

**RAPPORT OM JERNBANEULYKKE VED
FETSUND STASJON, KONGSVINGERBANEN, MED
ØSTGÅENDE TOG NR. 4661 DEN 18. JULI 2002**

**AVGITT
DESEMBER 2003**

Havarikommisjonen for sivil luftfart og jernbanes mandat er gitt gjennom "Forskrift om offentlige undersøkelser av jernbaneulykker og alvorlige jernbanehendelser". Havarikommisjonen for sivil luftfart og jernbane har utarbeidet denne rapporten utelukkende i den hensikt å forbedre jernbanesikkerheten. Formålet med undersøkelsen er å identifisere feil eller mangler som kan svekke jernbanesikkerheten, enten de er årsaksfaktorer eller ikke, og fremme tilrådinger. Det er ikke kommisjonens oppgave å fordele skyld og ansvar. Bruk av denne rapporten til annet enn forebyggende jernbanesikkerhetsarbeid bør unngås.

INNHOOLD

MELDING OM HAVARIET	3
SAMMENDRAG	3
SUMMARY 5	
1. FAKTISKE OPPLYSNINGER.....	7
1.1 Hendelsesforløpet	7
1.2 Personskade	8
1.3 Skader	8
1.4 Andre skader	9
1.5 Personellinformasjon	9
1.6 Rullende materiell.....	9
1.6.1 Involvert materiell.....	9
1.6.2 Togsammensetning	11
1.6.3 Infrastruktur/Kjørevei (Sporet og underbygning).....	13
1.7 Været.....	16
1.8 Trafikkledelse og ordregiving.....	16
1.9 Samband.....	16
1.10 Driftsform og signalsystem.....	17
1.11 Registrerende hastighetsmålerutstyr og datalogger	17
1.12 Skadebeskrivelse (Involvert materiell og infrastruktur).....	17
1.13 Medisinske forhold	18
1.14 Brann.....	18
1.15 Overlevelsesaspekter	18
1.16 Spesielle undersøkelser.....	18
1.17 Organisasjoner og ledelse	18
1.17.1 Lover og forskrifter.....	18
1.17.2 Rutiner for oppfølging av sikkerhetskritiske forhold.....	19
1.17.3 Operative bestemmelser og driftsforskrifter	20
1.17.4 Vedlikeholdsbestemmelser for rullende materiell og kjørevei.	20
1.18 Andre opplysninger.....	21
2. ANALYSE	22
3. KONKLUSJON	24
4. SIKKERHETSTILRÅDINGER.....	26
5. BILAG.....	26
6. DEFINISJONER.....	27

**RAPPORT OM JERNBANEULYKKE VED FETSUND STASJON,
KONGSVINGERBANEN, MED ØSTGÅENDE TOG NR. 4661
DEN 18. JULI 2002**

Tognummer: 4661

Involvert materiell: Godsvogn, type Lgjns-w

Registrering: Green Cargo/SJ, nr 4274 443 0881-6

Eier: Green Cargo AB

Broker: CargoNet AS

Besetning: 1

Passasjerer: Ingen

Hendelsessted: Kongsvingerbanen, under utkjøring fra Fetsund stasjon

Hendelsestidspunkt: 18. juli 2002 kl. 0920

MELDING OM HAVARIET

Havarikommisjonen for sivil luftfart og jernbane (HSLB) mottok melding om hendelsen kl. 0945 av vaktleder ved CargoNet AS sitt operative senter og av Jernbaneverkets uhellkommisjon og rykket umiddelbart ut til Gutterrud holdeplass der toget hadde stoppet.

SAMMENDRAG

Hendelsen:

Den 18. juli 2002 sporet en av vognene i tog 4661 av i en høyrekurve mellom sporveksel 2 på Fetsund stasjon og Fetsund bro på Kongsvingerbanen. En tilsvarende hendelse inntraff også den 13. august 2002 på samme sted med det samme toget. Den 18. juli fortsatte toget over Fetsund bro og videre ca. 5 km før avsporingen ble oppdaget og toget stoppet ved Gutterrud holdeplass. Den 13. august fortsatte toget ca. 3 km før avsporingen ble oppdaget og toget stoppet. De avsporede vognene var svenske og av typen Lgjns-w, dvs. toakslede containervogner med bladfjærer. Begge vognene sporet av med første aksel og begge var lastet med en lett container. Dagen før siste avsporing hadde det foregått utbedringsarbeid ved avsporingstedet. Denne rapporten omhandler den første avsporingen som skjedde den 18. juli, men vil også benytte data og informasjon som ble innhentet i forbindelse med avsporingen den 13. august der dette er hensiktsmessig.

Infrastruktur:

HSLB foretok en befaring både av sporet i området der toget hadde stoppet og ved Fetsund stasjon. Avsporingstedet ble lokalisert mellom sporveksel 2 og inngangen til Fetsund bro. Det var vindskjevheter i kurven og overhøyden i overgangsrampen var over akuttgrensene, men ikke over den fastsatte sikkerhetskritiske grensen for sporfeil. Det ble påvist

skinnelitasje med lokal utmatting/materialflyt som forsterket avsporingmuligheten. Avslutningen til ledeskinnene over Fetsund bro var mangelfull da disse manglet sammenføyning på landsiden. Avsporingområdet er kjent som et vanskelig geoteknisk område. Avsporingen førte til skader på sviller og festeanordninger langs hele strekningen mellom Fetsund stasjon og Guttersrud holdeplass.

