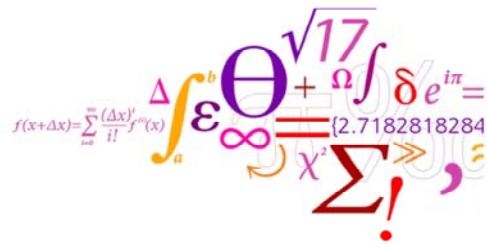


Undersøgelse af IC4 Bremsesystem og Glatte Skinner



Midtvejsafrapportering

Opgaven

På foranledning af DSB leverer DTU på baggrund af et omfattende forsknings- og udviklingsarbejde en udredning, der kan belyse IC4 togsystemernes maksimale evne til standsning.



Opgaven består i

- En gennemgang af IC4 togenes bremsesystemer med henblik på en vurdering af systemernes samlede funktion og sikkerhed.
- En analyse af forhold, der har betydning for togsystemernes evne til opbremsning som følge af lav adhæsion mellem hjul og skinner.
- 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.

Opgavens afgrænsning

DTU udfører en uafhængig undersøgelse og vurdering af IC4 togets bremseadfærd ved Marslev den 7. november 2011 med henblik på en analyse af togets bremseegenskaber og optimering af disse.

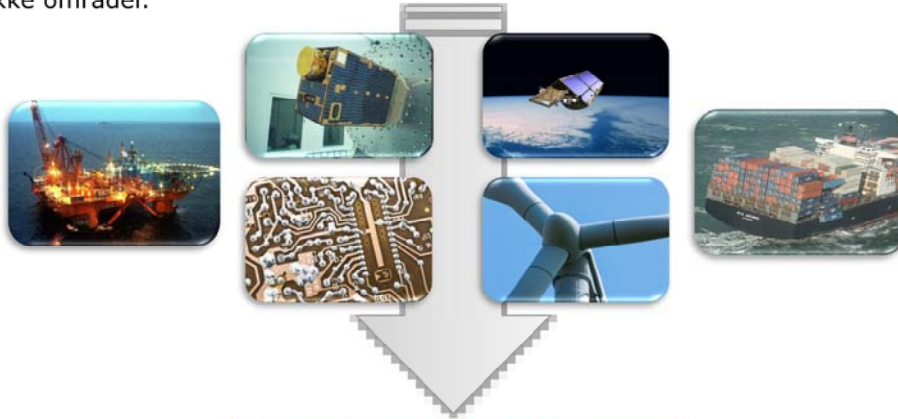
Udgangspunkt for undersøgelsen er Marslevhændelsen og data fra Vojens testkørsel.

Desuden gennemgår DTU forhold og metoder omkring alarminformation og logning af hændelser, og undersøger muligheder for monitorering eller forvarsling af områder med glatte skinner.



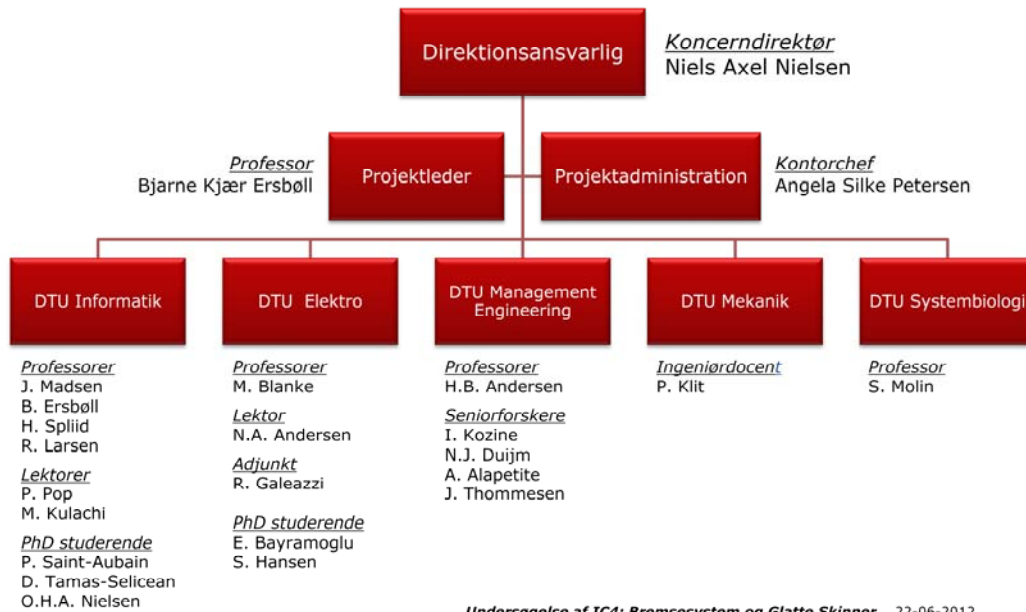
Forudsætninger for løsning af opgaven

DTU har omfattende viden om design af sikkerhedskritiske systemer og egenskaber ved materialer, maskiner og komplekse systemer indenfor en lang række områder.



På denne basis kan DTU udføre en overordnet vurdering af IC4 togets bremsesystemer og bremseadfærd

Projektledelse og Ekspert-teams



Opgaveløsningens to faser

Fase 1: Undersøgelse IC4 togets bremsesystemer

- Start: medio april 2012
- Midtvejsrapportering: medio juni 2012

Fase 2: Undersøgelse af IC4 togets førerinformationssystemer

- Start: ultimo maj 2012
- Samlet rapportaflevering: medio september 2012

AP1

AP2

AP3

AP4

AP5

T

U

S

E

E

1

F

a

s

e

2

DTU's fremgangsmåde

Systemarkitektur

- Kortlægning af de enkelte funktionsblokke i IC4 systemet og deres sammenhæng samt hvilke signaler og fysiske variable der findes mellem de enkelte hovedkomponenter.

Kausalitet

- Beskrivelse af årsags-virkningskæder mellem fysiske enheder og funktionsblokke samt opstilling af en risikoanalyse, hvor en kausalmodel af både tog og eksterne forhold - som for eksempel vejrlig - er taget i betragtning.

Simulering

- Simuleringsmodellen har IC4 togets bremse- egenskaber. Dette gør det muligt at kunne gennemspille Marslevhændelsen og afprøve IC4 togets bremseadfærd under forskellige forudsætninger.

Metode for IC4 undersøgelsen ^{1/2}

- Manualer, diagrammer, specifikationer.
- Log data fra Marslev og fra testkørsler fra Vojens.

Udgangspunkt



- Identifikation af delkomponenter og deres sammenhænge.

Forståelse



- Beregningerne er uafhængige af togets bremsesystem, idet de alene baseres på bremsekraft målt ved trykket i bremsecylindre samt målt hastighed og position.

Adhæsionsberegning



- Opbygning af en simuleringsmodel for IC4 togets bremsesystem.
- Validering af model i forhold til Vojens data + Marslev data.
- Da der er overensstemmelse mellem simuleringsresultater og resultater fra testkørslerne, er det rimeligt at antage, at modellen dækker de vigtigste aspekter af IC4 bremsesystemet

Model



Metode for IC4 undersøgelsen ^{2/2}

- Identifikation af fejlsценарier af IC4 togets bremsesystem.
- Opbygning af fejlmodel.

Fejltræmodel



- Opstilling af hypoteser på baggrund af:

- *Log data fra Marslev og testkørsler fra Vojens*
- *Opstilling og analyse af fejlmodel*
- *Minutios dataanalyse*
- *Gennemgang af tidligere udarbejdede rapporter*

Hypoteser



- Afprøvning af hypoteser ved brug af simuleringmodel.

Analyse



Resultater - overordnet

Eksterne faktorer

- Der var glat ved Marslev den 7. november 2011 – men ikke *ekstremt* (usandsynlig) glat
- Glatte skinner er et jævnlige forekommende vilkår, som man kan tage forholdsregler for

Bremsesystem

- På nær nedenstående fejl/uhensigtsmæssigheder virker IC4 bremsesystem som designet foreskriver.
- Bremsesystemet kan optimeres ved at justere på:
 - Rørføring
 - Retardere
 - Cross-blending
 - Magnetisk bremse
 - ATC hastighedsmåling
 - Hastighedsoplysning til lokofører
 - WSP referencehastighed

Menneskelige faktorer

- Ved Marslevhændelsen gav togførerinformationssystemet ikke optimal info til lokofører
- IC4 Infosystem og driver policy kan optimeres med henblik på hensigtsmæssig adfærd ved glatføre

DTU's resultat

- Ved en optimering af system og adfærd vil IC4's bremselængde ved Marslev den 7. november 2011 kunne afkortes med i alt ca. 550 m. Hertil bidrager en optimering af de tekniske faktorer med ca. 250 m, og en justering af førerinformationssystemet og tilsvarende tilpasning af køreadfærd med ca. 300 m.

MARSLEV FACTS

Tidslinje


Tid	Fakta
15:15:58	Passage af ATC balise ved AM-signal 2133.
15:16:34	Bremsning indledes (ca. 220 m før AM-signal 2153).
15:16:38	Passage af ATC-balise foran AM-signal 2153, fart 177 km/t.
15:17:25	Passage af ATC-balise ved AM-signal 2173, 2000 m efter AM-signal 2153.
15:18:00	Toget standser 651 m efter AM-signal 2173.

Baliser er magnetpoler (antennor) langs skinnerne hvis placering er kendt.

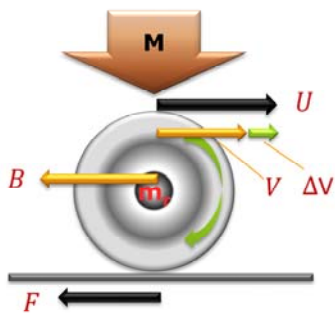
Tidspunkter fremgår af togets logsystemer. Der er to uafhængige logsystemer. Tidsopløsningen er 1 sekund.

Fart er målt hjulhastighed som er et pålideligt mål for toghastighed så længe der ikke er glidning ("slide")

Opgave
Metode
Resultater
Anbefalinger



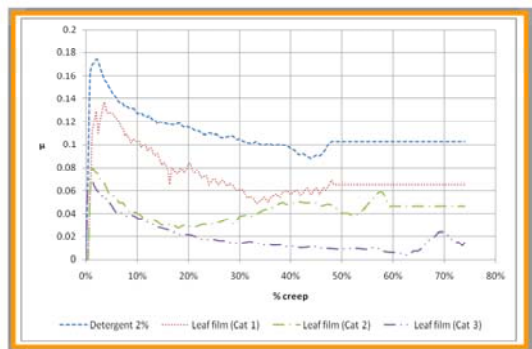
Bremsekraft der overføres



$$F_w = B + m_r \frac{dV}{dt}$$

$$F_t = \begin{cases} F_w & \text{hvis } F_w \leq \alpha (\Delta V) g M \\ \alpha (\Delta V) g M & \text{hvis } F_w > \alpha (\Delta V) g M \end{cases}$$

Symbol	Forklaring
M	vægt på aksel [kg]
m_r	roterende masse [kg]
V	periferihastighed af hjul [m/s]
U	togets hastighed [m/s]
ΔV	forskel mellem U og V [m/s]
B	bremsekraft på hjul [kN]
F_w	bremsekraft på skinne [kN]
F_t	bremsekraft opnået [kN]
g	tyngdeacceleration [m/s ²]
α	adhæsion (funktion of "slide")



Adhæsionskurver - eksempel GM/GN2695 (2010)

13
Undersøgelse af IC4: Bremsesystem og Glatte Skinner 22-06-2012

Figuren illustrerer et hjul der roterer på skinnen.

Togets fart er U [m/s] eller [km/h]. (divider [km/h] med 3,6 for at få [m/s])
Hjulets periferihastighed er V . Hvis der er glidning er der en forskellen $\Delta V = U - V$.

Begrebet relativ glidning (slide eller creep på engelsk) er $(U - V) / U$ (U forskellig fra nul).

Formlerne øverst viser den bremsekraft som hjulene overfører til skinnen. Hvis adhæsionen er højere end svarende til bremsekraften der ønskes overført, får vi intet glid mellem hjul og skinne. Hvis adhæsion er mindre, glider hjulet.

Adhæsion er det antal "g" man kan bremse (decelerere) med. Hvis adhæsionen er 0.1 er bremseevnen $0.1 * 9.82$ [m/s²] svarende til en deceleration på 0,98 m/s² eller 1 m/s² i runde tal.

Figuren viser adhæsionskurver for skinner med forskellige belægningsarter: vand og blade i 3 kategorier. Kurverne stammer fra WSP test forskrift (Rail Industry Guidance Note GM/GN2695, 2010 udgaven). Som det ses afhænger formen og niveauet på adhæsionskurven meget af belægningens art.

Estimat af Marslev adhæsion

Fysikkens love

Hvis der ikke er glid er adhæsionen $\alpha(0)Mg$ større end bremsekraft F_w

Hvis der er glid er adhæsionen αMg mindre end bremsekraft F_w

Bremsekraften F_w er kendt idet bremsecylinder tryk er målt på alle aksler

Der er tidspunkter hvor nogle hjul ikke glider medens andre glider

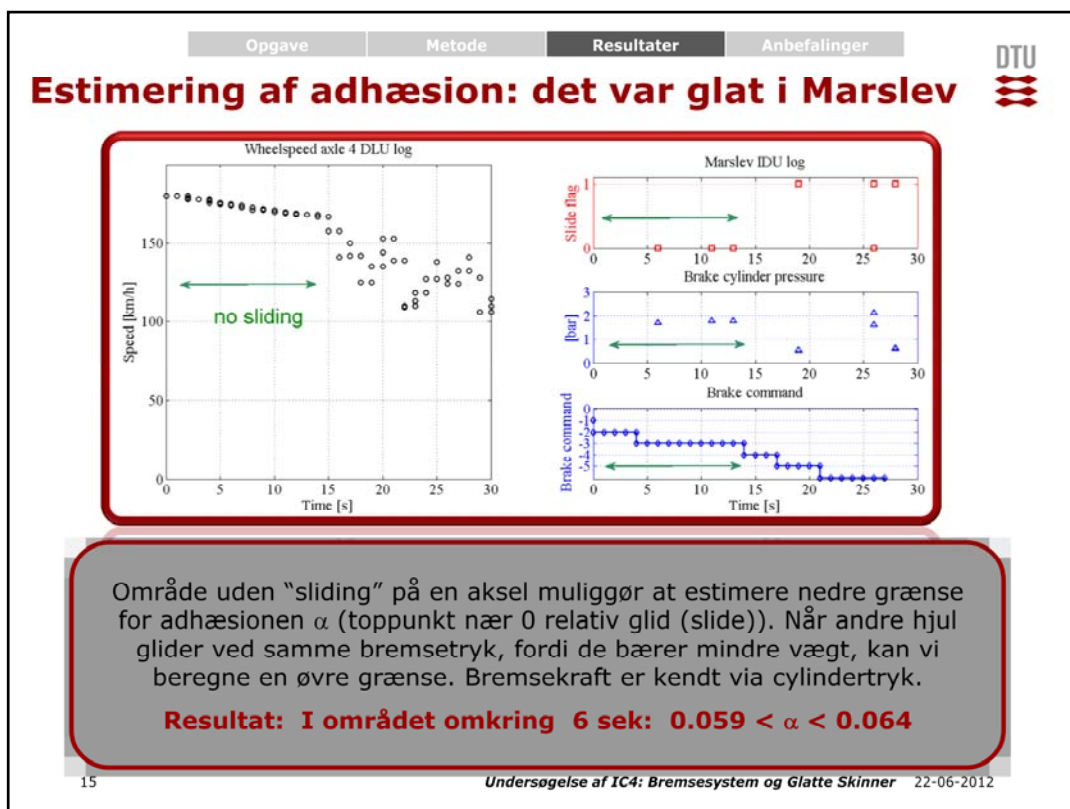


Vi kan estimere adhæsion fra loggede data i tidsrummet 0-15 sek.

For at fastlægge hvilken adhæsion der har været ved Marslev benytter vi de fakta om tid, afstand og fart der er tilgængelige. Desuden benyttes fysikkens love. Dermed bliver det muligt at estimere hvilken værdi adhæsionen havde ved Marslev.

Den kraft som bremsen giver, er specificeret i datablade for bremserne. Vi har checket disse data mod målte bremseforløb fra Vojens teststrækningen, og finder god overensstemmelse. Det testede togsæt bremses lidt bedre (5%) end specifikationen kræver.

Når én aksel glider (slider) samtidig med at en anden ikke glider, og bremsekraften er kendt, kan vi bestemme nedre og øvre grænser for adhæsionen.



Øverste plot til venstre i figuren viser målt hastighed på aksel 4 fra Marslev. De første 15 sekunder viser målingen et jævnt aftagende forløb. Samtidig er der et bremsetryk, vist i figurens midterste plot i højre side, hvoraf bremsekraften kan bestemmes. Der bremses med denne aksel uden glidning. Dette giver en nedre grænse for adhæsionen. Andre aksler udviser glidning i dette tidsrum. Bremsetrykket er det samme på disse aksler (trailer aksler) men der er forskel i den vægt der hviler på de enkelte aksler. Ud fra disse informationer kan en øvre grænse findes for adhæsionen.

Slip optræder på aksel 4 efter 15 sekunder hvilket ses af at målt hjulhastighed fluktuerer. Bremsecomputeren har et signal, vist i øverste plot til højre, som informerer om slip. Dette stemmer med den observerede hjulhastighed.


Bremsekommandoen er vist i nederste plot til højre. Bremsekommandoen er konstant i tidsrummet 4 til 13 sekunder.

Estimerede nedre grænse for adhæsion i tidsrummet umiddelbart efter 6 sek i Marslev er 0.059. Øvre grænse til samme tidspunkt er 0.064. Dermed konkluderes at tilstanden var "glat" i Marslev.


Man benytter betegnelsen "normal" ved adhæsion over 0.1, betegnelsen "glat" i intervallet 0.05 til 0.1 og "meget glat" under 0.05.

Toget tilbagelægger godt 700 m de første 15 sekunder.


Opgave	Metode	Resultater	Anbefalinger
--------	--------	------------	--------------

Benyttelse af andre fakta 

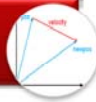
- Togets passage af baliser er kendt.
- *usikkerhed 1-2 sek*

Baliser 

- Bremsecomputere måler hjulhastighed. Togets hastighed er større end eller lig max. målte hjulhastighed.
- *usikkerhed 1-1,5 m/s*

Fart 

- Balisers position er kendt, togets stop position er kendt.
- *usikkerhed 1-5 m*

Position 

Fysik

togets masse gange acceleration = total bremsekraft	hastighed = integralet af acceleration over tid	tilbagelagt distance = integralet af hastighed over tid
---	---	---

16 Undersøgelse af IC4: Bremsesystem og Glatte Skinner 22-06-2012

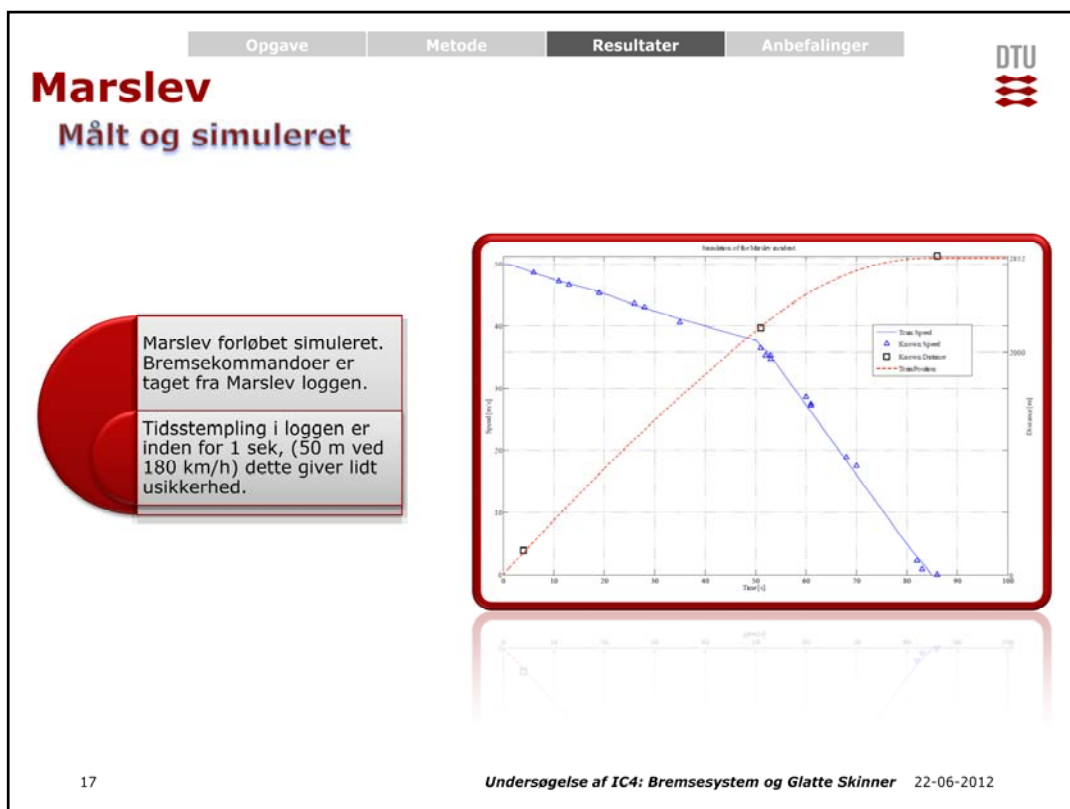
Kendskab til placering af baliser og til det tidspunkt de passeres, henholdsvis 4 s og 51 s, gør det muligt at estimere den adhæsion der i middel har været fra 700 m og indtil balisen ved AM-signal 2173 passeres.

