

NORGES STATSBANER

NORDNORGEBANEN
VESTRE LINJE

Spesialstudie for
optimalisering av tunnel-
tverrsnittet for tog i
200 km/t

Sandvika, 18. februar 1992

SPESIALSTUDIE FOR OPTIMALISERING AV TUNNELTVERRSNITTET FOR TOG I 200 km/t

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
1. INNLEDNING	3
2. SAMMENDRAG	3
3. FORUTSETNINGER	4
4. BEREGNINGER/VURDERINGER	4
4.1 Kjørmotstand ved toghastighet 200 km/t	4
4.2 Sprengning og sikring av tunneler	6
4.3 Kostnader	7
5. FØLSOMHETSANALYSE	12
5.1 Kun gunstige parameterendringer	13
6. TUNNELRUHET	14
7. TRYKKENDRINGER VED TUNNELMUNNINGENE	16
8. ANBEFALINGER	16
9. REFERANSER	16

1. INNLEDNING

I forbindelse med utredningen av Nord-Norgebanens vestre linje skal dagens typiske tunnelverrsnitt analyseres i en spesialstudie. Studien skal beregne og beskrive et optimalt tunnelverrsnitt for tog i 200 km/t. Studien er aktuell for flere banestrekninger idet det flere steder bygges nye linjer for fremtidig høyhastighetstog.

Utgangspunktet for studien er å frembringe tall og fakta vedrørende tunnelverrsnittet mht. NSB's høyhastighetskonsept. Vi har således sett på økonomiske aspekter i enkeltsporede, råsprengte jernbanetunneler som vil bli trafikkert med tog i hastighet inntil 200 km/t.

Arbeidshypotesen har vært at dagens tunnelverrsnitt er for trangt og at det vil være økonomisk riktig å utvide tverrsnittet når kjørehastigheten for de hurtigste togene når opp til 200 km/t.

Arbeidet har vært ledet av Berdal Strømme ved prosjektleder Svein Sørheim. Prosjektmedarbeiderne har vært personell fra Berdal Strømme og NSB Engineering. Oppdragsgiver har vært NSB Engineering ved overing. Ove Skovdahl som også har bidratt vesentlig i prosjektet. NSB Engineering har stått for den jernbanetekniske delen av arbeidet, mens Berdal Strømme har stått for prosjektledelse og den anleggstekniske delen.

2. SAMMENDRAG

Studien viser at det for de aller fleste enkeltsporede jernbanestrekninger ikke er lønnsomt å øke tunnelverrsnittet ut fra rent økonomiske betraktninger. For at det skal være lønnsomt å øke tunnelverrsnittet, må trafikkmengden være mye større enn det som en antar trafikken vil bli om noen år når de ulike banestrekningene blir trafikkert av høyhastighetstog i 200 km/t.

Luftmotstanden i norske råsprengte enkeltsporede tunneler er stor. For å kunne klare å holde hastigheten oppe i tunnelene som ofte også har stor stigning, er det mer økonomisk å investere i kraftige lokomotiver enn å øke tunnelverrsnittet.

Studien viser at det ikke er lønnsomt å glatte ut tunnelprofilet ved sprøytebetong, ved utstøping eller ved kledning.

Det kan være lønnsomt å øke tunnelverrsnittet for enkelte sterkt trafikkerte enkeltsporstrekninger der det også er gunstige fjellforhold med lite sikring i tunnelen. For dobbeltsporstrekninger som bygges med to tunnellop, kan det være lønnsomt å utvide tverrsnittet ut over dagens standardtverrsnitt.

En interessant konklusjon er at det for sterkt trafikkerte intercity strekninger ikke er særlig kostbart å øke tunnelverrsnittet dersom det er ønskelig av andre grunner. Beregningene viser at en økning av tunnelverrsnittet med 1 m² totalt koster ca. 40 kr pr. løpemeter tunnel.

3. FORUTSETNINGER/RAMMEBETINGELSER

Denne studien har hatt begrensede ressurser med hensyn til å utføre egne detaljerte undersøkelser. Det har vært en forutsetning at tilgjengelige data skulle samles inn og analyseres. Dersom vesentlige data manglet, skulle en prioritere disse innenfor rammene av studien og eventuelt allokere ressurser til den nødvendige aktivitet.

Selv om tilgjengelig data har vært mangelfull, har betydningen av å ha helt nøyaktige data om bl.a. luftmotstanden ikke vært vesentlig for hovedkonklusjonen i studien.

Studien bygger bl.a. på følgende:

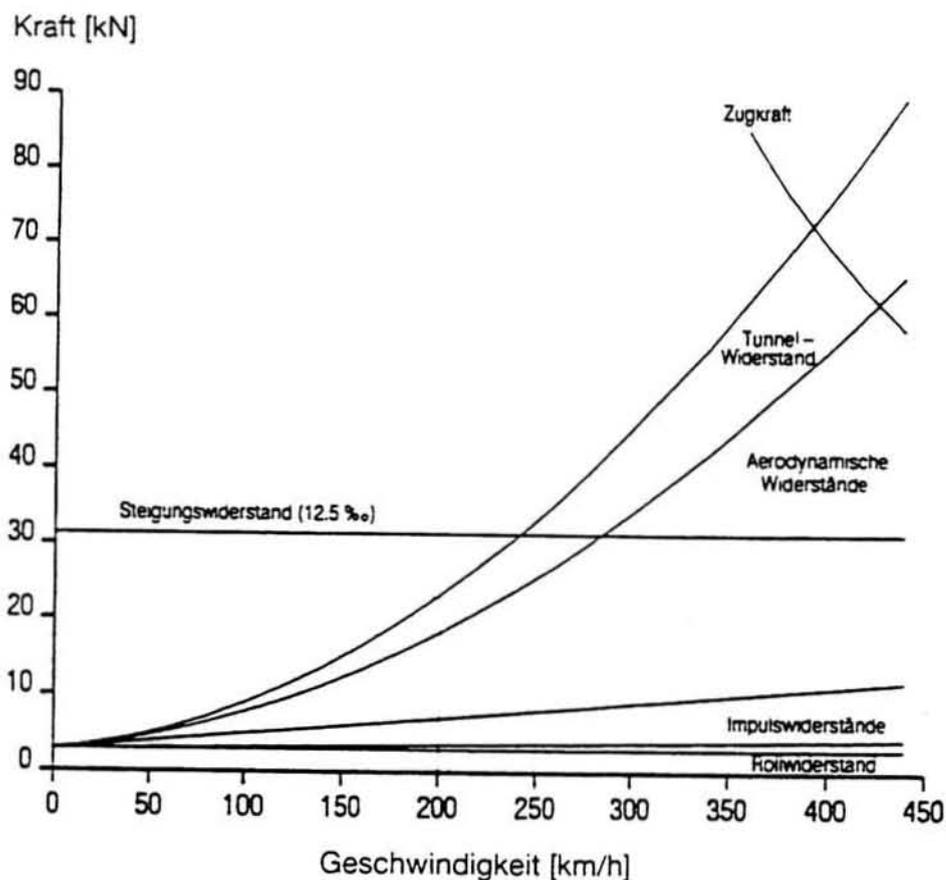
- Enkeltsporet linje
- Toghastighet inntil 200 km/t
- Togene har rimelig gode aerodynamiske egenskaper
- Tog for 200 km/t er trykktette
- Lokomotiv-/togtverrsnittet er 12 m².
- Lokløp pr. år er ca. 500.000 km
- Trekkraften på lokene er stor nok (inntil 6 MW)
- Tunnelene er drevet med konvensjonell sprengning
- Tunnelene er omkring 5 km lange
- Tunnelandel for nye baner er ca. 33 %
- Tunnelkostnadene er normaliserte
- Energikostnadene har markedspris

4. BEREGNINGER/VURDERINGER

4.1 Kjøremotstand ved toghastighet 200 km/t

Kjøremotstanden for et tog består i hovedsak av en luftmotstandsdel, en rulle- og impulsotstandsdel, en kurvemotstandsdel foruten stigningskomponenten. Stigning/fall komponenten er uavhengig av de andre faktorene og kan således legges til eller trekkes fra. For hastigheter omkring 200 km/t vil linjen dessuten ha kurveradier over 2000 - 2400 m slik at kurvemotstanden er neglisjerbar. En står således igjen med en luftmotstandsdel og en rulle- og impulsotstandsdel.

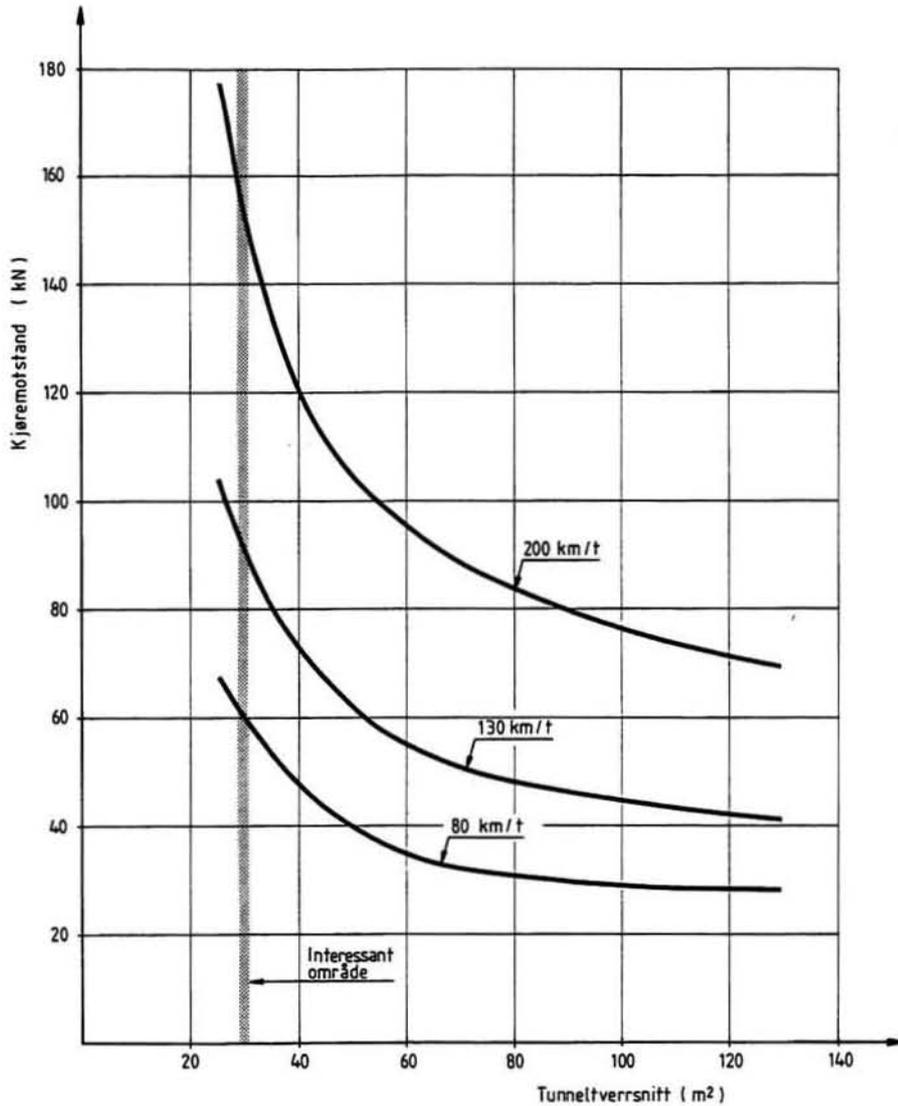
Figur 1 viser motstandskurven for ICE/V-tog som funksjon av kjørehastighet. Tunnelmotstanden er her liten pga. at tunnelen har glatt overflate og i tillegg er dobbeltsporet.