Vognmateriell:

Vognen som sporet av var lastet med en container. I vognens bakre venstre hjørne (A-ende) var det benyttet feil containerpigg og containeren ble dermed galt pålastet. Containeren lot seg ikke træs på, men hvilte isteden oppå piggen. Vognen fikk dermed en skjev vektfordeling og mindre hjultrykk på fremre venstre hjul. Det ble foretatt en undersøkelse av den avsporede vognen og gjort en sammenligning av togsammensetningen mot togets vognopptak. Denne viste at vognopptak og togsammensetning stemte. Det oppstod kun mindre skader på vognens fremre hjulgang som følge av avsporingen.

Konklusjon:

Samspeilet mellom vognstamme og skinne fungerte ikke som det skulle og derfor sporet en vogn av. Hver for seg har operatør og driver av infrastruktur prosedyrer som skal følges, men harmoniseringen og dermed forståelsen i samspeilet mellom de enkelte bidrag for sikker togframføring forbi Fetsund stasjon synes å ha vært for dårlig. Det ble målt skjevheter ved sporet, og området er kjent som et vanskelig geoteknisk område (ustabilt), men det ble på tross av dette ikke underlagt spesiell oppfølging. Spørsmålingene ga resultat over akuttgrensen, men ikke noe som tilsa at utbedringer skulle iverksettes umiddelbart. HSLB har som følge av undersøkelsen gitt 6 sikkerhetstilrådninger.

SUMMARY

The accident:

On 18. July 2002 and 13. August 2002 one carriage in train 4661 derailed in a right turn between points no. 2 at Fetsund station and Fetsund bridge on Kongsvingerbanen. Both trains continued across Fetsund bridge and another 3 to 5 km before the locomotive driver discovered the derailment and stopped the train. The derailed carriages were of type Lgjns-w, two-axel container carriages with laminated springs. Both carriages derailed with its first axel.

The carriages were lightly loaded. The day before the derailment on 13. August 2002 maintenance had been performed in the derailment area. The present report deals with the derailment that occurred on 2002.07.18 but will also use information and data from the occurrence at 2002.08.13 where this is relevant.

Notification to the investigation board:

The Accident Investigation Board Norway (AIBN) was notified about the accident from the person on duty in CargoNet AS and the Norwegian National Rail Administrations investigating board at 0945 AM on 18. July 2002.

The infrastructure:

There was executed a survey on the track in the area where the train had stopped and in the area around the Fetsund bridge. The point of the derailment was located between points no 2 and the start of Fetsund bridge.

In the derailment area there were warping in the curve and super elevation in the crossover ramp that exceeded the acute level, but did not exceed the stipulated maximum value. There were located damages on the sleepers in a distance of 3 to 5 kilometres.

The leading rails over Fetsund bridge were missing the joining on both sides of the bridge.

The carriages:

The container on the carriage that derailed on 18. July 2002 was not loaded according to rules in the carriage's A-end, which went second in the driving direction. Wrong container pig was used in the left side corner of the carriage. It made the container rest on the container pig instead of on the carriage floor. This gave the carriage a slanted weight distribution. The derailed carriage was examined, and the "train consist" was examined against the vehicle composition of the derailed train. There were damages on the derailed carriage's first axel.

The investigation:

HSLB started a pilot study to evaluate if a full investigation would give a safety profit. When it was decided to start a full investigation, AIBN continued to collect fact information in order to uncover possible failure mechanisms in the cooperation between the train and the infrastructure, and between the railway companies safety regimes' ability to satisfy traffic safety requirement.

Analysis of the cooperation between the train and the existing conditions of the infrastructure the day of the derailment was carried out. The aim of this investigation was to uncover factors that led to the derailment.

Actual information**The carriage:**

The carriage that derailed on 18. July 2002 was built in 1984 of AGEVE SWEDEN and registered at Green Cargo/SJ as nr. 4274 443 0881-6.

The carriage was built as a container carriage with movable end beams and is approximately equal to CargoNet A/S' carriage Lgs 442 9 before this was rebuilt from type Lgjs to Lgs.

This carriage type is not equivalent to Swedish wagons that earlier were involved in several derailments. Lgjs-w wagon has a stiff construction. Because of the wrongly loaded container the wagon became even stiffer and got a vertical bias of the weight. This made good climbing conditions for the left wheel in the wagon's B-end.

Infrastructure:

The track was not appropriately recalibrated, but the norms did not exceed the maximum values. There were uncovered large wears on the rails in the curve where the derailment took place. The stated limit for the value of warping and super elevation in the crossover ramp permits use of the track with no restriction concerning speed limit, type of carriage or composition of the train.

The existing rules for accepted norms of the track can easily give derailment with trains that require other track conditions than were present at Fetsund station at the time of the derailment.

The rails had a wear that gave friction and made good climbing conditions for the wheels.

The day before the derailment on 13. July 2002 maintenance had been executed at the derailment area at Fetsund station. This maintenance was performed because of a track measurement performed on 26. July 2002. This maintenance had been delayed due to heavy rain.

