

Konturkvalitet i sprengte tunneler



NFFS tekniske rapporter er utarbeidet av fagpersoner oppnevnt av utviklingskomiteen i NFF. Innholdet er i samsvar med kjent viten på det tidspunkt redigering ble avsluttet. Feil eller mangler kan likevel forekomme. NFF, forfattere eller fagkomiteen har intet ansvar for eventuelle feil eller mangler i rapporten og mulige konsekvenser av disse.

Det forutsettes at rapporten benyttes av kompetente, fagkyndige personer med forståelse for de begrensninger og forutsetninger som legges til grunn.

© Norsk Forening for Fjellsprenkningsteknikk - NFF

ISBN - 978-82-92641-26-2

Forsidebilde: NTNU



Trykk: Helli - Visuell kommunikasjon

Forord

Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF) er en åpen forening for personer og virksomheter knyttet til eller interessert i aktiviteter som angår norsk bergteknologi.

En sentral del av foreningens arbeid gjelder utviklingsprosjekter til nytte for bransjen. Dette skjer i nært samarbeid med relevante aktører, og de oppnådde resultater gjøres kjent gjennom NFF sine publikasjoner, håndbøker eller tekniske rapporter.

Teknisk rapport nr.12 er utarbeidet av Pål Drevland Jakobsen (NTNU), Vegard Olsen (Orica), Iver Hauknes (Orica), Jan Håvard Nordtug (student NTNU) og Thorvald Wetlesen (Bever control). Arbeidet er i stor grad basert på masteroppgaver gjort ved NTNU, doktorgradsarbeidet til Yangkyun Kim *Tunnel Contour Quality Index in a drill and blast tunnel* og erfaringer gjort gjennom forsøk i regi av Statens Vegvesen og Jernbaneverket. Utviklingskomiteen har fungert som referansegruppe og for kvalitetssikring av rapporten.

November 2012

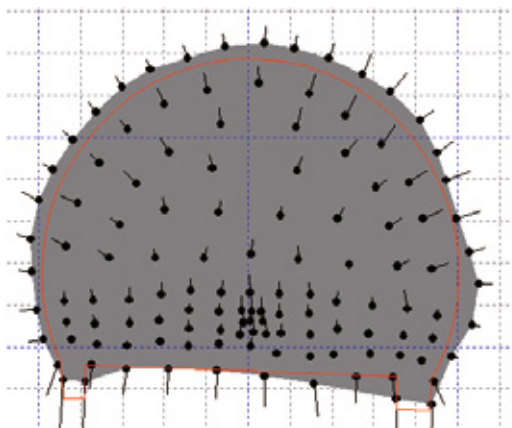
NFF - Utviklingskomiteen

Innhold

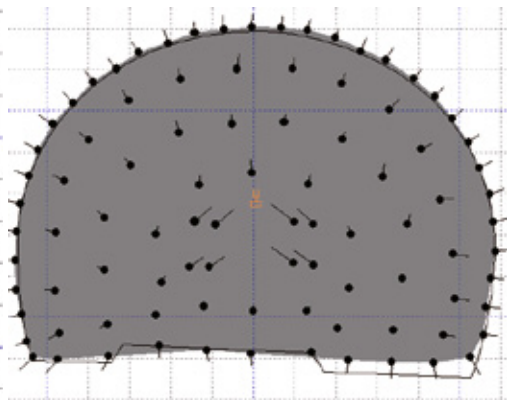
FORORD	2
1 INTRODUKSJON	4
2 SPRENGNINGSINDUSERT SKADESONE	6
2.1 Geologi og sprengstoffs påvirkning på skadesone	7
2.2 Forslag til ny skadesonetabell	14
3 KVANTIFISERING AV TUNNELKONTURKVALITET	15
3.1 Telling av hullpiper	15
3.2 Kjerneboring	15
3.3 Måling av skadesone ved hjelp av blokkuttak	16
3.4 Tunnelkonturindeks (TCI)	16
4 EKSEMPLER	22
5 KILDER TIL BORAVVIK OG BORINGENS INNVIRKNING PÅ KONTURKVALITET	28
5.1 Boreriggens nøyaktighet – posisjonering og navigering	30
5.2 Autoboring sammenlignet med manuell	34
6 SPRENGNINGSTEKNISKE FORSØK	35
6.1 Eikremstunnelen på Stor-Krifast	35
6.2 Jarlsbergstunnelen	36
6.3 Gevingåstunnelen	39
6.4 Kvivsvegen	42
6. KONKLUSJONER OG ANBEFALINGER	44
REFERANSER	45
VEDLEGG	46

1 Introduksjon

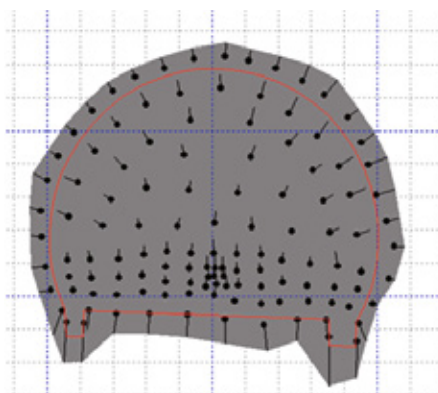
Norge er en tunnelnasjon med mye erfaring innen tunneldrift, avansert tunneldrivingsutstyr og dyktige fagfolk, men allikevel ikke best på konturkvalitet i boret og sprengte tunneler. Bever Control har samlet inn en del erfaringer (Figur 1 – 4) i fra andre europeiske land (blant annet Spania, Tyskland og Sveits) som underbygger påstanden om Norges manglende fokus på tunnelkonturkvalitet. Det understrekes at tunneldrivekonseptet vist i Figur 2 og 4 er annerledes enn i Norge. I Tyskland er det vanlig og ha en tilgjengelig roadheader som går over konturen etter sprengning, og fjerner eventuelle knøler. Det antas også at det tyske konseptet er mer tidkrevende og koster mer, men det viser allikevel hva som er mulig å få til med hensyn til konturkvalitet.



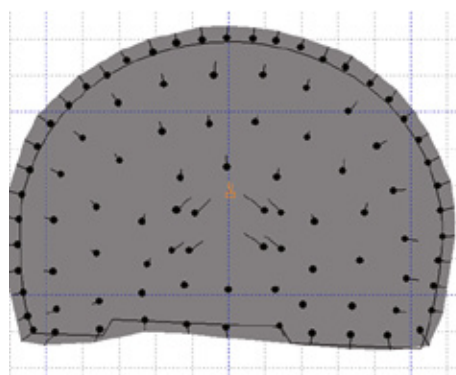
Figur 1: Støff norsk tunnel m/grovhullskutt og horisontal åpningsgroft



Figur 2: Støff tysk tunnel m/kilkutt



Figur 3: Bunn av salve norsk tunnel



Figur 4: Bunn av salve tysk tunnel

Sammenligner vi Figur 3 og 4 ser man at den norske tunnelen en overmasse på 24,1 m² (teoretisk konturareal: 63,6 m²), mens i det tyske eksemplet er overmassen er 10,0 m² (teoretisk konturareal: 81 m²).

Det har i den senere tid blitt en større interesse for konturkvalitet i tunneler i Norge. Den økte interessen har resultert i forsøk og oppfølging av salver i flere norske tunneler. Forsøkene har vært utført med fokus på både spregningsteknikk (bruk av elektroniske tennere og detonerende lunte i konturhull og fokus på å lade 1. og 2. kontur med redusert mengde emulsjon), og boring (borplan og kvalitet på borhull). Det kan variere noe hva man legger i at en tunnel har «god» kontur, men i forsøkene som er utført er konturkvaliteten vurdert ut i fra følgende kriterier:

- Redusert sikringsbehov som følge av skånsom sprengning og derav mindre skadesone
- Redusert mengde overmasse
- Redusert omfang av rensk
- Økt levetid og reduserte vedlikeholdskostnader for tunnelen
- Falltap

Disse punktene kan være et mål på om en kontur er «god» eller «dårlig». Dvs om man har lite overmasse, lave vedlikeholdskostnader og så videre så har man en god kontur. Konturkvalitet er direkte relatert til byggestid og kostnad, så vel som falltap i vanntunneler.

Den mest vanlige metoden for kontursprengning i Norge i dag baserer seg på strengladning av emulsjon og rørladninger. I berg med slepper, stikk og sprekker er det ikke unormalt at deler av konturrasten raser ut og man finner sprengstoff (rørladninger, detonerende lunte, emulsjonsrester) på røysa. Kun deler av ladestrengen i konturen er tilbake, ofte uten at den har blitt initiert. Kvaliteten på tunnelkontur avhenger ikke bare av lademetode i 1. kontur, men også av skadesone som skyldes eventuell overladning i 2. kontur. I tillegg er nøyaktigheten på boringen viktig og svært avgjørende for konturkvaliteten.

Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF) sitt bidrag innen tunnelkontur ble opprinnelig initiert av foreningens Utviklingskomite som to uavhengige prosjekter. Prosjekt 1 omhandlet spregningsteknikk for å oppnå bedre konturkvalitet, og prosjekt 2 omhandlet boreteknikkens påvirkning på konturkvalitet i tunnel. Denne rapporten forsøker å forene de erfaringer og målinger gjort i de to prosjektene. De samlede dataene og erfaringen som viser tunnelkonturkvalitet i de ulike prosjektene er anonymisert.

2 Sprengningsindusert skadesone

Sprengningsindusert skadesone/sprekker i gjenstående berg er studert i et omfattende forsøksprogram 1991 til 2008 i et av SveBrec / SveDeFo's forsøksprogrammer i Sverige. Sponsorer av programmet var Orica (Dyno Nobel), Vägverket, Banverket, Skanska, LKAB/Kimit og SKB.

Hovedmål for programmet var:

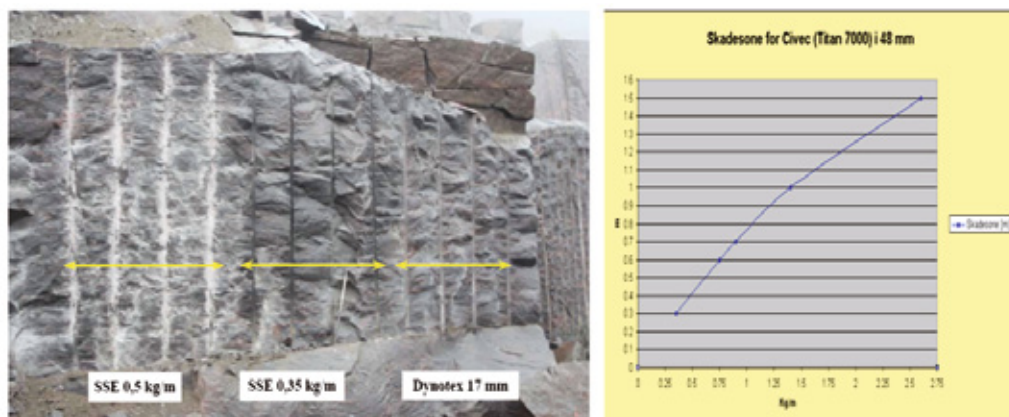
- Finne metoder for å måle skadesonen i gjenstående berg.
- Forstå mekanismen for overføring av sprengstoffets energi til skadesone i berget.
- Hvilke faktorene som påvirker skadesonen mest, og hvordan den kan reduseres.
- Hvordan estimere skadesonen med forslag til en ny skadesonetabell.

I forsøksprogrammet ble det skutt et stort antall prøvesalver av både pall og tunnelsalver med et stort antall ulike sprengstoffer i forskjellige diametere.

Siste delrapport (2006-2008) er en oppsummering av forsøksserien komplett med strengladning i tunnel (SSE, Titan 7000, Civec Control) og momentan tenning ved hjelp av bl.a. elektroniske tennmidler. (Olson et al. 2008)

Håldiameter:			45	48	51	54	57	64
Laddn.- diam.	Laddn.- kons.	Ekviv. kons.	R ₀	R ₀	R ₀	R ₀	R ₀	R ₀
mm	kg/m	kgDx/m	cm	cm	cm	cm	cm	cm
<i>Pulver:</i>								
17	0,23	0,17	12	11	11	10 ^a	10 ^a	8 ^a
22	0,38	0,29	35	33	31	29	27	24
25	0,49	0,37	56	52	49	46	44	39
<i>Emulsion:</i>								
17	0,25	0,18	24	22	21	20 ^a	19 ^a	17 ^a
22	0,42	0,37	56	52	49	46	44	39
25	0,54	0,48	84	79	74	70	66	58
29	0,73	0,64	134	125	118	111	105	93
32	0,88	0,78	182	170	160	150	142	126
<i>Dynamit:</i>								
22	0,53	0,53	73	68	64	60	57	50
25	0,69	0,69	104	97	91	86	81	72
29	0,92	0,92	158	147	138	130	123	109
30	0,99	0,99	173	162	152	143	135	120
32	1,13	1,13	208	194	182	172	162	144

Figur 5. Skadesonen fra ulike patronerte / rør sprengstoffer i ulike dimensjoner (etter Olson et al. 2008)



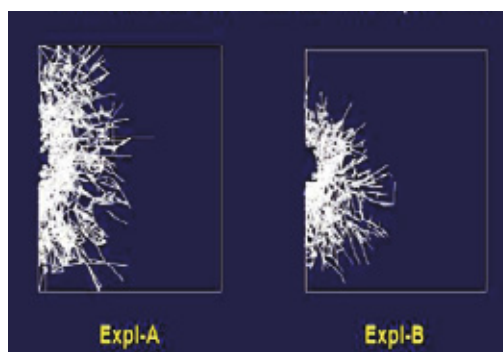
Figur 6. Skadesonen fra Dynotex17 mm rørladning og Civec Control strenger av ulik tykkelse i Ø48 mm hull

2.1 Geologi og sprengstoffs påvirkning på skadesone

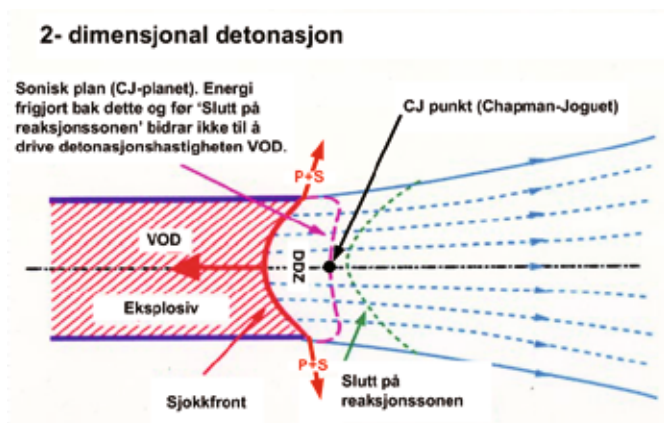
Bergmassestrukturer som oppsprekking, foliasjon og lagdeling har stor betydning for sprekkelengden i skadesone. Spregning parallelt med foliasjonen gir en doubling av sprekkelengden, da kritisk partikkelhastighet for å forlenge eksisterende sprekker er mindre enn for å skape nye. Sprenggasser vil også følge de største (mest åpne) sprekkenene, og forlenge disse.

Sprengstoffer med høy tetthet, energi og detonasjonshastighet genererer en større knusesone rundt hullet og flere og lengre radielle sprekker. Et høyt detonasjonstrykk gir kraftigere sjokkbølger som virker på berget og energien i sprenggassen blir høyere.

Ulike sprengstoff har sin egen sprekkSignatur (Figur 7)



Figur 7 Knusesone rundt hullet fra to sprengstoffer med ulikt detonasjonstrykk. Expl-A har høyere detonasjonstrykk enn Expl-B.