Figur 1. Sammenheng mellom kjøremotstand og hastighet for ICE/V
Ref. [1]

I Norge er det ikke gjort målinger av kjøremotstand i tunneler med tog i hastigheter omkring 200 km/t. Fra litteraturen har vi hentet data som angir kjøremotstand i tunneler med glatt tunnelkontur. For råsprenge tunneler har vi ikke funnet eksakte data, men har forsøkt å anslå verdier. Kurvene vi har gått ut fra har delvis vært togmateriell av ikke helt ny dato (1974), hvilket har gjort det nødvendig å justere kurvene og tilpasse dem i forhold til dagens aerodynamiske tog.

Figur 2 angir de kurvene vi har konstruert og gått ut fra ved våre beregninger/vurderinger.



Figur 2. Kurver for antatt kjøremotstand i råsprengt tunnel for tog i ulike hastigheter

Selv om kurvene i figur 2 ikke skulle være helt riktige pga. manglende data, er det kurvenes forløp og stigningen i kurvene som er det vesentligste.

For norske enkeltsporede jernbanetunneler er det kurvenes stigning i intervallet 30-31 m² (lysåpning) som er av interesse.

4.2 Sprengning og sikring av tunneler

Den vanligste måte å drive norske jernbanetunneler på er ved konvensjonell tunnelsprengning. Pga. høyde/breddeforholdene i jernbanetunneler skal det meget spesielle forhold til for at det vil lønne seg f.eks. å bore tunnelen med TBM-maskiner.

Tilsvarende er rensk, bolting og sprøytebetong de altoverveiende mest vanlige sikringsmidlene brukt i dag. Meget sjelden benyttes full utstøping idet teknikk og metode for sprøytebetongsikring har utviklet seg til et meget høyt nivå i Norge.

4.3 Kostnader

Ved en optimalisering av tunneltverrsnittet er det interessant å studere marginalendringer av faktorene. Dersom besparelsen i energiforbruket og andre besparelser er større enn kostnaden ved å sprengne/sikre en økning av tunneltverrsnittet, vil det lønne seg å øke tverrsnittet. Motsatt vil det lønne seg å redusere tverrsnittet. Imidlertid vil en reduksjon av tunneltverrsnittet være uaktuelt av andre grunner.

4.3.1 Kostnader ved sprengning/sikring i tunnel

Kostnadene ved sprengning av tunnel er rimelig enkelt å anslå. Omfanget av sikringen varierer imidlertid fra tunnel til tunnel. Vi har imidlertid antatt at sikringen av tunnelen i gjennomsnitt utgjør 30 % av sprengning og transport, hvilket vi mener gjenspeiler norske forhold. Tallet stemmer også godt med det som har vært i de store tunnelene som NSB har bygd de siste årene. (Kvålsåsen tunnel ca. 40 %, Finsetunnelen ca. 25 %)

Marginalkostnaden for 1 m² økning av tunneltverrsnittet blir således:

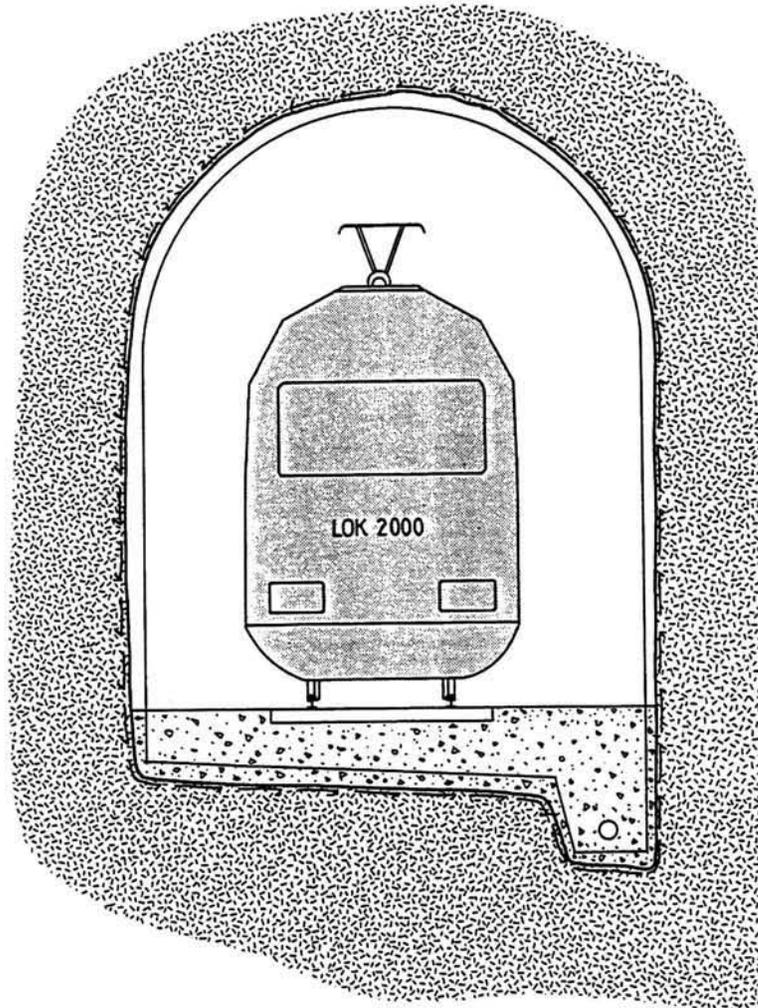
1. Boring, lading, sprengning	kr 65,-
2. Lasting og utkjøring	" 25,-
3. Sikring 30 % av 1-2	" 27,-
4. Rigg og drift 15 % av 1-3	<u>18,-</u>
Entreprisekostnad	kr 135,-
5. Prosjektering, byggeledelse, adm. 3 % av 1-3	" 4,-
6. Avgifter 14 % av 1-6	" 19,-
7. Uforutsett 5 % av 1-4	<u>7,-</u>
Total kostnad	<u>kr 165,-</u>

I noen tilfeller kan tunnelstein være vanskelig å bli kvitt, dvs. det koster med ekstra transport eller lignende. I andre tilfeller er det behov for stein i linjen eller stein kan selges, dvs. at en kan regne at kostnadsøkningen av tunneltverrsnittet er mindre enn det som er angitt over. Vi har i det videre ikke trukket slike faktorer inn i den generelle studien.

4.3.2 Kostnader vedr. kjøremotstand

Besparelsen i energiforbruket ved lavere kjøremotstand (luftmotstand) når en øker tverrsnittet (lysåpningen) med 1 m², kan beregnes ut fra stigningen på kurvene i figur 2.

Et standard tunnelverrsnitt er vist i figur 3. Teoretisk brutto tunnelverrsnitt inklusive grøft er 37 m^2 og minimum lysåpning er $30\text{-}31 \text{ m}^2$.



Figur 3: Standard tunnelverrsnitt for enkeltsporet jernbane. Togverrsnitt for Lok 2000. (Sveits)

Stigning på kurvene i figur 2 vil angi hvor mye energi det vil spares ved å øke tunnelverrsnittet for ulike togkategorier. Stigningen ved $30 - 31 \text{ m}^2$ er ca. $4,0 \text{ kN/m}^2$ for tog i 200 km/t , $2,5 \text{ kN/m}^2$ for tog i 130 km/t og $1,7 \text{ kN/m}^2$ for tog i 80 km/t . Arbeidet som må utføres av et tog i 200 km/t er således 4 kNm/m tunnel. En togpassering med tog i 200 km/t tilsvarer således $0,0011 \text{ kWh}$ og utgjør $0,042 \text{ øre}$ med strømpris $37,7 \text{ øre/kWh}$. Tilsvarende utgjør en togpassering i 130 km/t $0,026 \text{ øre}$ og en passering i 80 km/t $0,018 \text{ øre}$.

Besparelsen pr. tog må multipliseres med antatte trafikkmengder for togkategoriene for å kunne finne den totale besparelsen av å øke tunnelverrsnittet.

Fremtidige trafikkmengder er anslått og sammenstilt i tabell 1.

Tabell 1: Antall tog totalt for ulike banestrekninger og for ulike togkategorier.

	Banestrekning	Høy hastighet 200 km/t	Normal hastighet 130 km/t	Godstog 80-100 km/t	Totalt antall tog
Innerstrekning		50	50	10	110
Ytterstrekning	IC	32	8	20	60
Ytterstrekning	IC	20	20	20	60
Ytterstrekning	BRG/DOV/ SØRL.	8	8	8	24
Ytterstrekning	NORD/RØR	4	4	8	16

Når det gjelder innerstrekningen, antas det at trafikkmengden krever dobbelsportrasé, og antall tog er angitt i hver retning. I noen tilfeller kan det likevel være aktuelt å bygge to enkeltsporede tunneler.

Kjøremotstanden i tunnelen for normalhastighetstog og godstog er mindre enn tog i 200 km/t, men vil bidra en god del i besparelsene. Årlig besparelse vedrørende kjøremotstand i tunnel er satt opp i tabell 2.