Recommendations:

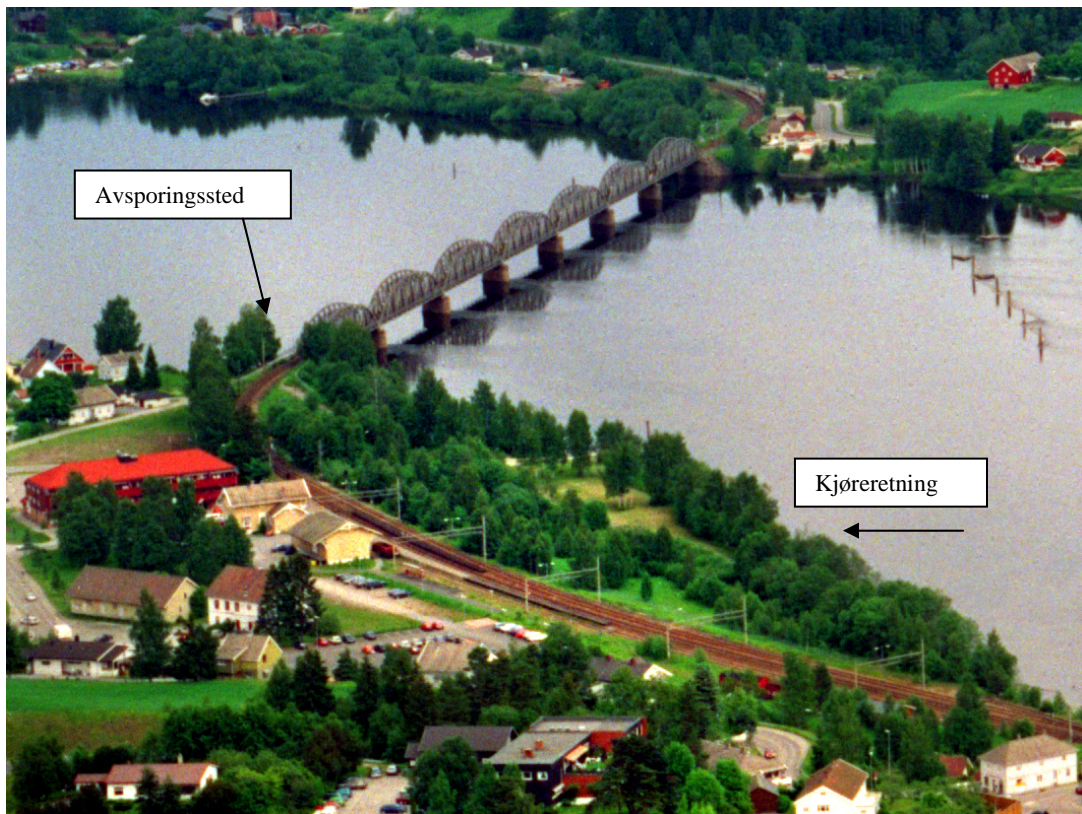
The investigation board has as a result of the investigation suggested 6 recommendations that touch on imply:

1. The quality of the track, including wear and maximum values for warping and super elevation.
2. Routines for approval and reopening of the track after maintenance.
3. Routines for and control of loading procedures.
4. Possibilities for improvement of the carriages running qualities.
5. Possibilities for improvement of the flange lubricating.
6. Risk analysis of infrastructure.

1. FAKTISKE OPPLYSNINGER

1.1 Hendelsesforløpet

Både den 18. juli og 13. august 2002 sporet en containervogn av i tog 4661 ved Fetsund stasjon på Kongsvingerbanen. Denne rapporten beskriver avsporingen den 18. juli. Avsporingen den 13. august var nesten identisk med første avsporing og vil i denne sammenheng kun bli referert til der dette vil forsterke og belyse årsaken til avsporingen den 18. juli. Begge avsporingene inntraff i en høyrekurve som ligger mellom sporveksel to på Fetsund stasjon og Fetsund bro. Togene fortsatte over Fetsund bro og 3-5 km videre før de stoppet.



Bilde av Fetsund stasjon og Fetsund bro.



(a)



(b)



(c)

(a) Bilde mot sporveksel to. I bakgrunnen skimtes Fetsund stasjon (b) Bilde fra den korte veibroen mot Fetsund bro. Den korte veibroen ligger mellom Fetsund stasjon og Fetsund bro. (c) Bilde mot Fetsund bro og avspningsstedet.

Den 18. juli 2002 krysset tog 4661 og lokaltog 1008 kl. 0901 ved Fetsund stasjon. Tog 4661 kjørte spor 2, over avvikende sporveksler. Toget holdt i følge registrerende hastighetsmåler en hastighet i underkant av 40 km/t. Etter å ha passert sporveksel 2 på vei ut fra stasjonen sporet vogn nr. 11 i toget av med vognens første hulgang. Hjulet på ytre skinnestreng i kurven klatret over skinnetoppen og sporet av.