Samtidig er der målinger af hjulhastighed til stede når hjul ikke slider.

Ved anvendelse af simpel fysik kan den i middel udnyttede adhæsion beregnes:

Hastighed = begyndeshastighed - integralet af deceleration over tid

Tilbagelagt distance = integralet af hastighed over tid



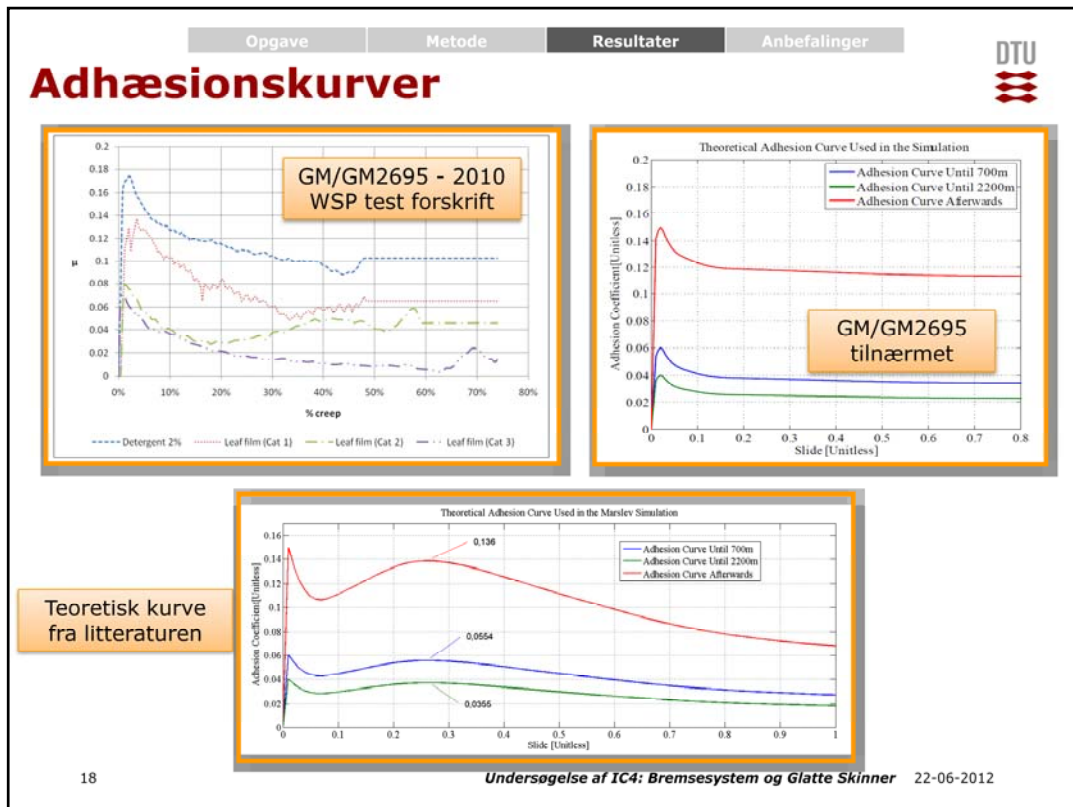
Benyttes disse simple fysiske love til en simulering af forløbet ved Marslev opnås kurverne for fart og tilbagelagt distance som figuren viser. Figurens vandrette akse angiver tid [s] siden starten af opbremsningen.

Firkanter angiver tidspunkt og position for balise ved AM-signal 1253, balise ved AM-signal 1273 og togets stop position.

Trekanten angiver målt hjulhastighed.

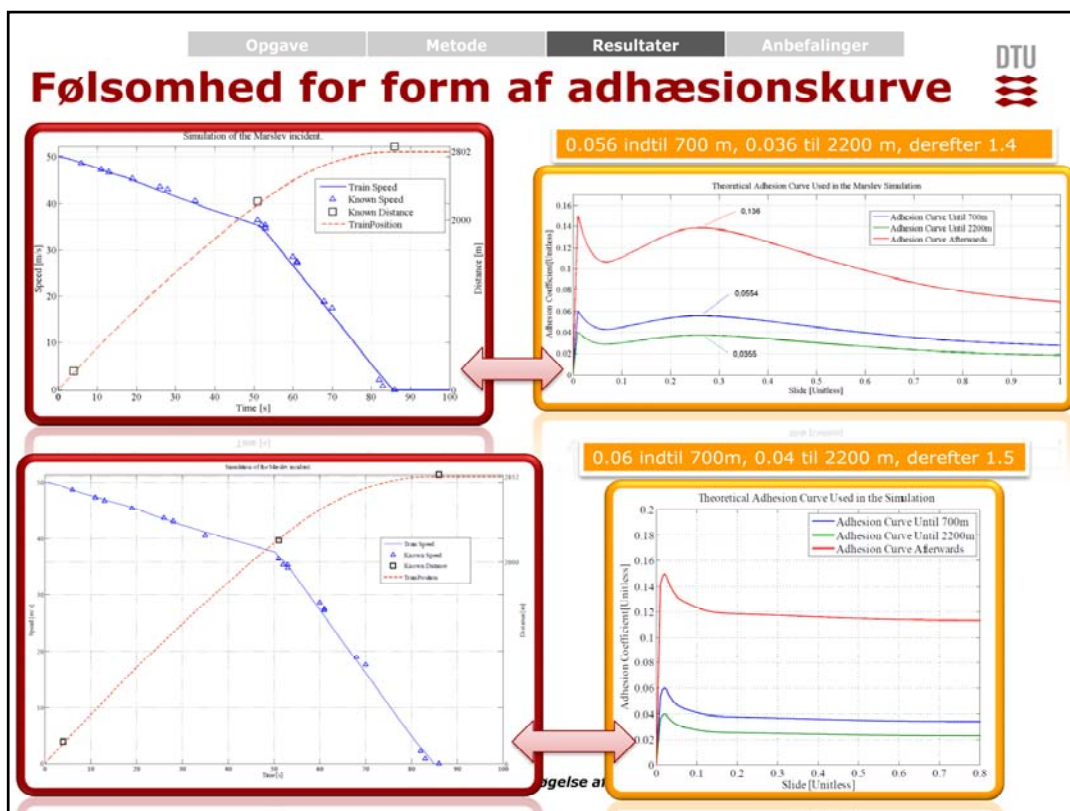
Simulering og faktiske målinger stemmer overens med meget snæver tolerance.

Opløsningen på tidsstempling er 1 s og toget kører 50 m/s i forløbets start, så simulering og målinger kan aldrig forventes at være helt præcist sammenfaldende.



Adhæsionskurvens form har en indflydelse på hvilken middel adhæsion der estimeres. Der er anvendt to forskellige adhæsionskurver til at teste følsomheden af simuleringen af den simple fysik.

Øverste kurvesæt til venstre er fra GM/GN2596 test forskriften. Øverste plot til højre er den approximation (glat kurveforløb) vi har anvendt i simuleringen. Det nederste sæt adhæsionskurver med to toppe, er et teoretisk forløb, som er benyttet i tidligere litteratur.



Figuren øverst til venstre viser simuleret fart og tilbagelagt distance med anvendelse af den "teoretiske" kurveform og adhæsiion 0,056 op til 700 m, 0,036 de næste 1500 m og 1,4 derefter. Værdierne refererer til kurvens top nummer 2, sådan som det er praksis. Top nummer 1 er 10% højere.

Figuren nederst til venstre viser igen simuleret fart og tilbagelagt distance men nu med anvendelse af en adhæsiionskurve som vist, der approximerer et forløb som angivet i GM/GN2596. Afhæsiionsværdierne er: 0,06 op til 700 m, 0,04 de næste 1500 m, derefter 1,5.

Sidstnævnte adhæsiionskurve giver en simulering der passer meget præcist i både position og fart langs hele forløbet.

Middel udnyttet adhæsiion i intervallet 700 til 2200 m var omkring 0,03 ved Marslev. Dette ses af hvordan målte hjulhastigheder aftager i intervallet. IDU loggen viser BCU enhedernes estimater af hastighed som er baseret på maksimum af målt hjulhastighed på hver enhed. Til tiden 15:16:47 er farten 168 km/h, til tiden 15:17:25 er farten 131 km/h. Hastighedsforskellen på 10,3 m/s over et tidsrum på 38 s svarer til en middel acceleration på $-0,27 \text{ m/s}^2$. Kurveforløbet for adhæsiion som approximerer GM/GN2695, med en top værdi på 0,04 og adhæsiion der falder til 0,02 ved store værdier af slide giver en simuleret hastighedsprofil, der stemmer godt overens med målte værdier.

DTU konkluderer at der var "glat" omkring signal AM-2153 faldende til "meget glat" over en distance på 1500 frem til signal AM-2173 m ved Marslev

Andre observationer : forankørende godstog

Et forankørende godstog standsede uden problemer ved signal AM-2193. Data viser at normal adhæsion indtræder ved signal AM-2173, 2 km før AM-2193.

Hvis godstoget i det væsentlige har bremset mellem signalerne AM-2173 og AM-2193, kan dette forklare at godstoget ikke fandt problemer med at bremse.

Med en adhæsion på 0,04 kunne godstoget bremse i lavt bremsetrin også før passage af AM-2173.

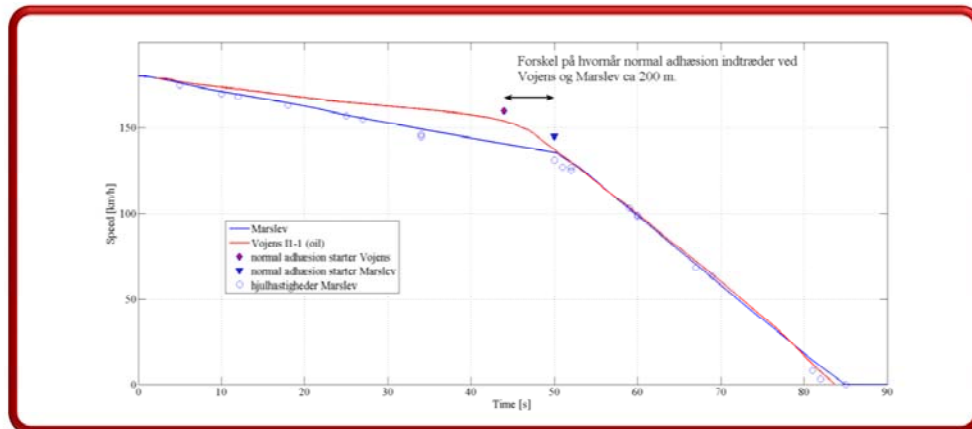
Det er rapporteret og står i Haverikommisionens rapport, at et forankørende godstog ikke rapporterede problemer med at bremse. Havarikommisionen nævner at godstoget ikke nødvendigvis har bremset på samme strækning som IC4. Da godstoget først skulle standse ved signal AM-2193 og ikke har rapporteret problemer kan man antage at det har oplevet normal friktion mellem signal AM-2173 og 2193. Målingerne af IC4 togets fartprofil bekræfter at normal adhæsion fra AM-2173 og ca 650 m frem. Observationer og konklusioner stemmer overens.

Observationer: samme standselængde men forskellig adhæsion i Vojens og Marslev



Normal adhæsion ved Marslev indtræder ca. 200 m senere end Vojens I1-1.

Figuren viser at farten på den glatte strækning aftager hurtigere i Marslev end i Vojens. Vojens "olie" test er betydeligt mere glat end ved Marslev.



21

Undersøgelse af IC4: Bremsesystem og Glatte Skinner 22-06-2012

Testkørslen ved Vojens med oliebelagt skinne (test I1-1) er ikke helt repræsentativ for Marslev forløbet.

Kun indgangsfart og den totale standselængde er ens.

Figuren viser målt hastighed som funktion af tid ved Vojens (rød kurve) og ved Marslev (trekanter) samt den simulerede hastighed ved Marslev (blå kurve).

Ved Vojens indtræder normal friktion efter 2000 m. Ved Marslev først ved 2200 m.

Ved Vojens (I1-1) aftager hastigheden meget langsommere på den glatte strækning end ved Marslev. Det betyder at Vojens I1-1 testen er meget mere glat end der har været ved Marslev.

Vojens data er benyttet af DTU til validering af simuleringsmodellen fordi der er komplette logfiler fra alle væsentlige komponenter og med høj tidsopløsning. Ved Marslev er der kun togets sædvanlige logfiler (IDU og DLU log) til rådighed.

IC4 BREMSESYSTEM SYSTEM MODEL

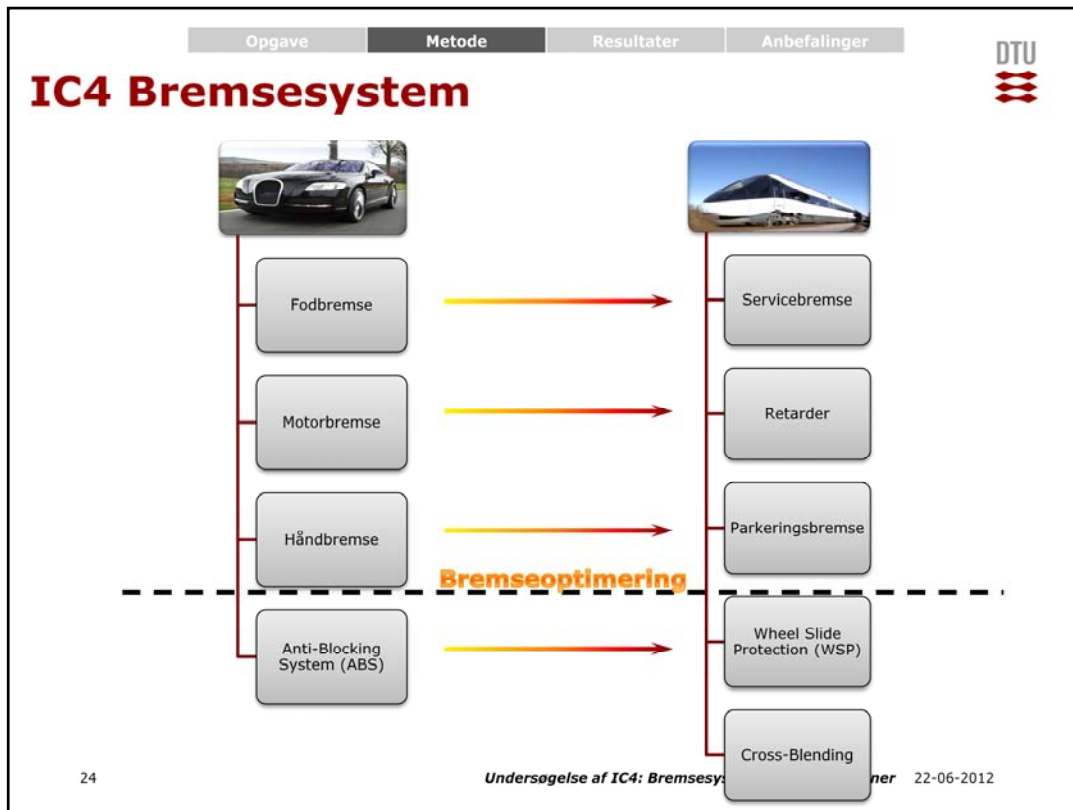
Afklaring af centrale tekniske begreber

System

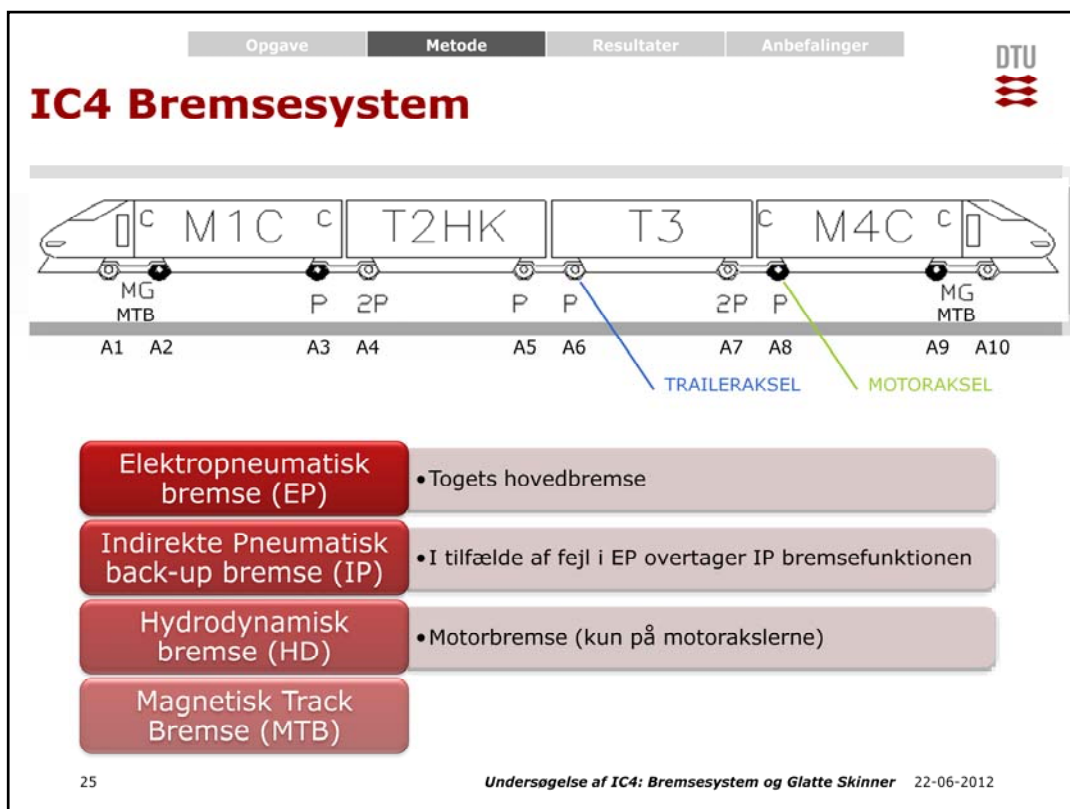
- IC4 bremsesystem og dets komponenter
 - *Pneumatisk bremse*
 - *Elektropneumatisk bremse*
 - *Retarder → Motorbremse*
 - *Wheel Slide Protection (WSP)*
 - *Cross-blending*
 - *Parkeringsbremse*
- Systemfunktionalitet – Funktionsdiagrammer for
 - *Brake Control Unit (BCU)*
 - *Integrated Relay Valve (IRV)*
 - *Wheel Slide Protection (WSP)*

Simuleringsmodel

- Systemmodel for en aksel
- Systemmodel for en bogie
- Systemmodel for motorvogn



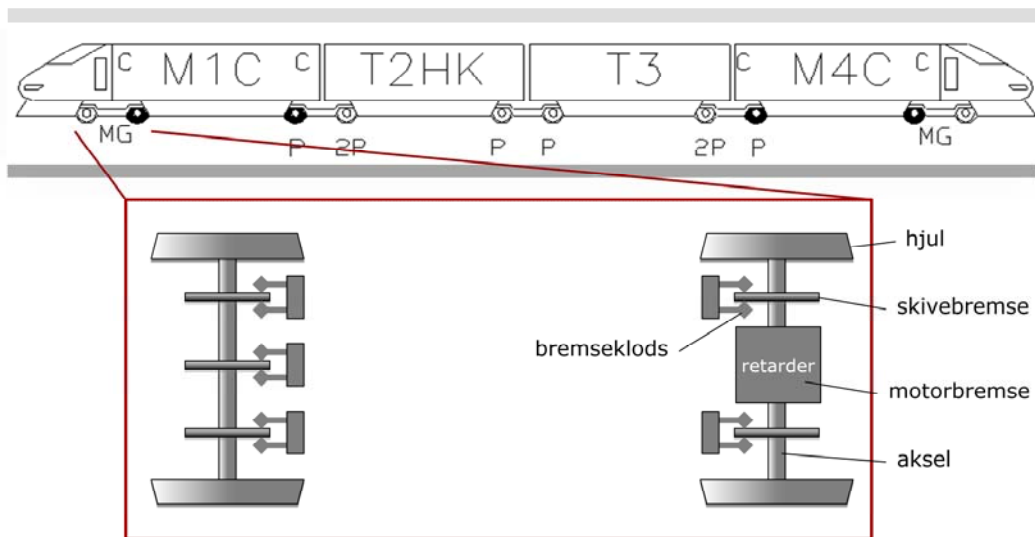
Princip og delelementer for bremsesystemer, IC4 toget sammenlignet med en bil.



