

HØYHASTIGHETS JERNBANE I NORSK TERRENG

Noen karakteristiske trekk ved
grunnforhold og topografi og
tilpassede løsninger og kostnader

Siv. ing. Anders Beitnes, SINTEF
Tekn. Dr. Roger Olsson, NGI

August 2007

Bakgrunn og hensikt

Jernbanelaget gjennomfører på oppdrag av Samferdselsdepartementet en omfattende evaluering av konsepter for høyhastighets jernbane i Norge, i stor grad ved hjelp av ekstern ekspertise, bl.a. fra Tyskland for å sikre integritet i vurderingene. SINTEF og NGI er invitert med i prosessen med fagkompetanse på geoteknikk og anleggsteknikk. Tekniske krav og fysiske forhold som dette gir oss innblikk i, har stor betydning for løsninger og kostnader. Vi har derfor blitt bedt om å forklare noen av de sentrale sammenhengene på generelt grunnlag.

Funksjonskrav

Den "klasse" av jernbane som er aktuell i Norge, er ikke akkurat høyhastighet i internasjonal betydning, der det nå gjøres forsøk med togfart over 500 km/t; det er heller snakk om en type middels høy hastighet med samme togtype som våre nyeste fjerntog og Flytoget, med toppfart opp mot 300 km/t. Ordinær fart på 250 - 270 km/t vil være nok til å sikre at reisetid mellom de største byene blir konkurransedyktig med flyreiser.

Det er ikke togteknologien, men baneutbyggingen som er det kritiske elementet. For å kunne kjøre tog i slik fart, må sporet ha slake svinger med minste kurveradius omkring 2,5 km og lange overgangskurver.

Det må også forutsettes meget stabilt underlag som ikke lar seg deformere verken av last eller klimapåkjenninger og det må være høy sikkerhet mot at fremmedlegemer kan komme i sporet. Dette krever usedvanlig omfattende sikringsarbeid i tunneler og skjæringer, sterke og stive fundamenter og totalt separerte korridorer med planfrie kryssinger der banen går i friluft.

Stigningsgraden på jernbane er normalt ikke mer 1,25 % for at godstog skal kunne føres fram, men hvis det bare skal kjøres persontog, forstår vi at stigninger på inntil 3 % kan aksepteres. Det kan bety mye for om man i det hele tatt finner mulige traseer og det vil bety mye for kostnadene.

En bane kan godt bygges med enkeltspor, noe som også betyr mye for kostnadene, men 12 – 15 km lange møtestrekninger, som jernbanefolkene kaller kryssingsspor, må anlegges på bestemte steder for å passe med rutetidene til tog som møtes i fart. I en så rigid togruteplan som dette konseptet krever, er det lite rom for stopp underveis og blanding med andre togtyper. Vi forstår jernbaneekspertene slik at godstrafikk må bygges ut langs eksisterende baner og at persontrafikk med raske tog i all hovedsak må ha banestrekningene for seg selv. Selv med dobbeltspor er det ikke blandet trafikk på høyhastighetsstrekningene i Tyskland. Det vi legger til grunn i det etterfølgende er derfor en maks stigning på 3%.

For at vedlikehold skal kunne gjennomføres uten å forstyrre togdriften, må det henimot overalt finnes en driftsadkomst utenfor sporet, gjerne i form av en veg som bygges parallelt i terrenget og inn til alle brufundamenter og tunnelåpninger. De lange tunnelene (mer enn ca 1,5 km) må ha drifts- og rømningsveg i form av en parallell tunnel.

Vi skal se litt på hva slike funksjonskrav fører til i ulike, typiske norske terrengetyper.

"Flatt" lavland på Østlandet.

