. 83—90) følgende utredning:

Forholdet mellem de forskjellige bergarters strækfasthet (ved avslitning)
og trykfasthet varierer ifølge de foretagne undersøkelser mellem 1:8 og 1:57,
og forholdet er des mindre jo sprødere bergarten er. Forholdet formindskes
ved op sugning av vand i stenen (Durchfeuchtung) og kan endog ved opblø-
tende bindemiddel bli = 0. Som middelværdi av strækfastheten sammenlignet
med trykfastheten kan sættes $\frac{1}{26}$ til $\frac{1}{30}$.

Ifølge en række forsøk med sandsten og kalksten er strækfastheten hos
bergart måttet med vand oftest omkring halvparten (maks. ca. 60%) av stræk-
fastheten i tør tilstand.

Som gjennemsnit for granit, diorit og diabas opføres trykfasthet hen-
holdsvis 2000, 1900 og 2000 kg. pr. cm² — og strækfasthet henholdsvis
30, 50 og 50 kg. pr. cm².

Bergarten omkring en tryktunnel blir efter en stunds forløp mættet med vand, hvorved *strækfastheten*, saavidt man hittil vet, altid nedsættes betydelig.

De netop nævnte tal for bergartenes fasthet gjælder for *hele* prøvestykker. For fjeldmassen i sin helhet kan man ikke regne med disse tal, — „en kjetting er saa sterk som dens svakeste led“. I aapne sletter vil *strækfastheten* være nul, og i glasstik vil man faa en *strækfasthet*, som er overmaade liten. I skifrike bergarter er *strækfastheten* mindre normalt paa skifrikhetsflaten end langs denne. Ved horisontalt eller flatliggende lag vil man saaledes i en horisontal tunnel faa det største *stræk* langs efter skifrikhetsplanet, hvor bergartenes *strækfasthet* er forholdsvis stor. Ved steiltstaaende lagstilling derimot vinkelret paa skifrikhetsplanet, hvor fastheten er liten. For Svælgen, hvor lagene ligger med fald paa ca. 26° , gjælder tilnærmet det første forhold. Herlandsfossen, med fald ca. 48° , danner overgangen til det andet.

Videre maa tages i betragtning, at ved tunnelskytningen, som er en ganske anderledes haardhændt arbeidsmetode end den der anvendes ved uttagning av bygningssten, hvorfra prøvestykker i almindelighet tages, vil det omgivende fjelds fasthet, særlig for *stræk*, nedsættes sterkt.

Bergarten omkring en tryktunnel vil bli utsat for *strækpaakjendinger* ikke alene hvor fjeldvegten ekvivalerer vandtrykket, men ogsaa ved betydelig større fjeldvegt, som skjønsmæssig kan ansættes til mindst den dobbelte, kanske endog den tredobbelte eller endnu større fjeldvegt. Selv hvor en tunnel gaar under en næsten flat fjeldmark, hvor altsaa fjeldvegten vil være omkring 2,8 ganger vandtrykket, vil der saaledes være en mulighed for *strækspændinger*. Og ved en tunnel under fjeldsidene, hvor fjeldvegten ofte vil være omkring 1,5 ganger saa stor som vandtrykket, vil man altid være utsat for *strækspændinger* i fjeldet.

Ogsaa av hensyn til *strækspændinger* med de derav følgende ulemper, herunder ikke mindst utvidelsen av alle forhaanden værende sprækker o. s. v. i indspringende hjørner, maa man altsaa forsøke at faa placert tunnellen saa langt ned eller saa dypt ind i fjeldet som mulig.

Under samme forhold mellem fjeldvegt og vandtryk, f. eks. ved 1,4-dobbelt fjeldvegt, hvortil vil svare omtrent halvparten saa stor fjeldtykkelse som vandhøide, vil strækspændingen stige omtrent proportionalt med vandtrykket. Ulempene vil saaledes i det hele og store bli størst ved tunneller med stort tryk.

Vi har hittil erfaring fra vort land for, at tryktunneller i særlig gode bergarter kan anvendes ved høide paa 135 til 150 m.

Ved de allerfleste anlæg vil det utvilsomt være billigere at benytte ydre rørgate end tryktunnel. Dette system vil bare komme paa bane under specielle lokale betingelser, saavel med hensyn til terrænget som til bergartenes beskaffenhet.

