Lærebok i jernbanetekniikk

L533

Kapittel 8

Fastspor

Utgitt: 15.09.99

1. ANVENDELSE AV FAST SPOR 3

1.1 GENERELT OM ANVENDELSESOMRÅDER 3
1.2 FORDELER OG ULEMPER 4
1.3 KOSTNADER TIL BYGGING, DRIFT OG VEDLIKEHOLD 5
1.3.1 BYGGEKOSTNADER 5
1.3.2 DRIFTS- OG VEDLIKEHOLDSKOSTNADER 6

2. TEKNISK BESKRIVELSE 8

2.1 GENERELL OPPBYGGING 8
2.2 BEREGNINGSGRUNNLAG FOR MAKSIMALE BØYESPENNINGER 10
2.3 BEFESTIGELSE I FAST SPOR 14
2.4 BYGGENØYAKTIGHET 15

3. TYPER FAST SPOR 16

3.1 GENERELT 16
3.2 RHEDA 1972 16
3.3 RHEDA/SENGEBERG 17
3.4 RHEDA/BREDDIN - GLÖWEN 18
3.5 ZÜBLIN 18
3.6 BTD - V2/BREDDIN - GLÖWEN 19
3.7 ATD 19
3.8 WALTER 20
3.9 GETRAC 20
3.10 STEDEF 21
3.11 SONNEVILLE 22
3.12 FFYS 22
3.13 PACT 23
3.14 ICOSIT 23
3.15 PREFABRIKKERTE PLATER 24
3.16 KONTINUERLIG INNSPENT SKINNE 24

1. ANVENDELSE AV FAST SPOR

1.1 Generelt om anvendelsesområder

Et alternativ til konvensjonelt spor med sviller og ballast er en utførelse med såkalt fast spor, som vil ha både mindre egenvekt og lavere byggehøyde enn et konvensjonelt ballastspor. I fast spor erstattes ballasten med betong eller asfalt. Generell oppbygging av konstruksjonen er nærmere beskrevet i avsnitt 2.

Fast spor i Norge

Bruk av fast spor på deler av det norske jernbanenettet har vært vurdert flere ganger, senest i Romeriksporten på Gardermobanen. Innføring av høyhastighetstog i Norge har aktualisert bruken av fast spor her i landet. Fast spor i Norge er trolig mest aktuelt i lange tunneler. Tidligere har ikke besparelsene ved drift og vedlikehold for slike løsninger oppveid merkostnadene ved bygging.

Historikk

Helt siden begynnelsen av 70-tallet, har fast spor vært hovedregelen på det japanske høyhastighetsnettet. Resten av jernbaneverden har holdt seg til det klassiske ballastsporet, men flere baneselskaper har drevet forsøk med fast spor. Det foregår en sterk utvikling på området samtidig som det virker som bruken av fast spor i Europa står foran et gjennombrudd. Vedlikeholdet på høyhastighetsbanene med tett trafikk har blitt langt mer omfattende og kostnadskrevende enn antatt da banene ble planlagt på 80-tallet. Flere nye høyhastighetsstrekninger i Tyskland bygges nå med fast spor. Filosofien er at dersom det er vanskelig med disponeringstid for vedlikeholdsarbeider (tett trafikk med små tidsluker), velges fast spor. Deutsche Bahn AG har f.eks besluttet at fast spor skal brukes på nye baner i tunneler som er mer enn 500 m lange. Eurotunnelen ble også bygget med fast spor. Også i Sveits, England og Frankrike er det strekninger med fast spor.

I Norge er det noen korte strekninger med fast spor. I Oslo kan følgende strekninger nevnes:

- Forbi Nationaltheateret på T-banen (System ”Kölner Ei”)
- Bybane gjennom Sinsenkrysset (Icosit)
- Havnesporet over Framneslokket (Underlagsplate på polyuretan)
- Bru over Drammenselva og bru over Nitelva (Corkelast/Edilon)

Patenterte løsninger

På markedet finnes det en rekke patenterte løsninger for fast spor. Det er stor konkurranse mellom rettighetshaverne, og det er derfor mulig å få til en reell priskonkurranse på systemer for fast spor. Ulike løsninger for fast spor beskrives nærmere i kapittel 3.

Løsninger med fast spor vurderes og bygges primært for nye baner. En jernbanestrekning kan deles inn i tunneler, broer og dagstrekninger. Noen av løsningene for fast spor er gjennomgående dvs egner seg for alle tre tilfellene, mens andre løsninger kun egner seg for ett av de tre tilfellene.

Tele- og setningsfritt

Et nærmest ufravikelig krav ved bruk av fast spor er at sporet må være tele- og setningsfritt. Vekslingen mellom fjellgrunn og svært bløte løsmasser er et særtrekk for Skandinavia. Dette gjør det krevende å bygge sporet setningsfritt.

Det vil sannsynligvis være mer kostbart å rette opp et fast spor enn et ballastspor om uhellet skulle være ute. Mindre endringer kan rettes med justeringsmulighet i skinnefeste. Teknisk lar det seg gjøre å bygge daglinjer setnings- og telefri, men dette er et kostnadsspørsmål. Det må f.eks gjennomføres svært omfattende geotekniske undersøkelser for å sikre setnings- og telefri daglinje. Grunnvannsspeilets beliggenhet har stor betydning i denne sammenheng. Videre må det stilles svært strenge krav til oppbygning av fyllinger og tilbakefylling mot kunstbyggverk som bruer og lignende.

Bruk av fast spor på bruer er lite aktuelt dersom tilgrensende spor ikke bygges som fast spor.

Fast spor i Norge er derfor mest aktuelt i tunneler, eventuelt med korte dagstrekninger mellom. I tunneler må sporet antas å være tele- og setningsfritt. I tunneler vil det være minimalt behov for justeringer under forutsetning av at alle toleranser overholdes under bygging.

1.2 Fordeler og ulemper

Fordeler

I kapittel 1.1 er det nevnt at fast spor har en del fordeler framfor konvensjonelt spor med ballast. De viktigste fordelene med fast spor er:

- Fast spor krever mindre vedlikehold enn konvensjonelt spor med ballast
- Driftssikkerhet og tilgjengelighet for fast spor er vesentlig bedre enn for ballastspor
- Ballastoverbygning for høyhastighetstrafikk er begrenset i sin yteevne. Generelt har fast spor vesentlig lenger levetid enn ballastspor. I Tyskland forutsettes 60 års levetid på de nye høyhastighetsstrekningene, mens ballasten må skiftes etter ca 15 år på tilsvarende høyhastighetsstrekninger. Med betong i underbygningen vil det ikke være risiko for setninger i sporet i tunneler
- Målinger viser at fast spor har like god eller bedre sporkvalitet enn de beste ballastspor. Systemer som er bygget for at sporet finjusteres før faststøping, har de aller beste resultatene, se kapittel 3
- Ved setningsfri underbygning har ikke fast spor behov for justering. Som ekstra sikkerhet kan skinnefestet likevel ha justeringsmuligheter
- Sporvekslene for fast spor vil være minst like gode teknisk som for ballastspor
- Konstruksjonen gir en meget jevn fordeling av kreftene mot undergrunnen og god sporstabilitet i horisontal og vertikal retning
- Behovet for byggehøyde i fast spor kan gjøres mindre enn i et konvensjonelt spor. Ved å introdusere en konstruksjon med fast spor i eksisterende tunneler med opprinnelig ballastspor kan sporet dermed senkes for å gi plass i det øvrige tverrsnittet for det rullende materiell og kontaktledning. I nye tunneler vil redusert tverrsnitt gi mindre sprengning og massetransport. Tunnelhøyden kan reduseres med i størrelsesorden 25 cm ved bruk av fast spor. Kostnadsbesparelsen er størst ved fullprofilboring, som brukes mye i Europa. Ved konvensjonell sprengning, som brukes mye i Norge, er ikke kostnadsbesparelsen så stor
- Vektlegging av helse og miljø for drifts- og vedlikeholdspersonell i forbindelse med sporvedlikehold, spesielt i tunneler, taler til fordel for fast

spor. Dette gjelder først og fremst støv og avgasser samt sikkerhet for drifts- og vedlikeholdspersonalet ved vedlikeholdsarbeider som sporjustering og ballastrensing i tunnel

Ulemper

De viktigste ulempene med fast spor, sammenlignet med ballastspor, er:

- Prisen for legging av fast spor er høyere enn for et konvensjonelt spor
- Dersom det skulle oppstå setninger eller utførelsen ikke er helt nøyaktig utført fra starten av, vil det være forbundet med store kostnader å utbedre skadene. Fast spor stiller meget strenge krav til underbygning og til nøyaktig utførelse under produksjon. På noen strekninger der dette ikke er gjort, er det gjort dårlige erfaringer med fast spor.
- For fast spor vil det være behov for sviller, befestigelse og sporveksler av en type som ikke er standard i Jernbaneverket, men som er standard hos andre store jernbaneselskaper
- Støyen i et fast spor kan bli meget høy. Årsaken til dette er at overflatene i de ulike synlige konstruksjonslagene er meget glatte og at konstruksjonen derfor ikke evner å absorbere lydbølgene like godt som ballast. Mulighetene for demping av luftlyd er likeverdige for fast spor og ballastspor. Demping av strukturlyd vil være dyrere med en løsning av fast spor. Alternativt kan derfor ballastspor og ballastmatter brukes på de relativt korte strekningene dette gjelder
- Generelt har fast sporkonstruksjon liten elastisitet
- Det vil ta lenger tid å repareres sporet for fast spor ved eventuell avsporing, men forskjellen er ikke dramatisk
- Enkelte systemer har vist seg ikke å holde mål grunnet dårlig holdbarhet. Det er derfor viktig at løsninger som tas i bruk er utprøvd og godt dokumentert med hensyn til erfaringer og holdbarhet. Langtidsvirkningen på asfalt er ikke godt nok dokumentert ennå. Det har også vært problem med at forbindelsesskruer løsner fra befestigelsen og må etterskrus for enkelte løsninger

1.3 Kostnader til bygging, drift og vedlikehold

Som nevnt i kapittel 1.2 vil byggekostnadene for fast spor være høyere enn for ballastspor. For å forsvare slike merkostnader, må altså besparelsene og fordelene for fast spor under drift overveie merkostnadene ved bygging.