Figur 8: 2-dimensjonal detonasjon

Det er energien som frigjøres i DDZ-sonen mellom sjokkfront og det soniske planet, som bestemmer sjokkfrontens hastighet (sprengstoffets detonasjonshastighet, VOD), og skaper sjokkbølger som overføres til berget i form av P og S bølger.

Desto større mengde energi som frigjøres i DDZ-sonen desto høyere detonasjonshastighet og sjokktrykk.

Sprengstoffer hvor det meste av sprengstoffets totale energi omsettes i DDZ-sonen klassifiseres som ideelle sprengstoffer. DDZ-sonens tykkelse er bare noen millimeter og ladningens diameter og bergets innspenning har liten innvirkning på detonasjonshastigheten. Blant de ideelle sprengstoffene hører høyeksplosiver som Pentritt (PETN) med en detonasjonshastighet på ≈ 7000 m/s.

Trykket i CJ-punktet (detonasjonstrykket) er ofte brukt til å kvantifisere trykket som overføres fra sprengstoffet til omgivelsene.

Detonasjonstrykket kan beregnes ut fra den forenklede ligningen:

$$p_{CJ} = \frac{\text{Tetthet} \cdot \text{Detonasjonshastighet}^2}{4} = \frac{\gamma \cdot D^2}{4}$$

For sprengstoffer som benyttes til sprengning av berg ønsker man å redusere energien som frigjøres i DDZ-sonen. Disse klassifiseres som ikke ideelle sprengstoffer. Dette gjøres ved å redusere tetthet og tilsette komponenter som reagerer bak det soniske planet og dermed bidrar med økt energi i sprenggassene. DDZ-sonen er betydelig større enn den man finner hos de ideelle sprengstoffene og påvirkes av ladningens diameter og bergets innspenning. Ikke ideelle sprengstoffer med liten diameter og dårlig innspenning vil ha en lav detonasjonshastighet og et lavt sjokktrykk som overføres til berget. Denne egenskapen finner man i en del rørladningene og strengladede emulsjonssprengstoffer utviklet for kontursprengning.



Figur 9. Rørladninger for kontursprengning

Dynotex nr.	1	2	3	4
Tetthet ca., g/cm ³ (kan variere noe)	1,0	1,05	1,16	1,21
Energi pr.kg sprangmasse ca., teoretisk verdi	3,4	2,8	1,6	1,2
Detonasjonshastighet ca., (1)	2300	2200	1700	1300
Gassvolum ca., teoretisk verdi	800	700	370	210
Overføringsavstand ca., (2)	>8	>5	1	1
Vannbestandighet, (2)	Begrenset for alle typer			
Oksygenbalanse	4,8	4,8	0,8	0,4
Vektstyrlig (1)	75	65	35	30
Følsomhet ved slagstøt (SAM fallhammer)	20	20	20	>60
Følsomhet ved friksjon (SAM friksjonsapparat)	>360	>360	>360	>360
Min. styrke tørrair detonerende lunte anordnes				

Detonerende lunte er i dag ikke godkjent for bruk i tunnel og er derfor ikke tatt med i hovedrapporten til Olson et al (2008).

Det ble innledningsvis utført en del forsøk med Detonex 40 og 80 g/m lunte i 45-51 mm hull diameter i tørre hull med skadesoner målt til 0.2 / 0.3 m (Olson et al 2003).

Detonerende lunte har et meget høyt detonasjonstrykk, og den lave skadesonen må tilskrives ladningsmengden/m og den store frikoblingen man oppnår med en ladning på 10 mm (80 g/m) i 51 mm hull.

I vannfylte hull hvor dempningen av sjokktrykket blir minimal vil skadesonen for detonerende lunte typisk være 4 ganger større (Olsen et al 2003).

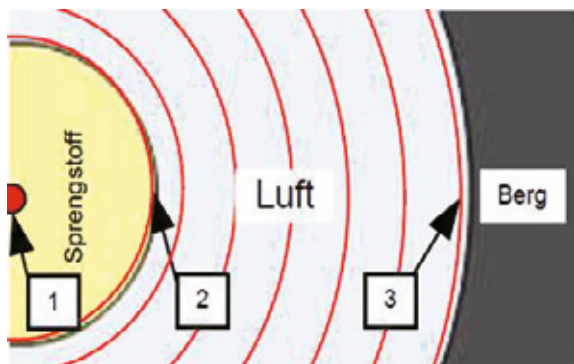
Mekanismer for hvordan sprengstoffers ulike egenskaper overføres til skadesone i forskjellige typer berg er beskrevet av Oucherlony (1997) og Nie (1999).

Frikobling (dekobling)

Frikobling mellom sprengstoff og berg er den mest benyttede metoden for kontursprengning. Frikobling oppnår man når diameterforskjell mellom borhull og sprengstoff er stor.

$$\left(\frac{\text{Diameter sprengstoff}}{\text{Diameter borhull}} \right)^{2\gamma}$$

Trykket fra sprengstoffet dempes i tørre hull med forholdet mellom diameter og sprengstoff som vist. Adiabatic γ kan variere mellom 1 til 1.3, hvor 1.3 (Calder 1977, Nie 1999) har vist seg å gi en god overensstemmelse med målte verdier når diameterforholdet er stort. (trykket dempes for en 10 mm ladning i et 51 mm hull med 98 %). I tillegg til dekoblingen kommer tap i grensesjiktet luft borhullsvegg.



Figur 10. Skjematisk fremstilling av overføringen av sjokktrykket i et hull med et frikoblet sprengstoff i et hull med luft. 1) Detonasjonstrykk. 2) Eksplosjonstrykk. 3) Borhullstrykk.

Eksplosjonstrykket er typisk 20-50 % av detonasjonstrykket.

Borhullstrykket kan estimeres til:

$$P_{\text{Borhull}} = \rho_{\text{Eksplosjon}} \cdot \left(\sqrt{\frac{L_e}{L_b}} \cdot \frac{r_e}{r_b} \right)^{2\gamma}$$

L_e , r_e er lengden og radien av sprengstoffet og L_b og r_b er Lengden og radien av hullet ($\gamma = 1.3$).

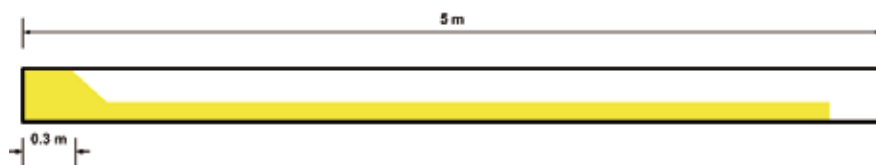
Bytter man medium fra luft til vann, som har en lydhastighet 5 ganger så høy som luft, dempes sjokket mindre og borhullstrykket vil være stort nok til å skape nye sprekker. Vann er inkompresibelt og vil sammen med sprenggassene penetrere nye og eksisterende sprekker og forlenge disse. For emulsjonsprengstoffet Civec Control med en ladning på 350 g/m er skadesonen målt til > 0.8 m i vannfylte hull som er mer enn en dobling i forhold til tørre hull.

Dekoblingens betydning for sprekkelengden er vist i Figur 5. Her er skadesonen fra ulike patronerte / rør sprengstoffer i ulike dimensjoner gjengitt.

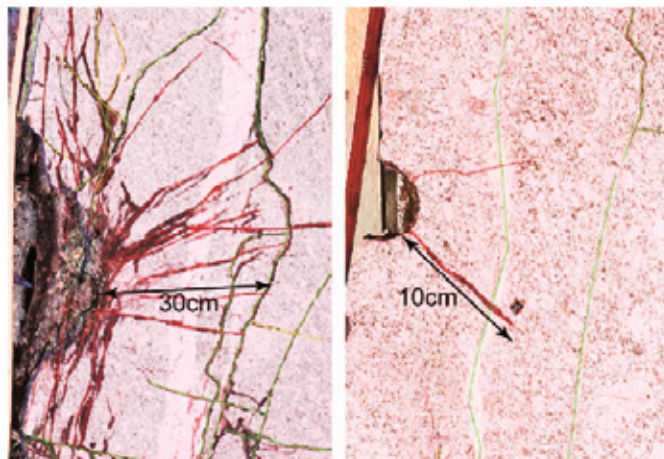
Skadesonen fra bunnladning vs pipeladning

Skadesonen er betydelig større fra bunnladningen / primeren enn fra pipeladningen. En primer har høyere detonasjonshastighet, mer energi og ofte større diameter slik at frikoblingen blir mindre.

Det er derfor viktig at bunnladningen holdes på et minimum av det som skal til for å initiere pipeladningen.



Figur 11. Strengladet konturhull med en bunnladning som fyller hele hullet

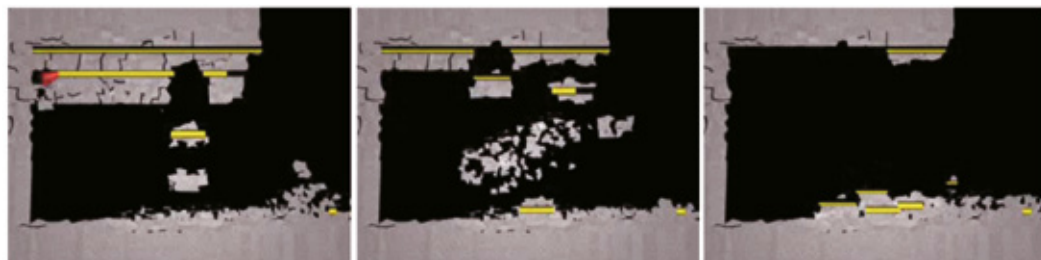


Figur 12. Sprekkesoner fra bunnladningen og fra pipeladningen

Forsetning og hullavstand

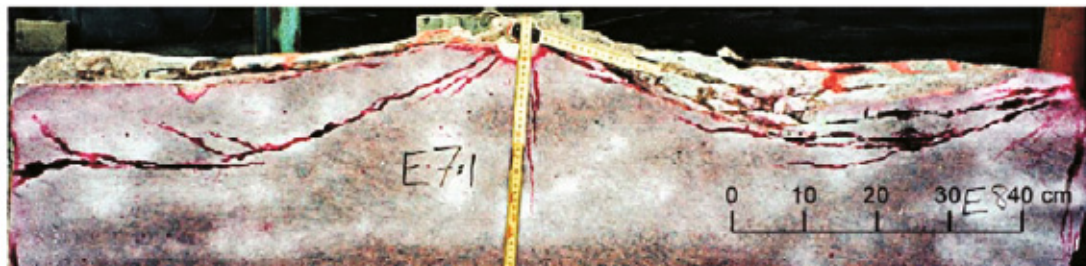
Forsøk har vist at konturens forsetning har liten innvirkning på skadesonen rundt hullet. Dette er også kjent fra kontursprengning med presplitt.

Avstanden til neste rast er av større betydning (kontur 2 / hjelperast). Er skadesonen fra denne for stor eller større enn konturrasten vil det være denne som skaper skadesonen i gjenstående berg. Er avstanden for liten kan denne ødelegge berget, sprengstoffet og tennmidlene i konturrasten. Dette er en ganske normal hendelse i tunnelsprengning hvor deler av konturrasten raser ut og man finner sprengstoff (rørledninger, detonerende lunte, emulsjonsrester) på røysa. Ofte finner man at kun deler av konturen er tilbake uten at den har blitt initiert. Dette er også et kjent problem ved bruk av bulkemulsjon hvor man får brudd i lade strengen med stopp i overføringen av detonasjonen.



Figur 13. Bildesekvens som viser utfall av konturen i dårlig berg / for liten avstand mellom konturrastene.

Er hullavstanden mellom konturhullene for stor eller at hullene i konturen ikke detonerer i riktig sekvens kan man få meget ugunstige bueformede sprekkesystemer i gjenstående berg, som vist i Figur 14.



Figur 14. Bølgeformede sprekker ved for stor hullavstand eller feil i opptenningssekvens

Samvirkning av ladninger

Samvirkning av ladninger er en metode som benyttes i alle former for sprengning hvor man vil ha redusert skadesoner (kontur, blokksteinssprengning). I kontursprengning i dagen benytter man detonerende lunte for å oppnå dette.

I tunnelsprengning har man gjort forsøk med elektroniske tennere for å oppnå denne effekten.

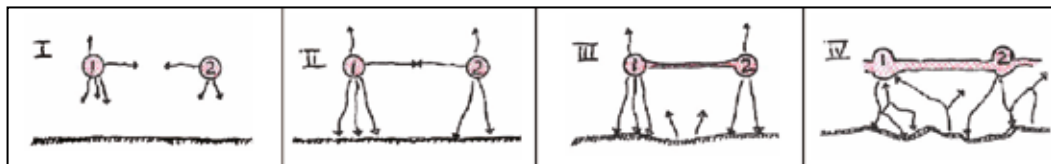
I Vånga-forsøkene ble det utført flere forsøk (Civec Control strengladning 350 g/m og 17 mm Dynotex rørladninger) med samvirkning av ladninger i nabohull og man klarte å redusere skadesonen fra 20 cm til 5 cm mellom hull med cc. 80 cm og en forsinkertid mellom hull under 1 ms.

Ved forsinkertid på 1 ms eller mer fant man ingen samvirkning mellom hull og skadesonen var lik den man fikk ved enkelthullssprengning.

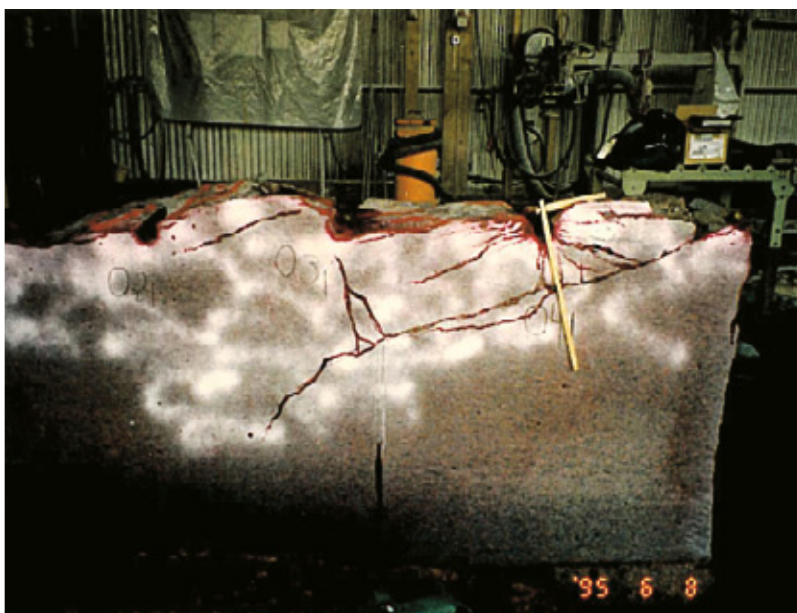


Figur 15. Ingen / liten skadesone mellom samvirkende ladninger mellom nabohull.

Momentan initiering er vist i Figur 16. Sjokk og sprekker fra nabohull kolliderer og stopper sprekke-dannelsen. Rød skravur indikerer sprenggasser.



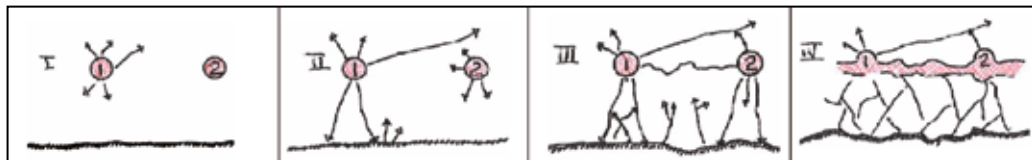
Figur 16. Momentan initiering, sjokk og sprekker kolliderer og stopper sprekke-dannelsen.