Elementerne i IC4 togets bremsesystem. Placering af parkeringsbremsere (P) på togets 10 aksler. Desuden er de 4 motorakslere (A2, A3, A8 og A9) vist.

IC4 BREMSESYSTEM SYSTEMARKITEKTUR

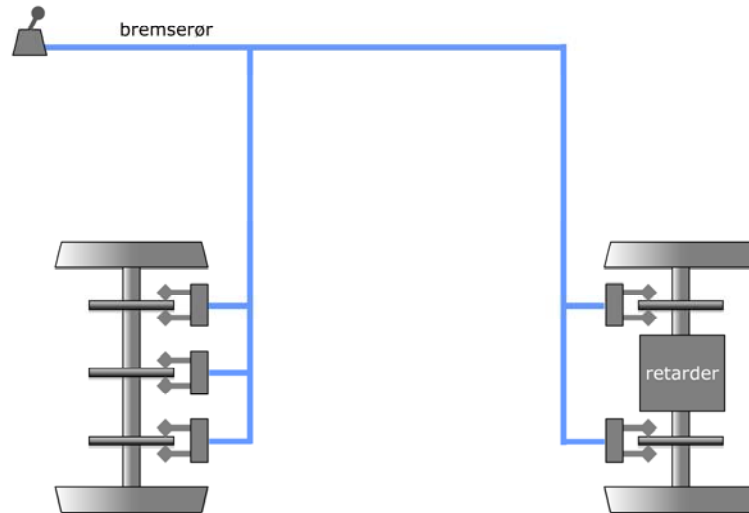
IC4 Bremsesystem



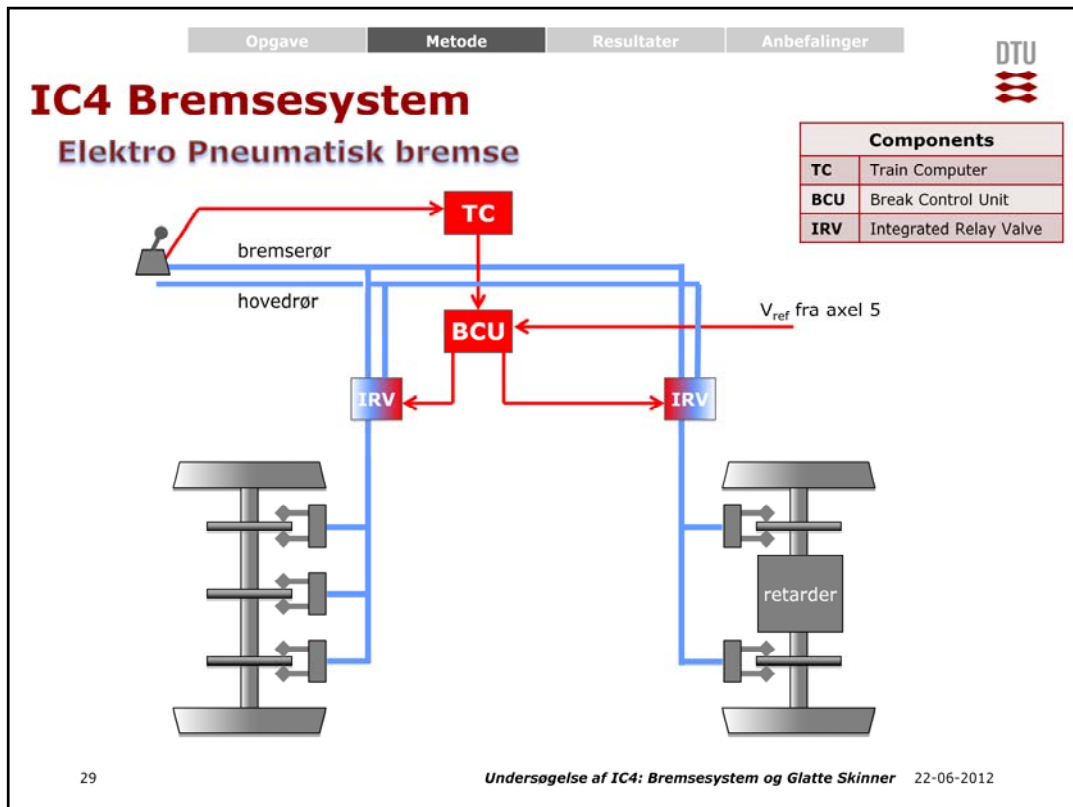
Bogie bestående af en traileraksel (A1) og en motor aksel (A2). Trailerakslen har 3 skivebremser og motorakslen har 2 skivebremser og en retarder (motorbremse). De følgende slides viser hvorledes der kan bremses på disse 2 aksler.

IC4 Bremsesystem

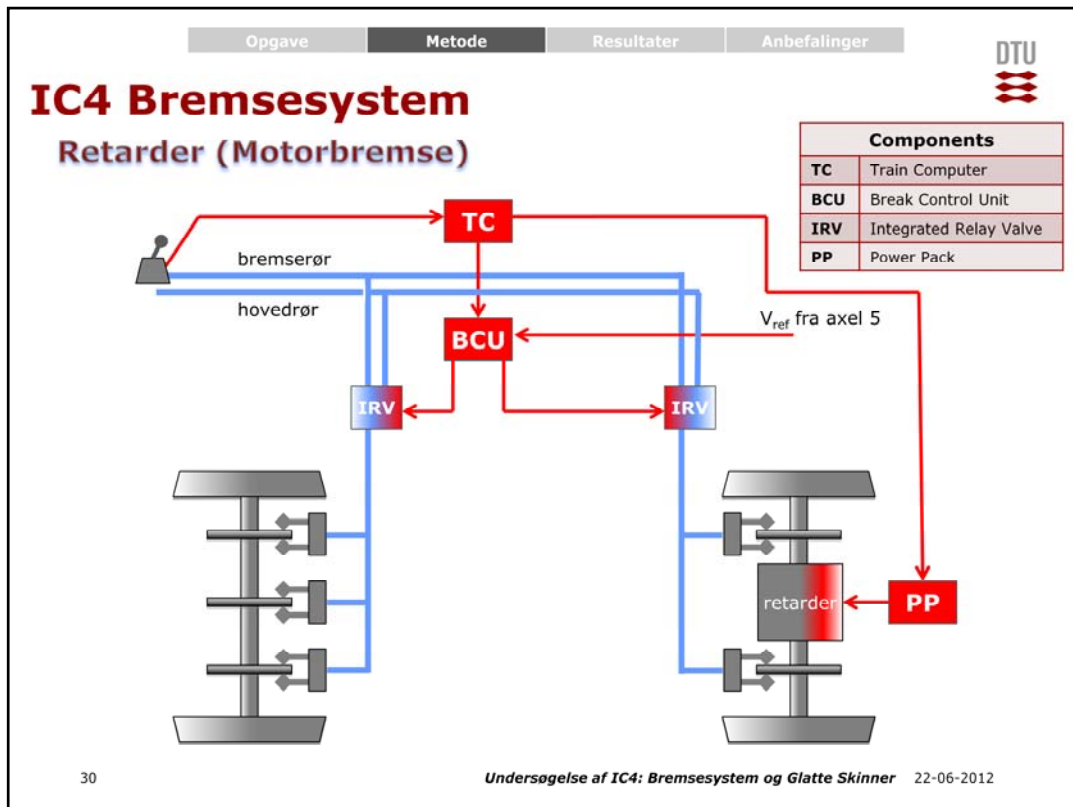
Pneumatisk bremse



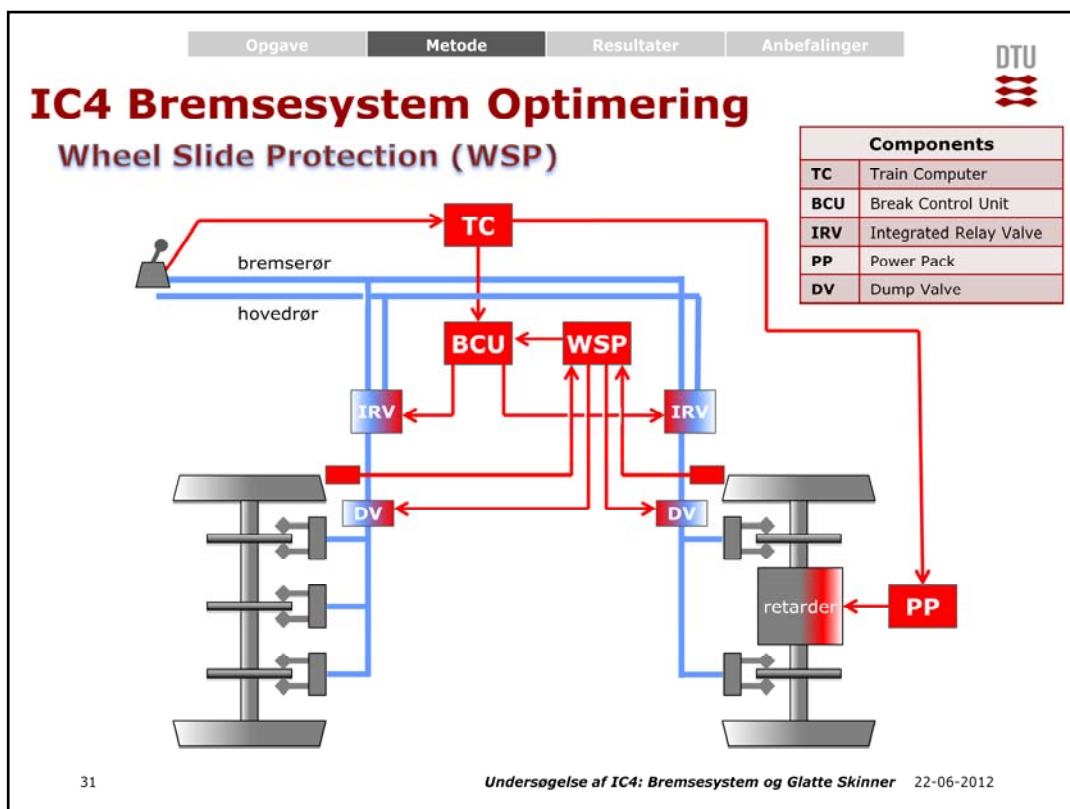
Den pneumatiske bremse (IP) virker ved at lokoføreren reducerer trykket i bremserøret, hvorved selve trykket i bremsecylinderen øges. Ved nødbremssning, lukkes alt luft ud af bremserøret og der opnås derved maksimalt tryk på skivebremsen.



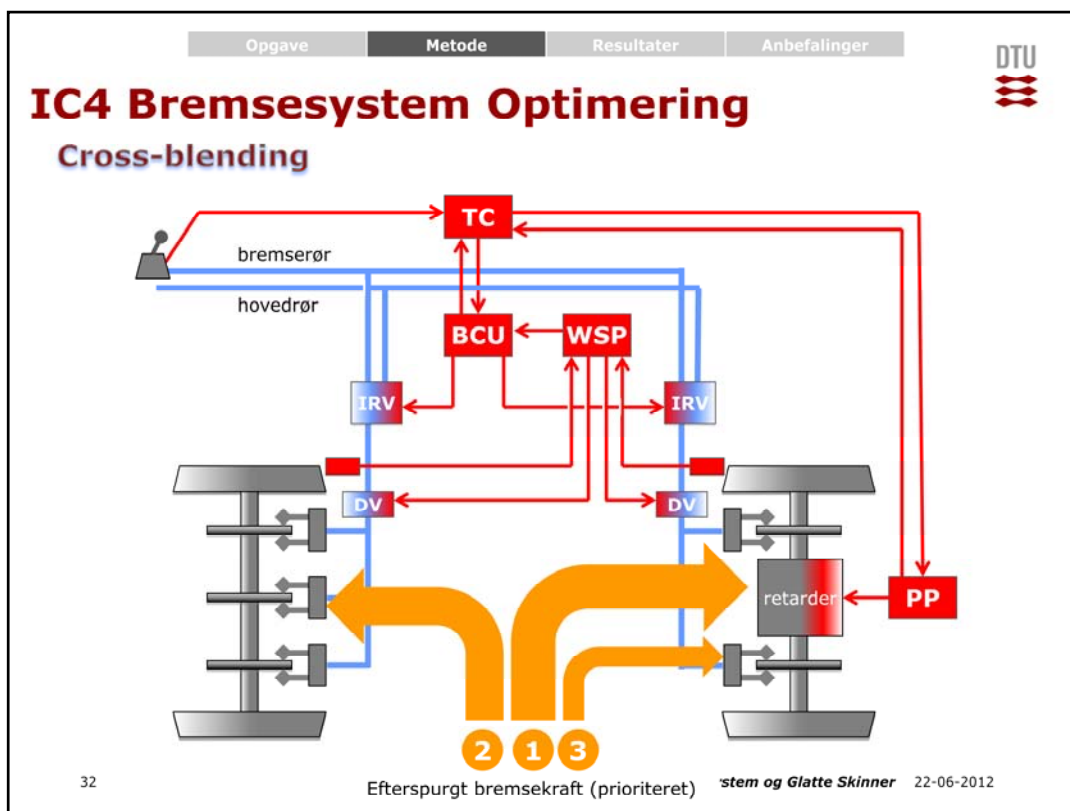
Den elektropneumatiske bremse (EP) virker parallelt med IP bremsen. Den giver en mere fin reguleret bremsning end IP bremsen. Lokoførerens bremse niveau omsættes i togs computeren (TC) til en efterspurgt bremsekraft som sendes til togets bremse kontrolenhed (BSU). Der er i alt 3 BCU'er, en som styrer akslerne A1, A2, A3 og A4, en der styre A5 og A6, og en der styrer A7, A8, A9 og A10. BCU'en regulerer trykket til skivebremserne gennem IRV ventilerne. Det nødvendige tryk beregnes ud fra togets hastighed. Denne hastighed er ikke den absolutte hastighed, men den der kan måles ud fra hastighederne på togets hjulaksler.



Togets motorakslar er udstyret med en retarder, der virker som en. Tog computeren (TC) sender et ønske om en given bremsekraft til Power Pack (PP) i motorenheden, som styrer retarderen.

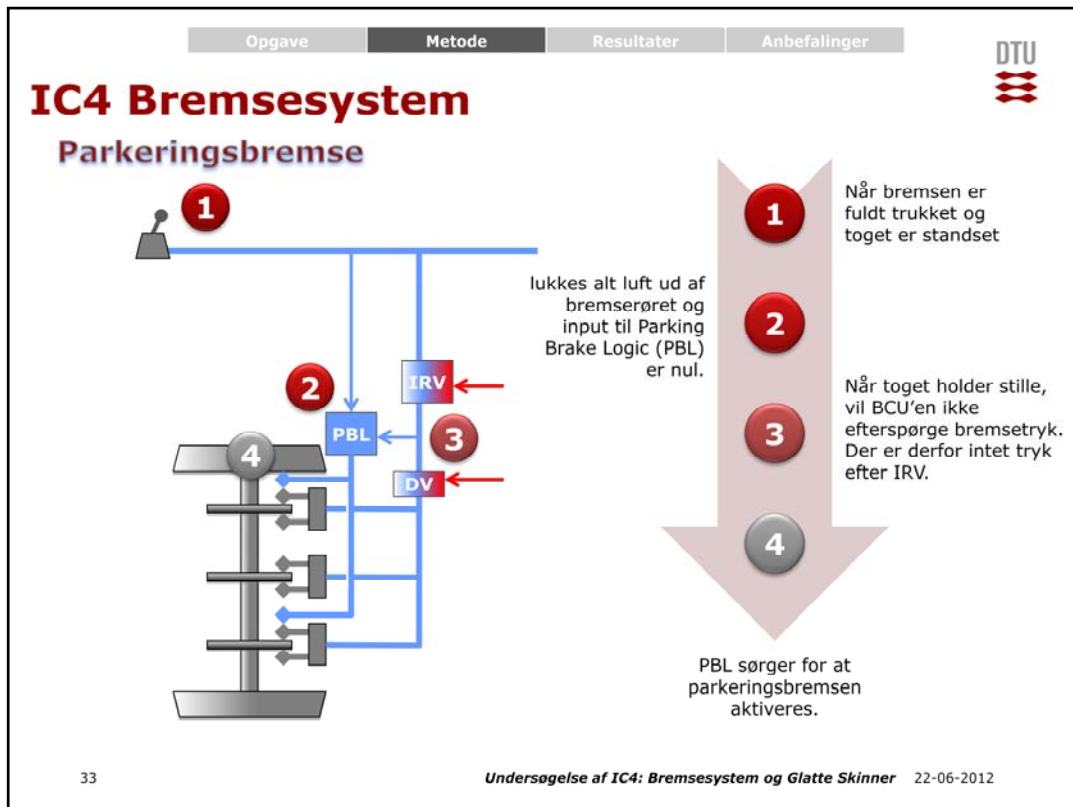


For at undgå at hjulene glider (specielt når der er glatte skinner), er hver BCU udstyret med en Wheel Slide Protection (WSP) enhed. Dette er en optimering af bremsesystemet. WSP'en måler hastigheden på hver af de aksler der er knyttet til BCU'en (4 eller 2 aksler). Ud fra disse hastighedsmålinger, kan WSP'en slutte om en given aksel glider. Hvis det er tilfældet, sendes en kommando til Dump Valve (DV), en ventil som sikre at trykket mindskes i bremsecylinderen, hvorefter den pågældende aksel igen bør begynde at rulle. Når akslen atter er kommet op i hastighed, kan der bremses på den igen.



Cross blending er en anden optimering af bremsesystemet. Det primære formål er at mindske belastningen på skivebremserne, hvorved levetiden af skivebremsernes bremseklodser forlænges. Den efterspurgte bremsekraft fra tog computeren (TC) bliver i første omgang sendt til PP hvor retarderen sættes igang med at yde denne bremsekraft (1). Den opnåede bremsekraft for retarderen opsamles og sendes tilbage til TC. Hvis ikke den ønskede bremsekraft kan opnås, sender TC en kommando til BCU'en om at leverer den manglende bremsekraft (= ønsket – det der kan leveres af retarder). Denne bremsekraft fordeles ligeligt mellem trailerakslerne (2). Hvis dette ikke er tilstrækkeligt, beder BCU'en også om bremsekraft på motorakslernes skivebremser (3).

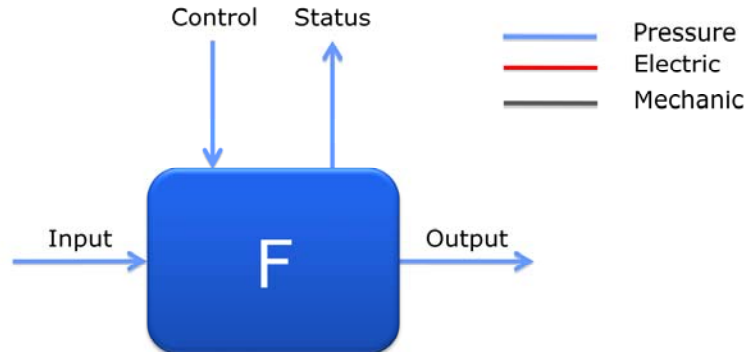
Train Computer (TC) beregner den nødvendige bremsekraft. Trin 1 er at få den fra motorbremsen (retarder). PP styrer retarder og giver feedback til TC om, hvor meget bremsekraft der leveres. Hvis ikke der leveres den fulde efterspurgte bremsekraft, efterspørges den resterende på trailerakslerne (dem uden motor), dette er trin 2. Hvis der stadigvæk mangler bremsekraft bruges skivebremserne på motorakslerne også trin 3.



