

RESUMÉ

20. juni 2012

Undersøgelse af IC4-togets bremseevne – midtvejsrapport

Opgaven

DTU har udført en udredningsopgave for DSB og Transportministeriet om IC4-togets bremseevne. Baggrunden herfor er, at et IC4-tog ved en hændelse i Marslev i november 2011 havde en ekstraordinært lang bremselængde og overskred det punkt, hvor det skulle have standset, med ca. 550 meter.

Hændelsen er ultimo 2011 og primo 2012 blevet analyseret af Havarikommissionen, DSB samt leverandører og konsulentfirmaer, som ikke har identificeret væsentlige fejl ved IC4-togets bremsesystemer, men fundet to enkeltstående tekniske forhold, som dog ikke er tilskrevet særlig betydning for bremselængden. Undersøgelserne har peget på hypotesen om lav adhæsion mellem hjul og skinner som værende årsag, dog uden at dokumentere forholdene ved Marslev.

Med henblik på at skabe fuld klarhed over hændelsens årsag har DSB indgået aftale med DTU om at gennemføre en udredning, der kan belyse IC4-togets evne til standsning. Undersøgelsen omfatter togets systemtekniske konstruktion og sikkerhedskritiske funktion, særligt med henblik på it-soft- og hardwaremæssige funktioner og disses samspil med de elektromekaniske komponenter, der har betydning for bremseevnen. Togets tekniske konfiguration og funktion kan ikke adskilles fra – men indgår i løbende samvirke – med eksterne omgivelser (særligt adhæsion mellem hjul og skinner) og med menneskelige faktorer, særligt togets betjening og informationssystemer til lokofører.

I opgaven indgår rådgivning med henblik på tiltag og tilpasninger af systemer og drift med det mål, at IC4-toget under sikkerhedskritiske forhold med størst mulig sikkerhed kan bringes til standsning.

Opgaven er inddelt i fem arbejdsopgaver (WP), og det er aftalt, at WP1-WP3, der omhandler bremseevne og eksterne forhold ved hændelsen i Marslev, påbegyndes i april 2012 og afrapporteres juni 2012, mens WP4 og WP5 (henholdsvis lokoførers informationssystem og detektering af glatte skinner)

afrapporteres september 2012. Der er indbyrdes sammenhæng mellem arbejdspakkerne, og der foretages derfor endelig afrapportering af opgaven i september 2012.

Metoden

DTU har gennemgået og analyseret det omfattende datamateriale fra togets datalogning-systemer, dels fra hændelsen i Marslev og dels fra testkørsler ved Vojens, foretaget af Havarikommissionen og DSB. Disse data muliggør en beregning af de faktiske skinneforhold ved Marslev-hændelsen.

DTU har udarbejdet en funktionel model af samtlige forhold – dvs. tekniske forhold, eksterne omgivelser og togets betjening – der har betydning for togets evne til at standse. Modellen understøttes af en fejltræsanalyse, der kortlægger og skaber overblik over mulige fejlhændelser og deres sandsynlighed.

På baggrund af overblik over togets funktionelle struktur samt de sikkerhedskritiske elementer har DTU opbygget en fuldt dynamisk model over samtlige centrale funktioner relateret til togets bremsevne, omfattende elektriske (computere), elektromekaniske og pneumatiske komponenter. Modellen er parametriseret på baggrund af omfattende dataanalyser af testkørsler ved Vojens og data fra hændelsen i Marslev. Det er DTU's vurdering, at modellen er i god overensstemmelse med togets konkrete adfærd i testsituationerne (såvel overordnet som alle loggede tekniske komponenter), og den kan bruges til troværdig analyse og simulering af hændelserne samt til at beregne effekten af optimerede delsystemer og køreadfærd.

Hændelserne er analyseret og simuleret på et højt detaljeringsniveau og mulige fejlscenarier er tjekket og analyseret på basis af fejltræsanalyser samt detailanalyser af logfiler fra Vojens og Marslev. Særligt DSB's testkørsler ved Vojens har givet et helt nødvendigt grundlag for opgaven, idet datagrundlaget omfatter tidsserier i størrelsesordenen en million datapunkter, der benyttes til at validere modellen og dens parametre. Hertil kommer, at hypoteser fra tidligere rapporter også er analyseret.