Figur 17. Normal skadesone når forsinkertiden mellom hull var 1 ms eller mer.

I Figur 17. kan man se at sprekken fra hull til høyre har rukket å passere nabohullet før det detonerer. Forsøkene ble utført i granitt og man kan anta at sprekke-hastigheten er rundt 1000 m/s eller mer.

Ingen samvirkning mellom hull er vist i Figur 18 hvor rød skravur indikerer sprenggasser.



Figur 18. Ingen samvirkning og reduksjon i skadesone

Forsøkene viste at enkelte fabrikat av elektroniske tennere hadde for stor egenspredning på høye forsinkertider til at man oppnådde ønsket samvirkning. Dette er senere verifisert i ISEE journal, *Blasting and Fragmentation* (Vol. 6, no. 1 2012 pp 1-18)

Forsøkene viste at reduksjon av sprekkelengden ved samvirkning av ladninger kun forekom ved ladingsmengder under 0,6 kg/m. For høyere ladingsmengder førte samvirkningen til en økt skadesone rundt hullet.

2.2 Forslag til ny skadesonetabell

En av hovedmålsetningene til forsøksserien var å utvikle en ny og bedre skadesonetabell (Olson et al. 2008).

Tabellen viser den maksimale skadesonen for tørre hull med en diameter mellom 48-54 mm hvor hullavstanden er mindre enn forsetningen. Sprengstoffer av ulik energi/m [MJ/Kg] regnet om til dynamitt-ekvivalenter (DxM/m), med ingen samvirkning mellom hull ($t \geq 1$ ms) indikert som *Nonel* og med samvirkning mellom hull ($t < 1$ ms) indikert som *Simultan*.

Tabell 11: Forslag til utøkad skadezonstabell		
Teoretisk skadezonsdjup i m enligt figur CBC/1, høgst	Laddningskonsentrasjon i kg DxM/m, høgst	
	Nonel	simultan ^a
0,2	0,1	0,2
0,3	0,2	0,3
0,5	0,3	0,4
0,7	0,4	0,5
1,1	0,7	0,6
1,3	0,9	(0,7)
1,7	1,3	-
2,0	1,6	-

Figur 19. Forslag til ny Skadesonetabell (Olson et al 2008)

Kommentarer til Figur 19:

- Er hullavstanden større enn forsetningen øker skadesonen med forholdstallet hullavstand/forsetning.
- Skadesonen i våte hull kan være 2-4 ganger større enn skadesonen i tørre hull.
- Sprengning parallelt med foliasjonen gir en dobling av skadesonen.
- Laddningskonsentrasjonen er regnet om til Dynamit i kg/m (DxM/m). Energien til Dynamit er 4,5 MJ/kg. Energien til Civic Control er 3,1 MJ/Kg. For å finne DxM verdien til Civec Control må ladet mengde pr. meter multipliseres med forholdstallet mellom energiene $3,1/4,5 = 0,69$. En Civec Control streng på 0,350 kg/m vil da få en DxM verdi på $0,350 \times 0,69 = 0,24$ som tilsvarer en maksimal skadesone uten samvirkning på 0,3-0,4 m som er i overensstemmelse med skadesonen vist for Ø48 mm hull i tabellen i Figur 6.
- Om laddningskonsentrasjonen er større enn 0,6 kg/m øker skadesonen ved momentan initiering ($t < 1$ ms)

3 Kvantifisering av tunnelkonturkvalitet

Konturkvaliteten i en tunnel har lenge vært mer eller mindre subjektivt uttrykk fordi det ikke har vært noen tydelige retningslinjer for hvordan man skal kvantifisere tunnelkonturkvalitet. Ofte er kun overmasse brukt som kriterium for å evaluere konturkvalitet i mange tunneler.

I det følgende kapitlet gis det en kort oversikt over hvilke tilnærminger som kan benyttes for å kvantifisere tunnelkonturkvalitet.

3.1 Telling av hullpiper

Telling av hullpiper etter sprengning er en mye benyttet metode for å angi kvaliteten på konturen. Metoden gir en god indikasjon på kvaliteten av konturen i godt berg, og er lite tidkrevende.

Den mest benyttede fremgangsmåten er å telle antall synlige hullpiper, eller antall meter synlige hullpiper i konturen og angi dette i meter eller prosent.

Et noe mer omfattende klassifiseringssystem for å måle kvaliteten av hullpipen, er omtalt av Ouchterlony et al. 2000, hvor hver meter av hullpipen kvalitetsbedømmes og summeres.

Tabell 1: Klassifisering av hullpipekvalitet (etter Ouchterlony et al. 2000)

Hullpipe kvalitetsfaktor	Visuell bedømming
0.	Ingen synlig hullpipe
1.	Hullpipe med synlig knuseroser
2.	Hullpipe men utbruddsvinkel mindre enn 180 grader
3.	Hullpiper med radielle sprekker
4.	Nær perfekte hullpiper
5.	Perfekte hullpiper med utbruddsvinkel på 180 grader. Ingen radielle sprekker.

Forsøk med saging har imidlertid vist at den visuelle bedømmingen av hullpiper etter sprengning ikke er en fullgod metode til å måle skadesonen i konturen. Ofte forekommer det at hullpipene er borte etter rensk som oftest forårsaket av dårlig berg eller at skadesonen fra kontur 2 er større enn skadesonen fra kontur 1. Sagingen har også påvist at det kan forekomme bølgeformede sprekkesystemer mellom hull selv om hullpipene var nær perfekte.

3.2 Kjerneboring

Uttak av borkjerner rundt konturen kan være en kilde for å finne mikroriss. Relativt korte (< 0,5 m) kjerner kan bores med enkelt og håndholdt utstyr bak stuff, uten å forstyrre inndrift i noe særlig grad. Etter at kjernene er utboret kan man visuelt bedømme riss, og eventuelt måle lydshastighet på kjernene som en indikator på tilstedeværelse av skadesone påført av sprengstoff.

3.3 Måling av skadesone ved hjelp av blokkuttak

Olsson et al. (2009) har utviklet en metode som går ut på blokkuttak, og analyse av blokkene (SveBrec / SveDeFo). En stor del av forsøkene ble utført i et granittbrudd (Vånga) og ble utført både med horisontale og vertikale hull. For vertikale hull ble emulsjonsstrengen først ladet i plastrør som ble veid for kontroll av ladet mengde.

Metoden består av sprengning, blokkuttak, saging, påføring av penetrant og utredning (som vist i Figur 20). Metoden er også benyttet i tunnel hvor man tar ut blokker med vaiersaging (Olsson et al. 2009).



Figur 20. SveBrec's metode for måling av sprenginduserte sprekker. Forsøkshull bores, lades og sprenges. Konturen merkes med hull nummer. Uttak av blokker bak forsøkshull. Saging av blokker, påføring av penetrant på sagsnittene og kartlegging av sprekker.

Bildet nederst til høyre viser sprengningsinduserte riss (røde og gule), naturlige svakheter i bergmassen (grønne).

3.4 Tunnelkonturindeks (TCI)

For å kvantifisere tunnelkontur har Kim (2009) utviklet en metode som kalles Tunnel Contour Index (Tunnel kontur indeks) (TCI). Denne metoden er beskrevet og har blitt benyttet for å skaffe en oversikt over tunnelkonturkvalitet i fra fem tunneler, totalt 11 km tunnel i Norge.

Tunnelkonturkvalitetsindeksen utarbeidet av (Kim 2009) er ment for å:

- Kvantifisere konturkvaliteten etter sprengning
- Sammenligne konturkvalitet effektivt mellom tunneler

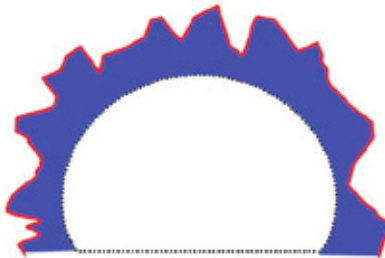
- Analysere hvordan forskjellige faktorer påvirker TCI mer systematisk.

Jo høyere TCI, jo lavere kostnad. Ved god kontur kreves mindre sprøytebetong og mindre sikring. I tillegg kan TCI brukes som et kvantifiserbart krav satt av byggherre til konturkvalitet.

Begreper som benyttes ved beregning av Tunnelkonturindeks (TCI)

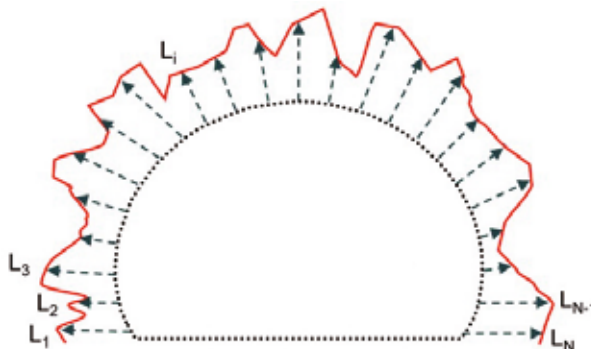
- Overmasse (O_v): Areal mellom utført kontur og teoretisk sprengningskontur (skravert i blått i Figur 21), i TCI-beregningen benyttes gjennomsnittlig overmasse. Dette er arealet utenfor sprengningskontur delt på konturens lengde, og har dermed enhet meter.

$$O_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i$$



Figur 21: Overmasse er skravert i blått (etter Kim 2009)

- Standardavvik (S_d): Per snitt utfører man et antall målinger ($L_1, L_2, L_3, \dots$) langs lengden av taket i konturen, standardavviket som benyttes i TCI-beregningen er altså standardavviket for disse målingene.

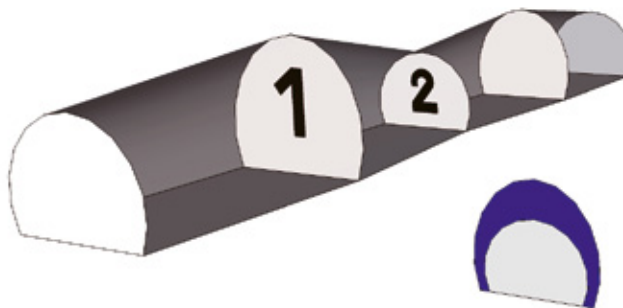


Figur 22: Målinger, L , langs taket for et enkelt scan (etter Kim 2009)

- Overmassevariasjon (V_o): Dette kan beskrives som standardavviket for et enkelt snitts overmasse sammenlignet med gjennomsnittlig overmasse for hele tunnelen. Denne verdien tar altså hensyn til ujevn kontur i lengderetningen av tunnelen. Om

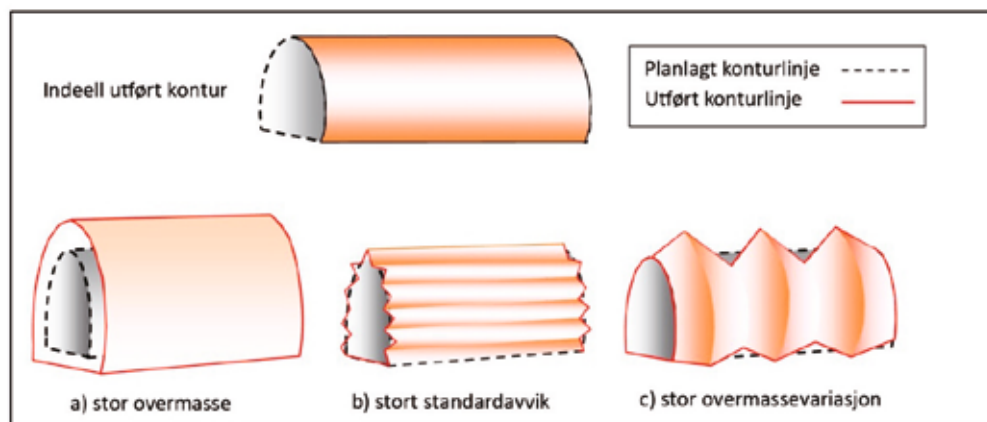
areal 2 i Figur 23 er tunnelens gjennomsnittlige areal vil overmassevariasjonen beskrives av arealet i blått. M er her antallet scan.

$$V_o = \sqrt{\sum_{j=1}^M \frac{(O_{vj} - \overline{O_v})^2}{M}}$$



Figur 23: Variasjon i overmasse i lengderetningen av tunnelen (etter Kim 2009).

- Avviksvariasjon: Variasjon i overmasse fra et punkt til et annet langs med et scan. Det vil si forskjellen mellom L_i og L_{i+1} (se Figur 22). Gjennomsnittet av disse beregnes og angis da som en verdi per scan.
- Teoretisk kontur: Konturen man ønsker å oppnå for ferdig tunnel, kravet som stilles til entreprenøren.
- Teoretisk sprengt kontur: Man planlegger ofte å sprengte ut et større areal enn den teoretiske konturen for å være sikker på at den ferdige, utførte konturen ligger utenfor den teoretiske konturen.
- Utført kontur: Dette er tunnelen slik den står når den er ferdig sprengt, data her hentes inn ved at man skanner tunnelene med laser underveis.
- Teoretisk areal: Dette er arealet som omslutes av borhull. Dette kan avvike noe fra den teoretisk sprengte konturen ettersom borplanene noen ganger endres, og dermed oppstår det et avvik.



Figur 24: Eksempler på forskjellige typer avvik fra ideell kontur (etter Kim 2009)

Definisjon av TCI

Den opprinnelige definisjonen av TCI er basert på skjematiske analyser av forskjellige typer data fra to tunnelprosjekter i Norge (Kim 2009). TCI tar inn parametere fra den utførte konturen i tunnelen som hentes inn ved hjelp av laser underveis i tunneldrivingen.

TCI beregnes ut ifra avvikene fra ideell kontur, og disse avvikene kan deles inn i tre grupper som illustrert i Figur 24. Eksempel a) har en jevn og fin kontur, men stor overmasse. Situasjonen i b) er at arealet av tverrsnittet er korrekt, men man har stor ruhet, og dermed stort standardavvik i hvert snitt. Situasjon c) har en jevn kontur, men arealet varierer i lengderetningen av tunnelen, altså man har stor overmassevariasjon.

TCI er da definert som en kombinasjon av tre parametre som hver tar hensyn til disse tre avvikene fra ideell kontur. En teoretisk perfekt tunnel vil ha en TCI på 83. Dette svarer da til null overmasse og helt glatt kontur. Det normale området regnes for å være mellom 39 og 62, hvor en høyere indeks vil være et mål på en bedre kontur. Vegtunneler i Norge vil i dag ligge opp mot den øvre grensen av dette intervallet. Det er eksempler som har en TCI på opp mot 60. TCI kan også beregnes for et enkelt snitt, den betegnes da som TCI_r , og også den har en øvre grense på 83.

$$TCI_T = \frac{300}{W_1 \cdot 0.006 \cdot \overline{O_v} + W_2 \cdot 0.8 \cdot (1 + 0.001 \cdot \overline{S_d} + 0.001 \cdot \overline{O_v}) + W_3 \cdot 0.02 \cdot V_o}$$

$$W_1 : W_2 : W_3 = 4,5 : 4,5 : 1$$

vekting av faktorene, foreslått i Kims doktorgrad (2009) .