1.3.1 Byggekostnader

Bygge-kostnader, størrelse

Data fra Japan tyder på at løpemeterkostnaden ved bygging av fast spor er 30 – 50 % større enn for ballastspor. Erfaringer fra Tyskland tilsier en merkostnad på opp mot 20 % for fast spor. I Japan brukes en løsning med prefabrikkerte plater. Tilsvarende løsninger med prefabrikkerte plater i Tyskland er dyrest av alle løsningene og vil neppe bli brukt i Tyskland. Data fra England tyder på en kostnadsforskjell på 30 %, mens data fra Frankrike viser en større kostnadsforskjell. Sammenligninger som ble gjort i Norge i tilknytning til vurdering av fast spor i Romeriksporten viste at en ADT-løsning (se kapittel 3.7) i Romeriksporten var ca 40 % dyrere enn sammenlignbare strekninger med ballastspor.

Følgende forhold vil først og fremst utgjøre kostnadsforskjellen mellom fast spor og vanlig ballastspor:

- Betong/asfalt er dyrere enn ballastpukk
- Svillene til fast spor er dyrere enn svillene til ballastspor
- Strengere krav til oppfølging og nøyaktig utførelse ved bygging av fast spor sammenlignet med ballastspor

Generelt er løsninger med betong som bærelag under svillene noe dyrere enn løsninger med asfalt som bærelag.

Fast spor har mindre konstruksjonshøyde enn ballastspor og det vil bety at det spares tunnelsprengning og utkjøring av masse. Dette må det tas hensyn til i eventuelle kostnadsberegninger.

1.3.2 Drifts- og vedlikeholdskostnader

Ved en total vurdering av drifts- og vedlikeholdskostnader vil følgende forhold ha betydning for lavere kostnader for fast spor:

- Sikkerhet og hastighet
- Bedre gangegenskaper for rullende materiell
- Lavere vedlikeholdskostnader for rullende materiell
- Bedre punktlighet og mindre driftsforstyrrelser

Spor-vedlikehold

Med fast spor vil sporvedlikeholdet bli vesentlig enklere og mindre omfattende enn for ballastspor. I Norge har vi imidlertid ikke særlig store erfaringer med hvordan høyhastighet og trafikktetthet påvirker nedknusing av ballast og ikke minst tilgjengelighet i tunneler. Erfaringer fra Tyskland tyder på at de totale drifts- og vedlikeholdskostnadene for ballastspor vil være vesentlig høyere på en høyhastighetsbane med blandet trafikk enn på en bane med lavere hastighet.

Både skinneprofil og svillestørrelse er forsterket i Norge i forhold til det som tidligere var vanlig på baner med lavere hastighet. Grunnet belastningen er det likevel sannsynlig at kostnadene til drift og vedlikehold på høyhastighetsbaner med stor trafikk blir høyere.

Ballastrensing

I ballastspor anses ballastrensing normalt nødvendig hvert 20. – 25. år. Stor togtetthet og krav til høyere hastighet og regularitet medfører større behov for ballastrensing. Grunnet økte påkjenninger og krav er det sannsynlig med behov for ballastrensing hvert 15. år. For fast spor er det ikke behov for ballastrensing.

Sporjustering

Behov for sporjustering i ballastspor vil variere sterkt. Normalt vil det være behov for sporjustering hvert 2. – 3. år på en bane med normalhastighet med et stabilt fundament. På høyhastighetsbaner er behovet for sporjustering noe større, dvs hvert 2. år. Stor togtetthet innebærer i tillegg at arbeidet må utføres om natten på relativt korte skift. For fast spor er det ikke behov for sporjustering.

Levetid

I forbindelse med sporjustering og ballastrensing må ballasten suppleres. Levetiden for sporet forventes å øke fra ca 40 år for ballastspor til ca 60 år for fast spor. Levetiden for skinner og skinnefeste forventes imidlertid ikke å bli påvirket av om ballastspor eller fast spor bygges.

Selve sporfornyelsen kan bli noe mer arbeids- og kostnadskrevende med fast spor sammenlignet med ballastspor. Sporfornyelsen er dokumentert praktisk gjennomførbar.

Aktiviteter som inspeksjon, skinnesliping, utskifting av smådeler og skinnebytte må antas å være uavhengig av om ballastspor eller fast spor benyttes.

2. TEKNISK BESKRIVELSE

2.1 Generell oppbygging

Asfalt eller betong

Det er utviklet flere varianter av det ballastfrie sporet. Generelt er det to typer materiale som er aktuelle som alternativer til ballast. I den ene sportypen utnyttes betong i stedet for ballast, mens i det andre tilfellet utnyttes asfalt i stedet for ballast. Asfalt og betong har en del forskjellige egenskaper:

- Asfalt er fleksibel og elastisk, mens betong er stiv
- Asfalt kan tas i bruk direkte etter avkjøling, mens betong må herde i flere døgn
- Asfaltens stivhet påvirkes av temperaturen, mens betongens stivhet i liten grad påvirkes av temperatursvingninger

Erfaringene med asfalt i sporkonstruksjonen er tidsbegrenset. I litteraturen beskrives oftest bruk av asfalt i positive ordlag.

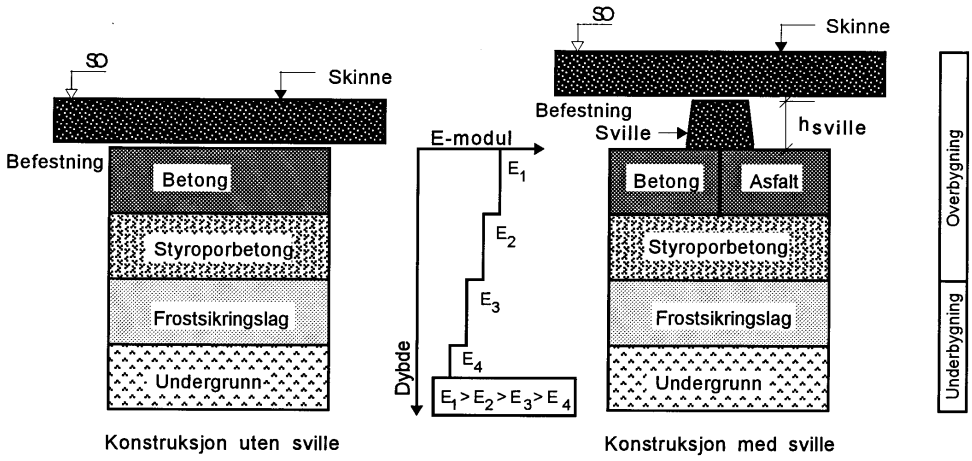
Oppbygging fast spor

Generelt består oppbyggingen av fast spor av flere lag og komponenter:

- Underbygning
- Frostsikringslag
- Et lag med magerbetong og hardskumplater som skal fungere som elastisk mellomlag (et såkalt HGT - lag (hydraulisch gebundener Tragschicht))
- Plasstøpt betongplate med gjennomgående slakkarmering, evt. asfaltlag
- Sviller med høyelastisk skinnebefestigelse (dvs. 2 mellomlegg)
- Skinner