Med den ringe erfaring, man hittil har paa dette omraade, at gaa over til tryktunneller paa f. eks. 500 eller 750 m.'s høide, vil være meget hasardiøst.

Men for mere beskedne trykhøider kan tryktunneller efter min mening fleresteds passe, nemlig hvor man derved kan opnaa en betydelig besparelse i rørgatens længde. Fleresteds blir man, av hensyn til steile fjeldvægger eller fare for stensprang — som ved Svælgen, — nødt til under enhver omstændighet at utminere en skakt (eller skraaskakt). Og da kan det fleresteds være økonomisk at la denne, i alle fald indtil en viss trykhøide, fungere som tryktunnel, saa man sparer indkjøb av jernrør. — Videre kan leilighetsvis terrængforholdene være saaledes, at man kan indspare betydelig i rørgate ved at benytte tryktunnel ret under en høi fjeldryg av solid fjeld, mellem fjeldmarken og dalsiden.

Rørgate i dagen vil efter min mening fremdeles bli det normale system, men tryktunnel kan være det mest økonomiske under specielt gunstige betingelser saavel med hensyn til fjeldets konfiguration som til bergartens soliditet.

Zusammenfassung.

Namentlich wegen der Schwierigkeit und der Kostspieligkeit während dem letzteren Teile des Weltkrieges eiserne Röhren zu verschaffen, wurden an mehreren Wasserkraftanlagen in Norwegen *Druckstollen* (*hauptsächlich ohne Ausmauerung*) gebaut, nämlich, wenn einige Anlagen mit geringer Druckhöhe nicht berücksichtigt werden, zu:

Herlandsfossen in Hosanger (25 Km. NO von Bergen), mit Wasserführung ca. 6 M.³ pr. Sekunde und maximaler Druckhöhe ca. 140 M. (S. 2—18);

Svælgen in Bremanger (zwischen Bergen und Aalesund), mit Wasserführung ca. 6.5 M.³ pr. Sekunde und maximaler Druckhöhe in dem Tunnel 151.5 M.; dazu schließt sich eine übliche Röhrenstraße mit Druckhöhe ca. 75 M.; gesamte Druckhöhe somit ca. 225 M. (S. 18—32);

Skar bei Kristianssund, mit Wasserführung ca. 1 M.³ pr. Sekunde und maximaler Druckhöhe ca. 142 M. (S. 32—47).

Der Druckstollen zu *Skar* geht in Granitgneis nebst ein wenig Hornblendeschiefer. Die hiesigen Gesteine sind erheblich stärker verwittert als es in allgemeinen sonst in Norwegen der Fall ist, und die Verwitterungszonen erstrecken sich an mehreren Stellen in dem Stollen bis zu einer Tiefe von mindestens 20 oder 25 M. Der Stollen — mit vier Fenstern (I—IV, Fig. 11—12 und 14) — wurde, um Zeit zu ersparen, ziemlich nahe unterhalb der Oberfläche gelegt, und zwar im unteren Teile des Tunnels, nur in einer Tiefe von etwa 25 oder 30 M. Durch die Verwitterungszonen und die Verklüftung entstanden sehr beträchtliche Leckagen. Es zeigte sich somit bald, daß der Stollen sich nicht ohne Ausmauerung anwenden ließ. Zur Ausmauerung wurden hölzerne Röhren nebst Beton zwischen der Röhre und

der Felsenwand benutzt. Dieses System bewährte sich aber nicht. Nur der obere Teil des Stollens, nämlich bis zu einem maximalen Wasserdruck von 37 M., soll deswegen zukünftig als Druckstollen benutzt werden, und man baut jetzt eiserne Röhren für den Rest, also für den hauptsächlichsten Teil der Wasserleitung.

Wegen der ungewöhnlich starken Verwitterung des Gesteins und des viel zu kurzen Abstands des Stollens von der Oberfläche ist in Betreff der Verwendbarkeit von Druckstollen im allgemeinen wenig Positives von Skar zu erlernen.