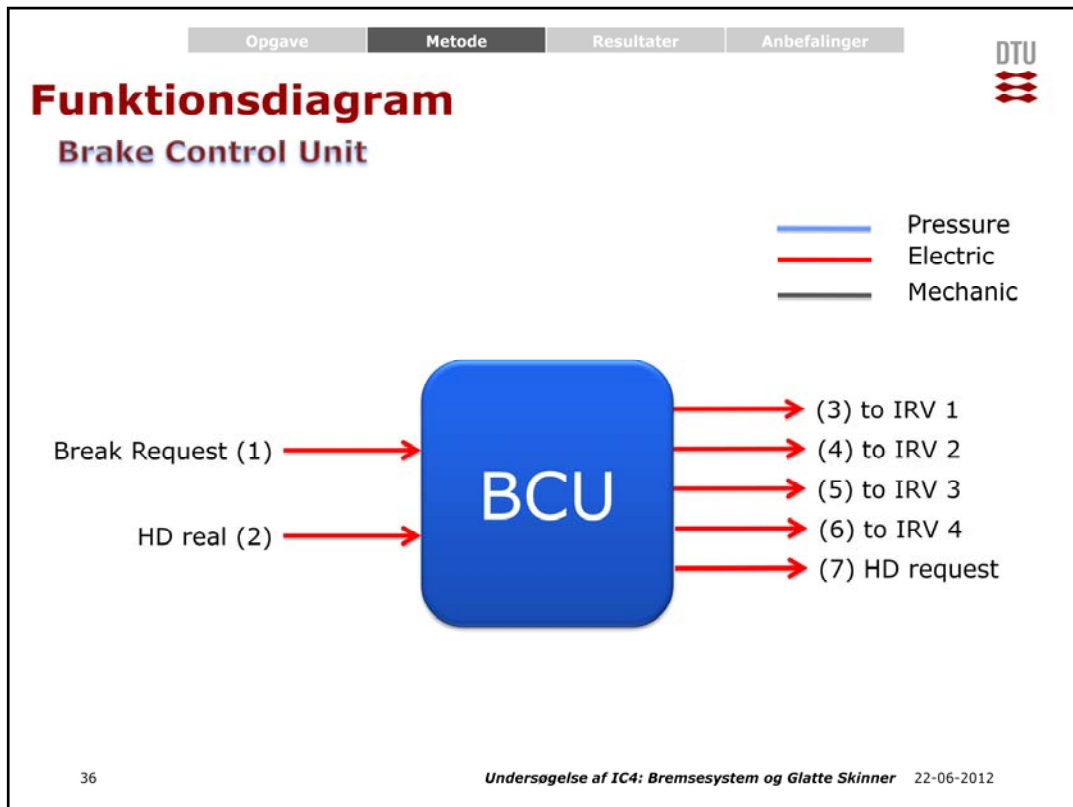
Parkeringsbremsen bruges til at forhindre toget i at rulle når det er bragt til standsning. Parkeringsbremsen er normalt ikke involveret under bremsnings af toget, men pga en forkert montering, hvorved Parking Brake Logic (PBL) enheden får sit ene input EFTER DV og ikke før DV som vist på figuren, vil parkeringsbremsen blive aktiveret under nødbremsning (intet tryk i bremsørør) når hjulene begynder at glide og WSP forsøger at slippe skivebremsen ved at lade trykket falde efter DV.

IC4 BREMSESYSTEM SYSTEMFUNKTIONALITET

Funktionsdiagram



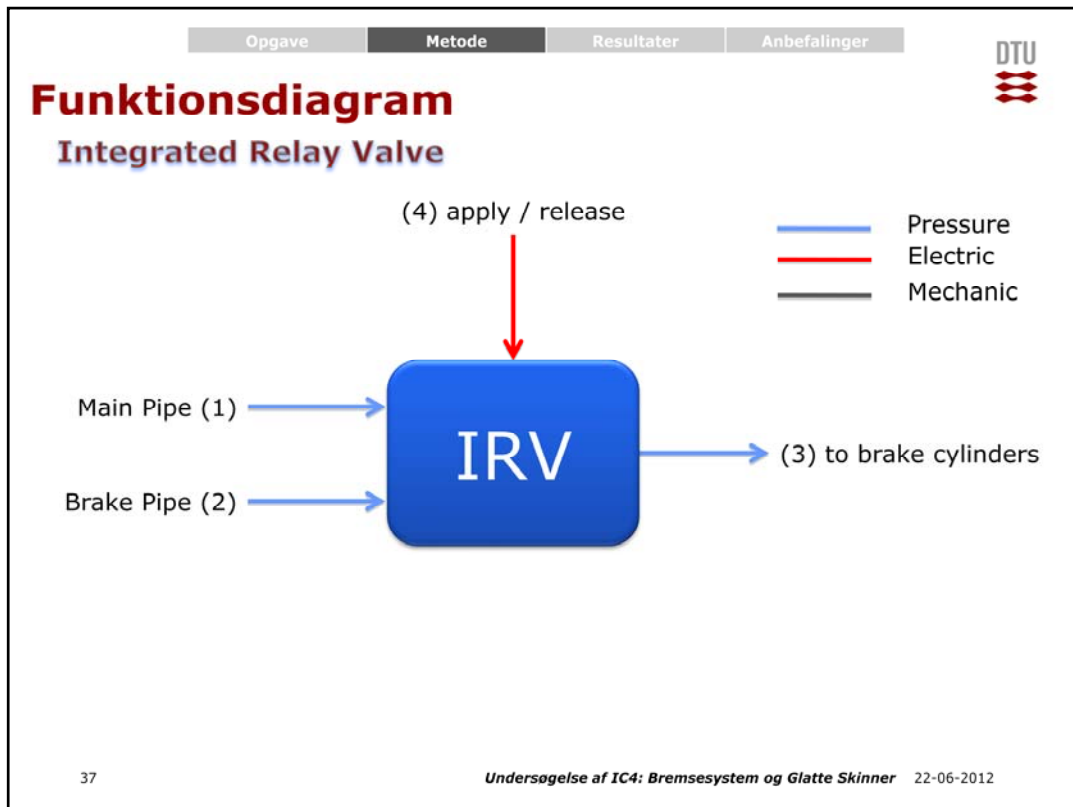
Generisk funktionel komponent. Flow fra "input" til "output" styres gennem "control", som igen kan være bestemt af en given tilstand eller signal i komponenten. Såvel input/output som control/status kan være lufttryk, elektriske signaler eller mekaniske (som oftest kræfter).



The Brake Control Unit is an electronic control unit, in charge with controlling the service brakes electronically (electro-pneumatic control) (EP) and the cross-blending. In the EP brake mode, the BCU receives the brake request from the driver's master controller and BCU calculates the necessary brake force to be supplied by the brake calipers mounted on the wheels, then it generates control signals (signals 3 to 6) to control the EP brake pressure in the IRV of each of the axles.

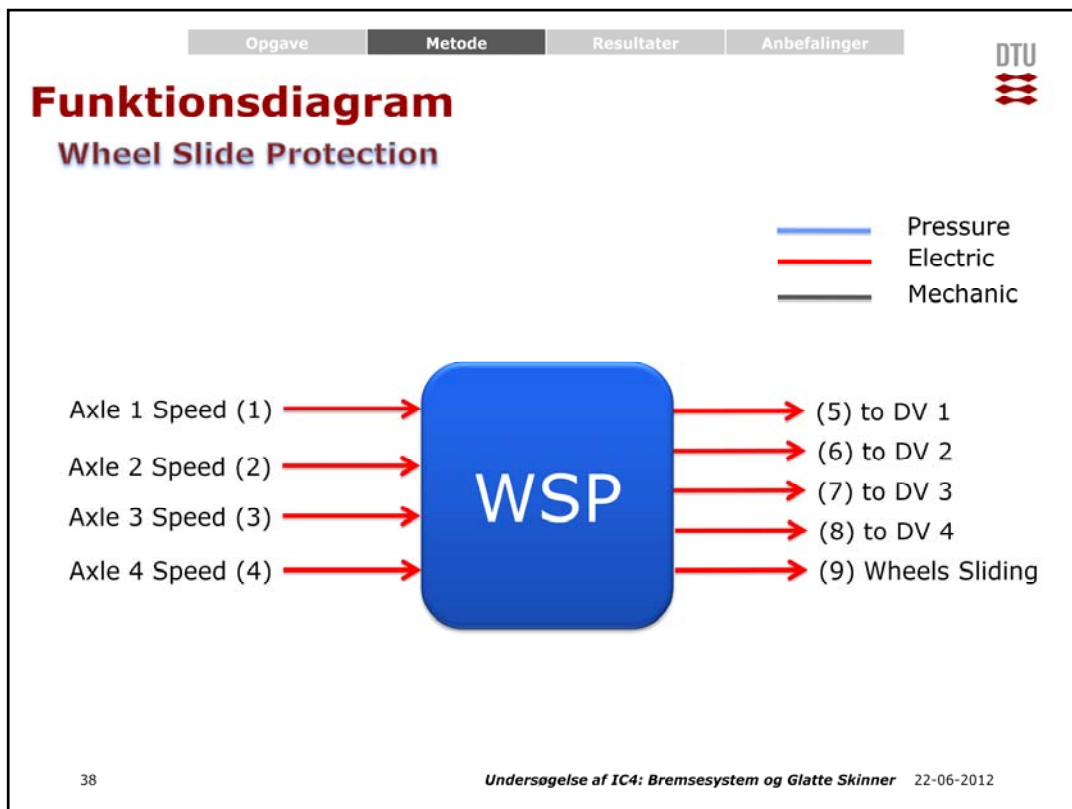
The service braking is done as partial or full integration of the hydrodynamic braking (HD).

In the cross-blending brake mode, the electro-pneumatic force (the required braking force from the EP control) is defined as the difference between the total required braking force and the HD force. Each BCU sends to the Train Computer (TC) the quantity of required HD from the retarder (signal 7) and will receive the actual quantity applied by the retarder (signal 2), continuously adjusting the required EP effort. Thus, when the total requested braking force can be supplied by the retarder, there is no EP braking applied, therefore sparing the friction brake. The BCU distributes the required EP braking to the trailer axles (which do not own HD braking capabilities), while the motor trailers contribute with HD effort and pneumatic, both of which dependant on the speed. All the HD available effort shall be used first, then the pneumatic effort, first on the trailer axles, and then on the motor axles.



The Integrated Relay Valve (IRV) controls the brake cylinder pressure, and includes two separate sections: the Indirect Pneumatic (IP) section and the Electro-pneumatic (EP) section. The IP brake pressure is manually controlled through the Brake Pipe (2) pressure; it ensures a braking force equal to the one available during the EP service brake, and is activated when the EP brake is not available either at train level, or at car level. The EP brake pressure is controlled by the BCU through the *apply/release* (4) control signal.

The IRV integrates the brake pressure from the two sections, and relays to the brake cylinders (3) the highest pressure level. Thus, in case the EP brake fails, the IP section takes over the braking command.

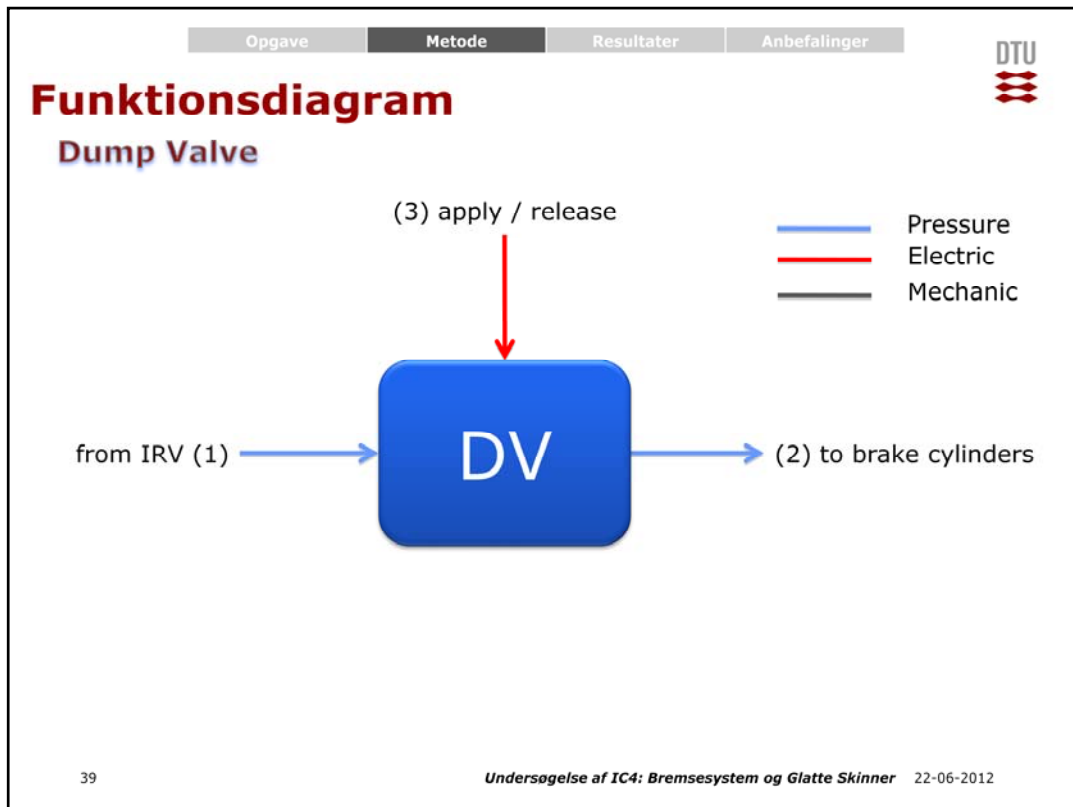


The Wheel Slide Protection (WSP) system's purpose is to prevent the wheel sets from locking during a brake application in order to avoid the slide and the resulting increase of the stopping distance, protecting the wheels from a flat. The WSP system measures the speed of each axle (signals 1-4) in order to define the instantaneous deceleration, and when the speed received from one of the axles is over a threshold (the wheel is sliding), the system adjusts the brake the brake cylinder pressure to maximize the braking effort, by controlling a Dump Valve (DV) through a signal (5-8), thus releasing or holding the brakes according to the signal.

In case the WSP detects that a Motor Axle (MA) is sliding, it signals the Retarder on that MA, and deactivates it to prevent the retarder from interfering with the WSP.

In case the WSP cannot recover the wheel from sliding in a certain amount of time, the WSP stops adjusting the pressure on that brake cylinder, and applies the brakes on that wheel.

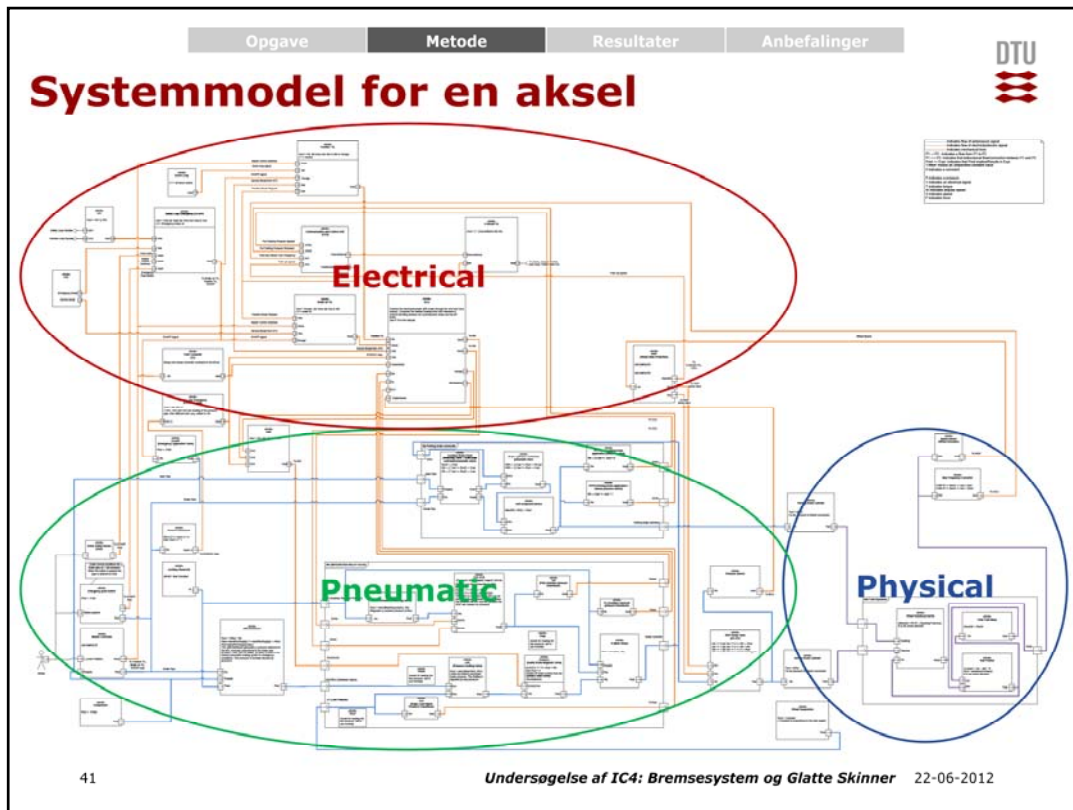
Similarly, in case the WSP detects a sensor error (the wheel accelerates/decelerates too fast), it assumes a sensor error, and excludes the wheel from the calculation of the instantaneous deceleration.



The WSP Dump Valve (DV) adjusts the brake cylinder pressure received from the IRV (1) according to the signal received from the WSP (signal 3), in order to maximize the braking effort, by releasing or applying to brakes.

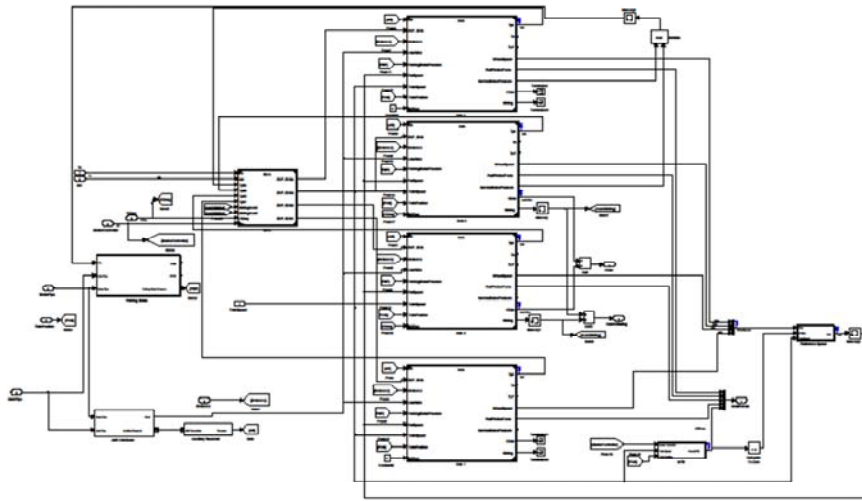
The DV are magnet-valves electrically controlled. In case of lose of electricity, the safe-state of the DV is to apply the brake pressure.

IC4 BREMSESYSTEM SIMULERINGSMODEL



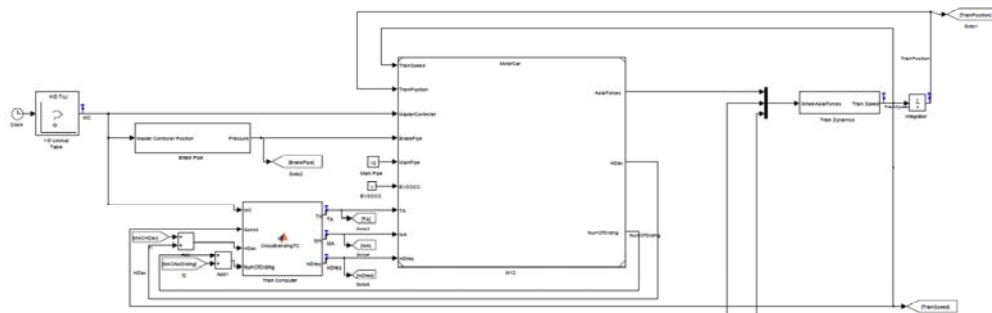
Model for en enkelt aksel. Indeholder elektrisk og pneumatisk del, samt den dynamiske del fra hjul og skinner.