Metoden vedrørende WP4 og WP5 er ikke endeligt fastlagt, idet de afhænger af resultater i WP1-WP3. Som del af WP2 har DTU dog foretaget indledende litteraturgennemgang af rapporterede hændelser af glatte skinner i særligt UK og Holland. Dette arbejde videreføres i WP5.

Resultater overordnet

Skinneforhold ved Marslev

DTU har estimeret den faktiske adhæsion mellem skinner og togets hjul ved Marslev på baggrund af logfiler over blandt andet bremsekraft og hastighed samt deraf afledt deceleration. Dette viser sig at være muligt, idet der undervejs på strækningen er nogle hjulaksler, der bremses fuldt ud, mens andre glider ("slider"). På disse punkter kan beregnes en øvre og nedre grænse for adhæsionen. Beregningerne er uafhængige af togets bremsesystem, idet de alene baseres på bremsekraft målt ved kompressortryk samt hastighedsændringer.

Adhæsionen (α) er et mål for "glathed" mellem hjul og skinne, og det kan derfor afgøres, om der var glat eller ej og i hvilket omfang. Adhæsionen ved Marslev var "lav" de første ca. 700 meter (α omkring 0.06) faldende til "meget lav" de næste 1500 meter (α omkring 0.04), indtil normal adhæsion på de sidste 650 meter sikrer opbremsningen ($\alpha > 0.15$).

Som forventet, et halvt år efter hændelsen, har DTU's gennemgang af data af vejrforhold ikke kunnet angive nogen årsag til, at der var glat ved Marslev den 7. november 2011.

Generelt om glatte skinner

DTU's litteraturgennemgang viser, at glatte skinner er vanskelige at detektere og forudsige. Det viser udenlandske erfaringer, hvor "sliding" og "stations overruns" i UK i halvdelen af tilfældene ikke kunne dokumenteres på skinneoverfladen, selv ved inspektion umiddelbart efter hændelsen. Fysisk-mekaniske forhold tilsiger, at selv meget små mængder biofilm, som er vanskelige at detektere, kan give lav adhæsion. Tilsvarende rapporteres fænomenet, såvel i litteratur fra UK og Holland som ved interview af DSB-personale i DK, at opstå uvarslet. Der er dog en sammenhæng med årstid og fugtige vejrforhold.

Baseret på foreløbige analyser af data fra sammenlignelige lande må det konkluderes, at skinneforholdene ved Marslev var usædvanlige, dog ikke mere end at hændelser af denne type ikke er ekstremt sjældent forekommende i Danmark. Danske data er sporadiske, men modsiger ikke denne vurdering. Da sammenlignelige data ikke umiddelbart er tilgængelige, har det ikke været muligt at beregne en hyppighed med rimelig sikkerhed. DTU's undersøgelser er foreløbige på dette punkt og fortsætter i WP5.

IC4-togets bremsesystem

Sikkerhedsbremssystemet på IC4 virker som designet foreskriver. Ud over de fejl, som blev konstateret af DSB og af Havarikommissionen, har DTU ikke fundet andre tegn på implementering, som er i modstrid med sikkerhedsbremssystemets specifikation.

Konklusionen bygger på sammenligning af DTU's dynamiske model for bremsesystemet og datalogningen af toget under hændelsen i Marslev samt ved testkørsler ved Vojens. DTU's model er bygget efter bremsesystemets krav og specifikationer. Overensstemmelsen mellem data og model i et meget kompliceret og omfattende sæt af situationer og datapunkter betyder, at DTU konkluderer, at sikkerhedsbremssystemet fungerer, som designet foreskriver. Sikkerhedsbremssystemet omfatter i denne forbindelse såvel de af togcomputerens funktioner, som vedrører bremsesystemet, decentrale bremsecomputere som de elektromekaniske komponenter, der udgør sikkerhedsbremssystemet.

Denne testmetode er sædvanlig i test af komplekse systemer, der består af flere overlejrede og redundante computer- og elektromekaniske systemer.

DTU har i tilslutning til bremsesystemanalysen fundet nedennævnte fejl og u hensigtsmæssigheder i designet, som ved udbedring kan nedbringe bremselængden. Hvert af forholdene er analyseret, og

det er beregnet, hvilken reduktion i bremselængden der ville realiseres ved Marslev-hændelsen, dersom fejlen eller uhensigtsmæssigheden ikke havde været til stede. Det skal understreges, at de enkelte effekter ikke umiddelbart kan adderes.