Dette er terreng som er karakterisert av at det har vært sjøbunn inntil for 8 – 10 000 år siden og de løse jordlagene består mye av leire og silt. Dette er jordarter som trykkes sammen når

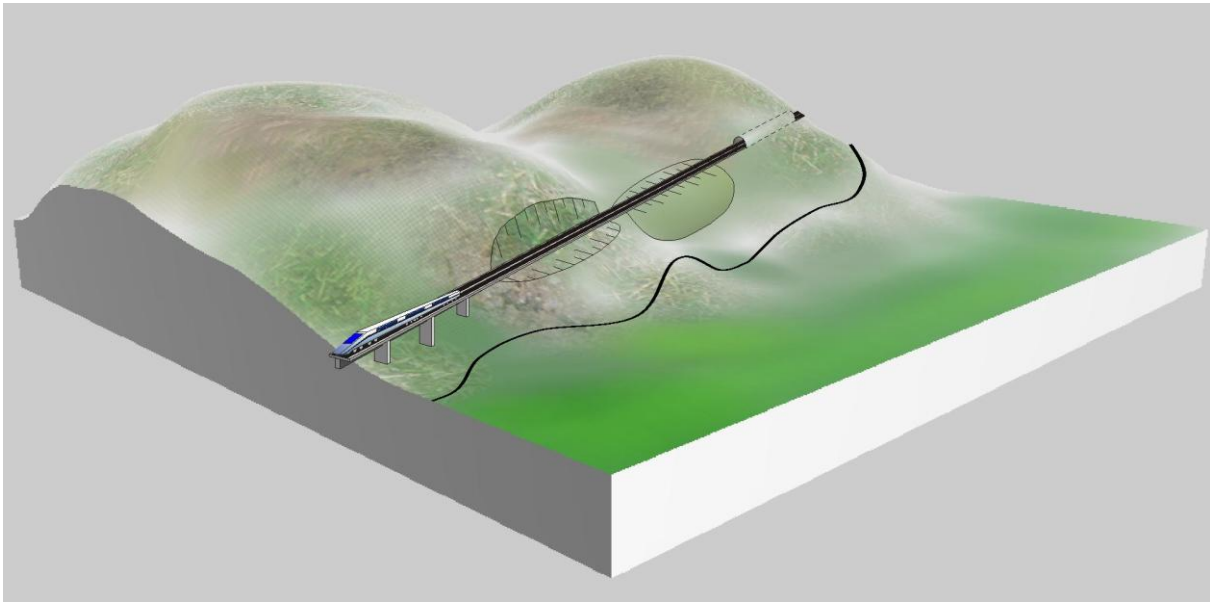
de utsettes for økt belastning eller drenering, som blir ustabile i bratte skråninger og som er utsatt for telehiv når de fryser. Selv i det vi oppfatter som stort sett flatt terreng er det mange steder terrasser i ulike høyder, eller det er skrånende terreng som er brattere enn 3%. Elver og bekker har mange steder gravet ut et ravinelandskap. Dertil kommer at dette er fruktbart jordbruksland og /eller allerede tett utbygd med annen infrastruktur. De oppstikkende bergformasjonene kan ha bra kvalitet, men vi må regne med at der bergoverflaten ligger lavt, er det svakt og forvitret berg som isen i sin tid lett kunne grave ut.

Resultatet for jernbane med strenge tekniske krav blir omfattende grunnforsterkning, mye planfrie kryssinger av veg og vilttrekk og gjennom oppstykkede jordbruksarealer. Bruer over elver og ravedaler krever omfattende fundamenteringsarbeid. Skjæringer, fyllinger, miljøtunneler og inngang til bergtunneler krever store terrenginngrep. Alt dette er konfliktskapende i lokalmiljøene og nødvendige avbøtende tiltak kan bli minst like dyre som selve banen. Tvinges man til dypereliggende tunnel, slik som den nye banen mellom Skøyen og Asker, må en regne med kostbar tunnelbygging på grunn av omfattende sikringsarbeid i berg av dårlig kvalitet, for å gjøre tunnelene tilstrekkelig tette mot grunnvannsdrenering og for ikke å skape rystelsesskader.

Dalsider på Østlandet og i Trøndelag

Dalbunnen i de fleste dalførene er oftest så opptatt av jordbruk, infrastruktur og bevaringsverdige landskap og biotoper at en ny bane tvinges til å ligge i dalsidene eller inne på åsrygger og skogsterreng langs dalene. Det blir også lange strekk der banen må bruke dalsiden for å "klatre" opp fra lavlandsnivå til høyfjellsplatået. Dalsider blir derfor en typisk terrengtype som skaper egne utfordringer for en stiv jernbanelinje med strenge tekniske krav. Typisk er det også at nesten ingen lange dalstrekninger (med unntak av Østerdalen) har så slak kurvatur at en høyhastighets bane kan bygges uten omfattende andel tunneler ut og inn av dalsiden. Ser vi på detaljerte kart, ser vi også som et typisk bilde at dalsideterrenget bukter seg inn og ut og stykkes opp av bekkeløp med raviner og til dels dype sidedaler. Der skråningene er bratte (for bratte til å dyrkes), er det ofte enten utstikkende bergnabber, ur på rasvinkel eller morenebakker som er avhengig av skogvegetasjon for å være stabile mot erosjon. De typiske terrengtypene vi finner i skogsområdene langs og mellom dalførene har enda mer kupert terreng med lokale høydeforskjeller som blir problematiske for gjennomføring av en stiv jernbanelinje.