Systemmodel for en motorvogn med 4 aksler



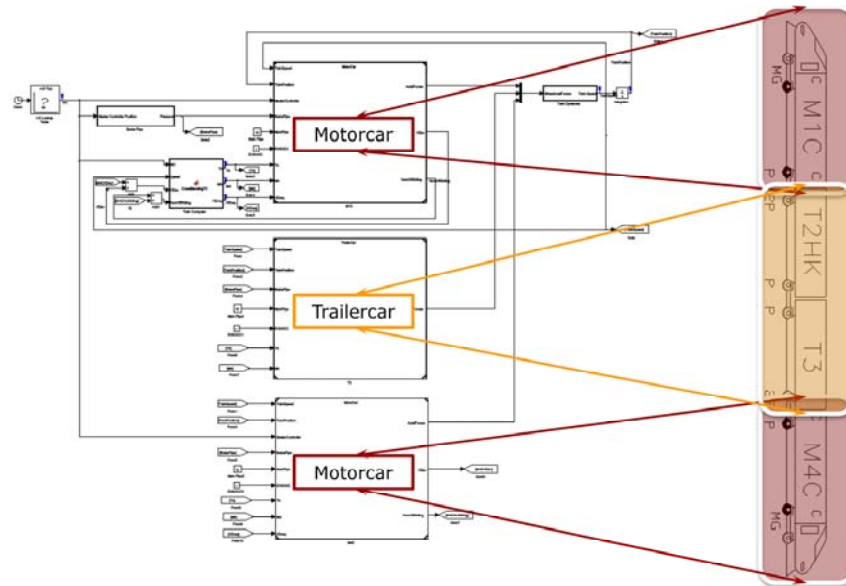
Model af motorvogn bestående af 4 aksler (2 bogies).

Systemmodel for en motorvogn



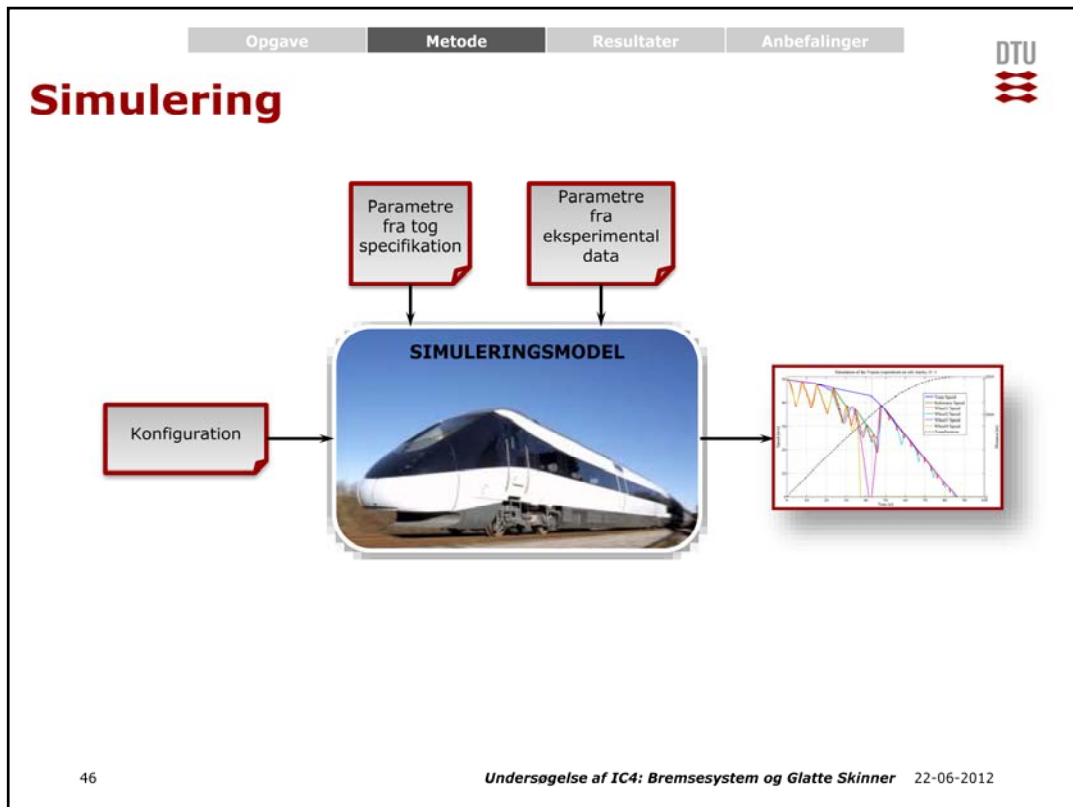
Overordnet model af motorvogn.

Systemmodel for 3 motorvogn (10 aksler)



Model af hele toget bestående af 3 vogne med i alt 10 aksler.

IC4 BREMSESYSTEM VALIDERING AF SIMULERINGSMODEL

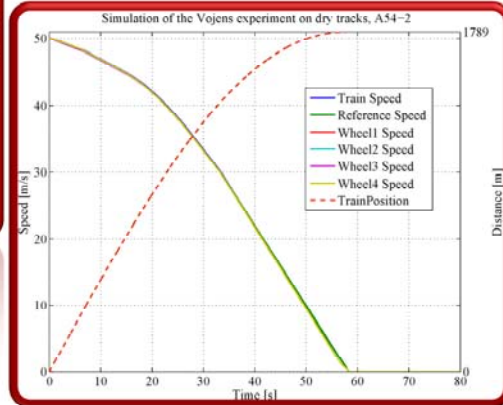
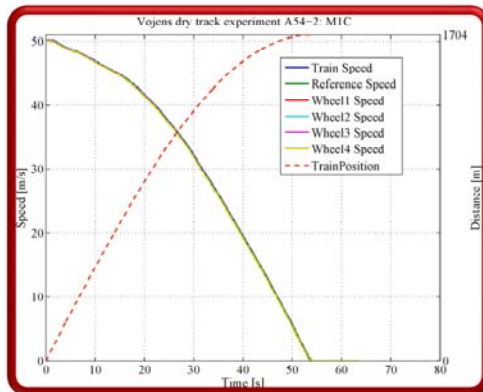


Simuleringsmodellen er implementeret i Matlab/Simulink. Modellen er kalibreret efter data fra Vojens eksperimenterne samt de specifikke parametre som forefindes i dokumentationerne for togets bremsesystem. Resultaterne af en simulering vises som plots af de dele (typisk signaler, tryk, tilstande, osv.) der er relevante for den givne simulering.

Simuleringsmodellen tager også en konfigurationsfil som input. Denne konfiguration bestemmer de eksterne forhold omkring simuleringen. De er,

- Bremsning som funktion af tid. Hvornår forskellige bremseindstillinger aktiveres.
- Adhæsionen som funktion af afstand og glidning. Det er her selve antagelserne omkring forholdet mellem hjultryk og skinne beskrives (se detaljer senere)
- Retarder on/off
- Cross-blending on/off
- Rørføring til parkeringsbremse korrekt/fejlagtig ført
- Magnetbremse on/off
- Togets hastighed ved start af simulering
- Togets samlede vægt (tomt tog, alle siddepladser i brug, fuldt tog)

Validering: tørre skinner



47

Undersøgelse af IC4: Bremsesystem og Glatte Skinner 22-06-2012

Simulering af Vojens eksperiment på tørre skinner sammenlignet med de reelle data



Simulering af Vojenseksperimentet på glatte skinner sammenlignet med de reelle data.

IC4 BREMSESYSTEM

KAUSAL ANALYSE

AF FAKTORER SOM PÅVIRKER TOGETS BREMSEADFÆRD

Kausalanalyse

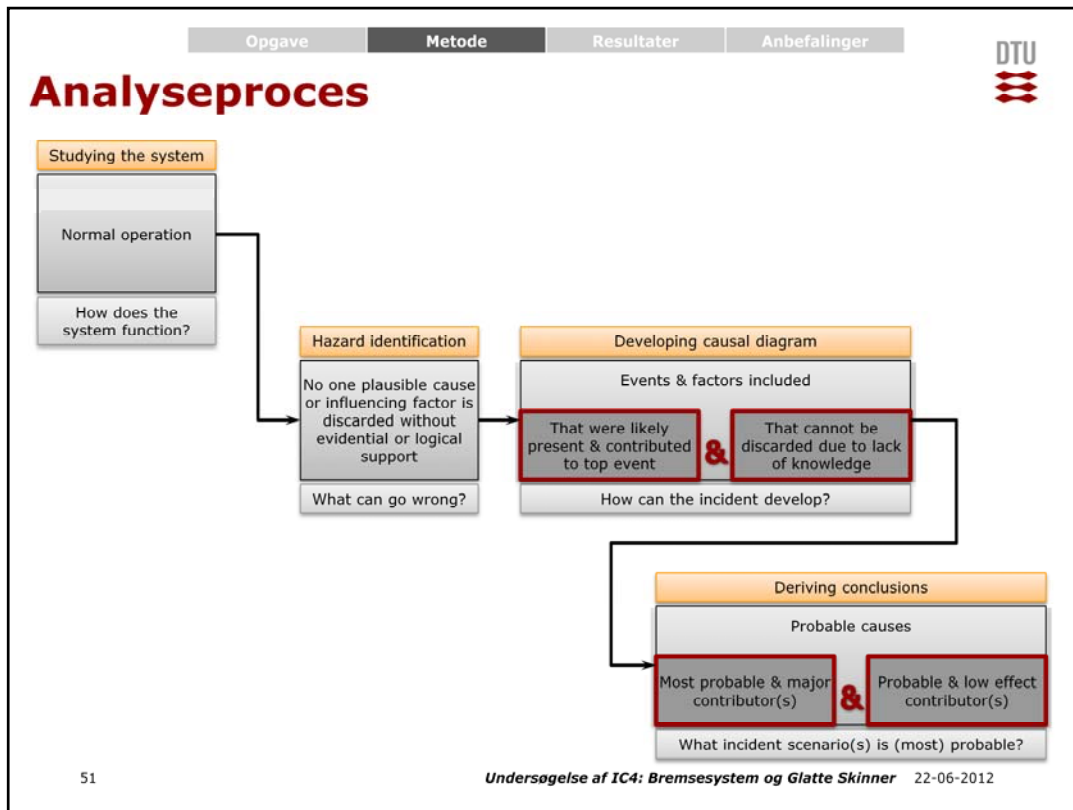


Der er foretaget en overordnet kvalitativ risikoanalyse af Marslevhændelsen ved hjælp af en kausal model af både tog og eksterne forhold med henblik på IC4 togets bremseevne.

Alle sandsynlige og forudselige hændelser på enkeltkomponenter og delsystemer samt interfaces, der i sammenspil kan føre til tophændelsen "for lang bremselængde af IC4", er blevet sammensat i en kausal model.

Modellen kortlægger både tekniske, menneskelige og eksterne årsager til tophændelsen, og giver overblik over udfoldelsen af mulige scenarier.

Indhold



Analyseproces

Identifikation af kritiske faktorer

På basis af en dybdegående analyse af

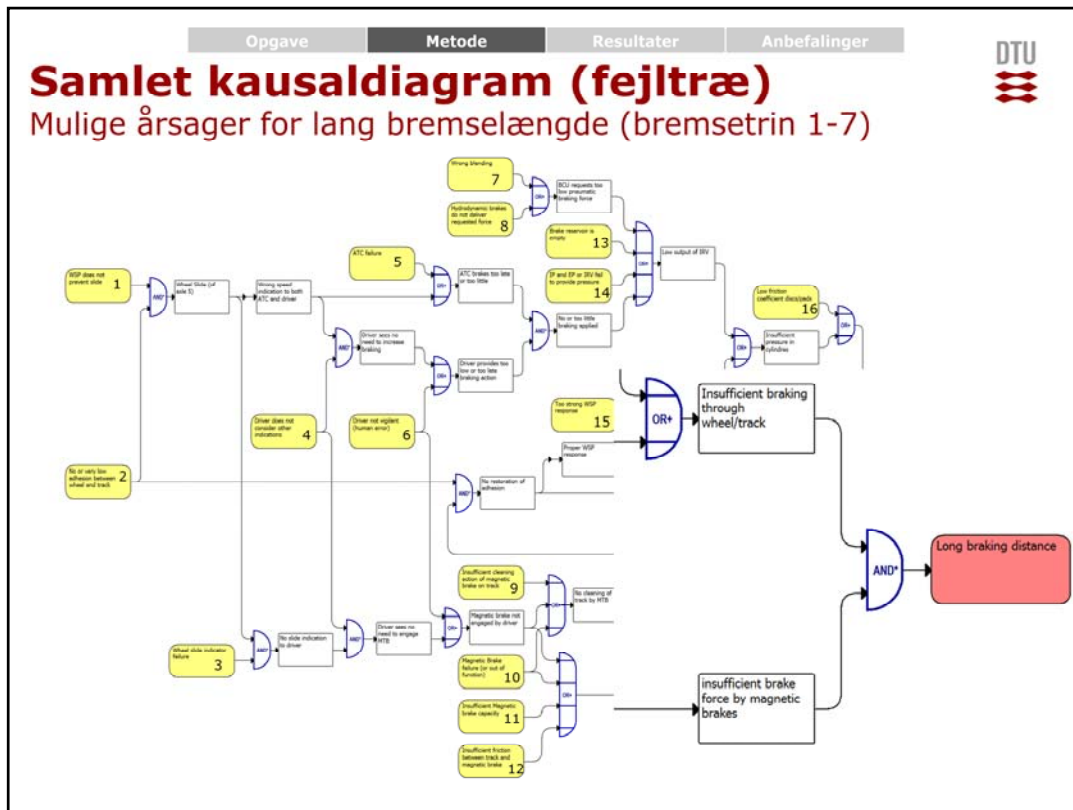
- teknisk dokumentation
- videnskabelig litteratur
- DLU og IDU logs (af Marslevhændelsen og efterfølgende tests)
- møder med DSB's eksperter og ingeniører samt udviklere af bremsesystemer
- interviews med lokofører

blev der udarbejdet en omfattende liste af plausible årsager og relevante faktorer

1. WSP does not prevent slide
2. No or very low adhesion between wheel and track
3. Wheel slide indicator failure
4. Driver does not consider other indications
5. ATC failure
6. Driver not vigilant (human error)
7. Wrong blending
8. Hydrodynamic brakes do not deliver requested force

9. Insufficient cleaning action of magnetic brake on track
10. Magnetic Brake failure (or out of function)
11. Insufficient Magnetic Brake capacity
12. Insufficient friction between track and magnetic brake
13. Brake reservoir is empty
14. IP and EP or IRV fail to provide pressure
15. Too strong WSP response
16. Low friction coefficient discs/pads

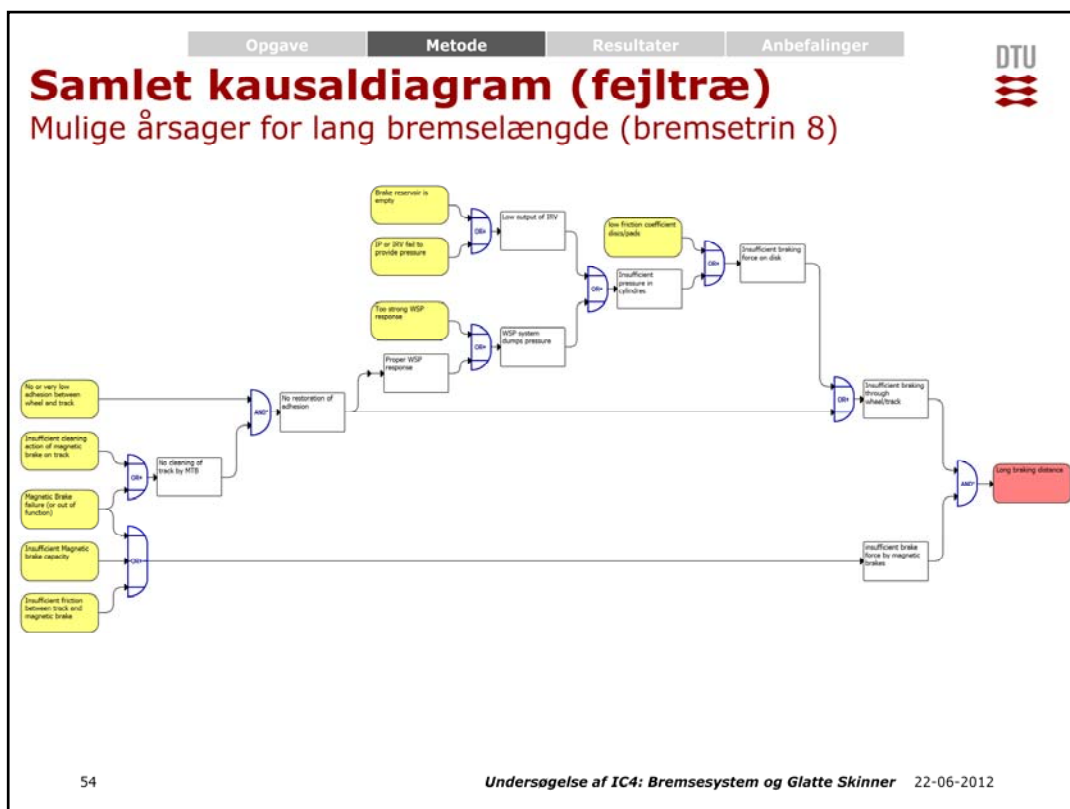
Identifikation af kritiske faktorer



Samlet kausal diagram (fejltræ): Mulige årsager for lang bremselængde (bremsetrin 1-7)

Table: Explanation of the initial events (basic events) displayed in the fault tree, with a review of the likely occurrence during the Marslev incident.

These descriptions apply both to the “service brake” and “emergency brake” analysis



Samlet kausal diagram (fejltræ): Mulige årsager for lang bremselængde (bremsetrin 8)

Beskrivelsen af de basale hændelser i tabellen er gældende også for dette fejltræ.

Sammenfatning vedr. fejltræmodel

Mest sandsynlige årsager

- Meget lav adhæsion + afkoblet magnetbremse.

Sandsynlige bidragsydere

- Suboptimal WSP reaktion → ukorrekt fartvisning + inadækvat lokoføreradfærd.
- Hydrodynamisk bremse leverer ikke den nødvendige bremsekraft eller suboptimal blending (dette er ikke helt afklaret indtil nu).

Sammenfatning vedr. fejltræmodel

IC4 BREMSESYSTEM DYNAMISK SIMULERING OG SYSTEM ANALYSE

Dynamisk model og analyse baseret på logfiler

Dynamisk model blev formuleret for tog, bremsesystem, adhæsion hjul-skiner samt "Wheel Slide Protection" regulering.

Dynamisk model blev sammenlignet med målinger i Vojens: god overensstemmelse.

Marslev log filer er benyttet til at estimere faktisk adhæsion.

Dynamisk simulering benyttes til at estimere hvad der var sket hvis

- Der ikke havde været fejl på montering af rørføring til P-bremse tryksensor
- Hydrodynamiske bremsere havde været fuldt aktive
- Magnetisk bremse havde været slået til
- Reference hastighed til WSP havde været ideel

Der er opbygget en simulator, som tager målte bremsetryk og bremsekommandoer som input og derudfra simulerer de funktioner i toget, som har relation til bremsesystemet. Simuleringen er dynamisk, det vil sige at acceleration (deceleration), hastighed og position beregnes ud fra målte bremsetryk og fragt fra retardere (hydrodynamisk bremse på gearkassen).

Opgave	Metode	Resultater	Anbefalinger
DTU			
<h2 style="text-align: center;">Sammenfatning af dynamisk modellering og analyse <small>1/2</small></h2>			
<div style="display: flex; align-items: center;">  <div> <p>DSB og Havarikommissionen har konstateret fejl i udførelsen af bremsesystemet:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rørføring til tryksensor til P-bremse monteret forkert. • Referencehastighed (i bremsecomputer) for høj på midterste bogie (1,5 m/s² i stedet for 1,2 m/s²). • ATC giver ikke rettidig advarsel grundet slide på aksel 5, hvor ATC måler hjulhastighed. • DTU har analyseret konsekvenserne af dette. </div> </div>			
<div style="display: flex; align-items: center;">  <div> <p>Bremsesystemet på IC4 virker som designet foreskriver: Der er ikke fundet tegn på implementering som er i modstrid med sikkerhedsbremse-systemets specifikation.</p> </div> </div>			
<div style="display: flex; align-items: center;">  <div> <p>DTU's analyser estimerer den faktiske adhæsion ved Marslev som værende "lav" faldende til "meget lav" fra ca 0.06 ned til ca 0.04 indtil normal adhæsion i den sidste del af opbremsningen.</p> </div> </div>			
<div style="display: flex; align-items: center;">  <div> <p>Logfiler viser, at de hydrodynamiske bremsere (del af driftsbremser – ikke sikkerhedsbremser) ikke leverer bremsekraft når der er "slide" på naboaksler (trailer). Det er ikke hensigtsmæssigt, hvis ikke alle aksler udnyttes bedst muligt når der er glat, også selvom fænomenet er kortvarigt.</p> </div> </div>			
58	<i>Undersøgelse af IC4: Bremsesystem og Glatte Skinner</i> 22-06-2012		

DSB og Havarikommissionen havde påpeget forskellige forhold på IC4 togsættet fra Marslev: rørføringsfejl til en tryksensor; sw/parameterfejl i én af bremsecomputerne; hastighedsinformation til ATC system bliver for lav når aksel 5 slider eller blokerer; WSP forhindrer ikke hjulblokering

DTU har derudover afdækket at der er forhold i designet omkring brugen af de hydrodynamiske bremsere (retardere) og fordelingen af bremsekraft på de 6 trailer aksler, som ikke er optimal ved lav adhæsion mellem hjul og skinne.