Tabell 2. Besparelser i kjøremotstand (luftmotstand) ved økning av tunnelverrsnittet med 1 m². Kapitaliseringsfaktor 12,4

Antall tog pr. døgn av hver kategori	8 à 200 8 à 130 8 à 80	20 à 200 20 à 130 20 à 80	32 à 200 8 à 130 20 à 80	50 à 200 50 à 130 10 à 80
Typiske banestrekninger	BRG/DOV SØR	IC- strekn.	IC- strekn.	Inner- strekn.
Besparelse pr. år (kr)	2,5	6,3	7,0	13,1
Kapitaliserte besparelser (kr)	31	78	86	162

4.3.3

Andre forhold

Noen andre forhold enn tunnelkostnader og luftmotstand må tas i betraktning. Dette er først og fremst besparelser ved antall feste-punkter for kontaktledningsanlegget som kan reduseres ved at avstanden mellom festepunktene øker når tunnelverrsnittet øker.

Dernest er det besparelser på materiellsiden både i investering og i drift og vedlikehold.

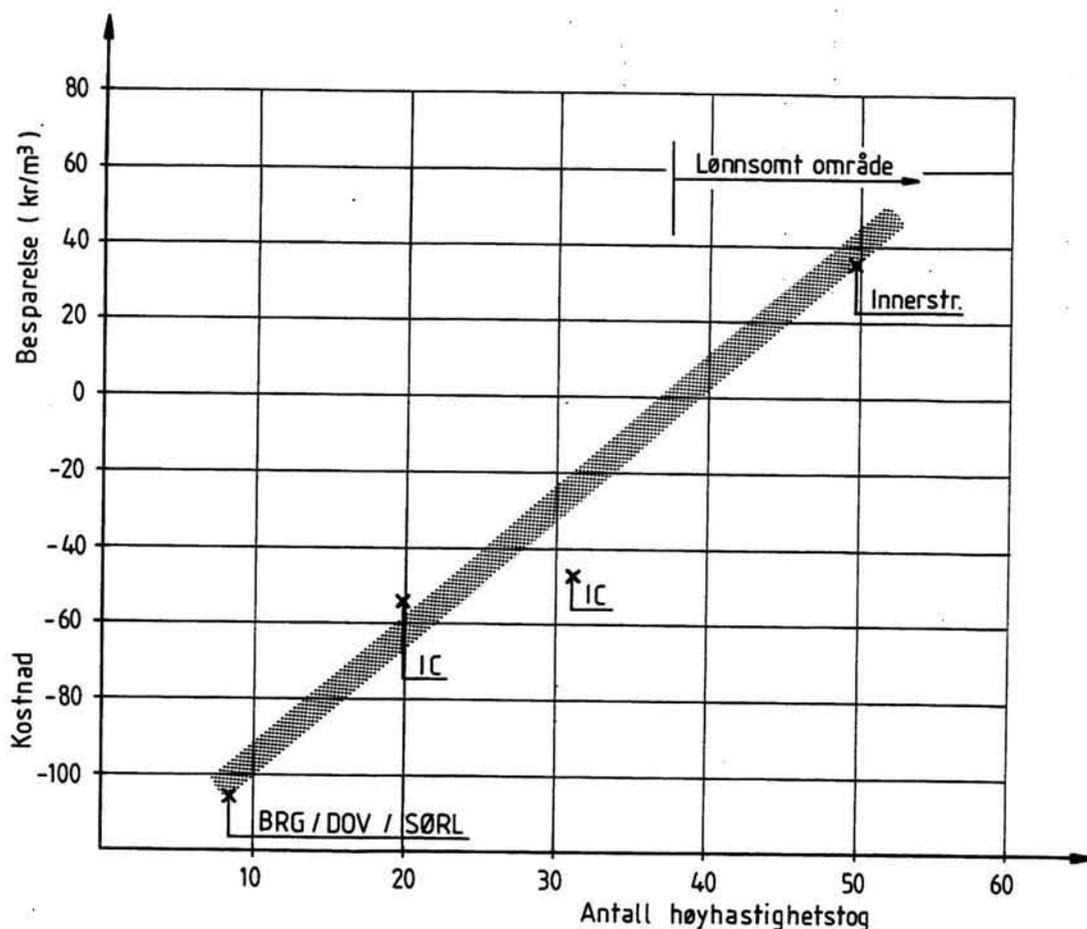
Kontaktledningsanlegget kan i en høyere tunnel ved tunnelverrsnitt ca. 41 m² ha like lang avstand mellom festepunktene som mastefundamenter i dagen. Det vil medføre at en kan øke avstanden fra ca. 45 m til ca. 60 m mellom festepunktene. Når kostnaden for et festepunkt er ca. 20.000 kr/stk. utgjør dette ca. 30 kr/m² økt tunnelverrsnitt.

Dersom tunnelverrsnittet gjøres større og dermed kjøremotstanden mindre, kan en minske installert effekt i lokomotivene. Besparelsen utgjør imidlertid meget lite, anslagsvis 1 kr/m² ved 10 høyhastighetstog og 3 kr/m² ved 30 tog.