Nordtugindeksen

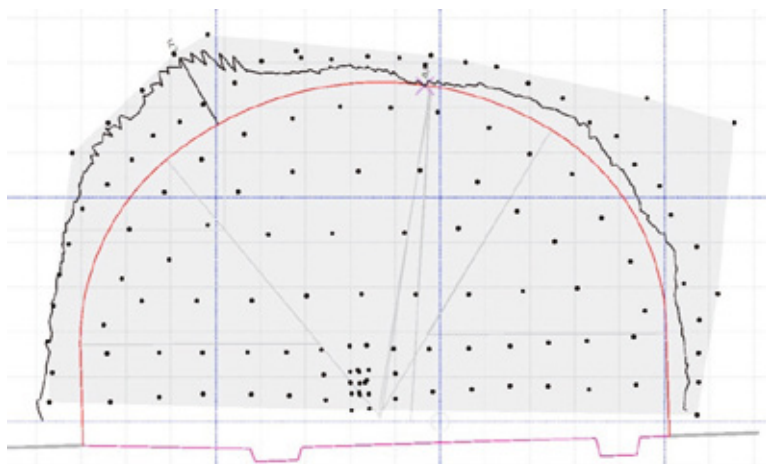
TCI tar hensyn til flere aspekter ved den utførte konturen (kvalitet på boring, spregningsteknikk og geologi). TCI viser derfor ikke isolert sett hvordan boringen er utført.

For å ta hensyn til dette innføres Nordtug-indeksen, F. Denne er ment for å se på sammenhengen mellom utført kontur og borplan.

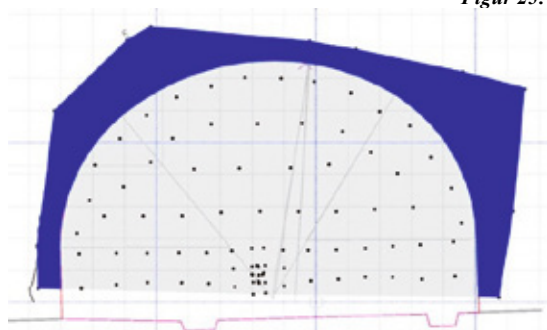
For å kunne se mer detaljert på borplanens innvirkning på kontur innføres Nordtugindeksen, F. Denne beskriver sammenhengen mellom boret areal og faktisk utført kontur. Den beregnes ut ifra to verdier; O som er snittets overmasse, og B som er boret areal minus teoretisk kontur, altså «boret overareal». Indeksen F beregnes da slik:

$$F = 10 \cdot \text{Log}(B^2 \cdot O)$$

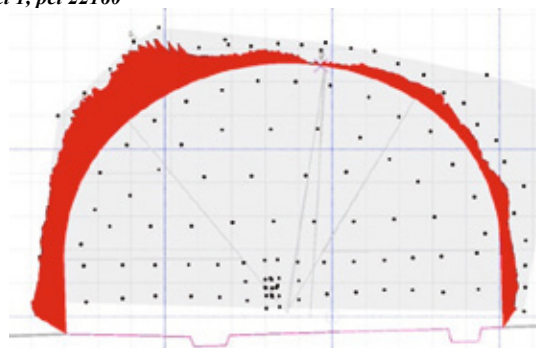
Av ligningen ser vi at dersom både overmasse og boret overareal er stort, vil F bli stor, og dermed er det en sammenheng mellom hvordan boringen er utført og avviket fra teoretisk kontur. I Figur 25 her ser vi tunnelkonturen slik den presenteres i Bever Controls programvare Bever Team 3. Sort strek er utført kontur, rød strek er teoretisk kontur, sorte prikker er borhull og skravert areal er det borede arealet. Figurene under viser borpillhøyde i blått, og overmasse i rødt.



Figur 25: Tunnel 1, pel 22160



Figur 26: Borpillhøyde



Figur 27: Overmasse

Eksempelet fra Figur 26 gir et tverrsnitt med svært lav TCI. Det har stor overmasse (15 m²) og det har stort standardavvik (44,1 cm). Når vi ser på borplottene ser vi også at det er boret

langt utenfor den teoretiske konturen, dermed får man en svært høy Nordtugindeks, ca 47. Gjennomsnittet i tunnelen er på 26,3. Det disse tallene sier, er at når det er et tverrsnitt med unøyaktig boring, med høy Nordtugindeks, så er det stor sannsynlighet for at det gir en dårlig konturkvalitet.

Kvantitativ analyse av bordata og scannerdata

For å analysere data ved hjelp av TCI og/eller Nordtugindeksen er det avgjørende at prosjektet er prosjektet i detalj med programvaren Bever Team 3. Indeksen vil gi feil resultat om det for eksempel ikke er lagt inn en nisje i teoretisk kontur. Da vil man i analysen senere se en utført kontur som ikke stemmer overens med den teoretiske.

TCI_A (ny klassifiseringsmetode for tunnelkontur av Alekander Korssund Andrianopoulos)

Andrianopoulos (2012) har foreslått en TCI-indeks som baseres på TCI per salve. Beregningen av TCI_A baseres på skannedata, slik som Nordtug-indeksen og TCI (Kim 2009). Basert på TCI_A for Eikremstunnelen og Oppdølstrandatunnelen foreslår Andrianopoulos et klassifiseringssystem som går i fra A til G, hvor A representer en «ekstremt god kontur». Utregningen for TCI_A er gitt av Formel 4.1-1 i Andrianopoulos (2012).

$$TCI_A = \frac{100}{\bar{O}_v \cdot RBA} \quad \text{Formel 4.1-1}$$

Der; *TCI_A = Applied Tunnel Contour Quality Index*

*RBA = (målt gjennomsnittssprengningsareal for salven/prosjektet
sprengningsareal for salven)*

Ö_v = gjennomsnittsvermasse for salven gitt i meter

100 = konstant for styring av variasjonsbredde i TCI_A verdier.

Tabell 2 Inndeling av TCI_A i intervaller som representerer konturkvaliteten, med tilhørende kategorier og titler (Andrianopoulos 2012).

Konturkvalitet (tittel)	Kategori	TCI _A
Ekstremt god	A	>74
Meget god	B	68-74
God	C	62-68
Middels	D	56-62
Dårlig	E	50-56
Meget dårlig	F	44-50
Ekstremt dårlig	G	<44

4 Eksempler

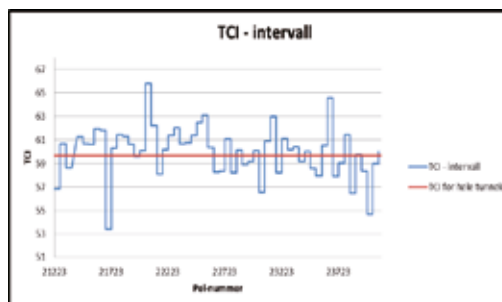
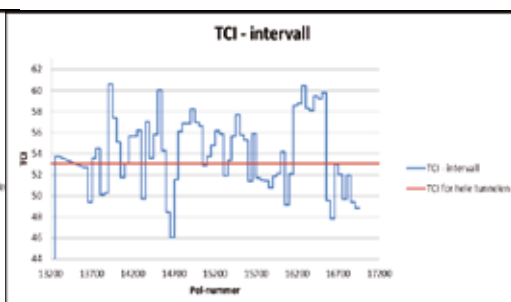
I dette kapitlet presenteres tunnelkonturindeksverdier (TCI) i fra 8 prosjekter. Data i fra 3 prosjekter er hentet inn i fra Kim (2009), mens data i fra de 5 andre prosjektene er hentet inn gjennom NTNU. Der behandlet i programmet Bever Team 3. Tunnelene analysert i sammenheng med dette prosjektet er anonymisert.

Det er gitt to forskjellige metoder for beregning av TCI. Man benytter noe forskjellige variabler for beregningen, men man skal oppnå samme resultat med begge. Formelgrunnlag for beregningen av begge indeksvariantene er gitt i vedlegg.

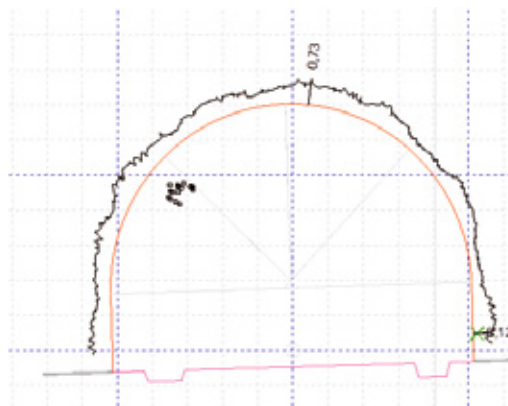
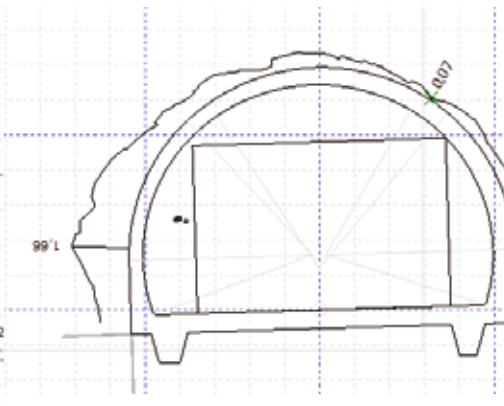
Tabell 3: Tunneloversikt

Tunnel	Lengde innsamlet-data [m]	TCI	Standardavvik gjennomsnitt [cm]	Overmasse gjennomsnitt [cm]	Overmasse-variasjon [cm]
Tunnel 1	2870	59,8	15,52	37,39	10,66
Tunnel 2	726	52,3	21,27	56,18	16,70
Tunnel 3	3679	53,1	20,86	54,20	15,98
Tunnel 4	9833	54,8	20,41	48,16	16,59
Tunnel 5	293	58,6	18,45	39,67	11,76
Tunneler i fra (Kim 2009)			Avviksvariasjon [cm]		
LS02-A	406	45,1	10	74	23
LS02-B	81	54,6	10	48	5
LS02-C	3944	47,2	9	69	17
LS02-D	1565	46,0	10	75	15
Marienburg	1435	52,1	10	55	8
Misiriyung	3565	62,4	6	27	11

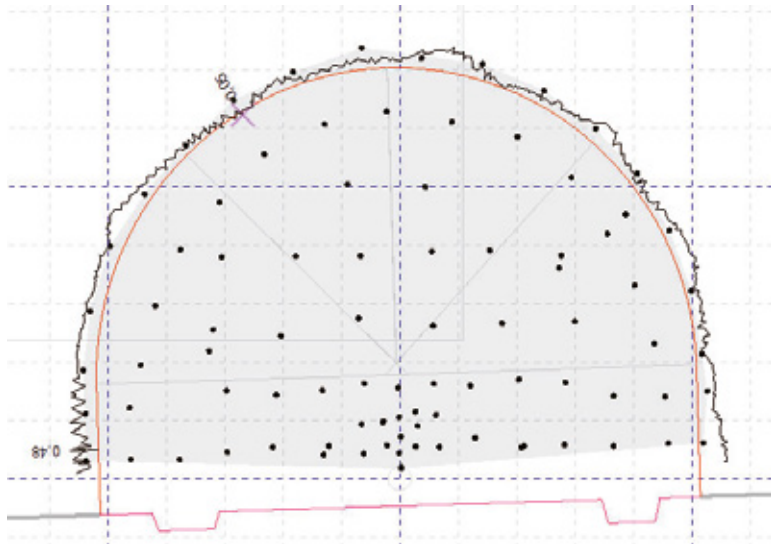
I Figur 28 og Figur 29 er TCI_T beregnet i intervaller på 50 meter (vist i blått), sammenlignet opp mot TCI for hele tunnelen(vist ved rød horisontal linje). Et intervall på femti meter svarer her til ti salver eller mer, etter som en salvelengde i disse tunnelene er noe under fem meter i snitt. I løpet av ti salver er det grunnlag for å antyde en tendens. Her ser man dermed seksjoner hvor tunnelen jevnt over er godt utført og seksjoner hvor man har bommet på teoretisk kontur. Avvikene her kan da skyldes for eksempel unøyaktig boring, skiftende geologi eller uheldig bruk av sprengstoff.

*Figur 28: TCI langs Tunnel 1**Figur 29: TCI langs Tunnel 3*

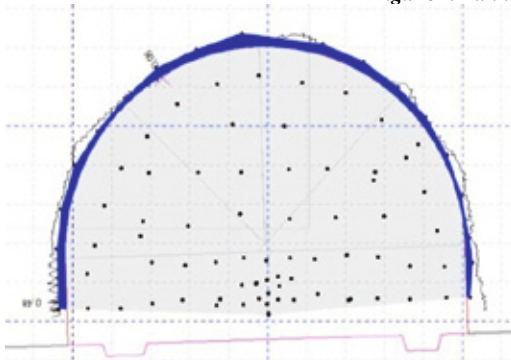
Ut ifra Tabell 3, Figur 28, og Figur 29 kan vi se tendenser til hvordan de forskjellige parameterne påvirker TCI for en tunnel. Vi ser at Figur 28 generelt har høyere TCI enn Figur 29, Dette skyldes en vesentlig høyere overmasse i Tunnel 3. I tillegg til den gjennomsnittlige overmassen påvirker variasjonen i overmasse også TCI i negativ retning.

*Figur 30: Tunnel 1 Pel 22357**Figur 31: Tunnel 2 scan Pel 2391*

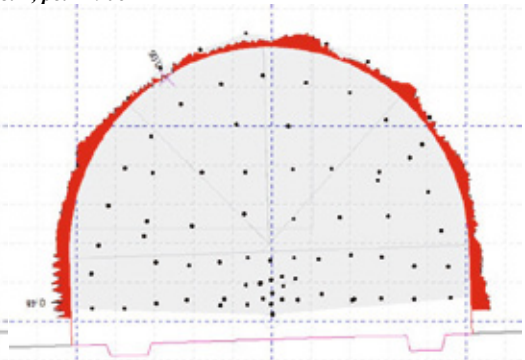
Figur 30 og Figur 31 viser to representative scan som illustrerer hvorfor TCI er forskjellig mellom Tunnel 1 og Tunnel 2. I Figur 31 ser vi at vi har en stor overmasse til venstre for konturen. Dette fører til en stor gjennomsnittlig overmasse, noen steder på opp mot en meter. Samtidig er sprengt kontur nesten helt i kant med teoretisk kontur i høyre side av tverrsnittet (overgang heng og vegg). Stor variasjon i pilhøyde fører også til at standardavviket blir stort. Begge disse effektene påvirker TCI i negativ retning.



Figur 32: Tunnel 1, pel 21906



Figur 33: Boret overareal



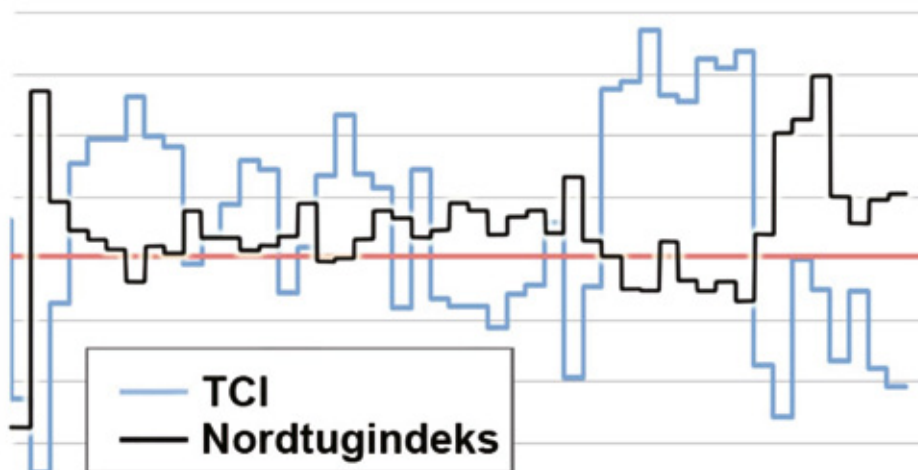
Figur 34: Overmasse

I Figur 32 ser vi at vi har både lav overmasse og lav boret overmasse, dermed blir Nordtugindeksen svært lav, her er den ca 17,5, mot gjennomsnittet for tunnelen på 26,3. Dette indikerer dermed at god boring har ført til en bra utført kontur. Nordtugindeksen kan i likhet med TCI beregnes for intervall langs tunnelen for å se på en tendens.