Bortset fra de af DSB og Havarikommissionen fundne fejl og uhensigtsmæssigheder, har DTU konstateret en god overensstemmelse mellem observerede tidsforløb og hændelser i bremsesystemerne og det design som er specificeret. Bremsesystemets funktionalitet og virkemåde stemmer med specifikationerne.

DTU har kunnet estimere den faktiske adhæsion i Marslev gennem en detaljeret analyse af sammenhængen mellem bremsetryk, målte fart og tilbagelagt distance hvor parametre som belastning (vægt) på hver enkelt aksel indgår samt parametre for sammenhæng mellem bremsekraft og tryk i bremsecylindre.

Opgave	Metode	Resultater	Anbefalinger
--------	--------	------------	--------------



Sammenfatning af dynamisk modellering og analyse 2/2

Med lav adhæsion forårsager IC4 cross-blending, at der kun bremses effektivt med 6 aksler indtil føreren sætter bremseniveau til "nødbremning" eller der forekommer glidning på den pågældende aksel. Dette er OK ved normale forhold. Ved "lav" til "meget lav" adhæsion er det ikke optimalt, og giver øget bremselængde.

Det implementerede Wheel Slide Protection (WSP) er designet og godkendt efter en tidligere standard og opfylder ikke nyeste (2011) standard for WSP, som især forbedrer WSP for "lav" og "meget lav" adhæsion.

Med en adhæsion under 0.05 skulle WSP systemet forhindre hjulblokering. Det gør det ikke på aksler med P-bremse.
Årsag: P-bremsen aktiveres ved høj hastighed når bremsekommandoen sættes til "nødbremning".

59 Undersøgelse af IC4: Bremsesystem og Glatte Skinner 22-06-2012

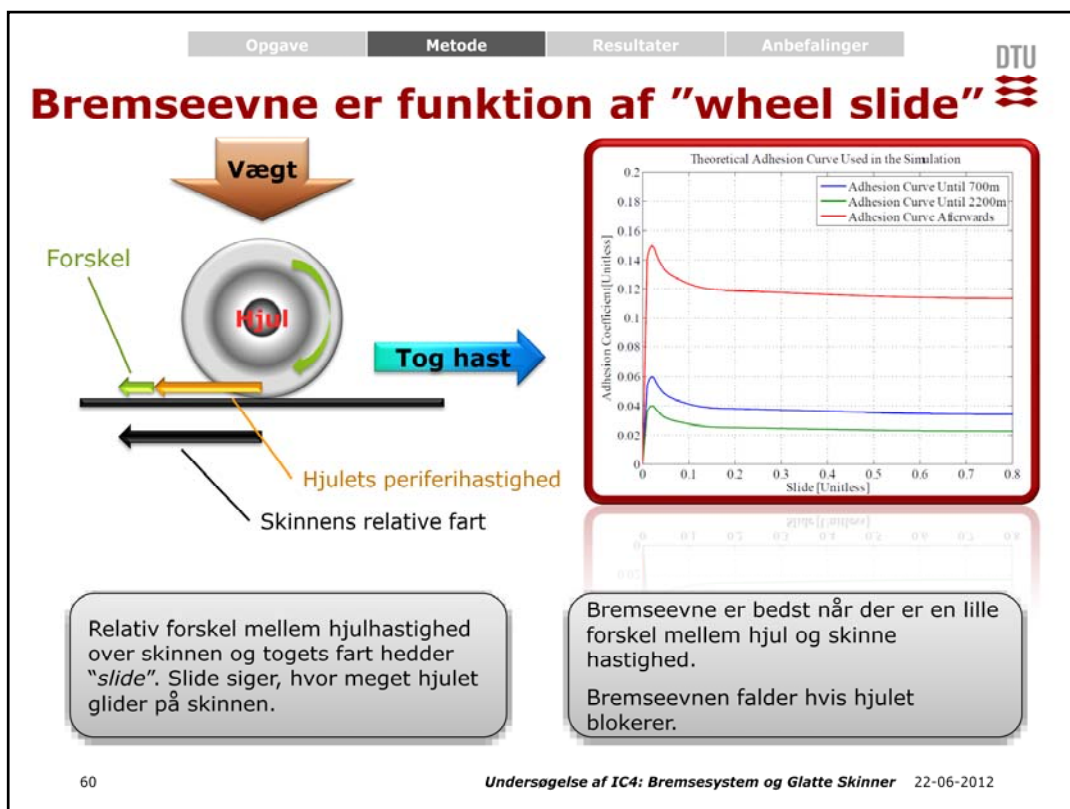
Når der sker slide på én af fire aksler, som er tilknyttet forreste eller bagerste bremsecomputer (BCU), kommanderes retarderne til at udkoble så de ikke leverer bremsekraft. En "blending and cross-blending" algoritme fordeler den manglende bremsekraft på øvrige aksler. Ved glathed kan disse aksler imidlertid ikke bremse yderligere, men den øgede bremsekommando forårsager at disse aksler går i dybere "slide". Med adhæsionskurver som GM/GN2596 bevirker dette en mindre bremseevne for de pågældende aksler.

Når motoraksler ikke glider, fordi der ikke bremses på dem, er der imidlertid en gavnlig effekt af at WSP systemet får en korrekt information om togets hastighed. Dette bevirker mindre værdi af "slide" og bibeholdelse af den bedre bremseevne nær adhæsionskurvens top.

Det understreges at blending/cross-blending algoritmen fungerer efter hensigten under forhold med normal adhæsion.

Forholdet omkring retardere og blending/cross-blending designet bør overvejes.

Defekten omkring forkert rørføring til en tryksensor som styrer parkeringsbremsen, er belyst af simuleringer og kan genskabe de tidsregistreringer, som blev optaget på test i Vojens og observeret opførsel ud fra logdata fra Marslev.



Denne planche forklarer "wheel slide" eller glid mellem hjul og skinne. Forholdet kendes også fra glatkørsel med biler.

Opgave
Metode
Resultater
Anbefalinger

DTU

Glat hjul/skinne kontakt = lavere adhæsion

Adhæsionen bestemmer togets bremsevne.
 Deceleration \leq adhæsion * 9.82 m/s²

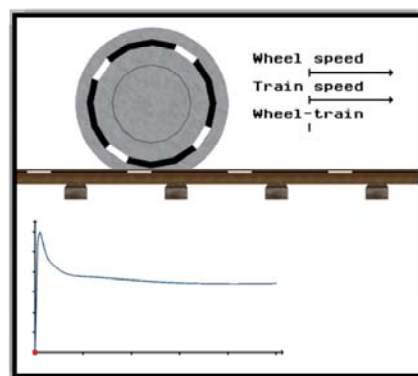
Adhæsion	α
normal	hvis $\alpha \geq 0.1$
glat (lav adhæsion)	hvis $0.05 \leq \alpha < 0.1$
meget glat	hvis $\alpha < 0.05$

61 Undersøgelse af IC4: Bremsesystem og Glatte Skinner 22-06-2012

Her defineres adhæsion som det antal gange tyngdeaccelerationen man kan decelerere (bremse) Definitionen af begreberne "normal", "glat" og "meget glat" er citeret.

Wheel Slide Protection (WSP)

Wheel Slide Protection (WSP) er en regulator som letter bremsetrykket hvis hjulet nærmer sig blokering. WSP tilstræber at holde "slide" omkring toppen af bremseevne kurven (adhæsion)



WSP funktionskrav er specificeret i international standard DS-EN-15595-WSP (2011).

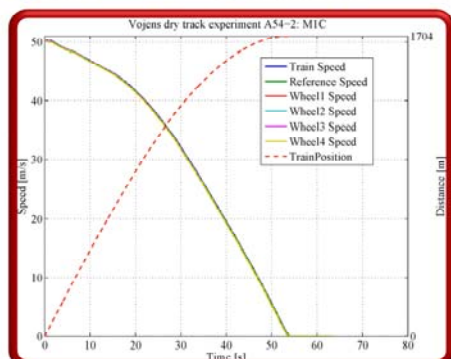
IC4 WSP er bygget efter den tidligere standard.

Wheel Slide Protection er et system der svarer til ABS bremses på biler. Hvis hjulet glider lettes bremsetrykket således at hjulblokering undgås.

Animeringen viser de første 30 sekunder aksel 4 hastigheden ved Marslev hændelsen. I de første 15 sekunder bremses akslen, men hjulet glider ikke. Adhæsionen udnyttes fuldt ud. Herefter glider hjulet og arbejds punktet kører frem og tilbage over den første del af adhæsionskurven, styret af WSP reguleringen.

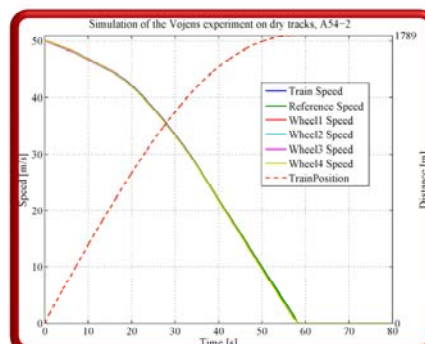
Vojens tests og simuleringresultater

Vojens – Tørre skinner



Målte resultater for akslerne 1-4
(Vojens A54-2 test)

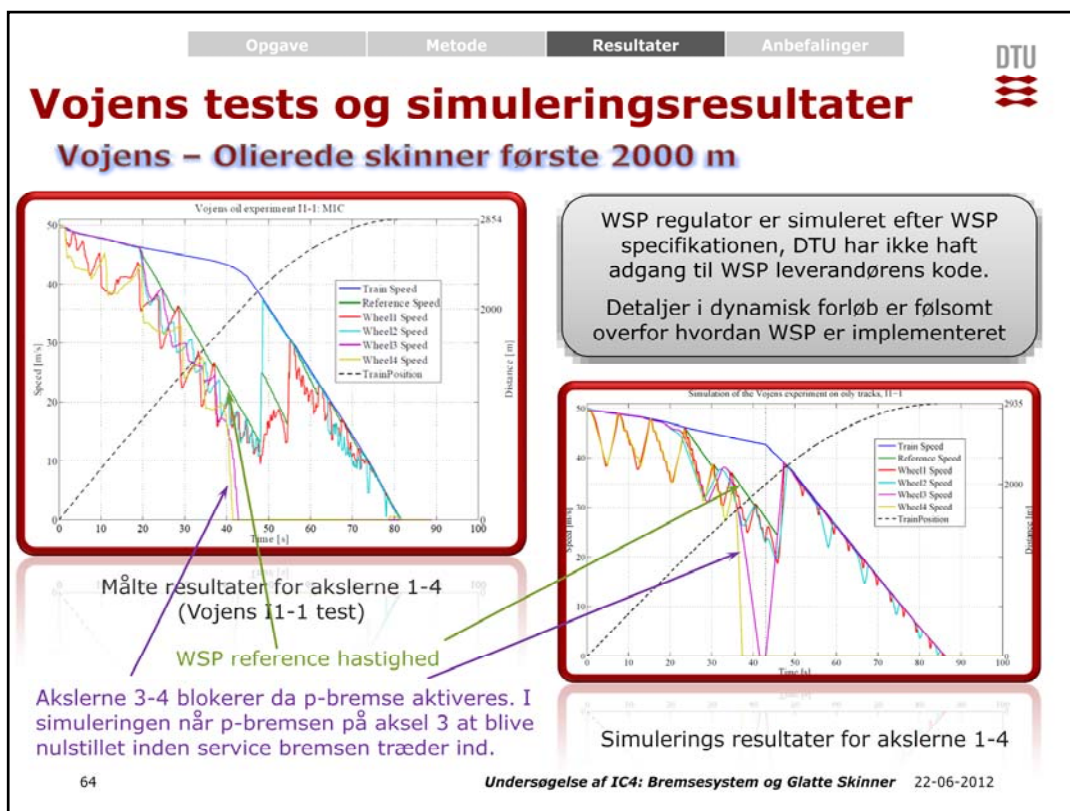
Simuleringen er udført med specificerede bremsedata. Tøget bremses lidt bedre end specificeret (normale forhold): 1,79 km simuleret, 1,70 km målt.



Simulerings resultater for akslerne 1-4

I Vojens blev der foretaget bremsetests på både tørre og oliebelagte skinner. Testen med tørre skinner er her sammenlignet med simuleringen. Simuleringen får den tidssekvens af bremsekommandoer, som er logget. Simuleringen er opbygget ud fra specifikationen og bremsedata er de der er beskrevet i specifikationen.

Resultatet viser at fart og hastighed stemmer overens med en vis tolerance. Togsættet bremses lidt bedre end simuleringen, altså lidt bedre end specificeret. Det bemærkes at der er en vis tolerance på loggede data, specielt har 1 sek opløsning i tidsstempler en betydning. Der er derfor en vis tolerance på simuleringen.



Sammenligning mellem Vojens test I1-1 på oliebelagte skinner er vist på disse figurer.

På Vojens data på plottet i venstre side blokerer akslerne 3 og 4 omkring 41-42 sekunder. Begge disse aksler er forsynet med parkerings bremses. Simuleringen viser også at begge aksler blokerer på dette tidspunkt. På grund af en lille tidsmæssig forskydning i simuleringen, som har årsag i forskellig WSP, frigøres p-bremse i simuleringen inden service bremsen tager over. I den virkelige test forbliver begge aksler blokerede. I simuleringer, hvor adhæisionskurven er en smule anderledes, eller WSP referencehastighed er lavere på det tidspunkt hvor føreren sætter bremsetrin til 8 (nødbremning) forbliver begge aksler i blokering. Den virkelige adhæisionskurve er ikke kendt og simuleringen vurderes som værende tæt på at eftergøre hovedtrækkene i de dynamiske forhold.

Det bemærkes at DTU ikke har adgang til WSP algoritmens detaljer. Den simulerede WSP er opbygget som en regulator, der opfylder standarden for WSP systemer.

Når toget passerer startpunktet bremser de bagerste hjul kortvarigt med "normal" adhæSION. Når slutpunktet af den oliebelagte strækning passerer, kommer forreste hjul ind på "normal" adhæSION før de bagerste. Denne effekt af togets længde er ikke medtaget i simuleringen på tidspunktet for denne midtvejsrapport.

Dynamiske usikkerheder kommer først og fremmest fra at parametrene og implementering af WSP regulatoren er forskellig i simuleringen og i virkeligheden. Åbne og lukketider og tolerancer for de pneumatiske ventiler, som styrer bremsetrykket er andre usikkerheder.

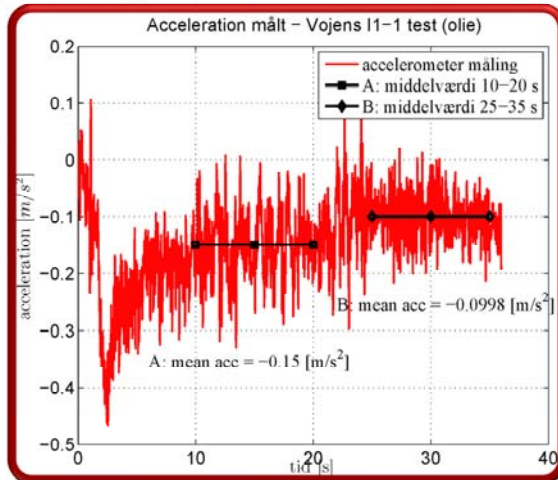
Vojens tests og simuleringresultater

Observationer fra Vojens I1-1 data - meget glatte skinner

- Aksler med hydrodynamiske retardere giver ingen bremsekraft (slået fra under eksperimentet).
- Blending – cross blending forøger derfor bremsekommando til øvrige aksler, men derved overstiges bremsevnen (adhæsionen) for disse aksler. Hjulene begynder at glide (sliding) og WSP bliver aktiv.
- WSP kan ikke forhindre dyb "slide" når adhæsionen er "meget glat". Årsagen er at den fart V_{ref} som WSP benytter, bliver væsentligt lavere end togets reelle fart. WSP holder derfor ikke slippet på en lav værdi, hvor adhæsionen er størst, men arbejder med et stort slip, hvor adhæsionen åbenbart er lavere.
- Når trinnet nødbremning nås aktiveres parkeringsbremsen. Disse aksler blokerer, og WSP kan ikke frigøre dem når adhæsionen bliver normal efter 2200 m. Dette øger bremsedistancen.

Denne planche sammenfatter observationer ud fra Vojens tests og simuleringer.

WSP egenskaber – Vojens I1-1 test (olie)



WSP forhindrer ikke dyb slide ved niveau "meget glat".

Det er denne version af WSP ikke designet til at kunne. Nyere versioner er bedre.

Adhæisionskurven i olie er ekstremt lav. Fire gange lavere end konstateret ved Marslev.

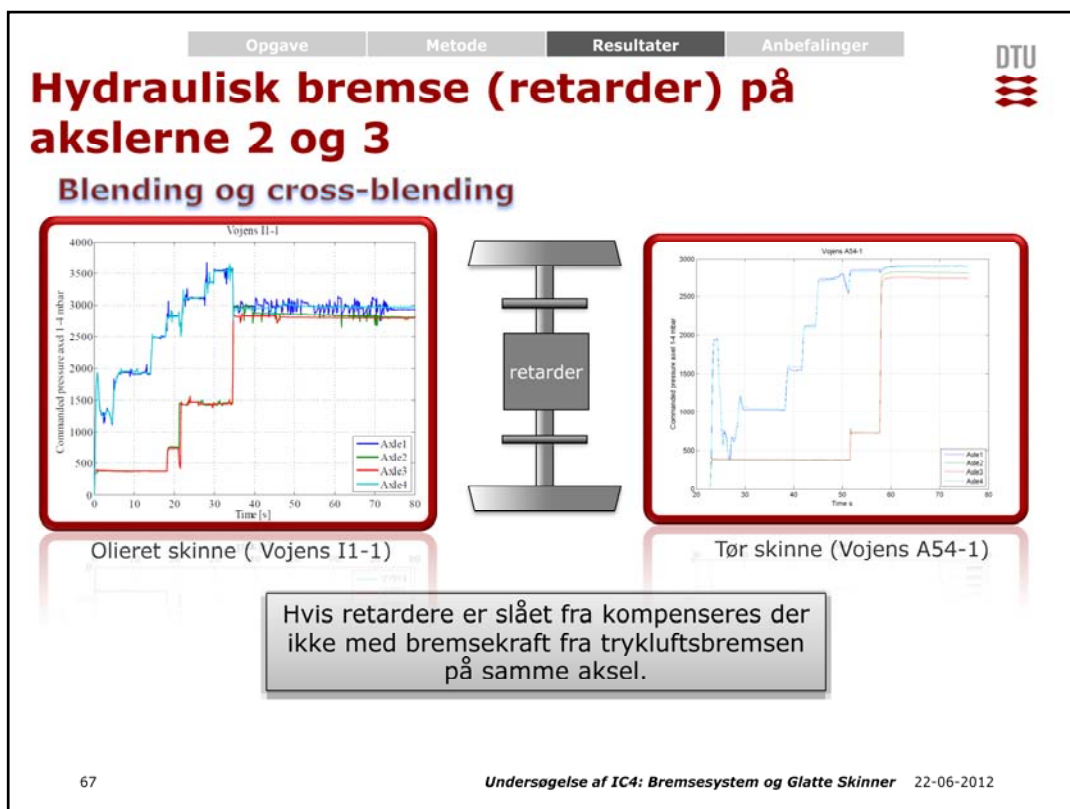
Målt acceleration ved Vojens test viser den faktisk udnyttede adhæision. Op til 20 s bremses der ikke på 4 aksler med retardere. WSP får korrekt referencehastighed. Acceleration er 0.15 m/s^2 (udnyttet adhæision 0.0153). Efter 25 s er aksler i dyb slide. Middelt acceleration er 0.099 m/s^2 selvom der nu bremses på alle 10 aksler. Udnyttet adhæision $0,0102$.