For rutetermin 151.1 (gjeldende i tidsrommet 16. juni til 14. desember 2002) hadde godstog 4661 og persontog 1008 ordinær kryssing på Fetsund stasjon. Tog 1008 hadde ankomst kl. 0858 og avgang kl. 0901. Tog 4661 passerte Fetsund stasjon kl. 0901. Persontog 1008 skulle kjøre spor 1 og godstog 4661 kjørte spor 2. Slik var det også den 18. juli 2002. Tog 1008 ankom Fetsund stasjon i rute og stoppet for av- og påstigning i spor 1. Tog 4661 passerte Fetsund stasjon i spor 2. Etter passering av stasjonen økte toget hastigheten til ca 80 km/h. Etter litt tid oppdaget lokfører en røyk-/støvsyke bak i toget og foretok en kontrollert stoppbremning av toget. Det ble da klart at en av vognene i toget hadde sporet av.

Den 13. august 2002 fikk tog 4661 en kortvarig stopp utenfor Fetsund stasjon før det fikk "kjøretillatelse" til spor 2 der det ventet til tog 1008 ankom spor 1. Deretter fikk tog 4661 "kjøretillatelse" fra spor 2 og økte hastigheten til nærmere 40 km/t. Denne hastigheten holdt toget i om lag 2 km før lokfører ble varslet av togleder om at toget hadde sporet av. Lokfører foretok da en kontrollert stoppbremning av toget. En person hadde sett at toget hadde sporet av og varslet politiet om avsporingen. De varslet togleder i Oslo som igjen varslet lokfører.

1.2 Personskade

SKADER	BESETNING	PASSASJERER	ANDRE
OMKOMMET			
SKADET			
INGEN	1		

1.3 Skader

Det oppstod kun mindre skader på det rullende materiellet. Det var hulgangen i vognens B-ende som gikk først i kjøretretningen som sporet av. Hulgangen "stod på bakken" da toget stoppet. I vognens A-ende kunne det observeres merker som skyldtes steinsprut uten at hjulsatsen nødvendigvis hadde sporet av. Det var småskader på grunn av steinsprut på bremsekomponentene. Det manglet to bremseklosser, men dette ble ansett for å være en følgeskade. Det venstre hjørnet i vognens A-ende var sterkt nedpresset pga en feillastet container. Det ble i tillegg observert malingsskader, sannsynligvis grunnet steinsprut. Vognen ble reparert etter avsporingen og satt tilbake i trafikk.

Infrastrukturen fikk skader på sviller og festebolter fra avsporingen og fram til Gutterrud holdeplass mellom Fetsund og Sørumsand stasjoner. Dette er en distanse på om lag 5 km. Det måtte her skiftes sviller og festeanordninger og justeres spor langs hele strekningen.

1.4 Andre skader

Det ble ikke registrert skader på last, gods, reisegods eller annen eiendom.

1.5 Personellinformasjon

Lokomotivfører: 44 år, ansatt i NSB AS, men utleid til CargoNet AS

Ansatt som lokomotivfører: 13. februar 1981

Siste prøve i sikkerhetstjeneste før hendelsen: 24. oktober 2000

Siste legek kontroll: November 2000

Typekurs på El.16: Utsjekket 5. mai 1981

Lokførers tjeneste i perioden 16 – 18/7 2002

Tjeneste 16.7.2002	Tjeneste 17.7.2002	Tjeneste 18.7.2002	Oppsatt tjeneste for 19.7.2002
Fri	Fri	Tjenestestart kl. 06:30 Uttak kjøre 4161/4162 Alnabru - Halsberg. Tjenesteslutt kl 14:45	Tjenestestart kl 02:05 Uttak kjøre 14007/14008 Halsberg - Alnabru. Tjenesteslutt Kl. 08:25

Involvert terminalpersonale var ansatt i CargoNet AS. Disse hadde påkrevet kompetanse.

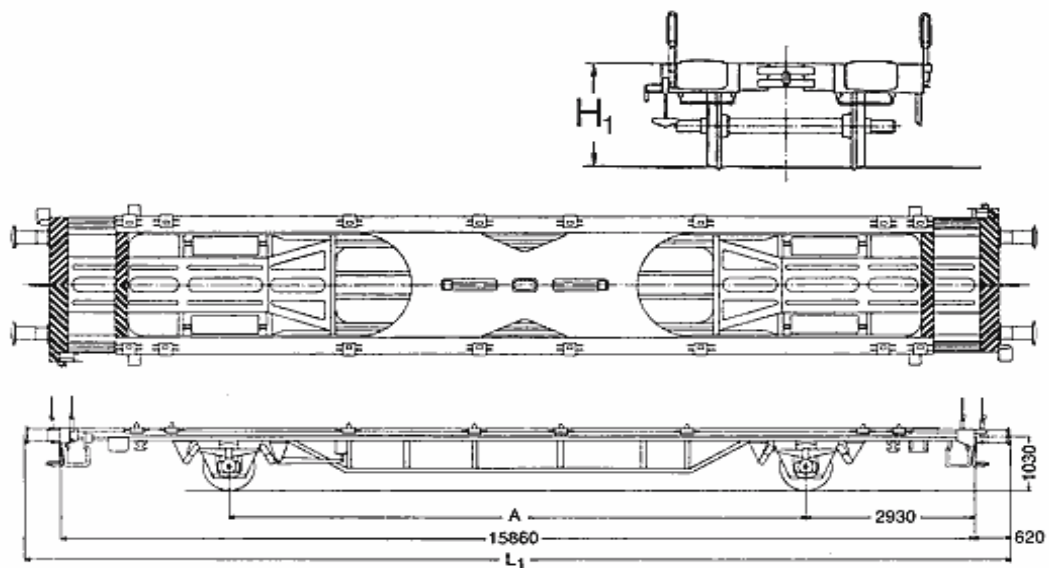
Involvert banepersonale var ansatt i Jernbaneverket. Disse hadde påkrevet kompetanse.