Elastisitets-modul

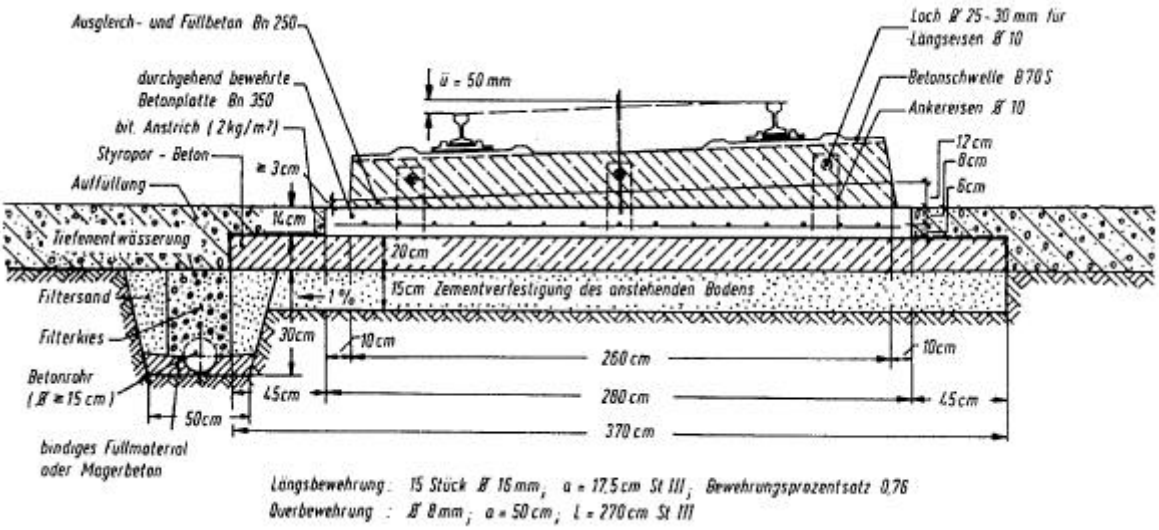
Det som kjennetegner oppbyggingen av konstruksjonen, er forskjellen i elastisitetsmodulene i de forskjellige lagene. Det øverste laget under betongsvillene, som er betongplate eller asfalt, har en meget høy elastisitetsmodul. Så blir elastisitetsmodulene lavere og lavere i de underliggende lagene. Lagene blir dermed mindre harde. Dette har sammenheng med lastfordelingen. Enkelte konstruksjoner bygges uten sville. Figur 8.1 viser generell oppbygging av konstruksjoner med og uten sville.



Figur 8.1 *Generell oppbygging av fast spor. Det øverste laget under sville er et betonglag eller et asfaltlag med høy elastisitetsmodul. Under er det et elastisk lag med lavere elastisitetsmodul. Deretter følger et frostsikringslag og til slutt underbygningen*

Oppbygging Rheda stasjon

Figur 8.2 viser mer detaljert oppbygging av en konstruksjon med fast spor. Konstruksjonen ligger på Rheda stasjon i en kurve med radius 5700 m og overhøyde 50 mm. Konstruksjonen er bygd opp av en 14 cm gjennomgående betongplate over et 20 cm tykt lag med styroporbetong. Mot grunnen ligger det 20 cm tykt sementstabilisert lag. Skinnen er festet til svillen med høyelastisk befestigelse. Mellom svillen og den gjennomgående betongplaten blir det lagt en utstøping av betong bl.a for å få riktig overhøyde på sporet. Svillene er forankret til underliggende armert betongplate med bøyler.



Figur 8.2 *Tverrsnitt av en konstruksjon med fast spor med gjennomgående betongplate i området ved Rheda jernbanestasjon*

2.2 Beregningsgrunnlag for maksimale bøyespenninger

Inntil mer nøyaktige metoder foreligger, kan følgende metode brukes. Metoden gjelder for en opptil tre lag tykk konstruksjon med isotrope, lineært elastiske materialer. For overbygninger uten sviller, der skinnene er festet direkte til betongplate vil ikke metoden være anvendbar etter den beskrivelsen som er angitt her. Metoden regner kun på horisontale bøyespenninger og er dermed ikke i stand til å si noe om de vertikale spenningene og hvordan disse fordeler seg.

Støttepunkts-kreftene

Beregningene tar utgangspunkt i støttepunktskreftene. Disse kan beregnes f.eks. etter Zimmermanns metode (bjelke på et Winkler-fundament). Støttepunktskreftene (i dimensjonerende tilfelle den maksimale støttepunktskraften) fordeles så over ei sirkulær flate - dette skal representere de spenningene man får i underkant av ei sville. En diameter på 30 cm kan være passende for en slik lastfordelingsflate.

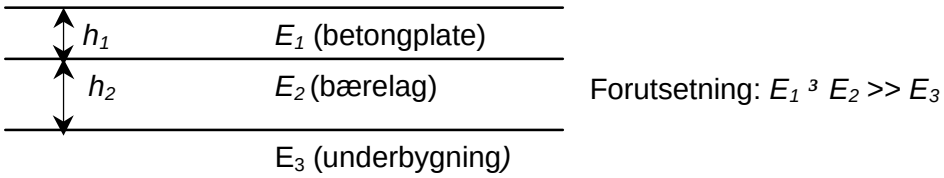
Forenklet beregnings-metode

Det presiseres at beregningsmetoden representerer en forenkling, særlig vil følgende tre faktorer påvirke nøyaktigheten til metoden:

- Antakelsen om sirkulær lastflate og størrelsen av denne
- Antakelsen om isotropt, lineært elastisk materiale
- Hvordan spenninger overføres mellom de ulike lag nedover i konstruksjonen

Dersom en skal ta hensyn til disse aspektene må en bruke mer avansert materialmodellering og elementmetoder.

Prinsippskisse av konstruksjonen som skal beregnes er vist i figur 8.3.



Figur 8.3 Prinsippskisse av beregnet konstruksjon

Bærelaget kan eksempelvis være sementstabilisert, bitumenstabilisert eller evt. sløyfes hvis underbygningen er av gode materialer.

Beregningsmetoden skiller mellom to tilfeller:

Tilfelle I: Det er ingen overføring av horisontalspenninger mellom lag 1 og 2.
Tilfelle II: Det er full kontakt mellom lag 1 og lag 2

Tilfelle I: Ingen overføring av horisontalspenninger mellom lag 1 og lag 2

Fiktiv undergrunns-modul

a) Det beregnes en fiktiv undergrunnsmodul *k* (med liknende betydning som ballastsifferet i Zimmermanns metode):

Dersom E_3 er bestemt ut fra platebelastningsforsøk på undergrunnen (Ullidtz):

$$k = \frac{E_3}{f \cdot \left(1 - n_3^2\right) \cdot a} \qquad (8.1)$$

hvor

f = 1.3-2.7, faktor avhengig av spenningsfordeling under belastningsplata, lavere verdi jo mer kohesiv (finkornet) undergrunnen er (*f* = 2.0 tilsvarer konstant spenning under hele plata).

n_3 = tverrkontraksjonstall for undergrunnen, hvis ingen laboratorieresultater finnes kan settes tverrkontraksjonstallet til ca. 0.35.

a = radius til plata som brukes i platebelastningsforsøket.

Dersom platebelastning ikke er utført kan følgende formel benyttes

$$k = \frac{E_3}{h^x} \qquad (8.2)$$

hvor h^x beregnes ved hjelp av følgende formel (basert på Odemarks ekvivalensmetode):

$$h^x = 0.83 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} \qquad (8.3)$$

der *c* = 0.83 når lag 2 er sementstabilisert, 0.90 når lag 2 er bitumenstabilisert

Ekvivalent lagtykkelse

b) Man beregner så en ekvivalent lagtykkelse for et system med ens E-modul ($E = E_1$) og med samme stivhet som lag 1 og lag 2 til sammen:

$$h_I = \sqrt[3]{\frac{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}{E_1}} \qquad (8.4)$$

Bøyemoment

c) Bøyemomentet til ekvivalentsystemet med $E = E_1$, h_I og k kan regnes ut etter Westergaard (evt. Pickett og Ray). Ifølge Westergaard (gjengitt av Ullidtz) er dette momentet lik

$$M_1 = \frac{P}{4} \cdot (1+v) \cdot \left\{ \frac{1}{p} \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot l}{b} \right) + 0.5 - t \right] + \frac{1}{32} \cdot \left[\frac{b}{l} \right]^2 \right\} \qquad (8.5)$$

hvor

$P =$ støttepunktkraft der vi vil beregne bøyespenninger

$n =$ tverrkontraksjonstallet (kan settes til 0.15-0.3 (lavest verdi om betongdekket er tykt i forhold til underliggende bærelag) om ikke andre opplysninger er gitt)

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_1 \cdot h_I^3}{12 \cdot (1 - n^2) \cdot k}} \qquad (8.6)$$

$$b = \sqrt{1.6 \cdot a^2 + h_I^2} - 0.675 \cdot h_I \qquad (8.7)$$

hvis $a < 1.724 \cdot h_I$

ellers settes $b = a$

hvor

a = radius til lastflaten, eller radien til platebelastningsplata, man regner med (f.eks. *a* = 15 cm), og som man regner med at fundamentmodulen *k* er gyldig for.

$t =$ Eulers konstant (0.5772)

Maksimale bøyespenninger

d) Maksimale bøyespenninger i lag 1 og i lag 2:

$$M_1 = M_I \cdot \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3} \qquad s_{1\max} = 6 \cdot \frac{M_1}{h_1^2} \qquad (8.8)$$

$$M_2 = M_I \cdot \frac{E_2 \cdot h_2^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3} \qquad s_{2\max} = 6 \cdot \frac{M_2}{h_2^2} \qquad (8.9)$$

Tilfelle II: Det er full kontakt mellom lag 1 og lag 2

Fiktive undergrunns-modulen

a) Den fiktive undergrunnsmodulen beregnes som for tilfelle 1.