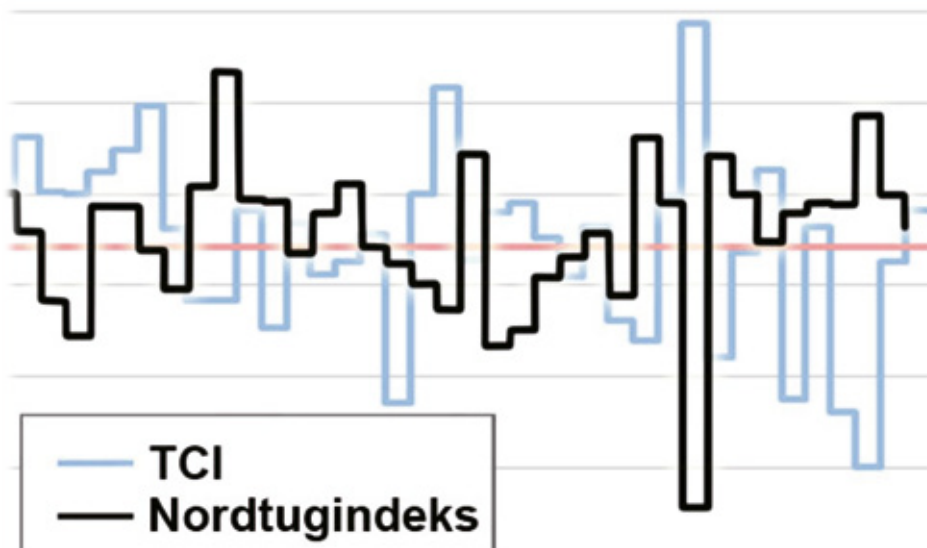
Tabell 4: Nordtugindeksen for de undersøkte tunnelene

Tunnel	Nordtugindeks
Tunnel 1	26,29
Tunnel 2	24,15
Tunnel 3	28,98
Tunnel 4	25,71
Tunnel 5	26,36

Nordtugindeksen bør oppgis med 2 desimaler ettersom man benytter seg av logaritme i utregningen, og dermed vil relativt små forskjeller i verdi kunne føre til nevneverdig kvalitetsforskjell.



Figur 35: TCI plottet mot Nordtugindeksen for Tunnel 3



Figur 36: TCI plottet mot Nordtugindeksen for Tunnel 1

Figur 35 og Figur 36 viser hvordan Nordtugindeksen og TCI henger sammen. Når TCI er høy tyder det på en kontur som er nær det ideelle, når Nordtugindeksen er lav tyder det på at det er boret nært den teoretiske konturen, dermed vil en høy TCI henge sammen med en lav Nordtugindeks og omvendt. Vi ser tilnærmet konsekvent at ved økende Nordtugindeks reduseres TCI og vice versa. Dette er en tydelig indikasjon på at der man observerer at det er boret med stort avvik fra teoretisk kontur ender man også opp med en ujevn kontur og

dermed lav TCI. Det som imidlertid ikke kommer frem av analysen som er utført her er hva dette avviket skyldes. Man vet ikke om det store avviket skyldes at det er prosjektert med en stor overmasse for å være sikre på å oppfylle kravet fra entreprenør eller om det rett og slett er boret unøyaktig. Noe av avviket skyldes en planlagt stikning, men denne er i tilfeller langt større enn nødvendig. (Strøm, 2010) Dette fører til at mange scan får en mye større overmasse enn det man strengt tatt behøver. Ansettet er allerede en god del større enn det teoretiske arealet, da trenger ikke stikningen å være så stor som den ofte er.

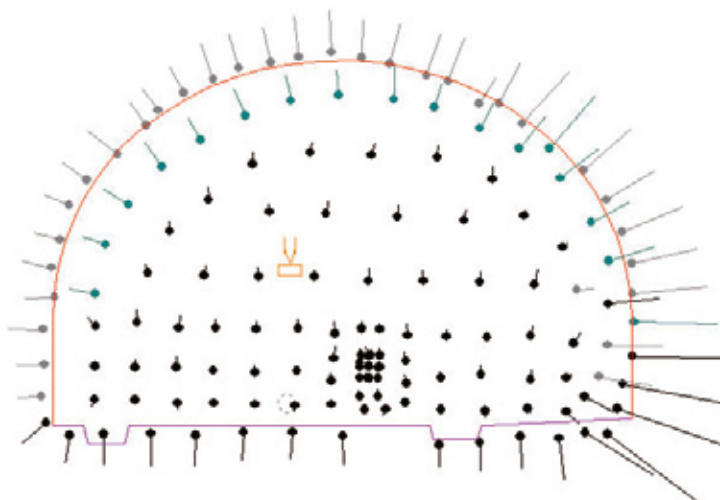
Tabell 5: Eksempel på grad av stikning hentet fra Tunnel 1.

Pel	Ansettareal [m²]	Teoretisk areal [m²]
21692,580	117,52	92,132
21697,368	143,07	92,132
21456,757	85,84	70,305
21460,279	134,78	68,834

Tabell 6: Eksempler på grad av stikning hentet fra Tunnel 4.

Pel	Ansettareal [m²]	Teoretisk areal [m²]
6233,445	66,19	64,272
6238,614	81,60	64,178
8799,098	68,37	64,094
8803,812	87,22	64,094

Denne stikningen påvirker TCI i negativ retning ettersom den fører til en stor overmassevariasjon, og enkelte snitt hvor man får en stor overmasse. Stikningen påvirker også Nordtugindeksen ettersom det er boret utenfor teoretisk kontur, dermed får man både stor overmasse og borovermasse. Figur 37 viser Tunnel 1 pel 22186, som viser at det er boret relativt nært til teoretisk kontur i stoffen, men i bunnen av salva har man flere steder gått over en meter ut.



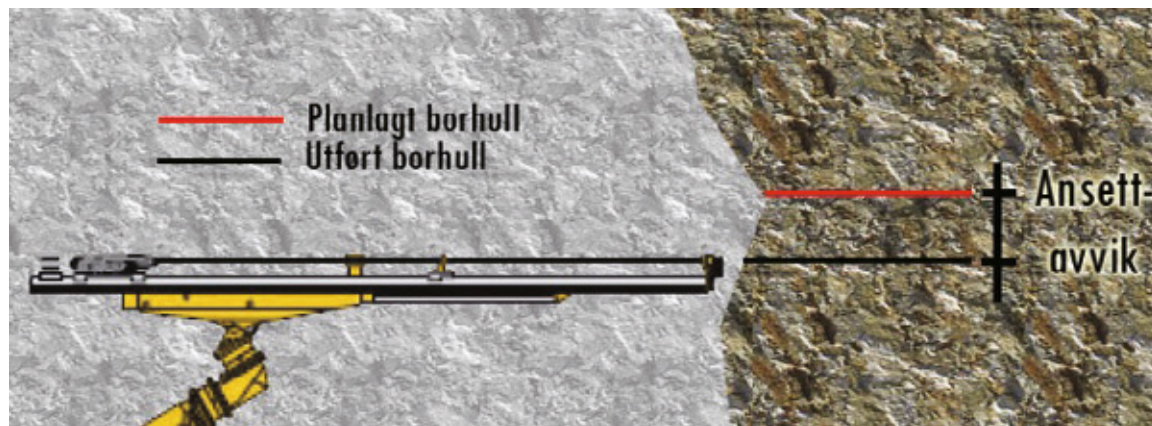
Figur 37: Borlogg som viser stikning. Øverst i konturen her er stikningen på 94 cm.

I en del utenlandske prosjekter ser man bedre tunneikonturkvalitet enn eksemplene overfor. Dette skyldes etter vår oppfatning i stor grad:

- Alle trinn i navigeringsprosessen gjøres mer nøyaktig, gjerne med bruk av kontrollpunkter. Kontroll med totalstasjon. Merker også stuff kontur med totalstasjon for kontroll
- Borer er mer nøyaktig med ansett og stikning etter borplan. Spesiell fokus også på stikning i såle
- Kortere hull og mindre krefter på bormaskin gir mindre boravvik. Borplanen kan da strammes inn med mindre plass til ansett og stikning
- Ved full utstøping har nøyaktighet mye større økonomisk konsekvens

5 Kilder til boravvik og boringens innvirkning på konturkvalitet

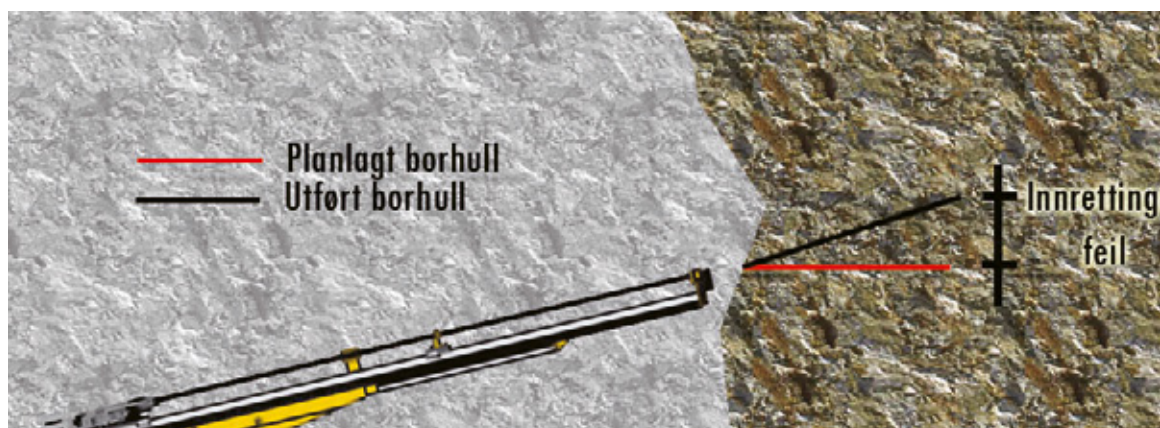
Nøyaktig boring er særdeles viktig for å oppnå en god kontur. Det er ikke mulig å rette opp boravvik i ettertid, og man kan ikke fjerne hele virkningen av unøyaktig boring ved å sprengte forsiktig. Menneskelig unøyaktighet kan gi et stort bidrag til boravvik, og datasystemer for å motvirke dette er utviklet og leveres i dag stort sett på alle nye tunnelrigger. Effektene i figurene er sterkt overdrevet for å illustrere.



Figur 38: Ansettsavvik

Ansettsfeil er at bormaskinen settes an på feil sted i forhold til planlagt plassering. Feilen regnes som konstant for hele borchullets lengde, og bør ikke overstige diameteren av borkrona. Ansettsfeil kan skyldes at borrhjellen står ustabil, ujevn overflate på stoffen og unøyaktighet fra riggoperatør.

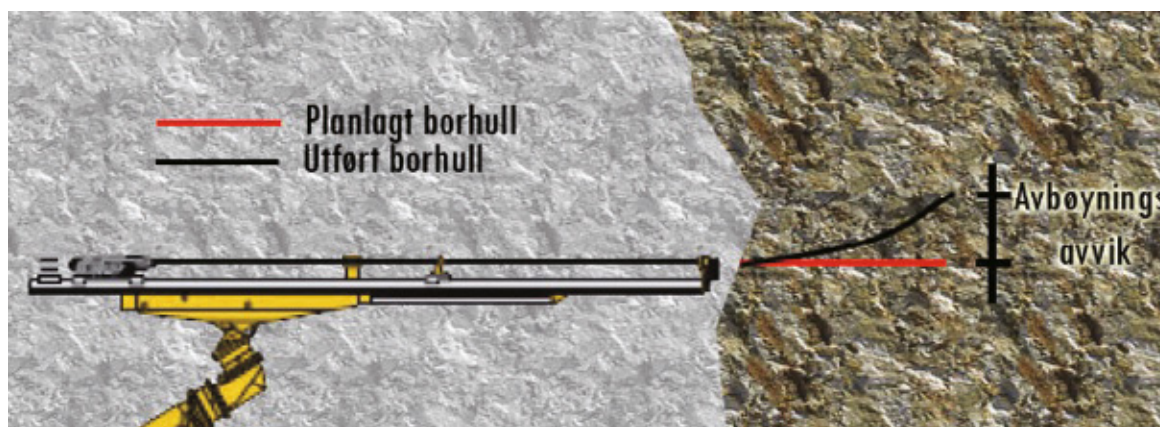
Man kan av og til oppleve at borrhjellen glir etter at den er navigert på stoff og står og borer. Dette er spesielt et problem dersom man driver på synk eller i stigning. På grunn av boringen vil det bli mye vann på stoff uavhengig av vanninntrengingen forøvrig. Dette kan gjøre det gjørmete og forårsake at borrhjellen glir. Dersom man laster ut med hjulgående lastemaskiner, og ikke bruker grove nok masser i sålen, vil problemet med gjørme kunne forsterkes ytterligere.



Figur 39: Innrettingsavvik

Innrettingsfeil er horisontalt og vertikalt avvik i forhold til planlagt retning av borhullet. Innrettingsfeil øker lineært innover hullet, og problemet øker dermed med lengre salver. Feilen skyldes i stor grad menneskelig unøyaktighet. Andre årsaker er at riggen står ustabilt, slitasje på borrhiggens hydraulikk og ledd på bommen, og at stuffens overflate er ujevn.

I tunneldriving borer man med stikning for å gi plass til boring av neste salve. Stikningsfeil betyr at man innretter bormaskinen med feil vinkel, f. eks at man borer med for stor eller liten stikning i konturen, og dermed får for mye overmasser eller knøl.



Figur 40: Avbøyningsavvik

Avbøyning under boring øker sterkt ved lengre salver. Kvaliteten på bergmassene og valg av borutstyr påvirker i stor grad, mens gravitasjonskrefter på lange salver kan påvirke noe. Ved stor borsynk øker risikoen for avbøyning da borkrona lettere vil gå på slepper og sprekker i fjellet. En løsning er å justere mate-, slag- og rotasjonstrykket, som kan endre kapasiteten. Ideelt bør borestrengen dimensjoneres slik at all energi fra bormaskin kan overføres samtidig som man borer rette hull. Tungt borutstyr har vist seg fordelaktig mht. avbøyning (Rønn 1997).

Man kan også fokusere på boravvik under design av borplan. Aktuelle parametre er diameter, og i særdeleshet salvelengde, da avbøyning øker som en andregradsfunksjon. Man kan også påvirke avbøyningen ved valg av borutstyr.

Geologiske forhold er også en kilde til boravvik. Svakhetssoner kan gi overbrytning rundt borkrona, hvilket kan føre til at borstrengen drar seg ut og mister retningen. Det samme gjelder dersom borkrona går på slepper eller sprekker. Generelt kan man si at borkrona følger minste motstands vei. Dersom borkrona drar ut og følger en sprekk, har man ingen mulighet til å hente inn igjen dette. Ved f. eks avbøyning som følge av vanskelige geologiske forhold må man forsøke å tilpasse seg dette ved valg av riktig borutstyr.