1.6 Rullende materiell

1.6.1 Involvert materiell

Ved begge avsporingene ble toget fremført med CargoNet AS lokomotiv type El 16. Dette er utstyrt med ATC og togradio, og har i tillegg mobiltelefon samt en GPS - enhet som gir CargoNet AS posisjonskontroll av togene.

Ved begge avsporinger var det en containervogn av type Lgjns-w som sporet av. Den 18. juli 2002 var det vogn nr. 4274 443 0881-6 som sporet av. Vognen er bygget 1984 av AGEVE SWEDEN og registrert hos Green Cargo/SJ. Vognens tommasse var 12 500 kg. Containeren, en "Eurocontainer", veide 4 950 kg mens lasten veide 6 550 kg. Dette gir en totalmasse for vognen på 24 tonn, noe som er godt innenfor maksimalbegrensingene og også over minimumsbegrensingen på 11,5 tonn for toakslede vogner.



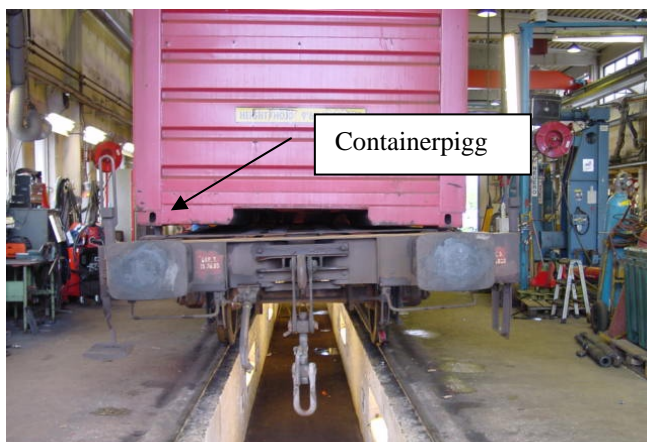
En skisse av vogntypen Lgjn-w som sporet av.

Ved første avsporing var akselavstanden på avsporet vogn ti meter og ved den andre avsporing ni meter. Også ved andre avsporing var vognen lett lastet.

Ved begge avsporingene var det vognens første aksel som sporet av. Ved første avsporing var i tillegg vognens container feil pålastet.

Ved undersøkelse av avsporet vogn etter hendelsen den 18. juli ble følgende forhold avdekket:

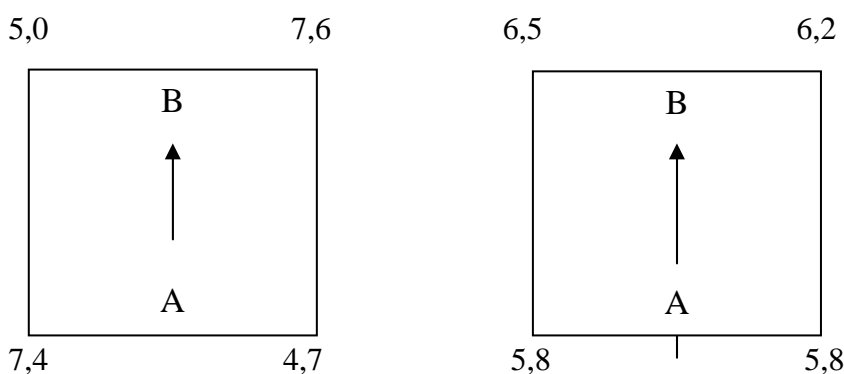
I vognens A-ende, på venstre side, var feil containerpigg benyttet slik at containerens underside sto oppe på containerpiggen (se bilde under). I de tre andre endene var riktige pigger benyttet. A-enden gikk bak i kjøreretningen. Containeren er vesentlig stivere enn vognen og dette hjørnet av vognen var nedpresset slik at vognen var svært skjev i denne enden. Det ble etter avsporingen målt en forskjell i bufferhøyden på høyre og venstre buffer på 35mm.



Vogna som sporet av den 18. juli 2002. Containeren ligger oppe på piggen i venstre hjørne og presser vognrammen skjev.

Under avsporing (feil lastet)

Korrekt lastet



Over er anført hjulmasse (* 1 000kg) når containeren var korrekt påsatt og når containeren var feil påsatt. Vognens lastfordeling ble, som det framgår, betydelig forskjøvet på grunn av den feillastede containeren.

Ved summering av vektene ved feil og korrekt opplastet vogn viste vektene at feillastet vogn var 400 kg tyngre. Dette antas å skyldes veietekniske forhold.