66

Undersøgelse af IC4: Bremsesystem og Glatte Skinner 22-06-2012

Ved Vojens testene var toget udstyret med et instrument til at måle togets acceleration. Figuren viser at decelerationen i tidsrummet 10 – 20 sekunder er $0,15 \text{ m/s}^2$. På dette tidspunkt bremses retarderne ikke på akslerne 3 og 4, og disse aksler er ikke i glid. Derfor får WSP en korrekt referencehastighed. I perioden 25-35 s er alle akslerne 1-4 (vist på planche 64) i glid. WSP benytter en referencehastighed som er lavere end togets reelle hastighed og hjulene går i dyb "slide". Decelerationen falder til $0,1 \text{ m/s}^2$ selvom der nu bremses på alle 10 aksler. Dette bestyrker antagelsen om at adhæisionen er bedst ved lav værdi af "slide".

Samstemmende med planche 21 viser denne måling at Vojens I1-1 eksperimentet er væsentlig mere glat end ved Marslev.



Denne og følgende plancher går i detaljer med de forhold DTU mener der kunne forbedre bremseevnen ved lav adhæsion.

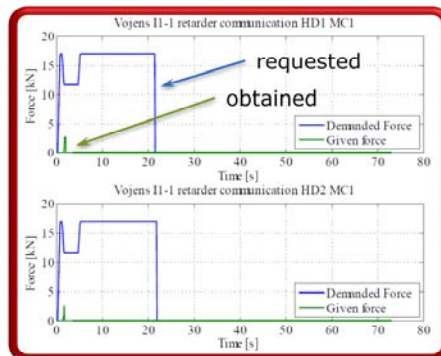
De to sæt kurver viser målte bremsetryk. Akslerne 1 og 4 er trailer aksler, 2 og 3 er motor aksler med hydrodynamiske bremser (retardere).

Kurverne viser at blending/cross blending sætter tryk på trailer aksler, men kun forøger lufttrykket på motorakslerne, hvor retarderne sidder, til halvdelen af den værdi som retarderne kunne give. Virkemåden er fin under normale forhold, men hvis der er glat udnyttes den ringe adhæsionen kun effektivt på 6 af de 10 aksler i de bremsetrin hvor retarderne er i funktion.

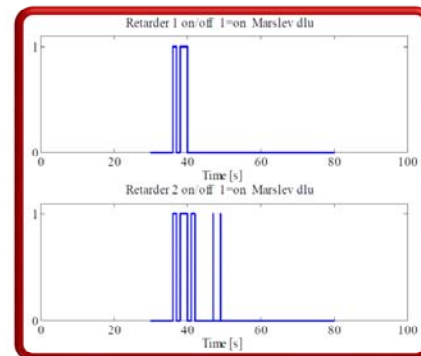
Luftrykket skal være mere end 0,36 på motoraksler, og mere end 0,5 bar på trailer aksler for at bremse.

Når der skiftes til højeste bremsetrin bremser toget med trykluft på alle aksler.

Retarders: Vojens & Marslev



Når retarder melder tilbage at der ikke leveres kommanderet bremsekraft. Manglende kraft fordeles på kommando til øvrige aksler. Det er ikke optimalt ved glathed.



Marslev data viser at hydrodynamiske bremser kun er delvist aktive i den første del af opbremsningen. HD bremserne giver øjensynligt ikke den kommanderede kraft da andre aksler er i "slide" med mindre end 17 kN bremsekraft.

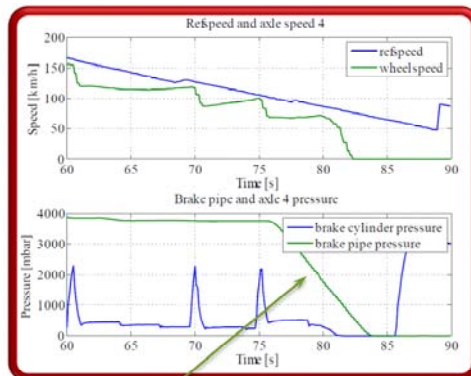
Retardere (hydrodynamisk bremse) benyttes som driftsbremse
– benyttes ikke under nødbremning.

Viser i plottet til venstre ønsket bremsekraft til retardere (blå) og opnået (grøn). Meddelelser i logfilen viser at retarderne ikke leverer bremsekraft.

Fra Marslev hændelsen har man kun IDU og DLU log filer. Plottet til højre viser at retardere kun virker kortvarigt. Tiden på denne tidsakse er sekunder er 15:16. Opbremsningen starter 15:16:34. Den korte puls til nul i begyndelsen af forløbet er et gearskifte. Retardere undlader at bremse under et gearskifte.

Monteringsfeil i tryksensor

Konsekvens



P-bremse aktiveres

DTU har ikke vurderet om blokerede bremses har en rensende effekt på skinnen – der er ikke publicerede data som giver entydige svar.

P-bremse aktiveres ved 155 km/h – 4 aksler blokerer – WSP kan ikke frigøre disse aksler når friktionen igen bliver høj – adhæsionen udnyttes dårligt. Denne fejl var tilstede i Marslev.

Denne planche viser at konsekvensen af defekt rørføring til parkeringsbremsens tryksensor er at p-bremse aktiveres. P-bremse aktiveres når "brake pipe pressure" er mindre end 2,7 bar samtidigt med at "brake cylinder pressure" er mindre end 0,5 bar.

Ved Vojens kan WSP kan ikke frigøre akslerne med P-bremse. De fire aksler med P-bremser er derfor blokeret (har relativ "slide" på 100%) og udnytter adhæsionen dårligt.

DTU har ikke vurderet om blokerede hjul har en rensende effekt på skinnen. Der er ikke data tilgængelige, som giver entydigt svar herpå.

Marslev

Analyse baseret på logfil fra Marslev og simulering af "what if":

- Der ikke var fejl på rørføring til tryksensor til parkeringsbremse
- Hydrodynamiske retardere gav kommanderet bremsekraft
- Der var ligelig fordeling på alle aksler – uden "blending" og "cross-blending"
- Magnetisk bremse var aktiv
- ATC aktiverede nødbremning

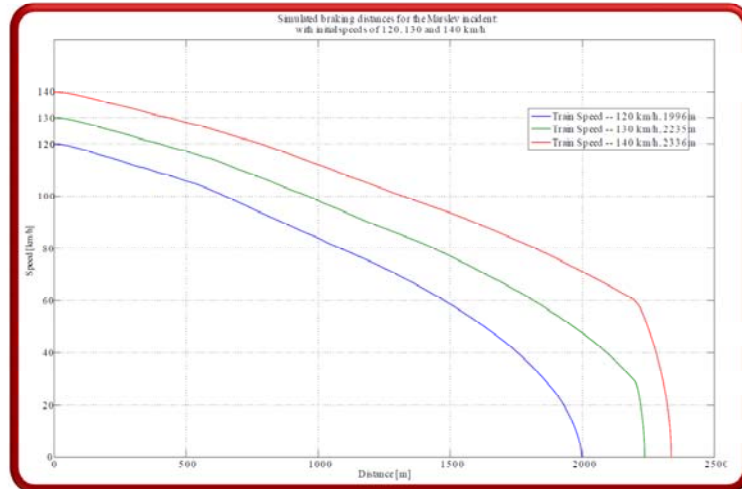
Marslev var glat faldende til meget glat. Defekt monteret rørføring til P-bremses tryksensor har indflydelse men ikke afgørende. Hvis magnetbremsen havde været aktiv ville dette give omkring 150 m mindre bremselængde med de forudsætninger der er anvendt.

Vi har ikke medtaget rensende effekt af magnetbremseser.

Ideel WSP reference hastighed kunne ikke simuleres.

Den opbyggede simuleringssmodel anvendes til at undersøge konsekvenser af forskellige tiltag man kunne foretage.

Simulering af bremselængde ved Marslev (ved forskellige toghastigheder)

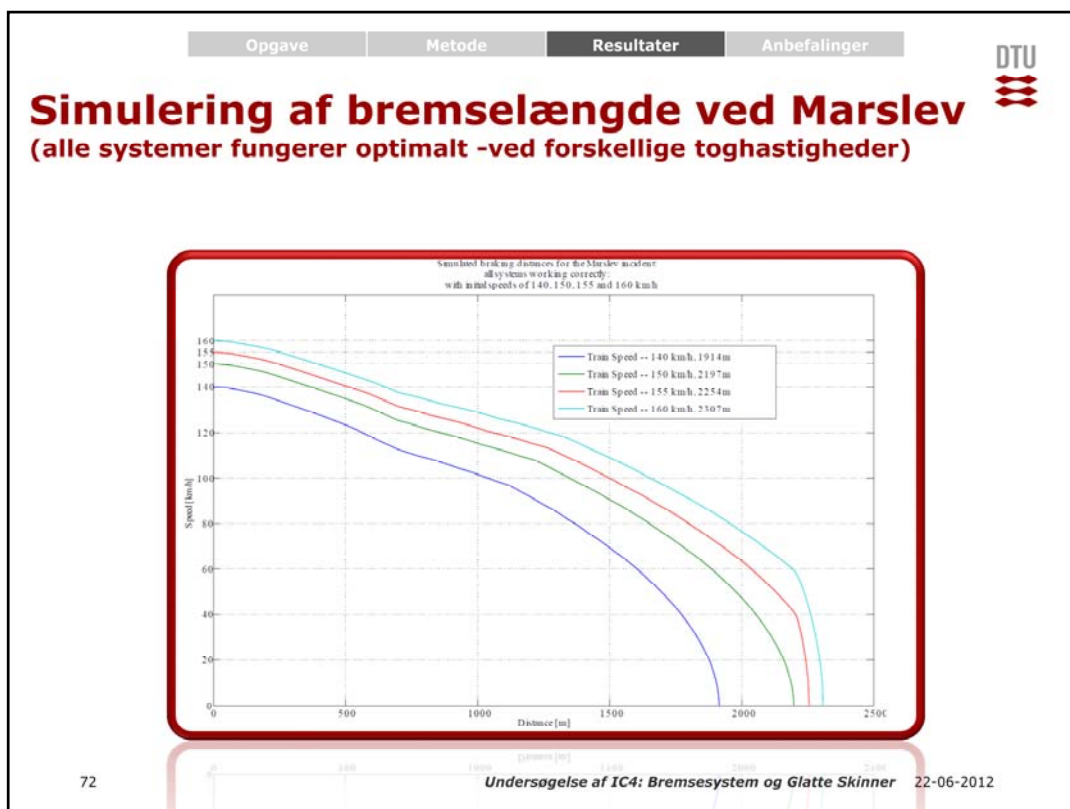


71

Undersøgelse af IC4: Bremsesystem og Glatte Skinner 22-06-2012

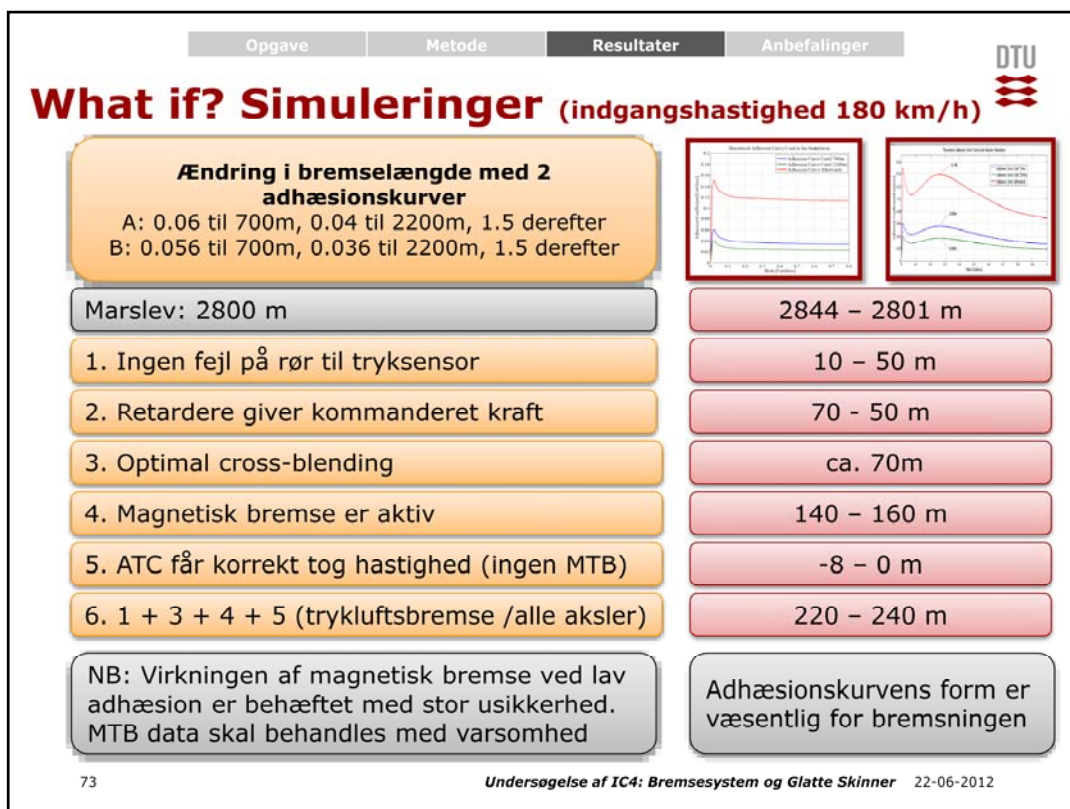
Her vises virkningen af at nedsætte farten inden signal AM-2153 passeres.

Figuren viser hastighedsforløb og standselængde simuleret for Marslev med hastighed 120, 130 og 140 km/h 220 m før signal AM-2153.



Figuren viser hastighedsforløb og standselængde simuleret for Marslev med hastighed 140, 150, 155 og 160 km/h 220 m før signal AM-2153.

Med indgangshastighed 155 km/h og alle tekniske systemer fungerende optimalt, ville IC4 være standset inden farepunktet ved signal AM-2173.



Simuleringer viser virkningen af at rette de konstaterede defekter samt af at foretage de optimeringer man kunne foretage.

Simuleringerne er foretaget for to de forskellige sæt adhæisionskurver som er vist.

Den væsentligste forbedring af standselængden fås ved at magnetbremsen (MTB) altid kan aktiveres under kørsel.

Den samlede effekt af alle tiltag / optimeringer er i området 200-250 m.

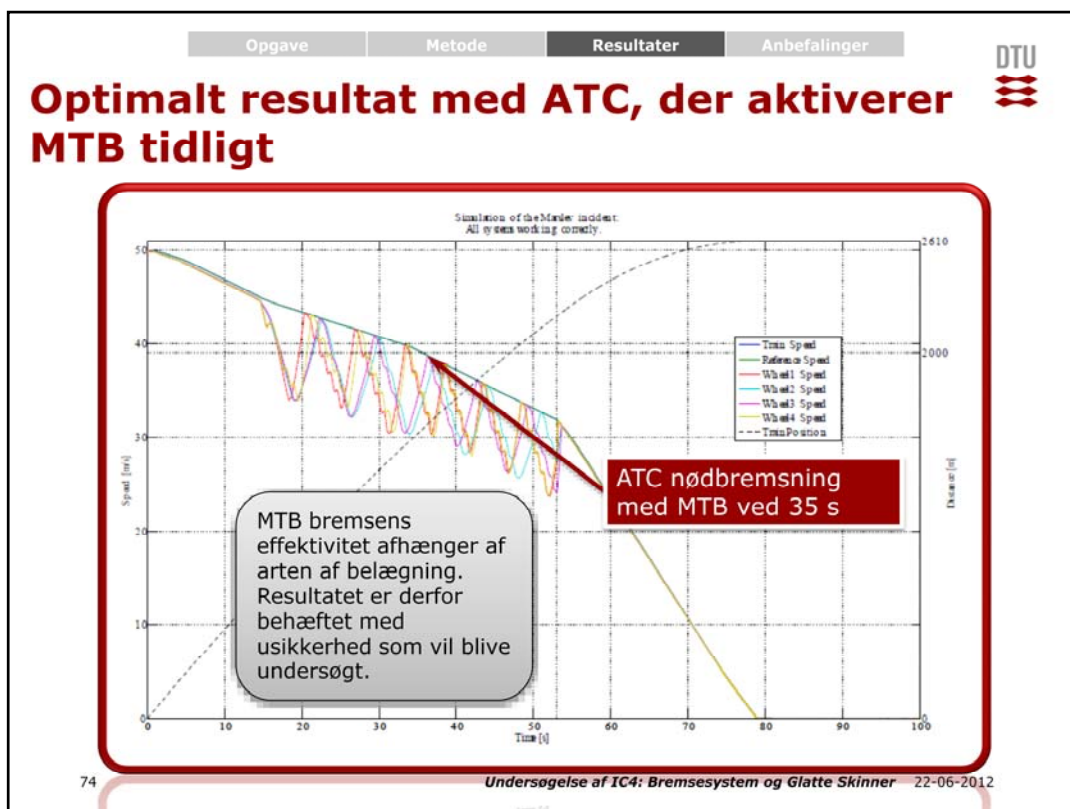
Dette ville ikke være nok til at forhindre at farepunktet efter AM-2173 blev overskredet ved Marslev.

Togets hastighed skulle have været mindre end 155 km/h 220 m før AM-2153 for at standse inden farepunktet.

Hvis der havde været normal adhæesion ved Marslev mellem AM-2153 og AM-2173 ville toget være standset inden farepunktet også med den hastighed toget havde (181 km/h) da opbremsningen startede.

Virkningen af at ATC systemet havde haft rigtig fart information er nul eller forværrende ifølge simuleringen. Der er tre fænomener i spil her. Først at ATC ikke kan benytte MTB bremsen, som var slået fra. Dernæst at føreren allerede have bremsetrin 7 på det tidspunkt ATC ville have nødbremset (svarer til trin 8). Desuden at den dybere slide som nødbremningen medfører ville forringe adhæisionen med de adhæisionskurver der er anvendt (og som følger GM/GN2596 test forskriften).

Det er vigtigt at bemærke at effekten af de enkelte tiltag ikke er additiv da der er et dynamisk samspil mellem funktionerne.



Viser ATC med korrekt fartinformation plus at ATC aktiverer den magnetiske bremse tidligere end føreren satte bremsen til trin 8 (nødbremssning). Effekten er en forkortelse af standselængden med 230 m.

IC4 BREMSESYSTEM HYPOTHESEN OM MEGET GLATTE SKINNER

Smøremiddel og hjul-skinne kontakt

- Det er velkendt at vand er et dårligt smøremiddel til metalliske kontakter, men det er mindre velkendt, at en beskedent tilsætning af organisk materiale til vand ændrer de smørende egenskaber drastisk.
- Skinnerne kan være våde/fedtede af forskellige årsager, men den typiske situation er, at det er løv fra træer blandet med regn eller sne, der danner en fedtet belægning på skinnerne.
- I træernes løv er der vegetabilsk olie og andre organiske forbindelser. Når bladene fanges i højtrykszonen mellem hjul og skinne presses olien ud af løvet og danner et lag opfører sig som en smørefedt.

Smøremidlets kemi

Plantecellerne i løvet er sammensat primært af vand, ca. 70%, og poly-saccharider (cellulose og pectin) og lignin. Cellulose er en vandopløselig polymer. Pectin er et polysaccharid med kompleks struktur. Eksperimentelle undersøgelser har vist, at tilstedeværelsen af vand spiller en vigtig rolle i dannelsen af et klæbende olie- eller fedtlignende lag.

Hændelser med glatte/meget glatte skinner

Glatte/meget glatte skinner indtræffer primært i løvfaldsperiode og under fugtigt vejr, visse strækninger mere modtagelige end andre, kan indtræffe hurtigt (inden for en time), ofte kan man efterfølgende intet spore.

Britiske og hollandske undersøgelser og erfaringer viser at glatte/meget glatte skinner forekommer ikke sjældent.

ABSOLUT FORELØBIG VURDERING:
Når britiske tal "ubehandlet" overføres til danske forhold kan forventes i gennemsnit 1-2 forbikørsler om året.
Opfølgning i WP5.

Enkelte lande har indført instrukser for bremseteknik ved glatte/meget glatte skinner, men fordele og ulemper ved generel instruks diskuteres.

Danmark

En rapporteret hændelse: Give 2009, overskridelse = 200 m.