Ekvivalent lagtykkelse

b) Ekvivalent lagtykkelse:

$$h_{II} = h_1 + c \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} \qquad (8.10)$$

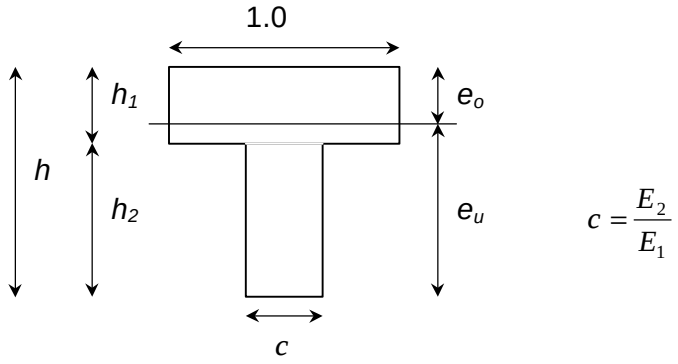
hvor c har samme verdier som for tilfelle 1.

Bøyemoment

c) Momentet M_{II} regnes ut på samme måte som for tilfelle 1, men med h_{II} i uttrykkene i stedet for h_I.

Maksimale spenninger

d) Lag 1 og lag 2 erstattes beregningsmessig av en T-bjelke med samme stivhet som de to lagene til sammen, se figur 8.4:



Figur 8.4 T-bjelke med samme stivhet som lag 1 og lag 2

Avstander til nøytralaksen:

$$e_o = \frac{h}{2} \cdot \frac{E_2 \cdot h_2}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2} + \frac{h_1}{2} \qquad e_u = h - e_o \qquad (8.11)$$

Arealtreghetsmomentet (om nøytralaksen):

Dersom $e_o < h_1$:

$$I = \frac{1}{3} \cdot e_o^3 + \frac{1}{3} \cdot (h_1 - e_o)^3 + \frac{1}{12} \cdot h_2^3 \cdot c + h_2 \cdot c \cdot \left(e_u - \frac{h_2}{2}\right)^2 \qquad (8.12)$$

Dersom $e_o > h_1$:

$$I = \frac{1}{3} \cdot e_u^3 \cdot c + \frac{1}{3} \cdot (h_2 - e_u)^3 \cdot c + \frac{1}{12} \cdot h_1^3 + h_1 \cdot \left(e_o - \frac{h_1}{2}\right)^2 \qquad (8.13)$$

Spenninger:

$$s_{lag1,o} = \frac{M_{II}}{I} \cdot e_o \qquad s_{lag1,u} = \frac{M_{II}}{I} \cdot (e_o - h_1) \qquad (8.14)$$

$$s_{lag2,o} = c \cdot \frac{M_{II}}{I} \cdot (e_o - h_1) \qquad s_{lag2,u} = -c \cdot \frac{M_{II}}{I} \cdot e \qquad (8.15)$$

Her indikerer indeks *o* overside, mens *u* angir underside. Formlene for spenning er slik at trykk gir positive spenninger, mens strekk gir negative spenninger. (Forutsetningen er at man definerer at nedadrettet støttepunktkraft (*P*) gir positivt moment M_{II}.)

2.3 Befestigelse i fast spor

Befestigelsens funksjon

Befestigelsen skal primært overføre kreftene fra skinnene til underlaget slik at sporets funksjoner opprettholdes. Generelt er følgende momenter viktige i denne sammenheng:

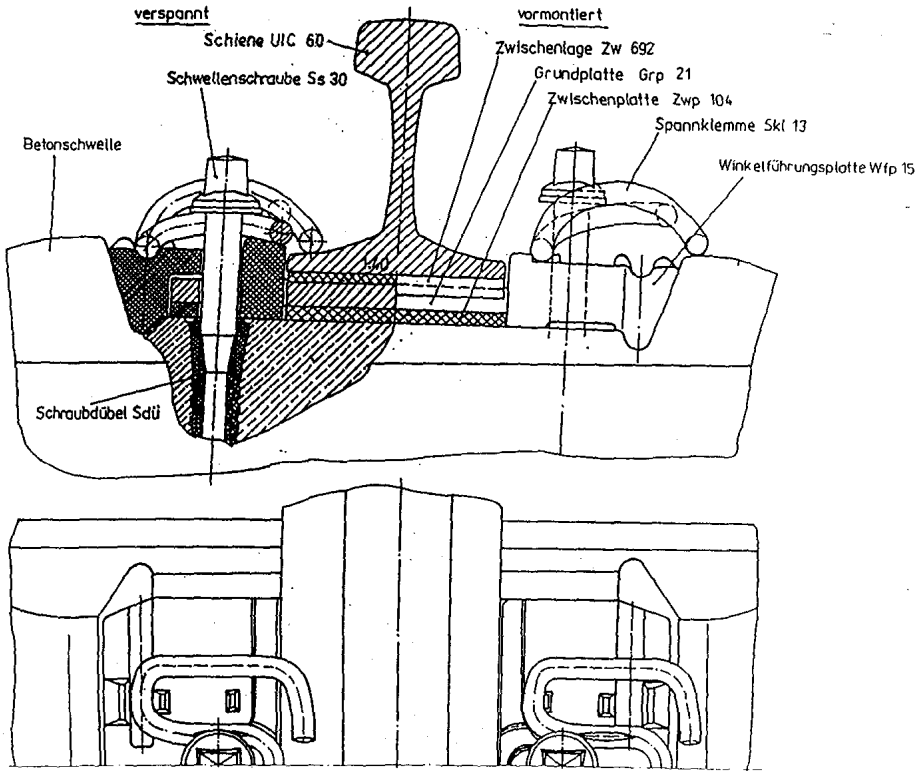
- Skinnene må sikres mot velting
- Befestigelsen må oppta langsgående krefter i sporet
- Sporvidden må holdes innenfor gitte toleranser
- Korrekt skinnehelning må sikres
- Må ha optimal elastisitet slik at god lastfordeling oppnås
- Elektrisk isolasjon må sikres
- Må ha høy klemkraft selv ved slitte isolasjonsdeler, dvs lang fjærveg
- Må ikke ha vedlikehold ut over skifting av slitte isolasjonsdeler
- Må ha formontering av alle deler i svillefabrikk
- Må ha rasjonell formontering av fjærer ved sporlegging
- Færrest mulig deler
- Delene skal ha lang levetid
- Må ha justeringsmulighet i høyde og eventuelt i side
- Funksjonalitet må være dokumentert

For noen år siden ble det gjort en evaluering av befestigelse for bruk på ballastspor i Norge. Pandrol Fastclip ble da valgt til avløsing for Pandrol PR/e-clip. En viktig årsak til dette var at fjærene ikke kan formonteres på PR/e-clip. Fastclip imøtekommer i stor grad kravene nevnt ovenfor, men foreligger ikke som løsning for fast spor med justeringsmuligheter.

Befestigelse for fast spor

Tilsvarende evaluering av befestigelse for fast spor er ikke gjort i Norge. På grunn av en relativt hard konstruksjon i et fast spor må befestigelsen være høyelastisk. Det er utviklet varianter for fast spor som tilfredsstiller momentene nevnt ovenfor:

- Pandrol har f.eks utviklet en justerbar løsning for fast spor for Japan basert på PR/e-clip
- I Tyskland brukes Vossloh loarv 300, som i stor grad imøtekommer kravene ovenfor, se figur 8.5. VOSSLOH loarv 300 er en befestigelse som er justerbar i høyde og side. Skinnen hviler på et mellomlegg av gummi. Under dette mellomlegget finnes en stålplate og under denne igjen et nytt mellomlegg i gummi. Det sistnevnte mellomlegget er lagt direkte på betongsvillen. I befestigelsen finnes 2 klemfjærer som må tåle bevegelser vertikalt for 2 mellomlegg i gummi. De vertikale amplitudene blir dermed meget store og det er derfor mulighet for utmatting.
- For øvrig eksisterer også befestigelse med til sammen 4 fjærer, dvs. 2 fjærer på hver side av skinnen. Dette medfører at hver klemfjær bare behøver å ta opp bevegelser fra et mellomlegg. De vertikale amplitudene blir dermed ikke så store. Faren for utmatting blir av den grunn redusert.



Figur 8.5 Eksempel på befestigelse til bruk i ballastfritt spor (VOSSLOH Ioarv 300). Befestigelsen er justerbar i høyde og side.