Påkjenningen på rullende materiell antas å være større i et mindre tunnelverrsnitt enn i et større. Denne besparelsen har vi imidlertid ikke forsøkt å kvantifisere.

4.3.4 Sammenstilling

Dersom vi sammenstiller de forhold vi har utledet over, ser vi at besparelsen er meget avhengig av trafikkmengden. Vi har følgende sammenheng mellom kostnad/besparelse og trafikkmengde, jfr. figur 4.



Figur 4. Lønnsomhetskurve for utvidelse av tunneltverrsnittet fra 30 til 31 m² angitt som antall høyhastighetstog.

Av figuren ser vi at trafikkmengden må være større enn 35 -40 høyhastighetstog pr. døgn for at det skal være lønnsomt å øke tunneltverrsnittet.

Denne trafikkmengden forekommer ikke i dag og vil sannsynligvis heller ikke forekomme i overskuelig fremtid på mange banestrekninger. Dessuten vil en slik trafikkmengde med høyhastighetstog og annen blandet trafikk kreve dobbeltsporet jernbane.

I spesielle tilfeller vil en imidlertid kunne ha to enkeltsporede tunneler, en i hver retning, i stedet for en dobbeltsporet tunnel i sterkt trafikkerte områder. Her må en være oppmerksom på at årsaken til å velge to enkeltsporede tunneler kan være vanskelige grunnforhold. I slike tilfeller vil det likevel ikke være lønnsomt å øke tunneltverrsnittet selv om trafikkmengden er stor pga. høyere kostnad for sprengning og sikring enn det som er forutsatt i denne studien.

5. FØLSOMHETSANALYSE

De viktigste parametrene i denne analysen er;

- Kjøremotstandsendringen, dvs. stigningen på kurven i figur 2
- Kostnadene ved sprengning og sikring
- Energiprisen
- Kapitaliseringsfaktoren
- Trafikkmengden

Kurven for kjøremotstanden som funksjon av tunnelverrsnittet er trukket på bakgrunn av sammenlignbare data og tilpasset norske sprengte tunneler. Kurven kan tenkes å være feil enten ved at stigningen er brattere eller slakere.

Kostnadene ved sprengning og sikring varierer lite fra år til år og er en parameter vi har rimelig god kontroll med. Tendensen de siste årene er at kostnadene i reelle kroner har gått ned. Nedgangen har vært såvidt stor at få eller ingen entreprenører tjener penger på tunneldrift i øyeblikket. Sannsynligheten for at prisene vil stige antas å være større enn at prisene vil fortsette å synke. Imidlertid er det marginalprisen vi betrakter i denne studien, og denne er mindre følsom for endringer i prisnivået for tunnelsprengningen totalt.

Energiprisen er NSB's kalkulasjonspris inklusive avgifter. I utgangspunktet er dette riktig pris idet den er normalisert i forhold til ulike priser på kraftleveranser til NSB fra ulike energiverk. Prisen er altså markedspris.

For tiden foregår en omstilling av energimarkedet til et mer liberalistisk marked. På kort sikt (1 - 2 år) kan det være mulighet for mindre monopolsituasjon for de enkelte energiverk ved at kunder (spesielt store kunder) fritt kan kjøpe elektrisk kraft fra hvilket som helst energiverk. På denne bakgrunn er det grunn til å anta at energiprisen vil synke.

Imidlertid er det kostbart å bygge ut ny elektrisk kraft fra vannkraftverk eller andre kilder. Energi fra oljeprodukter antas å bli dyrere også pga. miljøavgifter. Dette samlet vil presse prisen på elektrisk strøm oppover på lang sikt. Det er likevel lite trolig at prisen på strøm vil stige dramatisk de nærmeste årene.

Kapitaliseringsfaktoren vi har benyttet er 12,4 og fremkommer som faktor for nåverdien av en annuitet over 30 år med effektiv rente på 7 %. Å benytte 30 års horisont for en samfunnsmessig investering er vanlig. Likeledes er 7 % realrente akseptert som en målestokk for en god investering og er fastsatt av Finansdepartementet som kalkulasjonsrente ved all offentlig virksomhet.

Ved å akseptere en mindre god investering kan realrenten settes til f.eks. 4 %. I norsk industri er dette vanlig akseptabel inntjening. Kapitaliseringsfaktoren vil da bli 17,2 i stedet for 12,4.

5.1 Kun gunstige parameterendringer

Vi kan beregne lønnsomheten i to ytterpunkter der en i det ene tilfellet lar alle parametrene virke i gunstig retning. I det andre tilfellet lar en alle parametrene virke i ugunstig retning. For oss er kun det ene tilfellet interessant idet en ved å la alle parametrene virke i ugunstig retning bare vil finne ut at lønnsomheten er enda mer ugunstig enn det som er vist i figur 4.