DSB og Havarikommissionen har tidligere konstateret fejl i udførelsen af bremsesystemet:

- Rørføring til tryksensor til P-bremse var monteret forkert. Selv med en adhæsion på under 0.05 skulle WSP systemet forhindre hjulblokering. Det gør det ikke på aksler med P-bremse. Årsag: P-bremsen aktiveres, som følge af fejl i rørføring til tryksensor, ved høj hastighed, når bremsekommandoen sættes til "nødbremning". Wheel Slide Protection-systemet (WSP) kan ikke forhindre hjulblokering med aktiveret P-bremse. (Reduktion i bremselængde¹ på ca. 30 meter).
- En parameter for referencehastighed er sat forkert i bremsecomputer BCU_T3 (1.5 m/s² i stedet for 1.2 m/s²). DTU har simuleret konsekvenserne heraf og finder, at dette forhold kun har en ringe effekt på bremselængden. (Reduktion i bremselængde² på ca. 10 meter).
- ATC-systemet måler udelukkende hastighed på aksel 5. Når denne glider eller blokerer, som ved Marslev, er konsekvensen en for sen aktivering af ATC's automatiske nødbremse-funktion, samt at lokoføreren får forkert information om togets reelle fart. Lokofører kan nødbremse uafhængigt af ATC-systemet. Virkningen i Marslev er lille, da bremsen allerede er i trin 7.

I tilslutning til ovenstående forhold har DTU identificeret følgende uhensigtsmæssigheder:

- Magnetbremse bør altid kunne aktiveres. Magnetskinnebremsen er ikke påkrævet for IC4, men bør kunne aktiveres, da litteraturen viser, at de har en effekt ved visse typer belægninger, som giver glathed mellem hjul og skinne. Det bør overvejes, om lognings- og bremsesystemet burde tilpasses så magnetbremsen aktiveres automatisk ved høj "slide". (Reduktion² i bremselængde ca. 150 meter).
- "Retardere" (hydrodynamiske bremsere) kobles ud, når én aksel ud af fire glider, selv om den aksel, som retarderen sidder på, ikke glider. "Retardere" er en del af driftsbremsen – ikke sikkerhedsbremsen og er en del af "power pack". Den manglende virkning har betydning for de lave bremsetrin. (Ved optimal funktion fås en reduktion i bremselængden på ca. 60 meter).

¹ Målt i forhold til den faktiske bremselængden på ca. 2870 meter ved Marslev, dersom rørføring til tryksensor havde været korrekt

² Dersom magnetbremsen var blevet aktiveret i trin 8 (nødbremsetrin) ved Marslev målt i forhold til faktisk bremselængde på ca. 2870 m

- Med lav adhæsion forårsager IC4's cross-blending, at der kun bremses effektivt med 6 aksler, indtil føreren sætter bremseniveau til "nødbremsning", eller den pågældende hjulaksel går i slide. Dette fungerer ved normale forhold, men ved "lav" til "meget lav" adhæsion er det ikke optimalt og giver øget bremselængde. (Reduktion i bremselængde ca. 70 meter).
- Ligesom Havarikommissionen finder DTU, at hastighedsangivelsen ved slide på aksel 5 er misvisende lav. Dette forhold har betydning for to forhold, dels at ATC-systemet får forkert information, som nævnt ovenfor, dels at togføreren misledes om togets reelle fart.

Endelig kan det nævnes, at nyere Wheel Slide Protection-systemer er designet til at fungere bedre ved meget lav adhæsion.

Ovennævnte reduktioner i bremselængde er beregnet og afhænger af modellen for den funktionelle sammenhæng mellem "slide" og adhæsion. DTU har ved beregningerne anvendt den samme modeltype som anvendes af det internationale standardiseringsorgan for WSP-systemer. Modellen understøttes af data fra Marslev. Imidlertid er der i litteraturen andre modeltyper, som kan ændre ovenstående estimater af reduktion i bremselængden. Estimerne er derfor kun indikative.

Ovennævnte forhold vurderes således ifølge konventionel teori og standarder for implementering af WSP-systemer at kunne reducere bremselængden ved glat føre.