2.4 Byggenøyaktighet

Utførelse

Som nevnt i kapittel 1.2 stilles det svært strenge krav til nøyaktig utførelse ved bygging av fast spor. Følgende faktorer er derfor svært viktig for å oppnå et godt resultat ved prosjektering og bygging av fast spor:

- Det må brukes gjennomarbeidede og utprøvde konstruksjonsdetaljer, f.eks skinnefester som holder og har optimal elastisitet
- Både før og under byggearbeidet må det gjøres ekstra stor innsats med landmåling for å klare å overholde toleransekravene som stilles for fast spor
- Kontroll av utførelse av byggearbeidene er svært viktig. Erfaringene i Tyskland har vært at forholdsvis få entreprenører behersker slike arbeider godt nok. Målinger fra prøvestrekninger har vist at det er praktisk gjennomførbart å bygge førsteklasses spor.

Nøyaktighet

Fast spor, som er bygget med størst mulig grad av nøyaktighet for å garantere varig førsteklasses kjørekomfort, vil medføre mindre slitasje både på kjøreveg og på rullende materiell. Det er gjort dårlige erfaringer på enkelte strekninger med fast spor i Europa. En vesentlig årsak til dette er at det ikke har vært lagt tilstrekkelig stor vekt på de ovennevnte faktorene.

3. TYPER FAST SPOR

3.1 Generelt

Løsninger, prinsipp

Løsningene for fast spor kan deles inn i grupper avhengig av konstruksjonsprinsippet:

- Løsninger som bruker sviller eller betongklosser
- Løsninger med enkeltpunkter for skinneopplegg
- Løsninger som bruker prefabrikkerte plater

Løsninger, Tyskland

I Tyskland har en f.eks etter mange års prøver og forsøk valgt løsninger for fast spor med en eller annen form for "svillekonsept". Årsaker til dette er:

- Det er enklere å oppnå stor spornøyaktighet ved montering av sporet
- Det er stor grad av redundans i systemet
- Systemet er mindre sårbart i tilfelle avsporing

I Tyskland legges det også vekt på at løsningene skal kunne brukes gjennomgående på hele strekninger. Dette betyr at samme løsning skal kunne brukes for daglinje, tunneler og bruer på en gitt strekning.

Løsninger Japan

I Japan brukes for en stor del 5 m lange prefabrikkerte betongelementer på støpeasfalt.

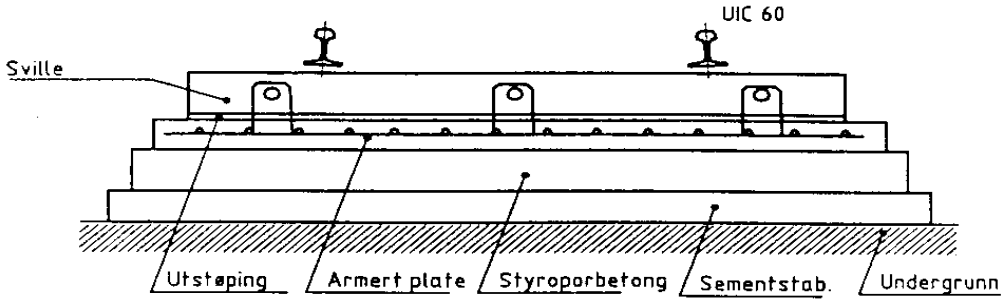
Løsningene for fast spor kan også deles inn etter byggemåten:

- Oppbygging "fra toppen" ved at skinner og sviller monteres endelig og i nøyaktig posisjon og deretter støpes fast
- Oppbygging "nedenfra" ved en lagvis oppbygging fra banefundamentet slik at sporets endelige beliggenhet bestemmes av toleransene i lagene under svillene

I kapittel 3.2 – 3.16 er vist skissemessige løsninger av forskjellige typer av konstruksjoner for fast spor. Til hver av løsningene er det gjort korte kommentarer.

3.2 Rheda 1972

Dette er den klassiske løsningen for daglinje fra Rheda jernbanestasjon i Tyskland. Den prinsipielle oppbygging av Rheda 1972 er vist i figur 8.6. Over underbygningen er sporet bygget opp med et sementstabiliserende lag i bunnen. Deretter følger et lag styroporbetong som lastfordeling og frostisolasjon. På dette laget er det støpt en armert betongplate. Så er skinnestigen med betongsviller lagt ut og justert i permanent posisjon før faststøping. Det er etablert en monolitisk forbindelse mellom betongplaten og betongsvillene. Det er utsparinger i betongsvillene for langsgående armering for utlegging av betong mellom svillene. Selve svillene er forankret til underliggende armert betongplate med bøyler.

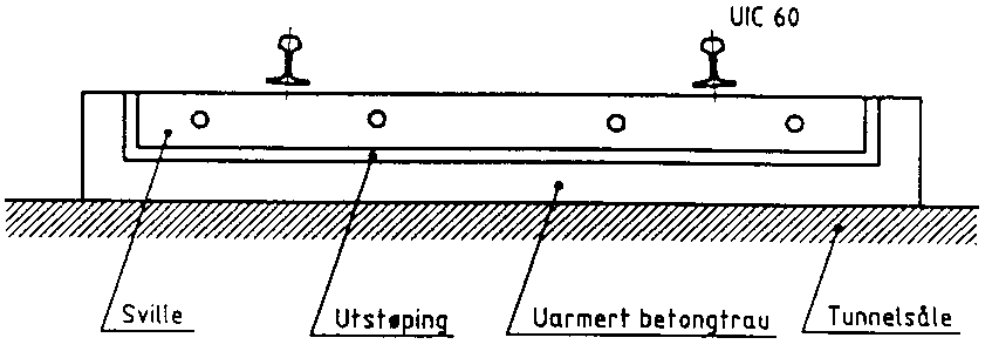


Figur 8.6 Fast spor av type Rheda 1972

Dette sporet har ligget siden 1972 uten annet vedlikehold enn utskifting av isolasjonsdeler i befestningen. Tilgrensende ballastspor er pakket flere ganger i samme tidsrom. Dette er en løsning som er kostbar å bygge, men konstruksjonen har vist seg å ha et betydelig potensiale for optimalisering.

3.3 Rheda/Sengeberg

En modifisert utgave av Rheda-sporet er vist i figur 8.7. Denne utgaven ble bygget i Sengebergtunellen. Et stort og velkjent tysk entreprenørselskap var delaktig i utviklingen av den forenklede løsningen. Konstruksjonen består av bl.a. et lag uarmert betongtrau. I dette laget legges sporkonstruksjonen. Sporet justeres i sitt endelige leie og støpes fast ved gjennomgående armering gjennom utsparinger i svillene.



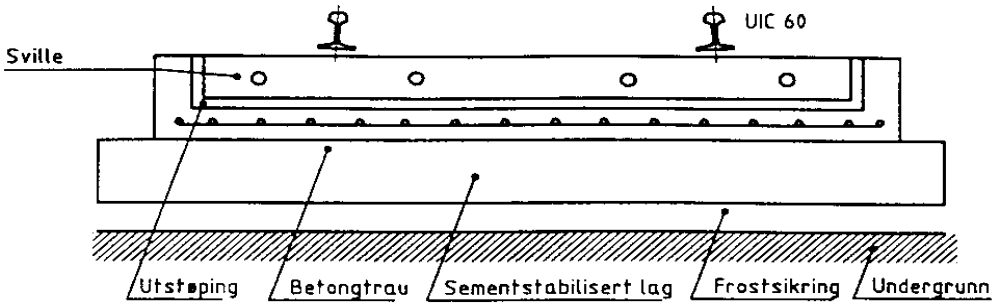
Figur 8.7 Fast spor av type Rheda/Sengeberg (1989)

Det ble utviklet en spesiell maskin for støping av betongtrauet. Sporet ligger på en høyhastighetsstrekning og målinger av sporet viser svært gode resultater mht. sporkvalitet.

Det kan stilles spørsmål om det er fornuftig å la betongtrauet være uarmert. Dette på grunn av betongens kryp- og svinnegenskaper.

3.4 Rheda/Breddin - Glöwen

Daglinjeløsningen av sporet i Sengebergtunnelen er vist i figur 8.8. I motsetning til situasjonen i Sengebergtunnelen er betongtrauet armert og lagt på et sementstabiliserende lag. Dette laget hviler igjen på et frostsikringslag. Sporet støpes fast i sitt endelige leie ved gjennomgående armering i utsparinger i betongsvillene til skinnestigen.

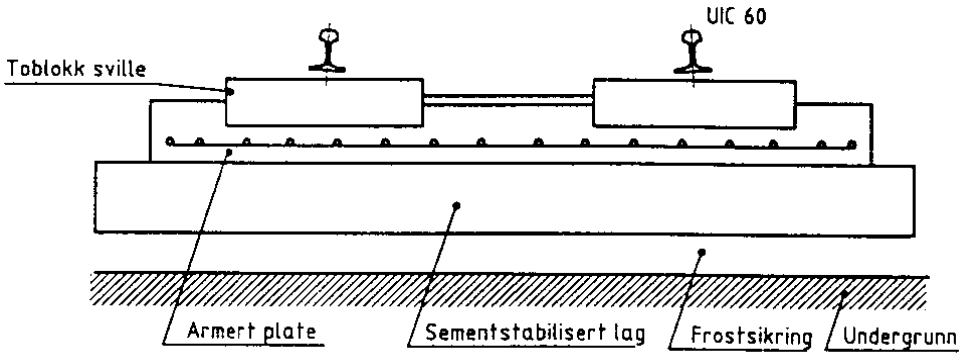


Figur 8.8 Fast spor av type Rheda/Breddin - Glöwen i daglinje (1994)

Dette sporet har holdt seg godt med hensyn på sporkvalitet.