En beregning av parametrene i kun gunstig retning kan være;

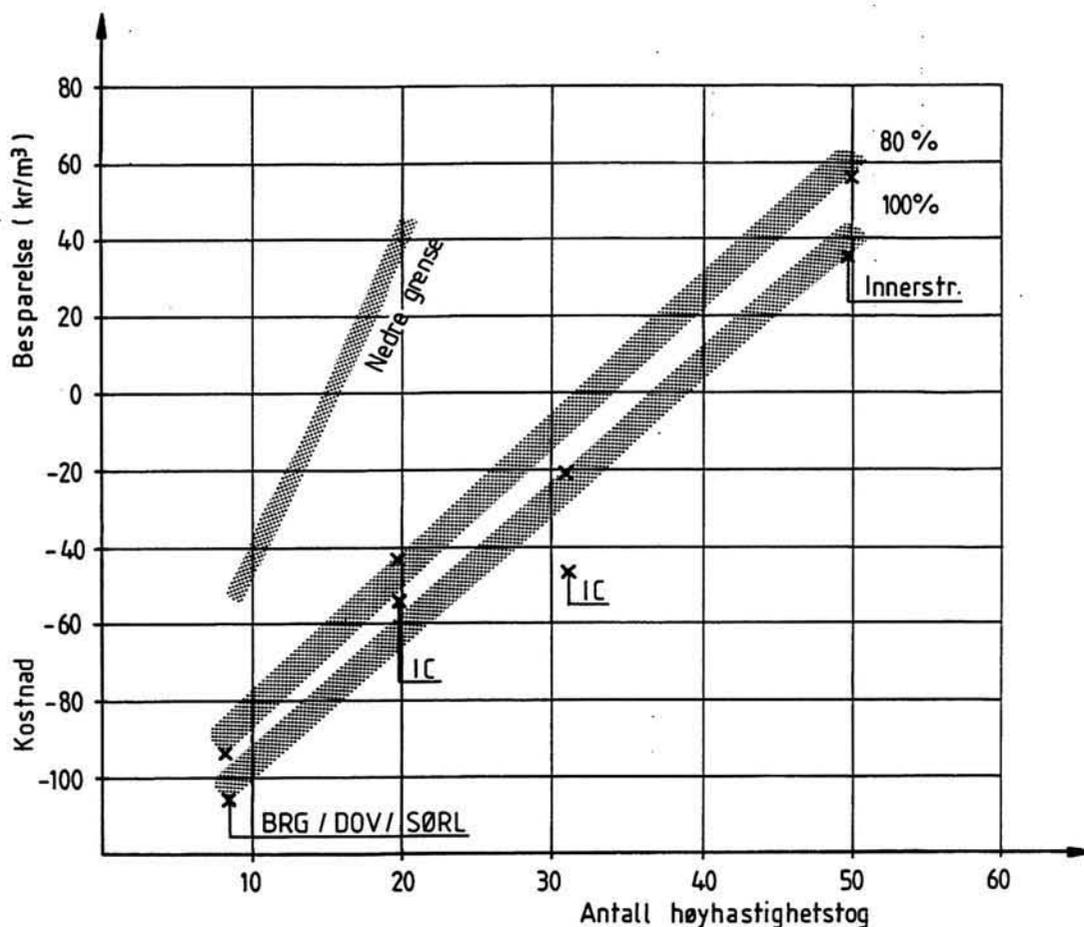
- Stigning på kurven for kjøremotstanden er 20 % brattere
- Kostnadene ved sprengning/sikring reduseres med 10 %
- Energiprisen øker med 15 %
- Kapitaliseringsfaktoren settes til 17,2 i stedet for 12,4.

Sjansene for at alle gunstige parameterendringer slår til samtidig og i så stor grad er meget liten. Vi antar for enkelhets skyld at dette representerer nedre grense.

En annen beregning av parametrene i noe mindre gunstig retning kan være:

- Stigningen på kurven for kjøremotstanden er 10 % brattere
- Kostnadene ved sprengning/sikring reduseres med 5 %
- Energiprisen øker med 5 %
- Kapitaliseringsfaktoren er fortsatt 12,4

Dersom vi antar at dette utgjør 80 % persentilen, får vi følgende bilde av lønnsomheten, jfr. figur 5.



Figur 5. Lønnsomhetskurve for utvidelse av tunneltverrsnittet fra 30 m² til 31 m² med ulike gunstige parametre.

Sjansen for at kun gunstige parametre slår til samtidig er meget liten. Konklusjonen er således at det å øke tunneltverrsnittet ikke er lønnsomt ved de små trafikkmengdene en har av høyhastighetstog på enkeltsporede jernbanestrekninger.