Gangdynamiske simuleringer gjennomført av TrainTech Engineering Sweden AB viser at skjevhet i vektfordelingen på vogner påvirker avsporingfølsomheten. (Se vedlegg TrainTech Engineerings rapport)

I henhold til G-60-2, kapitel 2, punkt 8 tillates vognmateriell å ha en viss skjev vektfordeling, for toakslede vogner inntil 5 tonn pr. aksel. Sideveis skjevlasting tillates ikke grunnet avsporingfare. I henhold til ENP 14033 er det tillatt med 8 % hjultrykksforskjell. Andre kilder opererer med tillatt hjultrykksforskjell på opp til 12,5 %. En middelvei på 10 % tillater en hjultrykksforskjell på 600 kg. I dette tilfellet var hjultrykksforskjellen 2 600 kg på fremste hjulgang og 2 700 kg på bakre hjulgang.

Avsporet vogn gikk som vogn nr 11 i bremsegruppe G. Også vogn nr 10 hadde omstillingshåndtak for bremsegruppestiller i bremsegruppe G, men det var ikke mekanisk forbindelse til vognens styreventil. Denne stod i bremsegruppe P.

1.6.2

Togsammensetning

Den 18. juli bestod tog 4661 av 33 vogner som ble fremført med lokomotiv El 16.2213 tilhørende CargoNet A/S. Toget hadde en samlet masse på 716 tonn og en lengde på 613 meter, fordelt på 84 aksler.

Bremseprosenten var 63 % i bremsegruppe P, og togets største tillatte kjørehastighet i følge togsammensetningen var 80 km/t.

Nedenfor følger en oversikt over togenes sammensetning overlevert lokomotivfører i vognopptaket. I etterfølgende tabells bremsegruppekolonne er det anført A, P og G. A står for avstengt bremse, P og G angir valgt bremsegruppe for den enkelte vogn. Det er tre bremsegrupper, G, P og R. Bremsegruppe R og P er hurtigvirkende bremser. Bremsegruppe R benyttes kun av persontog, mens bremsegruppe P benyttes av både persontog og godstog.

Bremsegruppe G er langsomtvirkende bremses og benyttes i lange godstog da denne gir en jevnere tilsetning og løsing av bremsene i toget. Bremsegruppene kan til en viss grad benyttes sammen, men en blanding av bremsegruppe R, P og G i samme tog tillates ikke. Tog 4661's bremses var innenfor gjeldende regler.

Oversikten viser vognenes fortløpende plassering i toget, bruttovekt og bremsegruppe. De avsporede vognene er merket med fet skrifttype.

Avsporing 18.7.2002		
Vogn nr.	Vekt i tonn ifølge godsvogn opptak til lokfører	Bremse gruppe
1	16	P
2	16	P
3	16	P
4	36	P
5	16	P
6	16	P
7	16	P
8	31	P
9	24	P
10	17	P (G)
11	24	G
12	15	P
13	31	A
14	15	A
15	16	A
16	15	P
17	16	P
18	16	P
19	15	P
20	27	P
21	27	P
22	16	P
23	80	P
24	27	P
25	27	P
26	27	P
27	15	P
28	16	P
29	16	P
30	16	P
31	15	P
32	26	P
33	14	P

Avsporing 13.8.2002		
Vogn nr.	Vekt i tonn ifølge veiing	Bremse gruppe
1	29,1	P
2	88,9	P
3	16,6	P
4	22,7	P
5	22,5	P
6	12,5	P
7	25,0	P
8	20,2	P
9	16,9	P
10	17,5	P
11	40,8	P
12	68,6	P
13	27,3	P
14	26,9	P
15	22,3	P
16	15,8	P
17	15,1	P
18	15,4	P
19	37,7	A
20	40,4	P
21	39,9	P
22	23,1	P
23	25,5	P
24	25,7	P
25	22,1	P
26	89,6	P
27	16,0	P

Nedenfor følger en tabell med informasjon om avsporet vogn og de vognene som gikk nærmest den avsporede vognen ved avsporingen den 18. juli. Avsporet vogn er merket med fet skrift. Forkortelsen dl betyr dobbeltlenket.

Vogn nr.	Vogn nr.	Litra	Lengde over buffere [m]	Aksel avstand [m]	Løpeverk
9	42 74 443 0 741 2	Lgjns 746	17,1	10	UIC, dl, trapesfjær
10	42 74 443 0 696 8	Lgjns 746	17,1	10	UIC, dl, trapesfjær
11	42 74 443 0 881 6	Lgjns-w 831	17,1	10	UIC, dl, trapesfjær
12	21 74 225 1 406 7	Hbis 763	14,34	9	UIC, dl, parabelfjær
13	23 80 292 2 063 5	Hirrs	-	9+9	UIC, dl, parabelfjær

Lokomotivet ble klargjort ved Grorud vedlikeholdsbase. Dette er hovedbasen for CargoNet AS elektriske lokomotiver.

Togstammen ble sammenslått, kontrollert og bremseprøvd ved Alnabru skiftestasjon. Alnabru er den vanlige utgangsstasjonen for godstog fra Oslo.

I toget den 18. juli var det 2 vogner med farlig last i fareklasse 2. Det var også 2 vogner som gikk som spesialtransport. Disse var korrekt merket og angitt i vognopptak for lokfører og hadde ingen innvirkning på hendelsen.

Den 13. august ble 2 vogner fremført som spesialtransport i tog 4661. Det ble også fremført 2 vogner med farlig last i fareklasse 2. Disse var korrekt merket og angitt i vognopptak for lokomotivfører og hadde ingen innvirkning på hendelsen.