3.5 Züblin

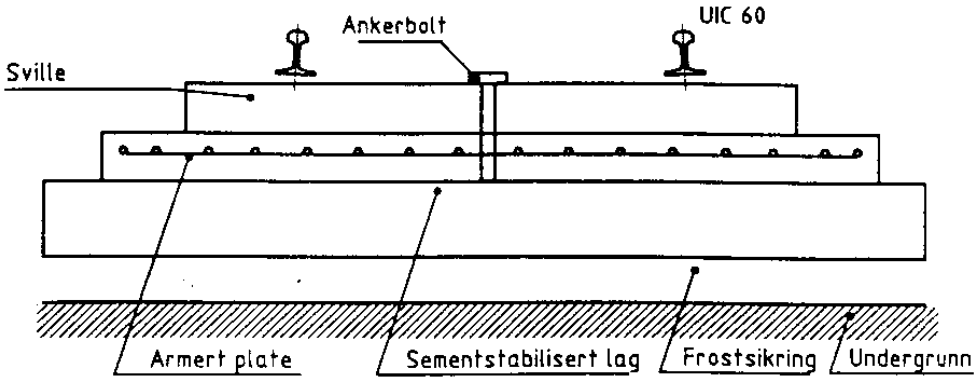
Denne løsningen, som er vist i figur 8.9, avviker prinsipielt fra Rheda ved at betongsvillene (to-blokksviller) settes i fersk betong. Sporet fikseres altså ikke før faststøping. Selve oppbyggingen av lagene under svillene er i prinsippet den samme som for Rheda-løsningene.



Figur 8.9 Fast spor i Züblin utførelse (Wittenberge 1994)

3.6 BTD - V2/Breddin - Glöwen

Denne utførelsen er vist i figur 8.10. Betongsviller blir lagt direkte på et armert betongbærelag. Sidekrefter tas opp med en stålforankring i midten av sporet. Selve oppbyggingen av lagene under svillene er i prinsippet den samme som for Rheda-løsningene.

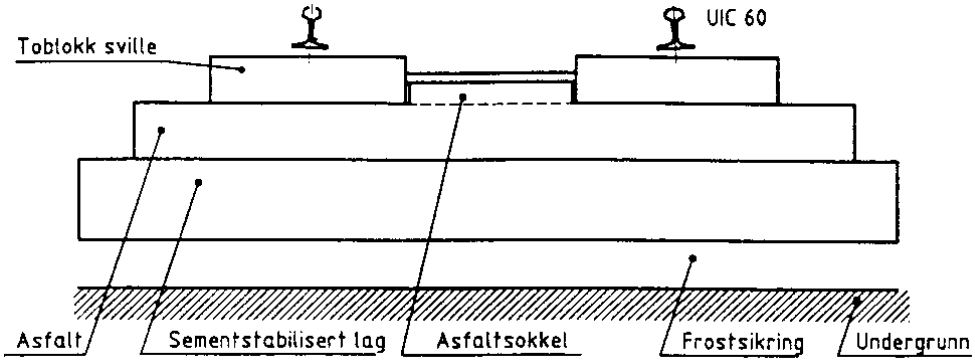


Figur 8.10 Fast spor i BTD utførelse (1994)

3.7 ATD

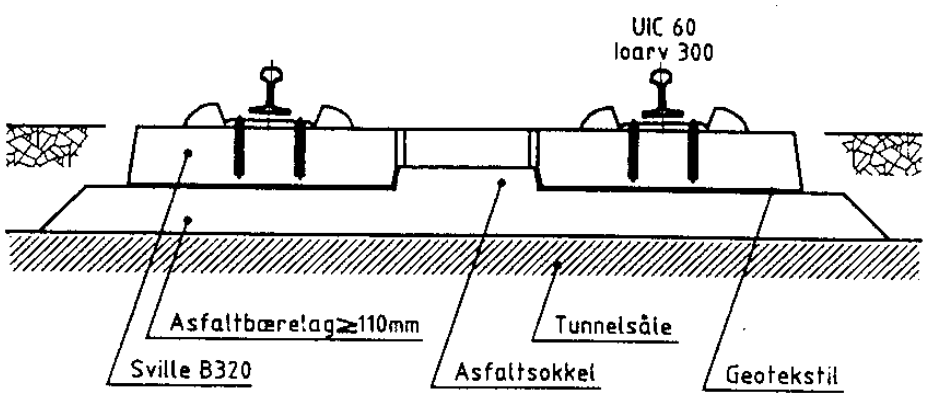
Daglinjeutgaven av ATD-løsningen er vist i figur 8.11. Betongsvillene legges direkte på et asfaltbærelag. Sidekreftene tas opp ved en asfaltsokkel i midten av sporet. Betongsvillene kan være i monoblokkutførelse eller i toblokksystem, som vist i figur 8.11.

Det ble bygget en 7 km lang dobbeltsporet prøvestrekning i en tunnel i 1994. I tunnelen ble både frostsikringslaget og det sementstabiliserende laget sløyfet. Dette har sin årsak i konstant høy temperatur og fast grunn i tunnelen.



Figur 8.11 Fast spor av type ATD for daglinje (Nantenbach 1994)

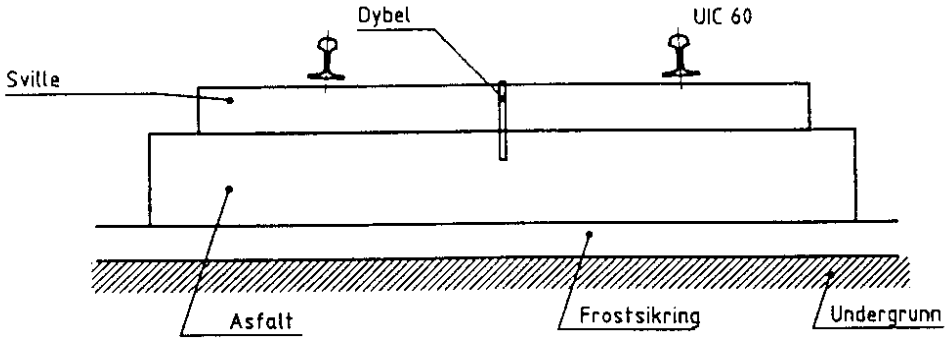
Det var en modifisert utgave av denne løsningen som var aktuell å bruke i Romeriksporten på Gardermobanen. Løsningen ble for såvidt akseptert som brukbar, men det forelå i 1994 lite erfaringsdata om sporveksler og ingen data om demping av strukturstøy for denne løsningen. Figur 8.12 viser hvordan ADT-spor i Romeriksporten var tenkt utformet.



Figur 8.12 Fast spor av type ATD. Planlagt løsning i Romeriksporten

3.8 Walter

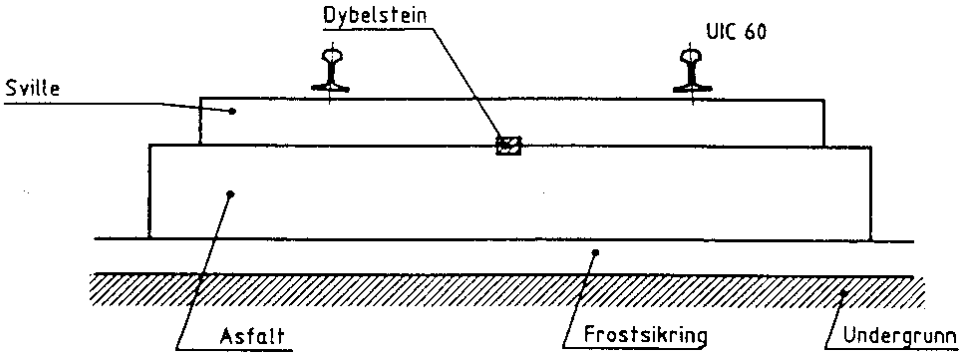
Også denne løsningen, som er vist i figur 8.13, har betongsviller lagt direkte på et asfaltlag. Prinsipielt er dette et ADT-spor, men løsningen har en annen svilleutforming med forankring i midten for å ta opp sidekrefter. Sidekreftene tas opp gjennom en ståldybel i stedet for gjennom en asfaltsokkel som i ADT-sporet. Selve oppbyggingen av lagene under svillene er i prinsippet den samme som for de øvrige løsningene nevnt ovenfor.