Optimale banelinjer vil få mange dype skjæringer og høye fyllinger. Men det kreves slake skråninger for å oppnå akseptabel stabilitet og da blir det store terrenginngrep og mange steder uakseptable sår i landskapet. Se illustrasjon i firur 1.



Figur 1. Stive jernbanelinjer i dalsider kan gi uakseptable terrenginngrep.

Resultatet når det kommer til stykket blir nok enda mer tunnel. Selv det er ikke uten utfordringer, blant annet fordi den stive linjeføringen hindrer oss i å velge traseer med de gunstigste bergforholdene, og fordi inngangspartiene med spiss vinkel til dalsiden medfører kompliserte anlegg og lange betongtunneler som må fylles over igjen. Et annet alternativ kan være å føre banen på ”stylter” (bru/viadukt) gjennom terreng som ikke tåler tradisjonelle inngrep, men med de løsningene vi har erfaring for i dag gir det svært høye kostnader.

Høyfjellet

På høyfjellsplatåene kan det være gunstige terrengforhold på lange delstrekninger. Her kommer imidlertid andre hensyn inn. Regulariteten i togplanene krever god beskyttelse mot drivende snø, noe som enkelte steder bare kan sikres med overbygg eller en linje som ligger 2 – 3 m over bakkenivå. Noen steder må en også regne med utfordringer knyttet til myrterreng og teleutsatt silt i bresjøavsetninger. Aktuelle strekninger vil dessuten gå gjennom verneverdige biotoper og viktige områder for villrein, eller det kan oppstå konflikter med etablert fritidsbebyggelse slik som langs Ustevann for en ny Bergensbane.

Vestlandet

Høye fjell og dype fjorder med et veldig begrenset areal som er flatt og rettlinjet nok til bane i terrenget, tvinger nesten alle alternative linjer til å gå i lange bergtunneler. Det gjelder også for traseen som i hovedsak følger eksisterende jernbane over Voss. Forholdene for tunnel i berget kan være bedre enn på Østlandet og i Trøndelag, men ikke uten utfordringer knyttet til sprakefjell, konfliktskapende anleggsvirksomhet og lang byggetid. Åpen linje i forholdsvis flatt terreng, slik som på Sveio, vil medføre mye bergsprengning i knauser og stadig krysse myrer og småvann hvor det være noe bløt grunn. Det må også antas at det blir krevd et stort antall vilt- og jordbrukskryssinger i slikt terreng. En helt spesiell type utfordring oppstår der det er behov for å krysse enkelte dype fjorder med bru eller undersjøisk tunnel (se eget kapittel).

Sørlandet

Jernbanealternativene fra Porsgrunn til Kristiansand og videre mot Stavanger må krysse gjennom et landskap som ikke har så høye fjell eller dype daler, men det er usedvanlig kupert i en skala på 50 – 200 m. Det typiske er grunnlendt bergterreng som er tett oppbrutt av daldrag med bratte sider og små vann. For en ny, stiv jernbanelinje vil dette medføre et stort antall tunneler, til dels ganske korte og med direkte overgang til bruer og viadukter. Bergmassen er grunnfjell. På grunn av det store antall forkastninger og dyp forvitring, viser erfaringer fra bl.a. det nye motorveiprosjektet at det blir mye sikringsarbeid i tunnelene. Nesten overalt hvor det er noen jordlapper innimellom bergknausene bor det folk, og vannene og berørte fjordarmer er landskap som det er lite ønskelig å skade. Linjevalget kan bli sterkt påvirket av slike forhold, og føre til enda dyrere løsninger (mer tunnel).