1.6.3 Infrastruktur/Kjørevei (Sporet og underbygning)

Ved avsporingen 18. juli fikk skinnegangen skader på sviller og festebolter fra avsporingstedet og frem til Guttersrud holdeplass mellom Fetsund og Sørumsand stasjoner hvor toget stoppet. Dette er en strekning på ca 5 kilometer.

Kongsvingerbanen går fra Lillestrøm stasjon (km 20.95) til Riksgrensen, Charlottenberg stasjon (km 136.27). Fetsund stasjon har to spor hvor spor 1 er hovedtogspor og spor 2 er kryssingspor. Sporveksel nr to mot Fetsund bro ligger i en horisontal (vannrett) kurve med en teoretisk radius på 862 meter og en teoretisk overhøyde (dosering) er på 55 millimeter. Rett etter sporvekselen begynner en overgangskurve med teoretisk lengde på 37 meter. Denne fører inn i en sirkelkurve med teoretisk radius på 289 meter og en teoretisk overhøyde (dosering) på 120 millimeter. Sirkelkurven har en teoretisk lengde på 82 meter og går over i en overgangskurve med teoretisk lengde på 42 meter. Overgangskurven og overgangsrampen går et stykke inn på broen og har felles avslutning i overgangskurvens begynnelse. Fetsund bro over Glomma er en 420 m lang fagverksbro av stål bygget i 1919.

I Norge er minste tillatte kurveradius på normalspor 130 meter. Kurven ved Fetsund har i følge løfteskjemaet en kurveradius på 289 meter.

Anlegging av spor med overhøyde på stålbroer er beskrevet i Jernbaneverkets Tekniske Regelverk JD 530 (JD 530), kapittel 3.7. Kapittel 3.7.1 beskriver oppbygging av overhøyden i en overgangskurve. Kurveradius og skinnforhøyning endres lineært inn mot rett spor. Dette er relevant for sportraseen ved Fetsund da kurven hvor avsporingen fant sted har sin overgangsrampe inne på Fetsund bro. Det ble ikke funnet avvik i forhold til regelverk.

Den største tillatte vindskjevheten i Norge ved prosjekteringskrav (ikke i tunnel) er 2,5 % (1:400). Dette tilsvarer 22,5 millimeter endring av den anlagte overhøyden på 9 meters basis. Ved Fetsund var denne verdien større, 120 millimeter på 42 meter, noe som gir en vindskjevhet på cirka 2,86 ‰.

Det er angitt to grenseverdier for falsk overhøyde (negativ overhøyde) og vindskjevheter. Disse er benevnt som akuttgrense og sikkerhetskritisk grense. Dersom de målte avvikene er over akuttgrensen skal sporet justeres innen en gitt tidsfrist, normalt innen neste spormåling. Ligger de målte verdier for sporfeil over den sikkerhetskritiske grensen skal sporet utbedres umiddelbart.

Den 27. mai 2002 ble det gjennomført en spormåling på Kongsvingerbanen med Jernbaneverkets målevogn "Roger 1000". Ved denne målingen ble det avdekket en kraftig vindskjevhet ved km 29,35 inne på broen. Den alvorligste vindskjevheten var 36 millimeter på 9 meters basis, noe som er over akuttgrensen for denne typen feil. Det ble dessuten registrert en høydefeil, også denne over akuttgrensen, umiddelbart før Fetsund bro. På grunn av resultatet fra disse målingene ble det utført sporarbeider på stedet i forkant av avsporingen den 18. juli. Det var ingen pågående sporarbeider på avsporingstedet den 18. juli.

Den 26. juli gjennomførte Jernbaneverket en manuell måling på avsporingstedet. Disse målingene danner grunnlaget for utbedringsarbeider som ble iverksatt den 12. august ved Fetsund stasjon. Dette arbeidet ble forsinket, blant annet på grunn av dårlig vær (kraftig regn). Etter avsporingen den 13. august ble det konstatert at dette arbeidet ikke var tilfredsstillende slutført.

Nedenfor er angitt i tabell de forskjellige grenseverdier av vindskjevheter samt målte verdier på Fetsund stasjon. Den angitte 2- og 9- metersbasis angir over hvilke distanse vindskjevheten aksepteres.

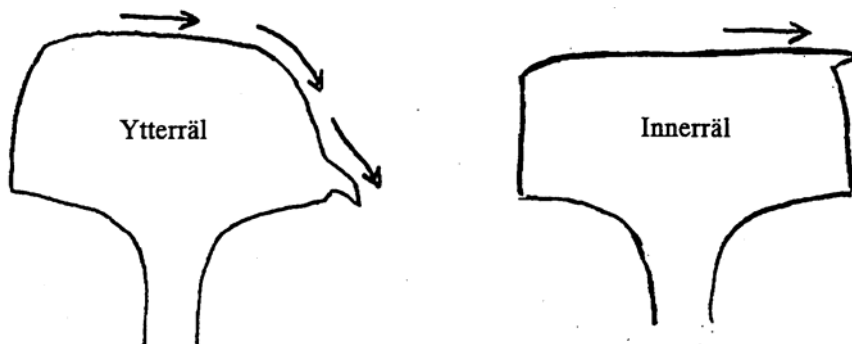
Tillatte verdier for vindskjevheter

<i>Type feil ved infrastruktur</i>	<i>Grenseverdier</i>	<i>2- meters basis</i>	<i>9- meters basis</i>	<i>Verdier ved Fetsund stasjon på 9-meters basis</i>
Vindskjevhet i overgangsrampe	Akuttgrense	10 mm	31 mm	Den 27.5.02, ca 36 mm
	Sikkerhetskritisk grense	14 mm	43 mm	Den 26.7.02, ca 45 mm