Figur 8.13 Fast spor av type Walter (Halle 1995)

3.9 Getrac

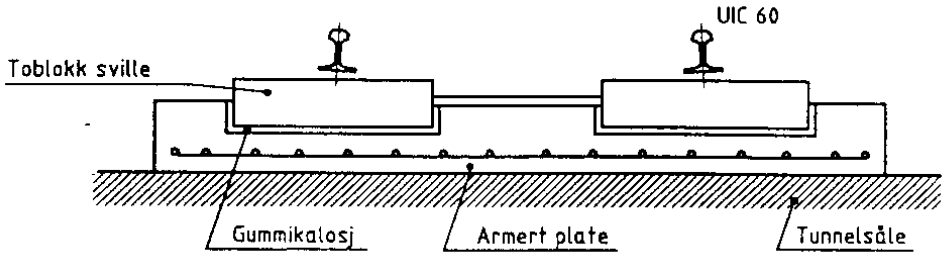
Også denne løsningen, som er vist i figur 8.14, har betongsviller lagt direkte på et asfaltlag. Prinsipielt er dette et ADT-spor, men løsningen har en annen svilleutforming med dybelstein i midten for å ta opp sidekrefter. Sidekreftene tas opp gjennom dybelsteinen i stedet for gjennom en asfaltsokkel som i ADT-sporet. Selve oppbyggingen av lagene under svillene er i prinsippet den samme som for de øvrige løsningene nevnt ovenfor.



Figur 8.14 Fast spor av type Getrac (Berlin 1995)

3.10 STEDEF

Løsningen, som er vist i figur 8.15, egner seg kun i tunneler. Betongsviller med ”gummikalosjer” støpes fast i betong. Sporet justeres til riktig leie før faststøping, omtrent som for Rheda-løsningene. Bærelaget er en armert betongplate.

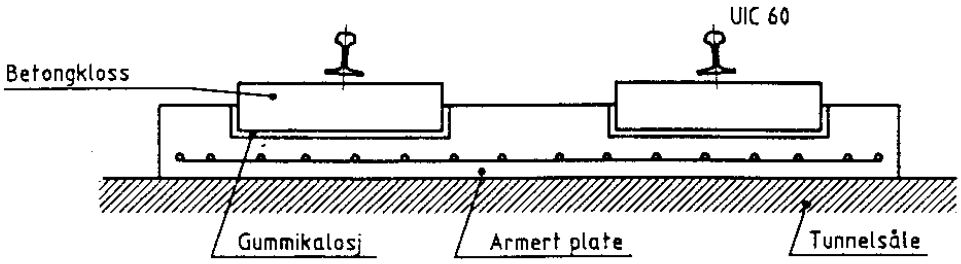


Figur 8.15 Fast spor av type STEDEF

STEDEF brukes bl.a i Frankrike og Sveits. Schweizerische Bundesbahn (SBB) har gode erfaringer med denne løsningen på de tunnelstrekningene hvor dette systemet ligger. Løsningen ble første gang installert så tidlig som i 1966, og denne har fungert godt siden. Deler av dette sporet ble skiftet ut etter en avsporing. Utskiftingen ble gjort uten spesielle vansker. Senere er denne løsningen brukt både på strekninger med sporveksler og på strekninger med tiltak mot strukturstøy.

3.11 Sonneville

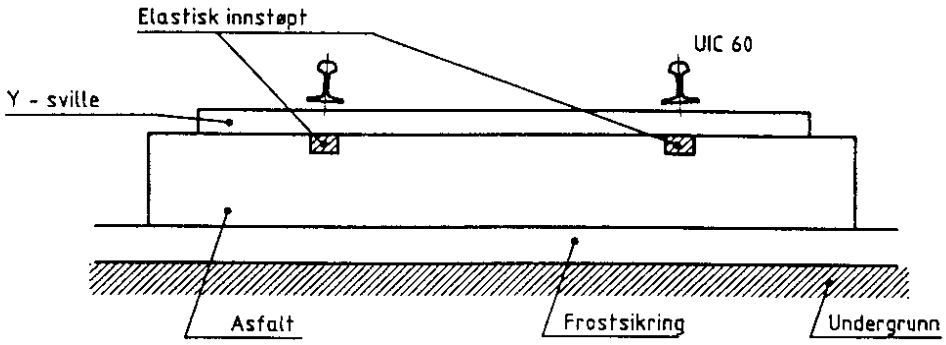
Løsningen, som er vist i figur 8.16, egner seg kun i tunneler. Denne løsningen er brukt i Eurotunnelen under den engelske kanal. Løsningen er en videreutvikling av STEDEF. Hovedforskjellen er at Sonneville-løsningen benytter betongklosser i stedet for betongsviller. Betongklossene med "gummikalosjer" støpes fast i betong. Sporet justeres til riktig leie før faststøping, omtrent som for Rheda-løsningene. Befestningen er også videreutviklet for Sonneville-løsningen. Bærelaget er en armert betongplate.



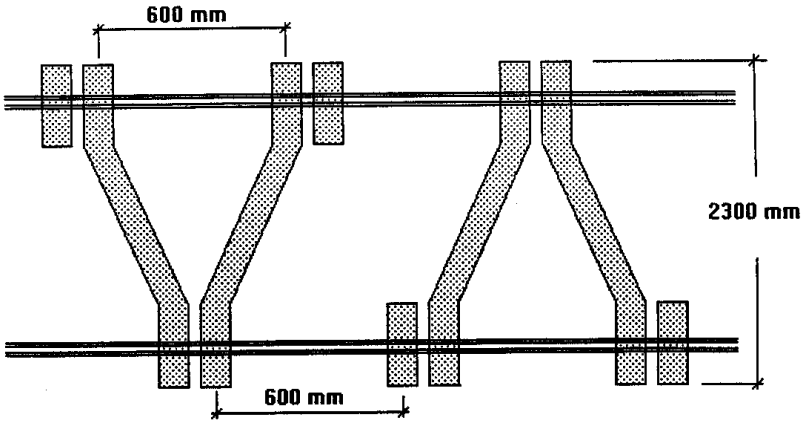
Figur 8.16 Fast spor av type Sonneville

3.12 FFYS

Denne løsningen, som er vist i figur 8.17, avviker fra de andre løsningene ved at stålsviller med Y-form anvendes som opplagring for skinnene. Stålsvillene legges direkte på et asfaltbærelag. Sidekreftene tas opp med langsgående stålforankring av sporet i asfaltbærelaget. Utforming av Y-sville er vist i figur 8.18. En sporkonstruksjon med Y-sville gir en betydelig høyere rammestivhet enn en konvensjonell sporkonstruksjon. Under asfaltbærelaget ligger et frostsikringslag over undergrunnen.



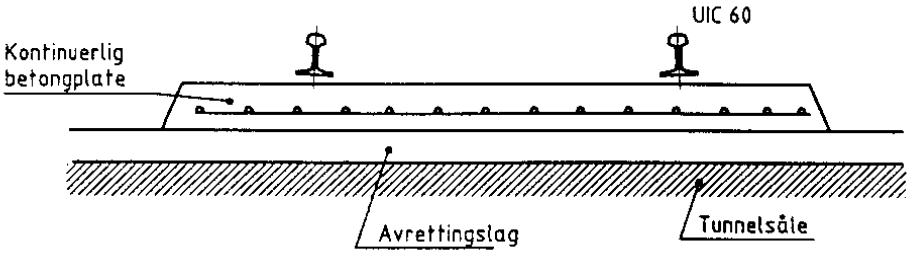
Figur 8.17 Fast spor av type FFYS (Halle 1995)



Figur 8.18 Prinsipiell utforming av stålsville med Y-form

3.13 PACT

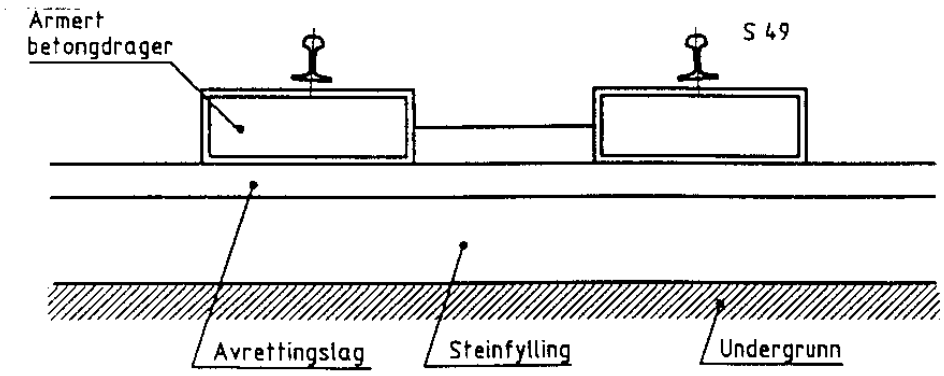
PACT har en kontinuerlig støpt betongplate (PAved Concrete Track) hvor hull for skinnefeste er boret ut og befestigelsen er festet med epoxymørtel. Denne løsningen er bl.a brukt på en godsbane i Canada med meget stor belastning (30 tonn aksellast). Tunnelversjonen av denne løsningen er vist i figur 3.19.