Spesielle fjordkryssinger

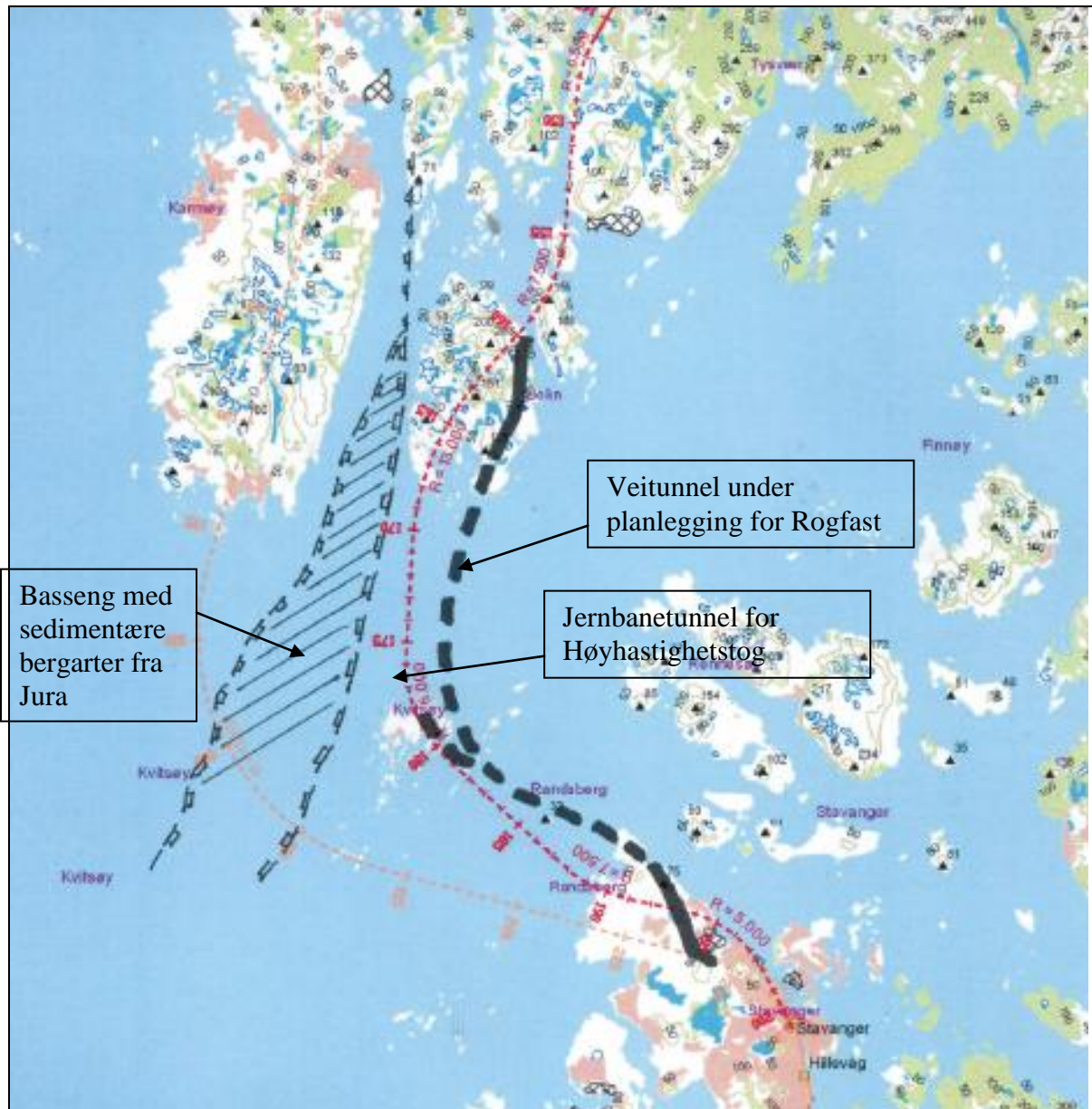
De mest utfordrende delstrekningene for et nytt banenett går fra Stavanger og nordover, der en ikke kommer utenom alternativ med undersjøisk jernbanetunnel. Norge har lang tradisjon med bygging av undersjøiske veitunneler. Frem til og med 2007 er det bygget 24 stk og det er ytterligere 6 stk under bygging. Den lengste er 7 931 m og den dypeste går 264 m under havnivå. De norske undersjøiske veitunnelene er bygget med en største helning på mellom 7 og 10 %, noe som er mer enn dobbelt så bratt som en jernbanetunnel får bygges (3 %), noe som gjør at jernbanetunneler blir mye lenger enn veitunneler. De foreslåtte traseene for jernbanetunnel nord for Stavanger er flere ganger lenger enn våre undersjøiske veitunneler. Slike lange tunneler kan neppe tenkes bygd uten to parallelle løp. Tunnelene kobles sammen med korte tverrtunneler for hver 500 m.