I Marslev-tilfældet vil overskridelsen på ca. 550 meter kunne reduceres med ca. 200-250 meter, dersom alle de foreslåede tiltag gennemføres. Det bemærkes, at man ikke kan addere de enkelte effekter ved introduktion af flere tiltag som følge af dynamiske forhold.

Køreinstruks og menneskelig adfærd

DTU er informeret om, at køreforskrifter er overholdt og har ved detailanalysen af logfiler ikke fundet anledning til anden opfattelse.

DTU's analysegrundlag og værktøjer muliggør vurdering af effekten af at optimere køreinstruksen i tilfælde som Marslev. Analyserne viser, at:

- en tidligere udløsning af den magnetiske bremse (ved tilpasset signaltransmission og infosystem) kan afkorte overskridelsen med yderligere op til ca. 100 meter afhængigt af belægningens art på skinnen.
- en reduceret hastighed – fra 177 km/t til 155 km/t ved første signal – ville reducere standselængden med yderligere ca. 300 meter. I den konkrete Marslev-hændelse var der information om trafikstatus og et skinneføre, der muliggjorde, at man – ved ændret kørepolitik – havde kunnet nedbringe hastigheden til 155 km/t ved første signal.

Informationssystem

En køreinstruks er naturligvis sammenhængende med og betinget af et præcist og agilt informationssystem. DTU's videre arbejde vil omfatte såvel information om eksterne forhold vedrørende skinne samt mulighed for forbedret logning af begyndende "slide".

Samlet konklusion

Den helt overvejende årsag til den lange standselængde ved Marslev var glathed mellem skinner og hjul. Glatte skinner er et forhold, der bør tages højde for, og hvis effekt kan påvirke alle togtyper. IC4-togets sikkerhedsbremssystemer virker som designet foreskriver, og DTU's undersøgelser har ikke fundet tegn på, at implementering skulle være i modstrid med sikkerhedsbremssystemets specifikationer. Sikkerhedsbremssystemet omfatter i denne forbindelse såvel de af togcomputerens funktioner, som vedrører bremssystemet, decentrale bremsecomputere samt de elektromekaniske komponenter, der udgør sikkerhedsbremssystemet.

DTU har identificeret en række uhensigtsmæssigheder i designet og påpeger muligheder for at optimere bremssystemet. Samlet ville udbedring af forholdene og optimering af de tekniske systemer kunne have nedbragt standselængden ved Marslev med ca. 200-250 ud af de samlede godt 550 m, og det kritiske punkt ville være overskredet med ca. 300-350 m. Standselængden skal derfor reduceres ved en kombination af bedre informationssystemer, og dermed sammenhængende optimerede kørepolitikker, samt ved teknisk optimering af blandt andet WSP-systemer, en mere robust hastighedsmåling og brug af togets magnetbremser.

DTU vil som en del af undersøgelsen arbejde på at konkretisere, hvilken kørepolitik der ved danske forhold vil kunne reducere sandsynligheden for sikkerhedskritisk lang standselængde. Hertil kommer, at DTU vil kunne gå i dialog med DSB og leverandører om forbedring af de tekniske komponenter.

Dokumentation af metode, data og resultat

DTU har, som led i midtvejsrapporten, afleveret et teknisk bilag i form af en PP-serie, som uddyber undersøgelsens afgrænsning, metode, data, resultater og anbefalinger.

Projektledelse og ekspert-team

Direktionsansvarlig:	Koncerndirektør Niels Axel Nielsen
Projektleder:	Prof. Bjarne Kjær Ersbøll
Projektadministration:	Kontorchef Angela Silke Petersen

DTU Informatik:

Prof. J. Madsen
Prof. B. Ersbøll
Prof. H. Spliid
Prof. R. Larsen
Lektor P. Pop
Lektor M. Kulachi
Ph.d. stud. R. Gronskytte
Ph.d. stud. D. Tamas-Selicean
Ph.d. stud. O.H.A. Nielsen

DTU Elektro:

Prof. M. Blanke
Lektor N.A. Andersen
Adjunkt R. Geleazzi
Ph.d. stud. E. Bayramoglu
Ph.d. stud. S. Hansen

DTU Management Engineering:

Prof. H.B. Andersen
Seniorforsker I. Kozine
Seniorforsker N.J. Duijm
Seniorforsker A. Alapetite
Seniorforsker J. Thommesen

DTU Mekanik:

Ingeniørdocent P. Klit

DTU Systembiologi:

Prof. S. Molin