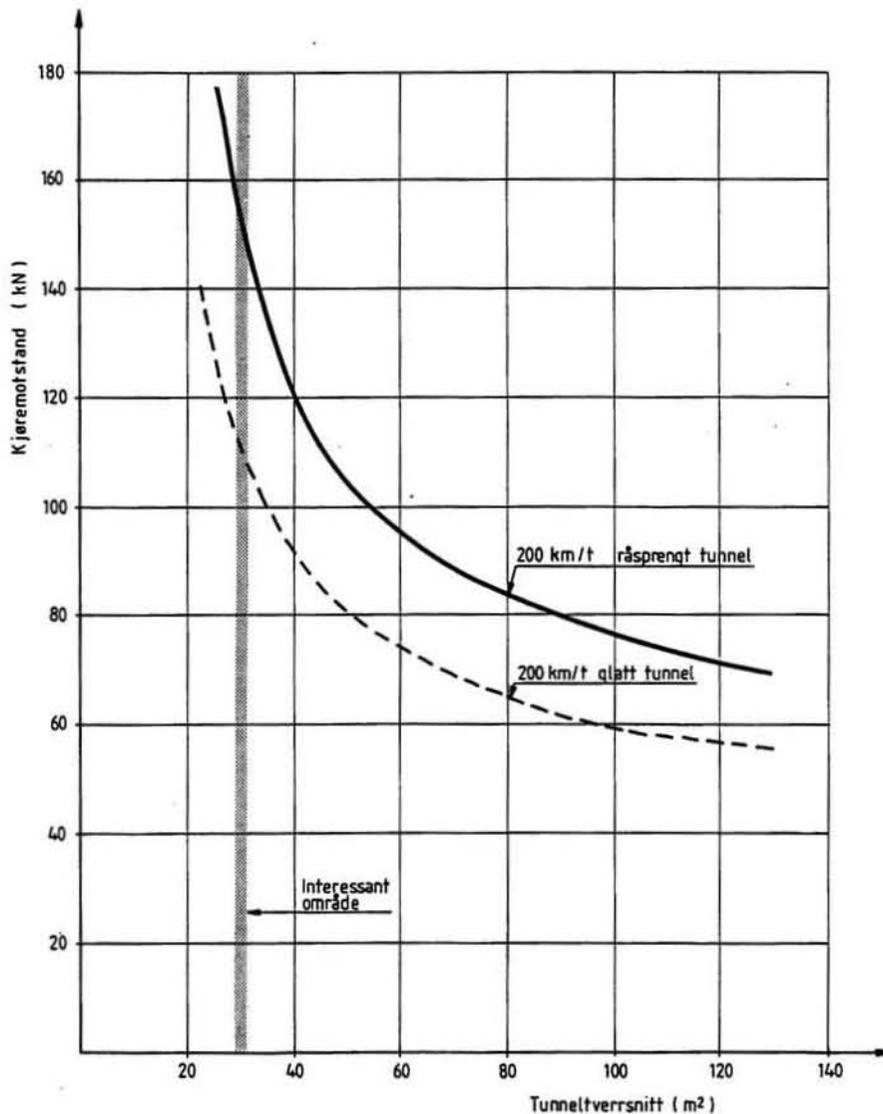
Muligens kan det på noen IC-strekninger i meget godt fjell med liten sikring og eller at tunnelsteinen kan benyttes på positiv måte, være lønnsomt å utvide tunneltverrsnittet.

6. TUNNELRUHET

En sprengt tunnel vil ha en mye større ruhet enn en utstøpt tunnel med samme tverrsnitt. Følgelig vil luftmotstanden være mindre i en glatt tunnel.

Spørsmål har vært reist fra tid til annen om det er lønnsomt å støpe ut eller glatte ut tverrsnittet med sprøytebetong eller lignende.

Figur 6 viser forskjellen i kjøremotstand mellom en råsprengt og en glatt tunnel for tog i 200 km/t. Tilsvarende vil det være en forskjell i kjøremotstand også for tog i 130 km/t og 80 km/t.



Figur 6. Kjøre motstand for sprengt tunnel og glatt tunnel

Av figuren kan en lese at forskjellen er 40 - 50 kN for tog i 200 km/t. For de andre togkategoriene er summen ca. 30 - 40 kN. For hver meter tunnel kan en således investere ca. 1.100 kr ved 30 høyhastighetstog pr. døgn, ved samme parameter som i kap. 4.3.

Kostnaden for å støpe ut en tunnel er i størrelsesorden 20.000 kr/meter tunnel. For å glatte ut tunnelen med sprøytebetong vil det medgå i størrelsesorden 3 m³/m til en kostnad av ca. 3000 kr pr. meter tunnel. I begge tilfellene er det altså ikke økonomisk å redusere kjøre motstanden ved å øke tunnelverrsnittet.

En eventuell tunnelkledning vil også komme på i overkant av 9.000 kr og vil falle ugunstig ut.

7. TRYKKENDRINGER VED TUNNELMUNNINGENE

Trykkendringene ved tunnelmunningene er ikke vurdert spesielt siden tog i 200 km/t forutsetter trykksterke tog, jfr. rapport [3]. For tog i 130 km/t er trykkendringen akseptabel for de fleste.

8. ANBEFALINGER

På bakgrunn av resultatene i studien er det grunnlag for å vurdere tunnelverrsnittet ut ifra den ulike trafikkmengden forskjellige banestrekninger har. Det kunne muligens være grunnlag for å differensiere tunnelverrsnittets størrelse på samme måte som vegvesenet deler sine veger og tunneler inn i vegklasser.

9. REFERANSER

- [1] PETERS, Jean-Luc; "Bestimmung des aerodynamischen Widerstandes des ICE/V im Tunnel und auf freier Strecke durch Auslaufversuche." ETR 39, September 1990.
- [2] GACKENHOLZ, Ludwig Von; "Die aerodynamischen Verhältnisse im Tunnel als Kriterium für die Planung und den Bau von Tunnelen auf Neubaustrecken", ZEV-Glas. Ann. 98 Nr. 9, 1874.
- [3] NSB Engineering; "Gardermo-banen, rullende materiell." Rapport Juni 1991.

Sandvika, 18. februar 1992
Berdal Strømme a.s.



Svein Sørheim

JERNBANEVERKET
BIBLIOTEKET



104075