Zu *Herlandsfossen* ist das Nebengestein bei dem schrägen Schacht und bei der inneren Hälfte des horizontalen Tunnels (Fig. 1—2) ein nur wenig schiefrig entwickelter und nur ganz schwach verklüfteter Hornblendeschiefer. In der äußeren Hälfte des horizontalen Tunnels finden wir andererseits einen Wechsel von Hornblendeschiefer und dünnschiefrigem Glimmerschiefer, der letztere in mehreren Schichten bis zu einigen Metern Mächtigkeit (Fig. 3—4). Als der Tunnel ohne Ausmauerung mit Wasser gefüllt wurde, bekam man — nach dem Verlauf von nur 5 Stunden und bei 123 M. Druckhöhe — sehr bedeutende Leckagen, den Einlagerungen von Glimmerschiefer entlang. Der Tunnel wurde dann auf der Strecke 55—114 M. (siehe „Senere betonutmuring“ auf Fig. 1) mit Beton (nebst einer nicht besonders starken Eisenarmierung) ausgekleidet. Diese Ausmauerung hielt sich anfänglich gut. Nach dem Verlauf von 3 $\frac{1}{2}$ Monaten, bei Druckhöhe meist 119 bis 128 M., bekam man aber wiederum, den Einlagerungen von Glimmerschiefer entlang, sehr beträchtliche Leckagen, und bei der Besichtigung des Tunnels zeigten sich bedeutende Risse in dem Beton.

Späterhin wurden die eisernen Röhren bis zum inneren Teile des horizontalen Tunnels verlängert (siehe „Rørgate“ und „Prop“, gleich Betonklotz, auf Fig. 1). Der Druckstollen geht somit jetzt ausschließlich in dem gutem und soliden Hornblendeschiefer, und dieses Gestein hat sich hier als *brauchbar für Druckstollen ohne Ausmauerung* (bis Druckhöhe ca. 140 m.) erwiesen. Seit der Verlängerung der Röhrenstraße zum inneren Teile des horizontalen Tunnels (Nov. 1920) und bis jetzt (Juni 1922) hat sich keine Leckage erwiesen.

Zu *Svælgen (Bremanger)* ist das Nebengestein ein in der Regel dickbankiger, etwas metamorphosierter, kompakter und nicht poröser Sandstein (von devonischem Alter), mit ziemlich flachem Fallen (durchschnittlich 26° , siehe Fig. 8). Wegen tektonischer Bewegung — nicht Faltung, wie es durch Versehen an Seite 25 angegeben ist — ist der Sandstein von annähernd vertikal (oder annähernd senkrecht auf der Schichtenfläche) stehenden Spalten durchsetzt, unter denen die allermeisten zwei konjugierten Systemen angehören; das eine System von Spalten geht annähernd parallel mit und das andere System annähernd senkrecht dem Tunnel (Fig. 9). Dazu kommen noch die ziemlich flach liegenden Schichtungs- oder Bankungsklüfte, die jedoch in der Regel ganz gut zusammengewachsen sind (Fig. 10). — Nur der obere Teil, mit Druckhöhe rund 150 M., wird, wie schon oben erwähnt, als Druckstollen benutzt.

Bei der ersten Probe des Stollens ergaben sich einige ganz unwesentliche Leckagen, nämlich — die Aufsaugung von Wasser im Nebengestein einbegriffen — nur 9 oder 10 Sekundliter (bei disponibler Wassermenge 6500 Sekundliter). Die größte der kleinen Leckagen stammte von der meist „wundbaren“ Strecke des schrägen Schachtes bei 133—140 M. Höhe, mit Wasserdruck ca. 100 M. und Abstand von der Oberfläche nur rund 35 M. (Fig. 5). Ein ganz wenig Wasser, wie ungefähr 3—4 Sekundliter, drang hier den vertikalen Spaltenklüften entlang nach der Oberfläche hinauf. Auch am Boden des schrägen Schachtes, bei 78—80 M. Höhe — 80 M. unterhalb der Oberfläche — gab es eine kleine, aber noch unbedeutendere Leckage. Nach Betonausmauerung der zwei kurzen eben genannten Strecken (133—140 M. und 78—80 M.) ist die gesamte Leckage zu einer vernachlässigbaren Kleinigkeit (ungefähr 2 Sekundliter) gesunken. Die Anlage steht jetzt in normalem Betrieb seit 30. Sept. 1921.

Wir lernen von den Anlagen zu Herlandsfossen und Svælgen, daß Druckstollen — ohne oder nur mit lokaler Ausmauerung — sich jedenfalls bis zu einer Druckhöhe von rund 150 M. verwenden lassen, vorausgesetzt:

daß das Nebengestein ganz besonders gut ist, nämlich ohne Verklüftung, Schieferungspartien usw., denen entlang das Wasser seinen Weg finden kann,

und daß dabei der Abstand von der Oberfläche — nicht nur im vertikalen Profil, sondern auch gegen die Seite zu — genügend groß ist.