5.1 Boreriggens nøyaktighet – posisjonering og navigering

Moderne datarigger slik de benyttes i norsk tunnelindustri er basert på at hullplassering, borets posisjon og retning kan beregnes ut fra boreriggens posisjonering og borbommens geometri. Da det i dag ikke merkes opp på stuff så vil nøyaktigheten være bestemt av nøyaktighet i boreriggens posisjon og posisjonsnøyaktighet for den enkelte bom.

- Nøyaktighet. Posisjon og orientering av boreriggens chassis, felles for alle bomber (5-10 cm)
- Nøyaktighet. Posisjon og orientering av borets ansett på stuff, individuelt for hver bom (5-15 cm)

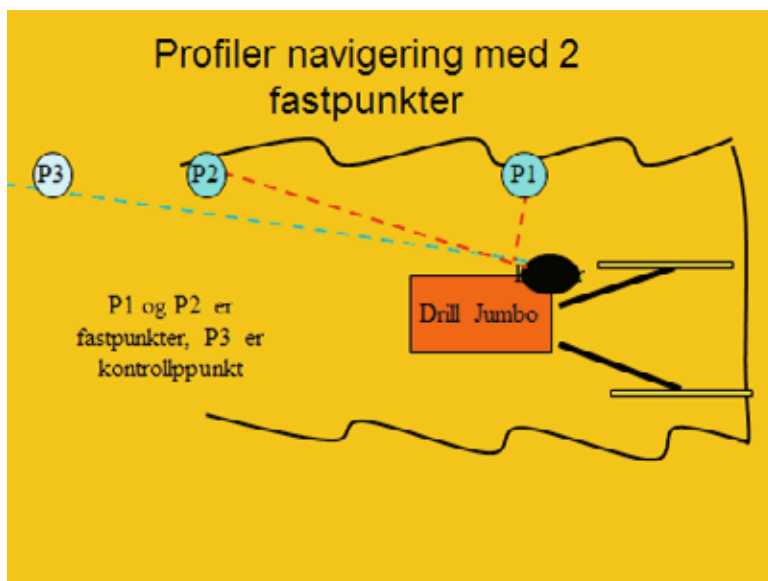
Det er i dag benyttet 3 ulike metoder for boreriggens navigering

- A. Profilernavigering. Bever 3D navigering. Profiler benyttes for innmåling av chassis posisjon ved å peke ut 1-3 fastpunkter som er plassert i tunnelveggen. Maksimal avstand ca. 100 meter. Kombinert med tunnellaser på stuff og et baksikte oppnås beste nøyaktighet samtidig som det er back-upløsning for klassisk lasernavigering, metode C)
- B. Totalstasjonsnavigering. Det benyttes en radiostyrt totalstasjon for innmåling av chassis posisjon ved å låse på 2 prismer som er montert på boreriggen. Totalstasjonen plasserer på en spade i tunnelveggen med referanse til ett ekstra fastpunkt. Totalstasjonen styres automatisk fra boreriggens programvare
- C. Lasernavigering. Denne metoden er basert på at mater innrettes etter en koordinatbestemt tunnellaserlinje. Operatøren legger inn pel nr. på teoretisk stuff som samsvarer med materfront på den borebom som er referert til tunnellaser. Basert på alle sensorer i bommen så beregnes boreriggens posisjon. Dette er den klassiske metoden som er benyttet av alle boreriggleverandører. Nøyaktigheten er begrenset pga. mulig unøyaktig pel nr. og deformasjoner i referansebom. Feil i pel nr. er ofte 1-2 meter eller mer. Feil i chassis posisjon i side og høyde vil typisk være 10-20 cm, og i retning 1-2 grader (side, høyde, retning). Konsekvensen av disse feilene kan gi store utslag med typisk 20-30 cm avvik på borehullets ansett

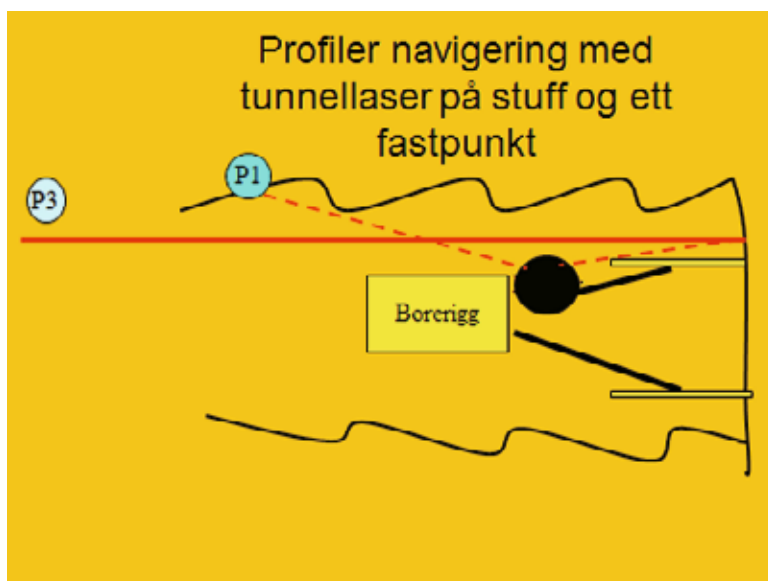
Ved siden av disse standardmetodene, så kan mer manuelle metoder benyttes som for eksempel at totalstasjon kan måle inn 2 fastpunkter på riggens chassis og koordinatene legges inn i datasystemet til riggen.

I Norge i dag så er Profiler navigering eller Totalstasjon mest benyttet. Lasernavigering benyttes kun i spesielle tilfeller. De viktigste fordeler med dette er:

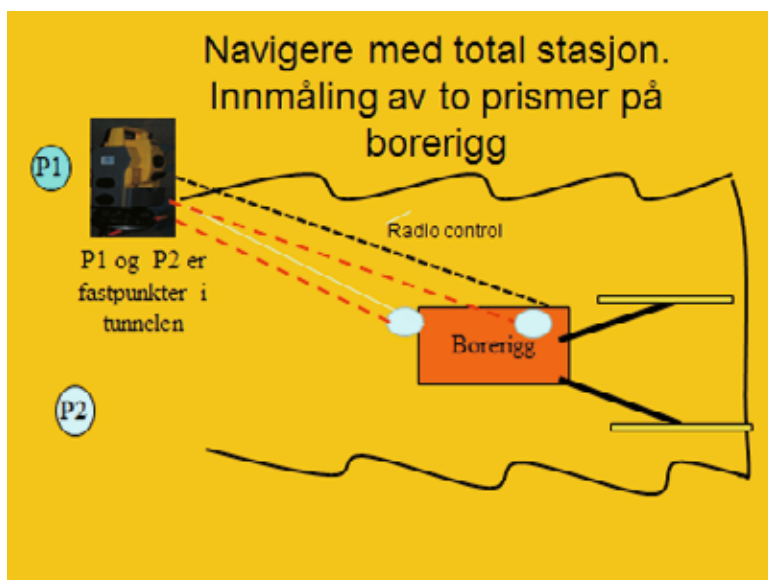
- Rask oppstilling og navigering (3-10min)
- Nøyaktighet på oppstilling blir best mulig (2-5 cm)
- Planer og dokumentasjon blir geo-referert med god nøyaktighet (5-15 cm)



Figur 41: Navigering med profiler og 2 fastpunkter (metode A). Dette er den mest vanlige metode for navigering i Norge.

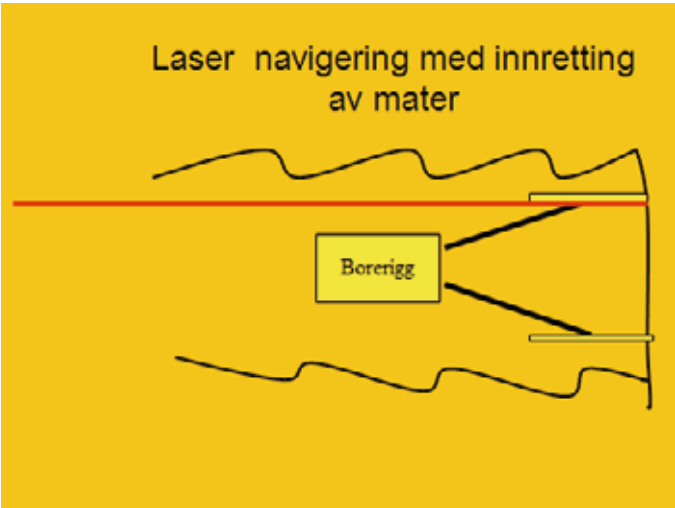


Figur 42: Navigering med profiler og tunnellaser. Dette er en sikker metode som gir noe bedre nøyaktighet ved scanning nær stoff.



Figur 43: Navigering med totalstasjon og radiostyrt innmåling av to reflektorer på boreriggen (metode B). Dette er en nøyaktig og rask metode, men innebærer noe mer kompleks utstyrsbetjening.

Figur 44 viser navigering med tunnellaser. Dette er en metode som kan lett gi store feil og anbefales ikke annet enn som reservemulighet dersom de andre metodene svikter. Det blir lett store feil i pel nummer, og borehullspresisjon har nesten dobbelt feil sammenlignet med metode A og B.



Figur 44: Navigering med tunnellaser. Mater justeres inn i laserstrålen og materfront definerer teoretisk stoff (metode C).

Tabell 7 Oppsummering av navigeringsmetoder, nøyaktighet og tidsforbruk.

NAV. METODE	UTSTYR	NØYAKTIGHET CHASSIS INNMÅLING	NØYAKTIGHET BOM RELATIVT CHASSIS	TOTAL NØYAKTIGHET ANSETT Retning Bunn salve 5m	TID FOR NAVIGERING
Merke stoff med spray og totalstasjon	Spray og totalstasjon	Ingen innmåling		10-20 cm 20-30 cm	30 min
Profiler (Metode A)	Profiler Fastpunkter	4-6cm	5-15 CM	10-20 cm	3 min
Profiler (Metode A1)	Profiler Fastpunkter og tunnellaser	3-5cm	5-15 CM	8-15 cm	3 min
Totalstasjon (Metode B)	Totalstasjon Trimble radiostyrt	1-4 cm	5-15 CM	6-17 cm	2 min
Laser navigering (Metode C)	Tunnellaser	5-15 CM Pel nr 1-2 meter	5-15 CM	15-25 cm Pel nr 0,5-2 meter	3 min
Totalstasjon	Manuell innmåling av chassis	1-3cm	5-15 cm	6-17 cm	15 min

5.2 Autoboring sammenlignet med manuell

Den klassiske automatiske posisjonering er basert på en forhåndsprogrammert sekvens som styrer rekkefølgen for hullboring. Med hyppige endringer i borplaner og tverrsnitt fører det til mye planarbeid som det synes vanskelig å få prioritert på kontoret. Alle leverandørene jobber nå med metoder for bedre auto-posisjonering. Det omfatter mer fleksibel sekvensprogrammering som borer kan bidra til under driften. Autoboringen kan forgå ved

- Automatisk flytting, påhugg (ansett) og boring til neste eller nærmeste hull
- Borer legger inn minisekvens for de nest hull som ønskes boret
- Ved konturboring kan joystick benyttes for mindre justeringer hvis det er ønskelig

Det er utført flere studier av hvordan autoboring påvirker tunnelkontur. Ved institutt for bygg, anlegg og transport på NTNU er det utviklet en egen metode for beregning av ruhet. Metoden kalles IBAs metode, og Pål-Egil Rønn fant ved hjelp av denne at dataassistert boring ga lavere og mindre variasjon i ruheten. Gjennom ulike hovedoppgaver er det også funnet at autoboring kan gi 6-7% mindre overmasse enn ved manuell boring, og at ruheten kan reduseres 8-9 % ved bruk av autoboring.

Tidsbruk trekkes frem som et omdiskutert tema rundt bruk av dataassistert tunnelboring. Riggoperatørene har ofte ment at autoboring tar lengre tid, og at det blir for mye databehandling. I tillegg påviser følgende erfaringer problemer knyttet til bruk av fullautomatisert boring:

- Kollisjon mellom bom og mater
- Boring av kontur og ligg
- Fjellkvalitet
- Jevnhet på stuff
- Parallelle aktiviteter
- Manglende interesse og opplæring av boreoperatører

6 Sprengningstekniske forsøk

Fra 2009 frem til 2012 er det gjort en rekke forsøk med mål for å forbedre tunnelkonturkvalitet. Dette kapitlet oppsummer erfaringer i fra 4 ulike forsøk i Norge.

6.1 Eikremstunnelen på Stor-Krifast

Statens vegvesen har gjort forsøk med konturspregning ved driving av Eikremstunnelen på Stor-Krifast i desember 2010. Forsøkene ble gjort i forbindelse med delprosjekt 7, tunnelutforming, i etatsprogrammet Moderne vegtunneler (Kirkeby 2011).

Forsøkene som ble utført er beskrevet i Tabell 8. De bekrefter at kombinasjonen nøyaktig boring kombinert med 17 og 22 mm rørladninger gir forbedret kontur, noe som gir besparelser på rensk, lasting og sikring. Rørladninger i seg selv er tungvint og relativt kostbart. Slurry har fordeler som rask lading og lite avgasser, men blir ofte ladet for hardt. Rapporten konkluderer blant annet med at detaljerte beskrivelser av hvordan konturspregning skal utføres, samt byggherre-oppfølgning av hvordan den oppnådde konturen er (grad av jevnhet, mengde overmasser) kan bedre tunnelens kontur.

Tabell 8 Bore og ladeplan oppgitt i konkurransegrunnlaget for Eikremstunnelen (etter Kirkeby 2011)

	Kontur 1	Kontur 2	Kontur 3
Hullavstand x forsetning kontur	0,7 x 0,9 m	0,6 x 0,7 m	0,5 x 0,5 m
Sprengstoff	1,1 MJ/m ¹⁾	0,9 MJ/m ²⁾	0,7 MJ/m ³⁾
Hullavstand x forsetning i nest ytterste rast	0,9 x 1,0 m	0,9 x 1,0 m	0,8 x 0,8 m
Sprengstoff	2,5 MJ/m ⁴⁾	2,5 MJ/m ⁴⁾	2.0 MJ/m ⁵⁾

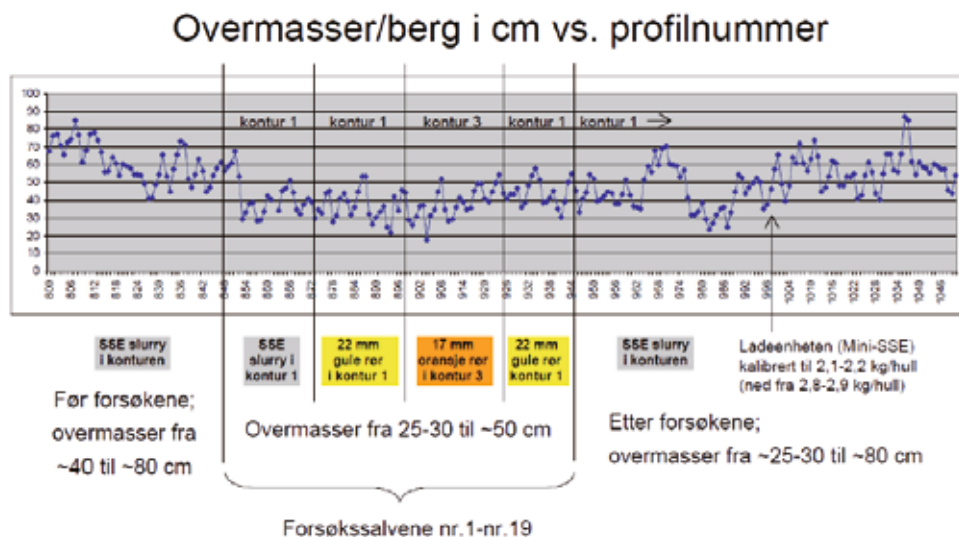
¹⁾Tilsvare 22 mm gule rør eller 0,35 kg SSE/m

²⁾Tilsvare 17 mm oransje rør + 40 g detonerende lunte

³⁾Tilsvare 17 mm oransje rør

⁴⁾Tilsvare 0,80 kg SS/m

⁵⁾Tilsvare 0,64 kg SSE/m



Figur 45 Overmasser fra skanning profil 800 – 1050 i fra Eikreststunnelen. (Kirkeby 2011)

6.2 Jarlsbergstunnelen

I juni 2010 ble det gjort forsøk i Jarlsbergstunnelen hvor man utførte sprengninger med elektroniske tennere, i kombinasjon med 80 g detonerende lunte (Jensen og Hansen 2010).