Figur 8.19 Fast spor av type PACT for tunnel

3.14 Icosit

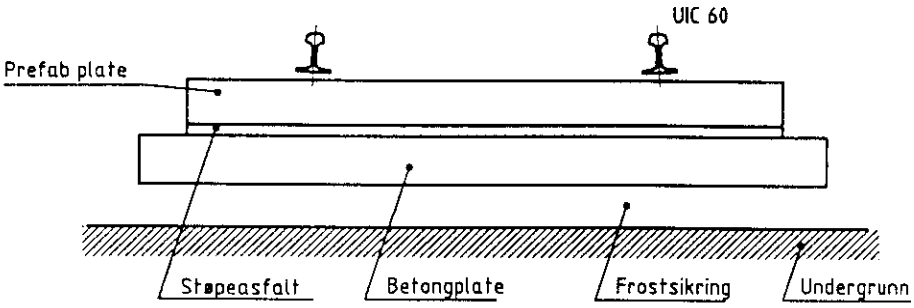
Denne løsningen egner seg både på daglinje, bruer og tunneler. Underlagsplater på elastisk underlag er festet til bærelag/bjelker i betong. Slike løsninger er særlig brukt på metroer, men de kan også brukes på jernbaner. Løsningen, som er vist i figur 3.20, ble brukt av AS Oslo Sporveier i Sinsenkrysset.



Figur 8.20 Fast spor av type Icosit. Løsning brukt av AS Oslo Sporveier i Sinsenkrysset

3.15 Prefabrikkerte plater

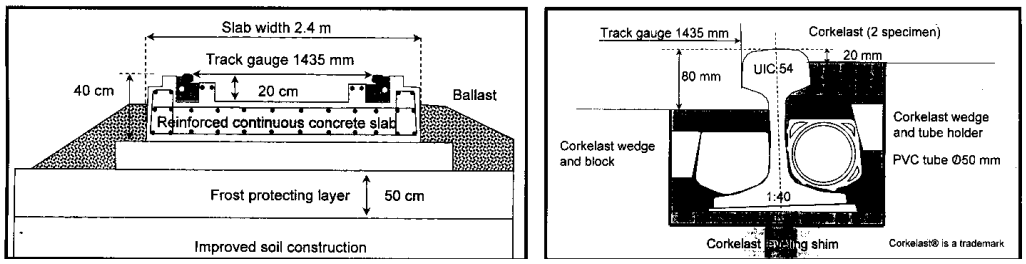
I Japan bygges de fleste faste spor med 5 m lange prefabrikkerte betongelementer på støpeasfalt. Denne løsningen brukes både på daglinje, bruer og i tunneler. Prinsippet for løsningen er vist i figur 3.21. Tyske undersøkelser viser at dette er en meget kostbar måte å bygge fast spor på. På strekninger med strukturstøy brukes gummimatter under de prefabrikkerte betongplatene.



Figur 8.21 Fast spor av prefabrikkerte plater

3.16 Kontinuerlig innspent skinne

De fleste sporkonstruksjoner er basert på at skinnen er festet i punkt over svillene. Men siden 1967 har det vært drevet forsøk i Nederland med kontinuerlig innspent skinner ved bruk av Corkelast (elastisk kunststoff). Dette systemet er kjent som ERC (Embedded Rail Construction). Prinsipp for systemet og innspenning av skinne er vist i figur 8.22. Erfaringene med dette systemet er at vedlikeholdsbehovet er lite. Dette systemet blir nå (1997) vurdert brukt på den nye høyhastighetslinjen mellom Amsterdam og den belgiske grensen. Som en del av denne vurderingen blir det bygget en 3 km lang teststrekning.



Figur 8.22 Prinsipp for ERC og prinsipp for innspenning av skinne

Kontinuerlig innspent skinne er også benyttet på noen bruer i Norge bl.a. pga. støyreduksjon.

LITTERATURHENVISNINGER

1. **Kaare Stjern – Fastspor i Norge. Kort vurdering av alternative løsninger og lønnsomhet,** Berdal Strømme (1997)

2. **Ragnar Hedström – Spårkonstruktion med asfalt. En litteraturstudie,** VTI-meddelande 722, (1996)

3. **Vassilios Profillidis – Railway Engineering,** (1995)

4. **Heiner H. Moehren – Paving alternatives to ballasted track. Track quality improvements to support high-speed rail,** Artikkel i AREA Bulletin, (desember 1997)

5. **Coenraad Esveld – Ballastless Track Offers Long-Term Advantages,** artikkel i Internasjonal Railway Journal, (september 1997)

6. **Josef Eisenmann – Railroad track structure for high-speed lines,** Railroad Track Mechanics and Technology, Proceedings fra et symposium ved Princeton University, (redigert av Arnold D. Kerr), side 39-61 (1975)

7. **Deutsche Bahn – Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn,** (Stand: 01.07.1994)

8. **Edgar Darr og Werner Fiebig – Entwicklungstendenzen der Festen Fahrbahn,** artikkel i ZEV + DET Glas. Ann. 122. Nr. 6 (Juni 1998)

9. **Günter Leykauf og Lothar Mattner – Feste Fahrbahn mit Asphalttragschicht,** artikkel i Eisenbahningeniør (49) 8/98

10. **Josef Eisenmann – Schotterloser Oberbau,**

11. **Edgar Darr – Qualität und Bestandigkeit der Gleislage von Festen Fahrbahnen,** artikkel i Eisenbahningeniør (48) 1/97

12. **Thomas Neidhart - Untergrundverformungen und Feste Fahrbahn,** artikkel i Eisenbahningeniør (47) 4/96

13. **Josef Eisenmann – Feste Fahrbahn auf Erdkörper,** artikkel i Eisenbahningeniør (48) 1/97

14. **Per Ullidtz – Modelling Flexible Pavement Response and Performance, 1. utgave,** Polyteknisk Forlag, Lyngby, Danmark (1998)

STIKKORDREGISTER

A

ADT-løsning · 5
ADT-spor · 19; 20
asfalt · 3; 5; 6; 8; 26
asfaltlag · 8; 9; 20
asfaltsokkel · 19; 20
ATD-løsningen · 19
avsporing · 5; 16; 21

B

ballast · 3; 4; 5; 6; 8
ballastmatter · 5
ballastrensing · 5; 6; 7
ballastsifferet · 11
ballastspor · 3; 4; 5; 6; 7; 14; 17
befestigelse · 5; 9; 14; 15
betongsviller · 16; 20; 22
bruer · 4; 16; 23; 24; 25
BTD utførelse · 19
byggehøyde · 3; 4

C

Corkelast · 3; 24

D

daglinje · 4; 16; 18; 19; 23; 24
Deutsche Bahn AG · 3

E

epoxymørtel · 23
ERC · 24; 25
Eurotunnelen · 3; 22

F

Fastclip · 14
FFYS · 22
fiktive undergrunnsmodulen · 12
fjellgrunn · 3
frostisolasjon · 16
frostsikringslag · 9; 18; 22
Frostsikringslag · 8
fullprofilboring · 4
fyllinger · 4

G

Gardermobanen · 3; 19
Getrac · 20; 21
gummimatter · 24

H

hardskumplater · 8
HGT - lag · 8
høyhastighetsstrekninger · 3; 4
høyhastighetstog · 3
høyhastighetstrafikk · 4

I

Icosit · 3; 23; 24

J

justering · 4

K

kjørekomfort · 15
klemkraft · 14
konstruksjonshøyde · 6
kontaktledning · 4

L

loarv 300 · 14
luftlyd · 5
løpemeterkostnaden · 5
løsmasser · 3

M

magerbetong · 8
massetransport · 4

N

Nationaltheateret · 3

O

Odemarks ekvivalensmetode · 11
Oslo Sporveier · 23; 24

P

PACT · 23
Pandrol · 14
Pickett og Ray · 11
platebelastning · 11
platebelastningsforsøk · 11
PR/e-clip · 14
prefabrikkerte betongelementer · 16; 24
prefabrikkerte plater · 5; 16; 24

R

Rheda · 9; 16; 17; 18; 19; 21; 22
Romeriksporten · 3; 5; 19; 20
rullende materiell · 4; 6; 15

S

Sengeberg · 17
Sengebergtunellen · 17
setninger · 4; 5
setningsfritt · 3; 4
Sinsenkrysset · 3; 23; 24
skinnebytte · 7
skinnefestet · 4
skinnehelning · 14
skinneprofil · 6
skinnesliping · 7
Sonneville · 22
sporjustering · 5; 6; 7
sporstabilitet · 4
sporvedlikehold · 4
Sporvekslene · 4
sporveksler · 5; 19; 21
Sporvidden · 14
sprengning · 4
STEDEF · 21; 22
strukturlyd · 5
strukturstøy · 19; 21; 24
styroporbetong · 9; 16
støpeasfalt · 16; 24
sviller · 3; 5; 10; 16

T

tunneler · 3; 4; 6; 16; 21; 22; 23; 24
tunnelsprengning · 6

U

Ullidtz · 11; 26
underbygning · 4; 5
underbygningen · 4; 9; 10; 16

V

Vossloh · 14

W

Walter · 20
Westergaard · 11
Winkler-fundament · 10

Y

Y-sville · 22

Z

Zimmermanns metode · 10; 11
Züblin · 18