Bei Neuanlagen ist, selbst in dem bestmöglichen Gestein, namentlich zu berücksichtigen, daß der Druckstollen soweit als möglich unterhalb der Oberfläche gelegt wird (Fig. 18). — Wo man bei der Ausminierung des Stollens besondere Wasserader und selbst nur ständig feuchte Stollenwände erhält, veraten dieselben gewisse Zonen im Gestein, die das Wasser relativ leicht durchdringen lassen, und die folglich eine Gefahr für Leckagen ergeben.

Eine Ausmauerung mit Beton als Schutz gegen Leckagen ist beim Überschreiten einer gewissen Wasserdruckhöhe, selbst wenn man von den Festigkeitsverhältnissen im Nebengestein absehen kann, für längere Zeit nicht ganz zuverlässig. Diese maximale Druckhöhe wird von einigen Fachleuten¹ zu nicht mal so viel wie 70—80 M., von anderen gar zu etwa 150 M. geschätzt. Die Grenze ist übrigens einerseits von der Beschaffenheit des Betons und andererseits von der Beschaffenheit des Nebengesteins abhängig. Und selbst Eisenbeton ist bei sehr großer Wasserdruckhöhe nicht genügend wasserundurchdringlich.

Der Wasserdruck (p) bewirkt einen Druck in radieller Richtung und — was für uns wichtiger ist — einen *Zug der Peripherie des Stollenquerschnittes entlang*. Bei ideal zirkelrundem Querschnitt des Stollens beträgt dieser Zug, zufolge der von Ingenieur FR. VOGT gelieferten Erörterung (S. 48—58), annähernd 0.7 p .

Das Gewicht des oberliegenden Gesteins veranlaßt ferner einen *vertikalen* Druck (v), gleich dem Gewicht des Gesteins, und einen *horizontalen* Druck (h), der niedriger, und zwar nicht unwesentlich niedriger als v , aber höher als Null ist.

¹ Selber bin ich nicht Fachmann auf diesem Gebiete.

Bei idealem Zirkelquerschnitt beträgt die wirklich stattfindende Zugspannung (Fig. 20) in vertikaler Richtung annähernd 0.7 ($p-v$) und in horizontaler Richtung 0.7 ($p-h$), — also mehr, weil h niedriger als v ist.

Die *Druckfestigkeit* des Granits und ähnlicher Gesteine beträgt durchschnittlich rund 2000 Kg. pr. Cm.^2 , die *Zugfestigkeit* dagegen nur etwa 50 Kg. pr. Cm.^2 , somit selbst in Gesteinen, die ganz frei von Klüften oder Sprüngen sind, nur einen kleinen Bruchteil, wie etwa $\frac{1}{20}$, von der Druckfestigkeit.

Bei Wasserdruckhöhe (p) entsprechend der oberliegenden Gesteinsmächtigkeit (v) — wie z. B. 100 M. Wasserdruck und Tiefe des Stollens 36 M. unterhalb der Oberfläche (siehe S. 61) — wird man immer eine horizontale *Zugspannung* erhalten. Eine solche tritt auch ein selbst bei etwa der zweifachen, wahrscheinlichenweise auch bei der dreifachen Größe der oberliegenden Gesteinsmächtigkeit, verglichen mit dem Wasserdrucke. Bei den Druckstollen muß man somit, selbst bei idealem Zirkelquerschnitt, in den allermeisten Fällen mit einer Zugspannung im Nebengestein rechnen.

In der Tat handelt es sich aber nie um einen ideal zirkelrunden Querschnitt des Stollens, wenn derselbe nicht ausgemauert ist. In allen *einspringenden Ecken* des Querschnitts erhöht sich die Zugspannung sehr erheblich. Das Wasser wird deswegen in allen Klüften des Nebengesteins als wie ein *Sprengkeil* wirken und eventuel auch neue Klüfte veranlassen.

In Betreff der Betonausmauerung gilt es, aus den eben erörterten Ursachen einen zirkelrunden — und nicht einen ellipsoidischen oder eckigen — Querschnitt zu benutzen. — Weil die norwegischen Anlagen keine eingehende Erfahrung auf dem Gebiete der Ausmauerung von Druckstollen ergeben, kann ich hier nicht auf diese specielle Frage eingehen.