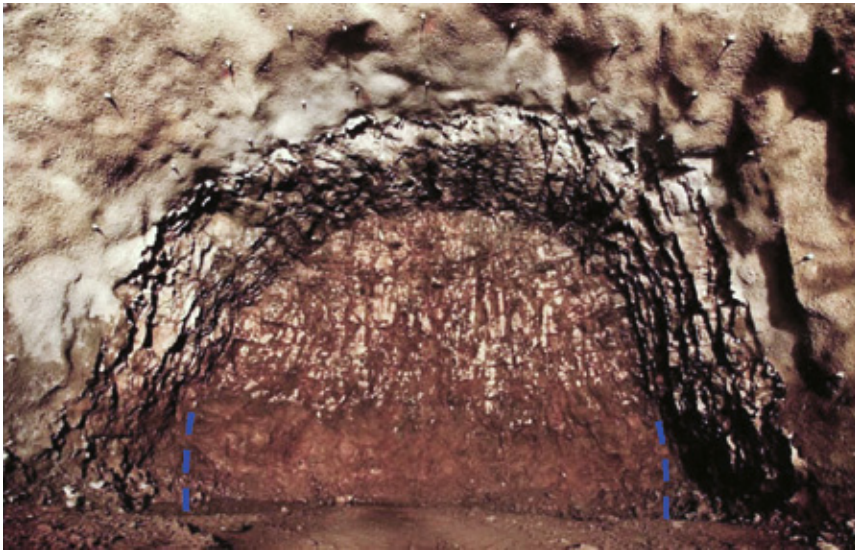
Hensikten med forsøksserien var ikke primært å gi en bedre konturkvalitet, men å vise at kombinasjonen elektroniske tenner og lunte ikke gir lunte i røysa. Kombinasjonen 80 g lunte og elektroniske tennere ga minst skadesone, repeterbar ladning og var lett å lade.

Selve koblingsarbeidet med elektroniske tennere tok noe lenger tid da hver enkel tenner må kobles inn på bussledningen. Etter noe trening ble det anslått at det tok ca 15 - 20 min. merforbruk per salve.

Bruk av detonerende lunte er i dag ikke lov, men det ble gitt dispensasjon til å utføre forsøk. Forbudet skyldes problemer tidligere med udetonert lunte i røysa, som senere detonerte ukontrollert. Det ble i disse forsøkene på seks salver ikke funnet noe udetonert lunte i røysa.

I forsøkssalvene ble kun toppdelen av konturen ladet, men skal man søke et optimalt resultat bør det konturlades helt ned til sålen. Slik bildene av konturen etter testssalvene viser (Figur 46), er konturen pen i øvre del av vegg og i heng, og ikke spesielt pen i nedre del av veggen hvor det er fulladet med bulkemulsjon.

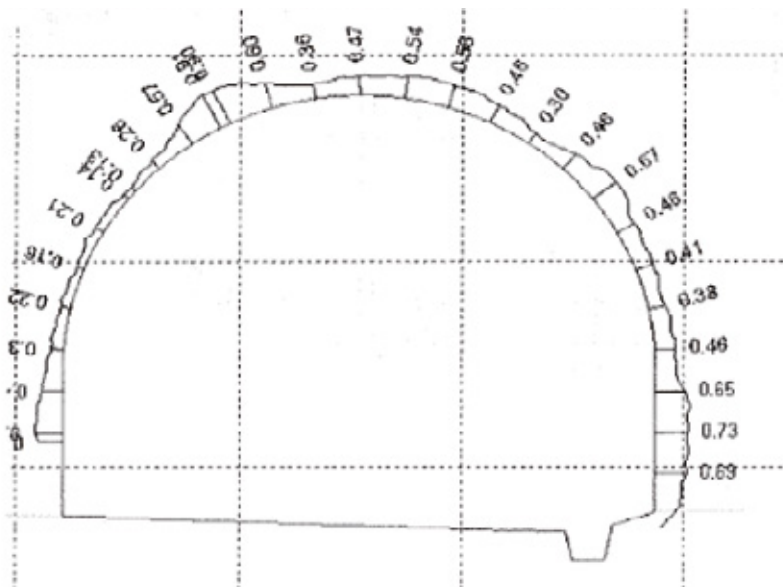
Lademengden i 2. kontur ble ikke redusert, og skadesonen fra fulladede hull er i forslag til ny skadesonetabell (Olson et al. 2008) angitt til å være ca. 1 m.



Figur 46: Skadesonen i veggen ved fulladede hull

Resultater

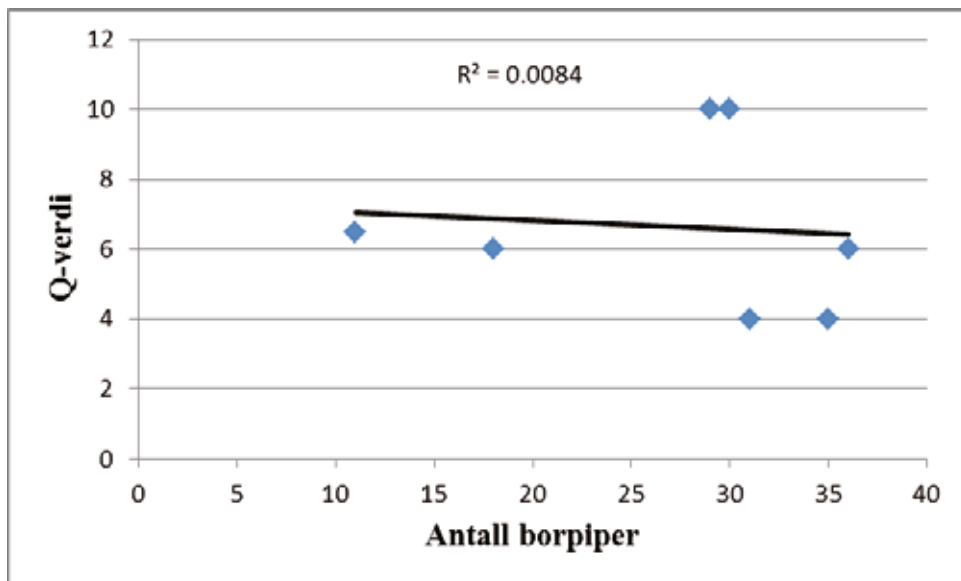
Figur 47 viser et eksempel på scannet profil langs forsøket, mens Tabell 7 oppsummerer resultater for forsøket. En enkel analyse av antall borepiper opp i mot bergmassekvalitet (Q-verdi) indikerer at bergmassekvaliteten har liten innvirkning på antall borepiper for dette forsøket (Figur 48).



Figur 47: Profil pelnummer 11925

Tabell 9: Resultater fra forsøk

Pelnummer	Antall borepiper	Tykkelse sprøytebetong	Antall bolter	Q-verdi
11930-11925	-	10	38	6,5
11925-11920	-	10	39	5,4
11920-11916	36	9,75	33	6
11916-11911	35	10	39	4
11911-11906	31	9,5	33	4
11906-11901	-	10	33	3,5
11901-11897	29	10	26	10
11897-11892	30	-	26	10
11892-11887	18	-	36	6
11887-11882	11	-	37	6,5

**Figur 48 Samsvar mellom antall borepiper og bergmassekvalitet (Q-verdi) for forsøkene i Jarlsbergtunnelen).**

Forsøkene indikerte følgende innvirkning på kostnad (Jensen og Hansen 2010):

- Redusert behov for rensk
- Redusert sikringsbehov, bolter.
- Reduksjon i mengde sprøytebetong
- Reduksjon av overfjellmasse
- Redusert omskyting
- Økte produktkostnader
- Noe lenger tid på koblingsarbeidet
- Mulig behov for flere borehull

Erfaringen fra de 6 forsøkssalvene viser at profilet ble betydelig bedre med elektroniske tennere og detonerende lunte, enn med bulkemulsjon og nonel tennere. Dette vises best ved at antall borpiper i hengen går kraftig opp, samt at hengen visuelt ser sletttere og bedre ut. Det var imidlertid vanskelig å se noen stor endring på profileringsdata før og etter forsøksfeltet. I rapporten foreslås det at dette kan komme av for lav oppløsning av profileringspunkter. Forskjellen i konturkvalitet før og etter rensk kan også muligens tilskrives at ladingen i kontur 2 ikke ble redusert og at skadesonen her var større enn skadesonen fra konturhullene.

Boltebehovet gikk ned, men det er vanskelig å se noen trend på sprøytebetongforbruket. Tid til maskinell- og manuell rensk gikk generelt ned, uten at det finnes detaljerte tall på dette.

6.3 Gevingåstunnelen

Våren 2010 ble det gjennomført fem forsøkssalver i Gevingåstunnelen. I løpet av prosjektperioden ble det gjennomført 5 forsøkssalver med elektroniske tennere i konturen for å undersøke effekten på konturkvaliteten. Hensikten med forsøkene var å verifisere at man fikk en redusert skadesone ved samvirkning av hull. Elektroniske tennere med en presisjon og nøyaktighet under 1 ms ble valgt (Lello 2010).

Det ble også dokumentert resultater på 15 salver i ordinær drift med Nonel i samme periode som referanse. Salvene med elektroniske tennere i konturen ble sammenlignet med disse.

Gjennomføringen av forsøket med de elektroniske tennerne var ikke vellykket. De geologiske forholdene ble forverret sammenlignet med referansesalvene, og det ble observert flere hull i salvene hvor bunnprimeren ble dradd ut av bunnladningen slik at hullene ikke ble initiert. Dette førte til omskyting, mer rensk og økt lastetid (Lello 2010).

For å unngå problemet med uttrekk av bunnprimeren ble flere metoder prøvd ut noe som medførte ekstra koblingstid. Problemet ble løst, men da var også antall prøvesalver nådd. Videre forsøk var ikke aktuelt av hensyn til produksjon.

For de hullene i konturen som detonerte som planlagt, observerte man som forventet flere gjenstående hullpiper, redusert overmasse og mindre rensk.

Resultater fra siste forsøkssalve 5

Siste forsøkssalven med elektroniske tennere hvor alle hull ble initiert og hvor geologien var bedre. Boret lengde for denne salven var 5.8 m. Konturen ble initiert i tre grupper av 8 hull. 8 tennere i venstre vegg og vederlag ble programmert med en forsinkertid på 3800 ms, 8 tennere i høyre vegg og vederlag ble programmert med en forsinkertid på 3825 ms og 8 tennere i hengen ble programmert med en forsinkertid på 3850 ms. Det siste hullet i indrekonturen ble initiert med Nonel LP og en forsinkertid på 3200 ms. Grøften ble initiert til sist med Nonel LP og en forsinkertid på 4800 ms.

Etter at de elektroniske tennerne var ført til bunn av borhullene var det cirka 1,2 m ledning til overs. Den ble buntet sammen og puttet inn i borhullet. Primeren i hullet ble byttet fra Pentex 25F til 200 g Dynamit. En 200 g Dynamit vil lettere kile seg i hullet og motsette seg utdragning.

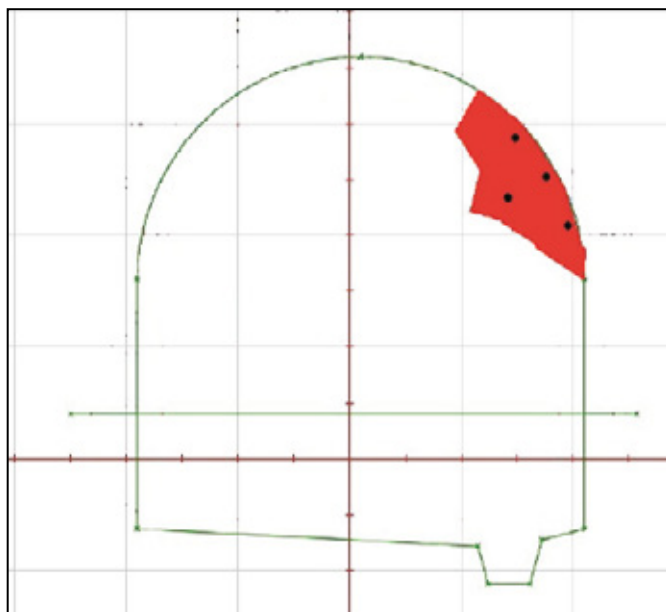
Kartleggingen viser mange stikk både tilnærmet parallelt med tunnelen og tilnærmet vinkelrett på tunnelen. Det er ikke kartlagt noen slepper eller andre større geologiske systemer på salvelengden. Fjellforholdene ser ut til å bedre seg sammenlignet med tidligere.

Observasjoner i fra siste forsøkssalve:

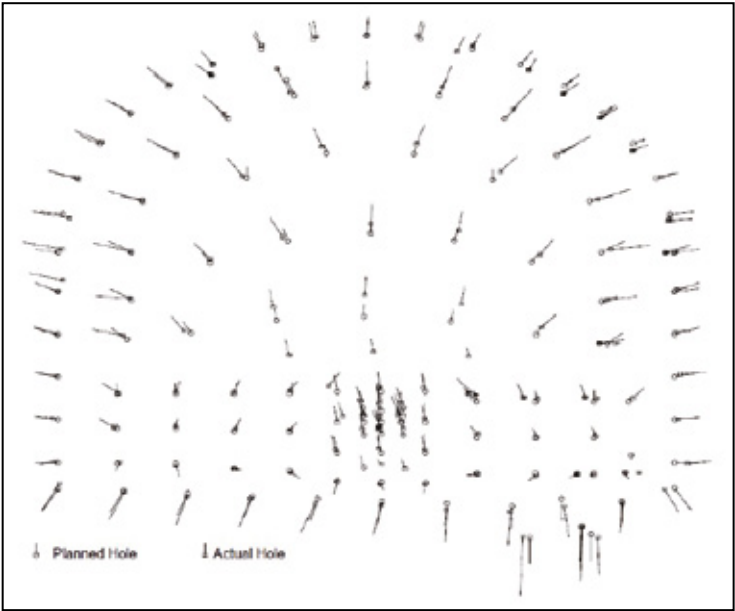
- Tre konturhull og ett indrekonturhull sto igjen.
- Det var ingen brytning ved bunn av hullene.
- Ingen hull hadde gjenstående sprengstoff.
- Det ble ikke gjort funn av udetonerte tennere og primere i røysa.
- Stort boreavvik i form av avbøyning på det gjenstående indrekonturhullet

Skytebas kunne fortelle at det gjenstående indrekonturhullet hadde ett stort boreavvik i form av avbøyning mot en sprekk. Han mente videre at avbøyningen var så stor at forsetningen til hullet ble for stor til at en kunne forvente brytning.