Den lengste jernbanetunnelen i Norge er Romeriksporten som er ca 14,6 km. Verdens lengste jernbanetunnel er bygget i Japan og er 53,85 km lang, hvor 23,3 km er under sjøen.

For **Haukeli-Stavanger-traseen** vil tunnelen bli ca 54 km lang og den dypeste delen vil være ca 370 m under havoverflaten. Dersom man ser bort fra at tunnelen går under Boknaøyene så vil ca 40 km være en undersjøisk tunnel. Noe øst for planlagt jernbanetunnelen holder Statens vegvesen på å planlegge Rogfast-forbindelsen som blant annet omfatter en undersjøisk veitunnel fra Randaberg i sør til Vestre Bokn i nord og som vil bli ca 25 km lang. Denne tunnelen planlegges å bygges med et teoretisk sprengningsprofil på ca 66,5 m² (T9,5) og skal utføres som en vanlig sprengt tunnel. Det planlegges betongelementer i veggene og PE-skum med sprøytebetong i taket. Dette er et noe mindre tverrsnitt enn hver av jernbanetunnelene som i denne fasen er bestemt å ha et tverrsnitt på ca 75 m². Dersom jernbanetunnelen bygges parallelt med veitunnelen så skulle denne muligens kunne brukes som anleggsadkomst.

For **Bergen-Stavanger-traseen** er det angitt en tunneltrase som vil bli ca 63 km lang og trolig noe dypere under havoverflaten enn i Haukeli-Stavanger alternativet. Tunnelen vil blant annet passere gjennom Karmsundbassenget som er et nedsunket område, som under Juratiden ble fylt med sedimentære bergarter av ukjent type. Det antas at massene er løst lagret og dermed også permeable. Her må man regne med hittil ukjente utfordringer og denne traseen bør frarådes hvis det finnes alternativer.

Problemstillingene er illustrert i figur 2.



Figur 2. Tunnel under Boknafjorden/Skudeneshfjorden. To alternativer for jernbanetunnel er vist sammen med ca beliggenhet av planlagt veitunnel. Skravuren antyder et parti med svært utfordrende bergforhold. Det østlige trasealternativet ligger til grunn for videre arbeid.

Fjordkryssing med lange bruer

I Haukeli-Bergen-traseen vil jernbanelinjen måtte krysse **Hardangerfjorden** ved Jondal, en kryssing mellom 1,5 km til 1,8 km bred og over 300 m dyp. Se illustrasjon i vedlegg. Prosjektet er mildest talt utfordrende og man må se på ulike tekniske konsepter:

- 1) Hengebru; Det er bygget kun to jernbanebruer med hengebros penn mer enn 1 km (1,1 og 1,38 km) i verden. Disse er bygget med meget store (og stive) brobaner. Kravet til bæreevne og stivhet gjør dette til et annet konsept enn for eksempel Hardangerbrua som nå skal bygges fra tofelts veg med 1,3 km spenn. Den lengste av hengebruene med jernbane, Tsing Ma i Hong Kong ble ferdig for knapt 10 år siden. Den har 6 veibaner og to jernbanespor. En norsk bro krever kanskje bare to kjørebane og ett

jernbanespor (i etasjen under, inne i et stivt fagverk), men den må ha mye av den samme stivheten og kan derfor neppe bygges mye enklere. Modifiserte løsninger med skråstag kan være aktuelle. Det henvises til eget notat fra Aas-Jakobsen om dette. En utredning om bru over Messinastredet har konkludert med at hengebru med spenn på 3300 m som gjennomførbar, men kostnaden gjør at den foreløpig ikke er realistisk.