Mange korte signalforbikørsler og 'glemt standsning' ('station overruns')

Erfaringer hos Ikf.: Opleves ofte i mindre grad, rapporteres ikke; forekommer især ved efterår og særlige vejforhold (diset, vindstille)

England

Grundige undersøgelser (RAIB) af 11 hændelser i 2005

6 overskridelser med mere end 1000 m (max hastighed: 144 km/t)

Ofte tages prøver fra skinnerne; i 45% af hændelser kan man ikke observere 'contamination' på skinnerne

Anbefaler ændring af 'driving policy': fra 'light and early' til

kraftigere opbremsning i starten, fordi:

1. udløse sand ved 'trin 2';

2. bedre udnyttelse af områder med højere adhæsion

Videre undersøgelser om varselssystem baseret på måledata og meldinger fra Ikf.

Senere hændelser: Stonegate 2010

Hastighed: 103 km/t; bremselængde: 5180 m.

Primær årsag: manglende sand

Lkf. = lokomotivfører

Hændelser i England efterår 2005

Signalforbikørsler (SPADs): 9 (7 i 2004)

Station overruns: 390 (152 i 2004)

"6 incidents (including the Esher SPAD) where the length of the overrun exceeded 1000 metres and 18 incidents where the overrun was so severe that the driver continued to the next station rather than returning to the station that had been passed."

9 hændelser undersøgt i RAIB Report 25.3/2006 (s.16) + Esher og Lewes (25.1 og 25.2)

Historisk: "high in frequency but low in consequence... [V]ery few accidents"

(RAIB 25.3/2006, s.7)

Stikprøver uden resultater

"In 45% of the adhesion related incidents occurring in autumn 2005, no rail head contamination was observed by the MOM. Among the incidents where no contamination was seen were two where the length of overrun exceeded 1,000 metres." (RAIB 25.3, s.18)

Ang. Driving policy

Baseret på 3 bremsetrin + nødbremse: trin 1 (0,3 m/s²), trin 2 (0,6 m/s²), trin 3 (0,9m/s²) (RAIB 25.3/2006, s. 40) – modsat 8 bremsetrin i IC 4

Fordele ved ny 'driving policy' uddybet:

1) sand udløses ved bremsetrin 2

"A further advantage of moving to a higher

brake step quickly is that should the train encounter an area of better adhesion, it will slow more rapidly than would be the case if it were held in a lower brake step. This may help to compensate for the early stages of braking when the train was sliding." (RAIB report 25 (Part 3)/2006, s.60)

(DSB har ikke tilsvarende retningslinjer for Ikf., hvis kørsel er baseret på deres professionelle uddannelse og erfaring. Det er således Ikf's ansvar, "at toget kan standses for et signal, der viser stop", jf. Give-hændelse)

Mulige problemer ved ny 'driving policy' ved Stonegate: "The driving policy required the driver to initially apply brake step two, rather than step one, in order to deposit sand, and thus to improve adhesion. This was a possible contributory factor." (RAIB report 18/2011, s.32)

Delvis forklaring:

"The OTDR data showed that, during the incident at Stonegate, the rate of brake retardation achieved reduced from 1.7 %g to 1.3 %g as the brake step was increased from two to emergency (see figure 4). This drop in retardation was similar to that seen in the low adhesion testing carried out by Southern Railway in April 2011. This showed a reduction in brake retardation from approximately 7 %g to 6 %g, in low adhesion conditions with no sand, as the brake was increased from step two to emergency. This reduction in retardation as braking is increased could be explained by the WSP system having to work harder to release the brakes more often to match the higher train braking to the low available rail adhesion." (RAIB report 18/2011, s.33)

Konkrete forhold ved Marslev

Vejret var diset.

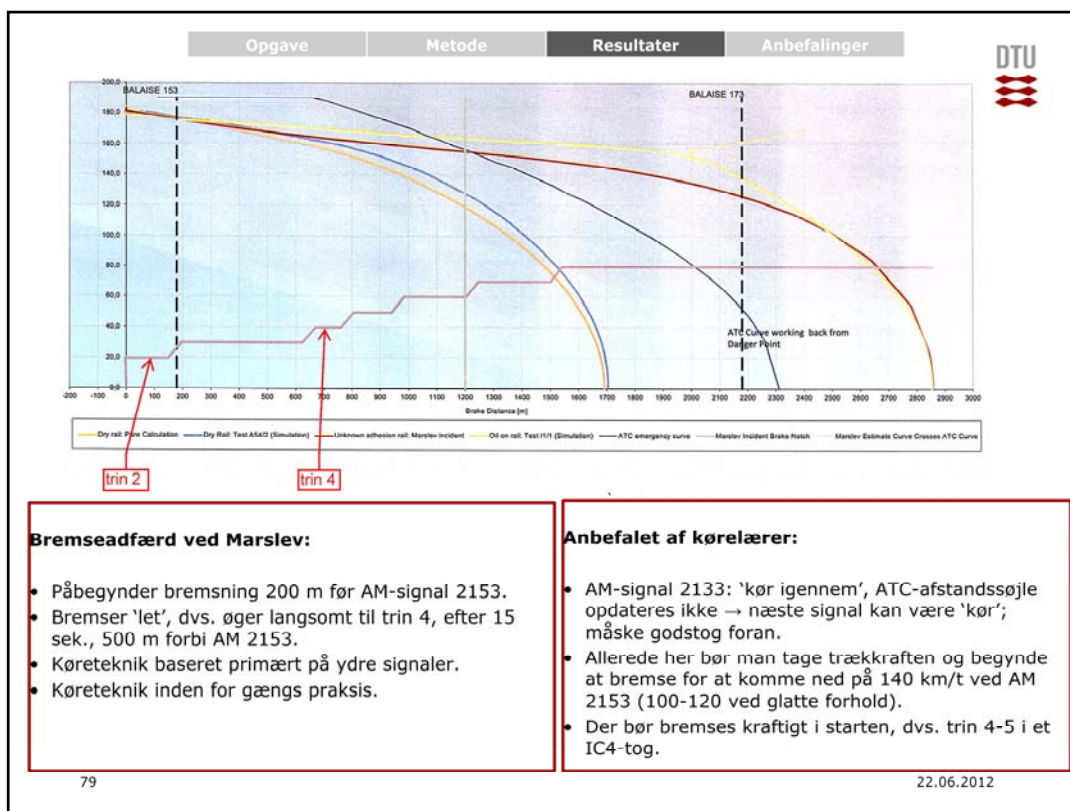
Banedanmark har ikke haft aktiviteter på strækningen: hverken med løvfaldsvogn eller sprøjtet mod ukrudt.

Omkringliggende arealer/grundstykker samt bevoksning langs skinner er ikke sandsynlige kilder til ekstraordinært materiale på skinnerne, men det er sandsynligt, at der kan have været mindre mængder løv hvirvlet op på skinnerne.

DSB modtager særligt mange meldinger om glatte skinner i perioden 2. og 7. nov. 2011.

Den konkrete bremseadfærd (lidt sent og let) overholder gældende procedurer, og er optimeret efter rettidighed.

Konkrete forhold ved Marslev



Bremseadfærd ved Marslev

Ikke ualmindelig bremseteknik: minimerer bremsetid og dermed køretid

Lkf. var bagud ift. køreplanen og kan være motiveret af at indhente forsinkelsen

Denne teknik er *ikke* i modstrid med gældende instrukser, der blot angiver, at det er lkf.'s ansvar, at toget standser ved rødt (se nedenfor).

Bremseteknik anbefalet af kørelærere

DSB Kørelærere om Marslev:

"Vurderer, at lkf. bremser sent og svagt ved Marslev

- Allerede når han er kørt forbi AM-signal 2133 (to grønne = 'kør igennem'), vil han vide, at det næste signal AM-signal 2153 kan være 'en grøn' (= 'kør', dvs. næste vil være 'rød' = stop), fordi ATC-afstandssøjlen *ikke bliver opdateret*. Han vil vide, at der højst sandsynligt er et godstog foran ham.
- I den situation bør man (ifølge TS) allerede ved det første signal (2133) tage trækraften og begynde at bremse (dvs. i den første blok mellem 2133 og 2153), således at man ved det næste signal (2153) er nede på 140 km/t. (ved glatte forhold bør man snarere være på 100-120 km/t).
- For at komme ned på 120-140 km/t ved AM-signal 2153 bør man bremse kraftigt i starten, dvs. i trin 4-5 i et IC4-tog.
- Ved selve hændelsen begynder lkf. at bremse 'let' 220 meter før AM-signal 2153 og kører forbi signalet med 177 km/t (Havarikommissionen). 'Bremses let': dvs. han når først op på trin 4 efter 15 s., ca. 500 m. efter AM-signal 2153 (bremselog).

"bremsen i IC4 er længere om at tage fat"

Underviser selv i denne bremseteknik

(Interview)

Kommentar

Bemærk, at den her anbefalede køreteknik *ikke* er en instruks. Det er netop lkf.'s eget ansvar at kunne standse, og der er forskellige måder at køre/bremse på.

Denne kørelærers anbefaling er relativt forsigtig og indebærer, at man bruger ATC-afstands-søjlen inde i toget til at køre mere sikkert.

Fra SR (de eneste regler for lkf.'s kørsel):

" 8.1.1. Ansvar

Ved enhver kørsel og rangering skal der være én person, der har ansvaret for sikkerheden ved kørslen. Denne person benævnes lokomotivfører, lods, fører eller rangerleder.

Den pågældende har ansvaret for, at

- bremsebestemmelserne overholdes
- hastigheden altid afpasses efter signalgivning samt bremse- og oversigtsforhold
- hastigheden altid afpasses efter vejrliget og skinnernes beskaffenhed (sne, is, løvfald mv.).
- udveksle alle sikkerhedsmeldinger vedrørende kørslen"

Resultater overordnet ⁽¹⁾

Effekt af tidligere konstaterede forhold

- DSB og Havarikommissionen har konstateret fejl i udførelsen af bremsesystemet:
 - Rørføring til tryksensor til P-bremse var monteret forkert.
 - Parameter til referencehastighed (benyttes i bremsecomputer) er for høj på midterste bogie (1.5 m/s² i stedet for 1.2 m/s²).
- DTU har analyseret konsekvenserne af dette, og finder at begge forhold kun har en ringe effekt på bremselængden (reduktion i bremselængde på henholdsvis ca. 30 meter og i størrelsesordenen 10 meter).

IC4 togets bremsesystem

- Sikkerhedsbremssystemet på IC4 virker som designet foreskriver. DTU har ikke fundet tegn på implementering som er i modstrid med sikkerhedsbremssystemets specifikation.
- Logfiler viser at hydrodynamiske bremsere (del af driftsbremser – ikke sikkerhedsbremser) kun kortvarigt leverede bremsekraft ved Marslev. Årsagen hertil er ikke opklaret. Forholdet har kun ringe betydning for bremselængden ved Marslev. (Reduktion i bremselængde ca. 60 meter).

Resultater overordnet ⁽²⁾

Skinneforhold ved Marslev

- DTU har kunnet anvende den udviklede dynamiske model til at estimere den faktiske adhæsion mellem skinner og togets hjul ved Marslev på baggrund af logfiler over blandt andet bremsekraft og deceleration. Adhæsionen er et mål for skinnernes "glathed" og det kan derfor afgøre om skinnerne var glatte eller ej, og i hvilket omfang. Adhæsionen ved Marslev var "lav" de første ca 600 meter ($\alpha=0.056$) faldende til "meget lav" de næste 1500 meter ($\alpha=0.037$) indtil normal adhæsion i de sidste 700 meter af opbremsningen. Den lave adhæsion, det vil sige den høje glathed mellem hjul og skinner er den helt afgørende faktor for standselængden.
- DTU's gennemgang af data om vejrforhold og tilstødende arealer har ikke kunnet angive nogen specifik årsag til at skinnerne var glatte ved Marslev den 7. november 2011.
- Baseret på foreløbige analyser af data fra sammenlignelige lande må det konkluderes at skinneforholdene ved Marslev var usædvanlige, men dog ikke mere end at hændelser af denne type kan forekomme i gennemsnit ca. 1 gang årligt i Danmark. Danske data er sporadiske men modsiger ikke denne vurdering.

Resultater overordnet ⁽³⁾

Generelt om glatte skinner

- DTU's litteraturgennemgang viser at glatte skinner er vanskelige at detektere og forudsige. Det viser udenlandske erfaringer hvor "sliding" og "station overruns" i UK i halvdelen af tilfældene ikke kunne dokumenteres, 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 UK og Hollandsk litteratur, samt ved interviews af DSB personale i DK, at opstå uvarslet.
- Der er dog en sammenhæng med årstid og fugtige vejrforhold.
- DTU's undersøgelser er foreløbige på dette punkt og fortsætter i WP4.

Anbefalinger ⁽¹⁾

Tiltag der kan reducere bremselængden ved glatte skinner

- DTU har i forbindelse med den omfattende gennemgang af IC4 togets bremsesystem identificeret en række forhold, der potentielt kan reducere bremselængden ved glatte skinner. Dette arbejde pågår fortsat. Her redegøres for hovedlinjerne i de spor der arbejdes med.

Anbefalinger ⁽²⁾

Tiltag der kan reducere bremselængden ved glatte skinner

- Magnetbremse bør altid kunne aktiveres. (Reduktion i bremselængde ca. 150 meter²).
- Det bør overvejes om lognings- og bremsesystemet skal tilpasses så magnetbremsen aktiveres automatisk ved høj "slide".
- Monter rørføring til P-bremsesensor efter forskrifterne. Med en adhæsion på 0.04 skulle WSP systemet forhindre hjulblokering. Det gør det ikke på aksler med P-bremse. Årsag: P-bremsen aktiveres ved høj hastighed når bremsekommandoen sættes til "nødbremning". WSP systemet kan ikke forhindre hjulblokering med aktiveret P-bremse. (Reduktion i bremselængde på ca. 30 meter).
- Retardere giver ikke den kommanderede bremsekraft, men årsagen er ikke identificeret. Retarder er en del af driftsbremsen og er en del af "power pack". Den manglende virkning har betydning for de lave bremsetrin. (Ved optimal funktion en reduktion i bremselængden på ca. 60 meter).

Rettelse pr. 26/6-2012: adhæsion på 0.056 rettet til adhæsion på 0.04

Anbefalinger ⁽³⁾

Tiltag der kan reducere bremselængden ved glatte skinner

- Med lav adhæsion forårsager IC4 cross-blending at der kun bremses effektivt med 6 aksler indtil føreren sætter bremseniveau til "nødbremsning". Dette er OK ved normale forhold, men ved "lav" til "meget lav" adhæsion er det ikke optimalt, og giver øget bremselængde. (Reduktion i bremselængde ca. 70 meter).
- Det implementerede Wheel Slide Protection (WSP) er designet og godkendt efter en tidligere standard og opfylder ikke nyeste (2011) standard for WSP, som især forbedrer WSP for "lav" og "meget lav" adhæsion. (Størrelsesorden som ovenfor, men kræver nærmere analyse).

Anbefalinger ⁽⁴⁾

Tiltag der kan reducere bremselængden ved glatte skinner

- Ovennævnte forhold 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. Estimaterne er derfor kun indikative og skal undersøges nærmere før de danner et tilstrækkeligt grundlag for at implementere tiltagene. Ovennævnte forhold vurderes således ifølge konventionel teori og implementering af WSP systemer at kunne reducere bremselængden ved glat føre.
- I Marslev tilfældet vil overskridelsen på 550 meter kunne reduceres med ca. 250 meter. Det bemærkes at man ikke kan addere de enkelte effekter ved introduktion af flere tiltag som følge af bremsesystemets interne opbygning.

Anbefalinger ⁽⁵⁾

Køreinstruks og menneskelig adfærd

- DTU er informeret om, og har ved detailanalysen af logfiler kunne konstatere, at køreforskrifter er overholdt.
- DTU's analysegrundlag og værktøjer muliggør vurdering af effekten af at optimere køreinstruksen i tilfælde som Marslev. Analyserne viser at:
 - En tidligere (automatisk) udløsning af den magnetiske bremse (ved tilpasset signaltransmission og infosystem) kan afkorte overskridelsen med yderligere ca. 100 meter.*
 - En reduceret hastighed – fra 177 km/t til 155 km/t ved første signal ville reducere standselængden med yderligere ca. 300 meter. Information om skinneføre tilgængelig – ved ændret kørepolitik – til at nedbringe hastigheden i Marslev hændelsen.*

Anbefalinger ⁽⁶⁾

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".

Anbefalinger ⁽⁷⁾

Samlet konklusion

Den helt overvejende årsag til den lange standselængde ved Marslev var glatte skinner.

IC4 togets sikkerhedsbremssystemer virker som designet foreskriver og DTU's undersøgelser har ikke fundet tegn på implementering som er i modstrid med sikkerhedsbremssystemets specifikationer.

Glatte skinner er et forhold der bør tages højde for og hvis effekt vil kunne påvirke alle togtyper.

Specifikt ved glathed mellem hjul og skinner vurderes standselængden at kunne reduceres ved en kombination af bedre informationssystemer og dermed sammenhængende optimerede kørepolitikker samt teknisk optimering af WSP systemer og en mere "intelligent" brug af 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.

Ekspert-Teamet

Arbejdspakke 1

DTU Informatik

- Professor Jan Madsen: design, simulering og analyse af komplekse, computerbaserede systemer
- Lektor Paul Pop: design og analyse af sikkerhedskritiske systemer
- Ph.D. stud. Domitian Tamas-Selicean: certifikation og implementering af sikkerhedskritiske systemer

DTU Elektro

- Professor Mogens Blanke: automationssystemers pålidelighed og fejltolerance
- Lektor Nils Axel Andersen: modellering af dynamiske systemer, realtids styring og regulering, indlejrede systemer, system integration inden for automatiserede systemer
- Ph.D. stud. Enis Bayramoglu: algoritmer og metoder til realtid anvendelse i automatiserede systemer

DTU Management

- Seniorforsker Igor Kozine: risk analysis of complex environments, probabilistic assessments

Ekspert-Teamet

Arbejdspakke 2

DTU Management Engineering

- Seniorforsker Igor Kozine: risk analysis of complex environments, probabilistic assessments
- Seniorforsker Nijs Jan Duijm: risk analysis of complex environments, hazard identification
- Seniorforsker Alexandre Alapetite: man-machine interaction, simulation of human performance
- Seniorforsker Jacob Thommesen: accident analysis/human factors
- Prof. Henning Boje Andersen: accident analysis/human factors

DTU Mekanik

- Ingeniørdocent Peder Klit: tribologi (smøringsmekanik, friktion og slid), maskinkonstruktion og maskinelementer

Ekspert-Teamet

Arbejdspakke 3

DTU Elektro

- Professor Mogens Blanke: automationssystemers pålidelighed og fejltolerance
- Lektor Nils Axel Andersen: modellering af dynamiske systemer, realtids styring og regulering, indlejrede systemer, system integration inden for automatiserede systemer
- Civiling. Enis Bayramoglu: algoritmer og metoder til realtidsanvendelser i automatiserede systemer

DTU Informatik

- Professor Jan Madsen: design, simulering og analyse af komplekse, computerbaserede systemer
- Lektor Paul Pop: design og analyse af sikkerhedskritiske systemer
- Ph.D. studerende Domitian Tamas-Selicean: certifikation og implementering af sikkerhedskritiske systemer

Ekspert-Teamet

Arbejdspakke 4

DTU-Informatik

- Professor Bjarne Kjær Ersbøll: anvendt statistik, mønstergenkendelse
- Professor Henrik Spliid: forsøgsplanlægning og industriel statistik
- Lektor Murat Kulachi: statistisk proceskontrol, forsøgsplanlægning og data mining
- Videnskabelig assistent Philip de Saint-Aubain

DTU-Elektro

- Professor Mogens Blanke: automationssystemers pålidelighed og fejltolerance
- Lektor Nils Axel Andersen: modellering af dynamiske systemer, realtids styring og regulering, indlejrede systemer, system integration inden for automatiserede systemer
- Adjunkt Roberto Galeazzi: modeling of dynamical systems, advanced control design, fault diagnosis
- Phd studerende Søren Hansen: analyse af komplekse fejlsituationer og medvirken ved opklaring af havarier på ubemandede fly

DTU Management Engineering

- Seniorforsker Igor Kozine: risk analysis of complex environments, probabilistic assessments

Ekspert-Teamet

Arbejdspakke 5

DTU Elektro

- Professor Mogens Blanke: automationssystemers pålidelighed og fejltolerance
- Lektor Nils Axel Andersen: modellering af dynamiske systemer, realtids styring og regulering, indlejrede systemer, system integration inden for automatiserede systemer

DTU Systembiologi

- Professor Søren Molin: biofilms, functional genomics, evolution, antibiotic resistance, bacterial physiology

DTU Informatik

- Professor Rasmus Larsen: billedanalyse, computer vision, industriel inspektion
- Ph.D. studerende Otto H.A. Nielsen: optiske sensorer og målesystemer