Ut fra nevnte observasjoner er det nærliggende å tro at samtlige tennere og primere detonerte, men siden det var et gjenstående hull fra indrekonturen ble forsetningen til de tre konturhullene for stor. Figur 49 og Figur 50 viser henholdsvis sprengningsresultat før omskyting og borelogg for forsøkssalve 5.

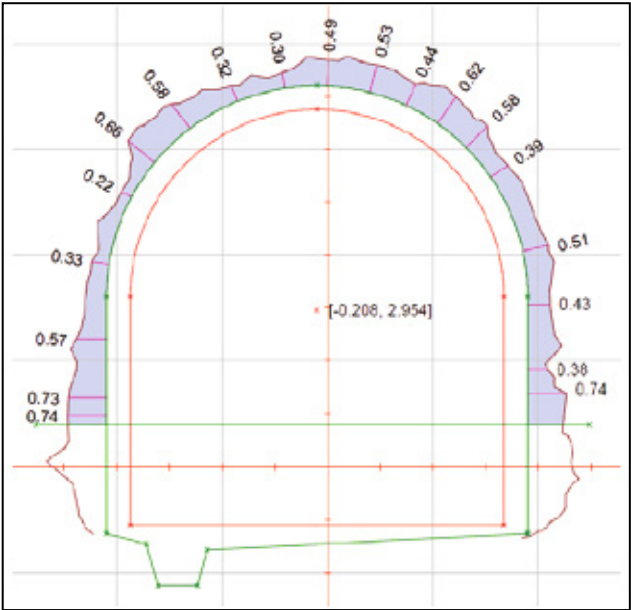


Figur 49: Sprengningsresultat for omskyting



Figur 50: Borelogg forsøkssalve 5

Figur 51 og Tabell 10 viser tverrsnittprofil for forsøkssalve 5, samt sammenligner forsøkssalve 5 opp i mot referansesalver.



Figur 51: Tverrsnittprofil forsøkssalve 5

Tabell 10: Resultater fra forsøkssalve 5 mot referansesalver

Parameter	Forsøkssalve 5	Gjennomsnitt referansesalver
Høyeste overmasse	10.9 m ³ /m	-
Laveste overmasse	6.8 m ³ /m	-
Gjennomsnittlig overmasse	8.6 m ³ /m	11.9 m ³ /m
Andel borepiper før rensk	42 %	-
Andel borepiper etter rensk	27 %	20 %
Maks utslag på rystelsesmåler i kontur	4 mm/s	-
Lade og koblingstid	118 min	82 min
Piggetid	60 min	83 min
Lastetid	140 min	125 min
Teoretisk skadesone (400 g/m)	30 cm	50 cm

6.4 Kvivsvegen

Tidlig i år 2010 ble det gjennomført konturspregningsforsøk i Fyrdsberg tunnelen på E39 Kvivsvegen, i et samarbeide mellom Mesta, NTNU og Statens Vegvesen. (Kirkeby 2010) Forsøkene som ble planlagt og til dels gjennomført er beskrevet i Tabell 11.

Under forsøket var det mye unøyaktig boring, problemer med rørladninger (ikke bruk av detonerende lunte første til knøl og uomsatte rør), for dårlig forberedelse og informasjon til tunneldriverne, samt for dårlig oppfølging underveis i forsøkene (Kirkeby 2010).

I test 3, 4 og 5 ble det brukt rørladninger (ikke bruk av detonerende lunte førte til uomsatte rør og knøl). Ved senere bruk av detonerende lunte bedret det seg med hensyn til uomsatte rør. Rørladninger gir også mye avgass, så i senere forsøk anbefales det i stedet å utvikle løsninger med slurry/emulsjon hvis mulig.

Det ble sprengt fem salver per test. På grunn av feilboring, dårlig fjell og lignende bør det være flere salver per test, slik at man får sikrere resultat og unngår at feilkilder i enkelt salver ødelegger for hele testen. Det ble også konkludert ved at det bør vurderes å redusere antall ulike tester ved senere forsøk, som senere ble gjort i Eikremstunnelen.

Tabell 11: Oversikt over forsøksvariantene som ble utført på Kvivsvegen

Beskrivelse	Bore- og ladeplan nr				
	1	2	3	4	5
Avstand mellom hull i konturrast x konturhull og nest ytterste rast	0,7 x 0,9 m	0,7 x 0,9 m	0,5 x 0,5 m	0,5 x 0,5 m	0,3 x 0,5 m
Redusert lengde på konturrast og nest ytterste rast	0	0,5 m	0	0,5 m	0
Konturrast lades med	Emulsjon SSE 0,35 kg/m 2 kg/hull 6,4 MJ/hull 0,6 kg/m ³ 1,9 MJ/m ³ Nonel LP 6'	Emulsjon SSE 0,35 kg/m 1,8 kg/hull 5,8 MJ/hull 0,6 kg/m ³ 1,9 MJ/m ³ Nonel LP 6'	Rørladninger Dynotex 1 0,20 kg/m 1 kg/hull 3,4 MJ/hull 0,7 kg/m ³ 2,3 MJ/m ³ Nonel LP 6'	Rørladninger Dynotex 1 0,20 kg/m 0,8 kg/hull 2,7 MJ/hull 0,7 kg/m ³ 2,3 MJ/m ³ Nonel LP 6'	Rørladninger Dynotex 3 0,24 kg/m 1,1 kg/hull 1,8 MJ/hull 1,4 kg/m ³ 1,8 MJ/m ³ Nonel LP 6'
Nest ytterste rast lades med	Emulsjon SSE 0,8 kg/m 4,0 kg/hull 12,8 MJ/hull 0,75 kg/m ³ 2,4 MJ/m ³ Nonel LP 5,6'	Emulsjon SSE 0,8 kg/m 3,6 kg/hull 11,5 MJ/hull 0,75 kg/m ³ 2,4 MJ/m ³ Nonel LP 5,6'	Rørladninger Dynotex 1 0,20 kg/m 1 kg/hull 3,4 MJ/hull 0,7 kg/m ³ 2,3 MJ/m ³ Nonel LP 5,6'	Rørladninger Dynotex 1 0,20 kg/m 0,8 kg/hull 6,4 MJ/hull 0,7 kg/m ³ 2,3 MJ/m ³ Nonel LP 5,6'	Rørladninger Dynotex 3 0,24 kg/m 1,1 kg/hull 1,8 MJ/hull 1,4 kg/m ³ 1,8 MJ/kg/m ³ Nonel LP 5,6'

6. Konklusjoner og anbefalinger

Gjennom denne rapporten håper NFF å oppsummere følgende momenter innen konturkvalitet i tunneler.

- Det er en rekke tilgjengelige målemetoder for å kvantifisere tunnelkontur, som gjør oppfølging av tunnelkonturkvalitet mulig uten særlig merarbeid for byggherrer og entreprenører.
- Det er fullt mulig å sprengne tunneler med langt bedre tunnelkonturkvalitet, enn det som gjøres i dag. En bedre kontur kan oppnås ved å ha fokus på nøyaktig boring, og reduserte lademengder i 1. kontur og 2. kontur.
- Det anbefales et insitament til entreprenører som sprenger tunneler med god tunnelkonturkvalitet. Insitamentet bør knyttes opp til scannet totalresultat og ikke borekvalitet. I et slikt insitament ordning vil TCI kunne brukes til å kvantifisere tunnelkontur over hele tunnelen eller delstrekk. TCI eller annen indeks kan implementeres i f.eks. Bever Control software. Alternativt kan en enkel overmasseberegning benyttes som grunnlag for insitament. Det anbefales også at byggherrer og entreprenører måler kontur slik at endringer kan gjøres underveis i tunneldrivingen.
- Ved hyppige endringer i tverrsnitt på grunn av siktutvidelser, ramper, utstyr som skal plasseres så vil parametriserte borplaner være effektivt for å oppnå optimal konturkontroll. Definerte toleranser vil automatisk bli ivaretatt.
- Norske krav etter gjeldende utgave av Vegvesenets håndbok 25 er at ansett skal være 0-20 cm utenfor teoretisk sprengningskontur, mens stikningen skal være maksimalt 3 %. Det kan være hensiktsmessig å plassere ansett i boreplanen ca. 15 cm utenfor kontur og 25 cm i stikning. Det tilsvarer maksimalt 40 cm i bunn salve for 5 meter lange hull. Dersom det er mye plass etter forrige salve så blir det best kontur og mindre hakk hvis ansettet flyttes lenger ut samtidig som stikningen reduseres mest mulig og sikter mot bunn av hullet. Det oppstår av og til større boreavvik som borer må vurdere korreksjon for etter erfaring.
- Det er utfordringer ved den praktiske utførelsen av ladning av kontur. Det anbefales å se på tekniske løsninger og lademetoder som reduserer bunnladningen, samt at man kan kontrollere at ladningsfordelingen i konturhullene blir gjennomført som planlagt.
- Det anbefales også et videre arbeid i analyse på hva en «bedre kontur» vil koste.

Referanser

Andrianopoulos, A., K. Ny klassifiseringsmetode for tunnelkonturen. Definisjon, Analyser, Kriterier og Påvirkning. NTNU masteroppgave 2012.

Blast and Fragmentation Vol. 6, no. 1 2012, Evaluation of emergent electronic detonators and modern non-electric shocktube detonators accuracy.

Jensen, P., Hansen, T., F., Rapport fra forsøk med elektroniske tennere og detonerende lunte ved driving av Jarlsberg-tunnelen. 2010. Tilgjengelig på: <http://www.austin.no/media/11/rapport-elektroniske-tennere-i-kontur.pdf>

Kim Y., Tunnel Contour Quality Index in drill and blast tunnel. NTNU Doctoral theses 2009:197

Kirkeby, T., Konturspregningsforsøk med ulike bore/ladeplaner (Rv. 70 Eikremstunnelen på StorKrifast). VD rapport nr 13. Vegdirektoratet.

Kleiven, E., Tunnelkontur. NTNU fordypningsprosjektoppgave 2010.

Lello, J., M., Konturkvalitet med elektroniske tennere. NTNU masteroppgave 2010.

NTNU, Statens Vegvesen., Konturforsøk – Fyrdstberg-tunnelen. 2010.

Olson, M., Ouchterloney, F. SveBeFo Rapport 65-2003, Ny skadezonsformel for skonsam sprängning, ISSN 1104-1773.

Olson, M., Svärd, J., Ouchterloney, F., Sprängskador for strängemulsion, fältförsök och förslag till skadezonstabell som innehåller samtidig upptänding. 2008. ISSN 1653-5006

Olson, M., Markström, I., Petterson A., Sträng M. Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL, SKB R-09-39). 2009.

Ouchterloney, SveBeFo Report 31-1997, Prediction of crack lengths in rock after cautious blasting with zero inter-hole delay, ISSN 1104-1773.

Ouchterloney, F., Olsson M., Båvik S-O. Perimeter blasting in a 130 m road cut in gneiss with holes with radial bottom slots. Proceedings of the 1st World Conference on Explosives & Blasting Technique, EFFE Munich 6-8 September 2000, Balkema.

Rønn. P.-E., Konvensjonell drift av tunneler, NTNU. Doktoringeniøravhandling 1997:6

Strøm, H., Konturkvalitet i Jondalstunnelen. NTNU fordypningsprosjekt 2010.

Shulin Nie SveBeFo Report 42-1999, Borehole pressure in blast holes. Measurements in granite block versus estimations. ISSN 1104-1773

Vedlegg

Formelgrunnlag beregning av TCI (Kim 2009)

$$TCI_T = \frac{C_T}{W_1 \cdot C_1 \cdot \overline{O_v} + W_2 \cdot C_2 \cdot (1 + 0.001 \cdot \overline{S_d} + 0.001 \cdot \overline{O_v}) + W_3 \cdot C_3 \cdot V_o}$$

$$= \frac{300}{W_1 \cdot 0.006 \cdot \overline{O_v} + W_2 \cdot 0.8 \cdot (1 + 0.001 \cdot \overline{S_d} + 0.001 \cdot \overline{O_v}) + W_3 \cdot 0.02 \cdot V_o} \quad \text{eller}$$

$$\frac{300}{W_1 \cdot 0.006 \cdot \overline{O_v} + W_2 \cdot 0.8 \cdot (1 + 0.009 \cdot \overline{D_d} + 0.001 \cdot \overline{O_v}) + W_3 \cdot 0.02 \cdot V_o}$$

$$W_1 : W_2 : W_3 = 4.5 : 4.5 : 1$$

$\overline{O_v}$ = Gjennomsnittlig overmasse for hele tunnelen

$\overline{S_d}$ = Gjennomsnittlig standardavvik for hele tunnelen

V_o = Variasjon i overmasse i lengderetningen

D_d = Variasjon i pilhøyde mellom snitt langs konturen.

$$C_T = \text{kalibreringsfaktor} = 300$$

Håndbøker fra NFF

- Nr. 1: Fjellinjeksjon. Praktisk veiledning i valg av tettestrategi og injeksjonsopplegg. (kr 200,-)
- Nr. 2: Engineering Geology and Rock Engineering. NBG (kr. 500,-)
- Nr. 3: Arbeidsmiljø under jord. (kr. 150,-)
- Nr. 4: Håndbok for skytebas. (kr. 150,-)
- Nr. 5: Tung bergsikring i underjordsanlegg (kr. 150,-)
- Nr. 6: Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg (kr.150,-)
- Nr. 7: Håndbok for bestiller av bergsprengningsarbeid (kr.150,-)

Tekniske rapporter fra NFF (kr. 100,- pr. stk)

- 01: Redningskammer for underjordsdrift
- 02: Diesel under jord. Sluttrapport fra forprosjektet.
- 02E: Diesel Underground – a project report.
- 03: Sikker sprengning i dagen.
- 04: Plastmaterialer i tunneler og bergrom – sikker håndtering i anleggsfasen.
- 05: - Informasjon, takk! Råd og tips om kommunikasjon i en anleggshverdag.
- 06: Sikker boring gjennom sylte.
- 07: Diesel under jord
- 08: Sikkerhet ved berginjeksjon
- 09: Behandling og utslipp av driftsvann fra tunnelanlegg
- 10: Rescue chamber for underground work. Transl. of techn.rept 1
- 11: Nøyaktig boring
- 12: Konturkvalitet i sprengte tunneler

Norwegian Tunneling Technology

- No. 1: Hard Rock Tunneling
- No. 2: Tunneling Technology
- No. 3: Hydropower Tunneling
- No. 4: Road Tunneling
- No. 5: Tunneling Today
- No. 6: Geology of Norway (a map)
- No. 7: Tunneling Reviewed in the International Press
- No. 8: Subsea Tunneling
- No. 9: Underground Storage
- No. 10: Urban Tunneling
- No. 11: Hard Rock TBM Tunneling
- No. 12: Water Control Tunneling
- No. 13: Health and Safety in Norwegian Tunneling
- No. 14: Norwegian Tunneling
- No. 15: Sustainable Underground Concepts
- No. 16: Underground Constr. for the Norwegian Oil and Gas Industry
- No. 17: Underground Openings - Operations, Maintenance and Repair
- No. 18: Subsea Tunnels
- No. 19: Rock Support in Norwegian Tunnelling
- No. 20: Rock Mass Grouting
- No. 21: Contracts in Norwegian Tunnelling

Fjellsprengningsdagen (Høstkonferansen)

En årlig konferansebok som er kommet fortløpende ut siden 1963.(Flere årganger er utsolgt).

Publikasjoner kan bestilles hos: NFF, Postboks 626, NO-1303 Sandvika
E-post: nff@nff.no



NFF

NORSK FORENING FOR
FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK

e-post: nff@nff.no

ISBN 978-82-92641-26-2