- 2) Flytebru; Det er bygget to slike bruer for vei her i landet. Denne løsningen har et stort minus med at den stopper all sjøtrafikk langs fjorden, og det er usikkert om den kan bygges stiv nok for jernbane.
- 3) Neddykket rørbru i fjorden; Et betongrør som har stor oppdrift, men som holdes fast på et visst dyp med vaierstag til bunnen. Et uprøvd konsept som har vært gjenstand for omfattende utredning, bl.a. for bruk i Messinastredet, selv om det er forlatt der pga jordskjelvsfare. Dette er kanskje det mest realistiske konseptet for en så bred fjordkryssing i vårt geologisk stabile område.
- 4) Undersjøisk tunnel. Vi vet ikke hvor dypt man må gå, men om vi antar 400 m, blir tunnelen minst 32 km, hvorav en del vil ha utfordrende bergforhold. Dette konseptet kan etter omfattende undersøkelser som vil bli nødvendig, gi helt andre kryssingssteder og banetraseer enn det som er grunnlaget her.

I vedlegget er det også illustrert hvor ulike forslag krever lange bruer over hhv. Hardangerfjorden, Langenuen ved Stord og Samnangerfjorden

Kostnader

På et stadium der en ikke har planlagt noen endelig trase og heller ikke foretatt grunnundersøkelser, er det knyttet store usikkerheter til kostnadsestimater. Allikevel er det nødvendig å få fram hvilken størrelsesorden av investeringsbehov de ulike banealternativene vil kreve. Da benytter en teknikker som tar hensyn til usikkerhet og får fram et grovt estimat med såkalt "spredning" for usikkerheten. Vi har bidratt i dette bildet med erfaringskostnader og med skjønn basert på de forholdene vi har beskrevet ovenfor.

Typiske enhetskostnader i millioner NOK/km for ulike elementer av grunnarbeid (dvs. uten spor og andre jernbanetekniske installasjoner) for baner med de utfordringene vi har nevnt ovenfor kan være:

Åpen linje i gunstig terreng:	15 - 25
Åpen linje på bløt grunn:	40 - 60
Åpen linje med høye skjæringer og fyllinger:	45 - 70
Enkel tunnel, avhengig av geologi:	60 - 120
Tillegg for parallell servicetunnel:	30 - 50
Bru/viadukt for enkeltspor (normale spennvidder):	120 - 200
Banetekniske installasjoner (hele veien):	ca 25

I tallene er det forsøksvis tatt med kostnader til planlegging og administrasjon. Kryssingsspor utgjør omkring 10 % av strekningene. Kostnaden for disse kommer i tillegg, men vil selvfølgelig avhenge av hva slags terreng de blir liggende i. I tillegg kommer også spesielle kostnader til avbøtende tiltak i berørte samfunn, kulverter, planfrie kryssinger, vegomlegginger osv.

Kostnader for tunnel er av stor betydning. Det vi angir her gir i gjennomsnitt noe over 100 MNOK/km for komplett installert tunnel. Det er derfor gjort en kontroll mot andre aktuelle prosjekter i Norden. Ådalsbanan i Sverige er oppgitt å komme ut med samlet kostnad for ett løp på 110 MNOK/km. Botniabanan ligger i samme størrelsesorden. Tunnelen for dobbelstspor Lysaker – Sandvika blir vesentlig dyrere enn dette. Gjennom Hallandsåsen på Sveriges vestkyst bygges det nå en dobbeltsporet jernbanetunnel som kan komme til å koste opp mot 800 MNOK/km. Enkelte strekninger i det norske høyhastighetsnettet kan møte forhold som vil ligne på det man har i Hallandsås.

Variasjonen mellom gunstig terreng, slik vi kan ha i nedre del av Østerdalen på den ene siden og gjennom kupert terreng i for eksempel Telemark (der det i det hele tatt er mulig), blir meget stor. Totalkostnad under 60 MNOK/km er det vanskelig å se for seg, mens det fort kan bli en gjennomsnittskostnad på omkring 150 MNOK/km for linjealternativ med mye bruer og tunneler.

For en mer enn 50 km lang undersjøisk tunnel under Boknafjorden med to parallelle tunnellop er det større usikkerhet enn for andre tunneler og det er flere forhold som gjør m-prisen dyrere.

For de mer spesielle bruløsningene som kreves for å krysse Hardangerfjorden, Samnangerfjorden, Langenuen og evt. andre tilsvarende dype og brede fjorder, har vi lite å holde oss til så langt. Hardangerbrua (1,3 km spenn for veg) er angitt å koste opp mot 2 milliarder (2005-kroner). Det er få slike bruer bygd for jernbane. Kostnaden blir mye høyere pga kravet til stivhet, som også øker vekt og dimensjoner betydelig. I diskusjoner med brukspertene hos Aas-Jakobsen, er det antydning at kostnaden kan ligge i størrelsesorden 3 x tilsvarende veibro. Ett eksempel fra en kombinert hengebru i Hong Kong indikerer omkring 10 milliarder for en bro med hovedspenn på 1,4 km. Messinabroen med 3,3 km hovedspenn ville ha kostet 30 milliarder.

Ut fra dette foreslås det å bygge kalkylene på følgende kostnadsnivå for hengebru med jernbane, ut fra lengde på hovedspenn:

Sted	Hovedspenn	Kostnad MRD NOK
Samnanger	800 m	3
Langenuen	1200 m	5
Hardangerfjorden ved Jondal	1800 m	10

Rørbru vil antakelig koste minst i størrelsesorden 3 MRD/km for den dykkede delen.

Sluttbemerkning

Vi er som mange andre positivt innstilt til konseptet med å utvikle den nasjonale infrastrukturen ved hjelp av nye jernbanelinjer for hurtig togforbindelse. Vi ser imidlertid at det har vært mangel på realisme i hva dette innebærer med hensyn til linjevalg, terrenginngrep og kostnader. Hvorvidt slike investeringer er lønnsomme i det ene eller andre perspektivet er ikke vårt tema, men bare når en innser hvilket løft samfunnet må være villig til å ta og hvilke inngrep vi må være enige om å tåle for å få det til, kan det bli realisme i det fortsatte arbeidet og de politiske diskusjonene. Vi håper våre betraktninger kan være til nytte i så måte.

Med tradisjonell teknologi vil forholdsvis dyre løsninger være nødvendige i norsk terreng. Dette burde anspore til en utvikling av anleggsteknologien. Kanskje finnes det mer optimale løsninger som kan utvikles for spesielle forhold, slik det norske fagmiljøet fant for oljeutvinningen på store havdybder, der gevinsten ble formidabel. Parallelt med at man fortsetter linjediskusjoner og opinionspåvirkning, burde det settes i gang et utviklingsarbeid som tar tak i dette. Kreativiteten i befolkningen og de beste norske ingeniørkreftene burde få i oppgave å finne rimeligere byggemetoder for å løse mange av de vanskelige terrengutfordringene og konfliktpunktene som nye høyhastighets baner vil medføre i vår type natur. Kanskje dette kan bli et nytt norsk spesialområde? Det er mange land i andre deler av verden som kunne nyte godt av ny teknologi for bygging av effektiv jernbane i vanskelig terreng. I det store perspektivet kan dette få mye større nytte for samfunn og miljø enn det utviklingsarbeidet som skjer med teknologi for ekstremt raske tog.

Vedlegg

Det er i dette vedlegget stilt sammen noen illustrasjoner med kartutsnitt over de lengste bruene for å gi et inntrykk av kompleksiteten av prosjektet. Som det fremgår av teksten i notatet, er dette prosjekter som vil være av størrelsesorden på linje med de mest utfordrende som er bygget i verden!



Figur V 1. Bru (eller annen løsning) over Hardangerfjorden ved Ytre Samlafjorden-Hissfjorden, ca 2100 m

Her ser en at det kan være noe smalere over fjorden lenger inn (ved Belsnes), der det er ca 1800 m. Her er det i dag et stort kraftlinjespenn. Nærmere undersøkelser kan finne fundamenter i fjorden, men neppe med mindre midtspenn enn 1500 m. Om en skal se på en løsning med nedsenket rørbru, vil nok smaleste punkt være et mer egnet sted, men da med lange tilførselstunneler på begge sider.



Figur V 2. Bru over Langenuen, ca 1200 m



Bilde 1. Bilde over Langnuen hvor bruene i Figur V 2 foreslås.



Figur V 3. Bru over Samnangerfjorden ca 800 m



Bilde 2. Bilde over Samnangerfjorden hvor bruene i Figur V3 er tenkt.