HSLB registrerte etter avsporingen at det hadde vært masseutglidning i innerkurven i fyllingen mellom sporveksel 2 på Fetsund stasjon og Fetsund bro (mot elven). JBV har

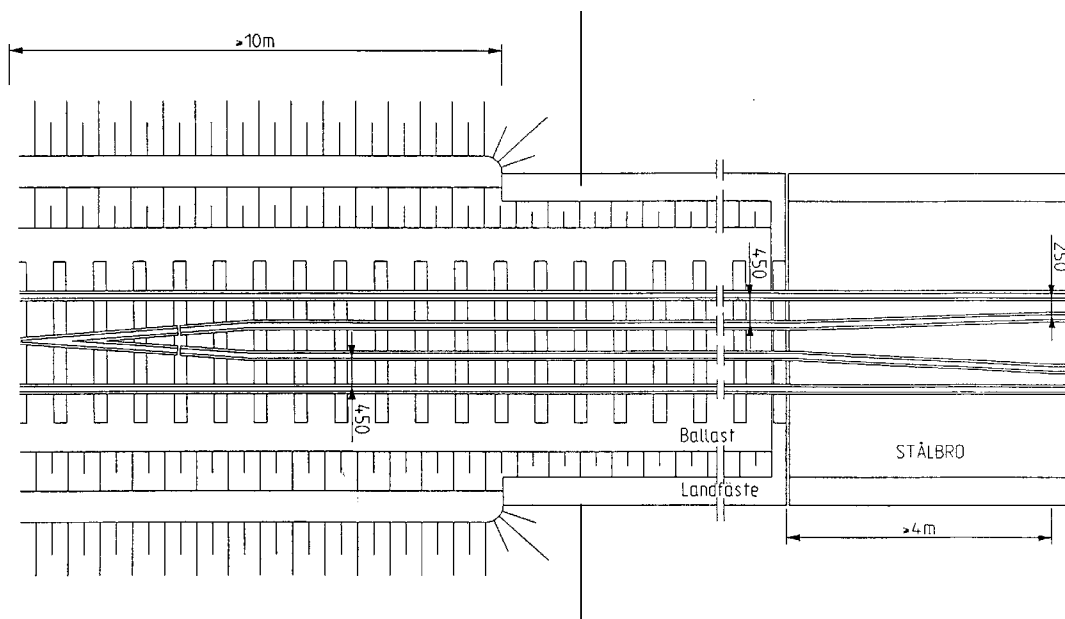
registrert avsporingstedet som et område med krevende grunnforhold. Avsporingstedet ligger på en fylling som grenser mot Glomma. Endeslutningen på fyllingen er steinsatt.

Under vises to typer skinneslitasje. Dette typiske utseendet hadde skinnene ved befaring på Fetsund den 10. september 2002. Slitasjen var markant på skinnene i 289-meterskurven. Det ble også observert at skinnene hadde tydelig kortbølget materiellopphopning, spesielt på den innerste skinnestrengen i den krappe sirkelkurven. Skinneslitasje gir et roterende hjul mulighet til å løfte seg ("klatre") ved at hjulflensen i hjulets kontaktpunkt finner tilstrekkelig friksjon mot skinnens kjørekant.



Skjematisk illustrasjon av skinneslitasje på ytre- og indre skinne i kurver. Hovedretning for friksjonskrefter er markert med piler i figuren.

Over Fetsund bro ligger det ledeskinner. Disse var ikke korrekt avsluttet på "land" mot Fetsund stasjon. Her var ledeskinnene ført inn på fyllingen (landfeste) for broen, men manglet den foreskrevne sammenføyningen videre på land. Denne sammenføyningen skal styre hjulene inn mellom ledeskinnene og hovedskinnene og skal være montert når konsekvensen av en avsporing kan bli spesielt store. Ledeskinnenes hovedoppgave er å hjelpe materialet til å følge sporråsen ved en eventuell avsporing. Ifølge gjeldende forskrifter skal ledeskinner innmonteres når en enkelt bro, eller flere nærliggende broer til sammen overstiger en lengde på 30 meter. Det finnes visse unntak, men ledeskinner skal uansett monteres hvis det er fare for at en avsporing kan skade en broes bæreevne. Når det gjelder ledeskinnenes utforming, er det spesifikke krav til skinneprofil, utforming, sammenføyning, montering, avstand till hovedskinne, baliser og jording.



Figur viser korrekt utforming av ledeskinner. Ved Fetsund bro manglet den del av ledeskinnene som går fra broens landfeste og frem til sammenføyningen.

1.7 Været

Det var overskyet, oppholdsvær og ca + 15° C på avsporingstidspunktet.

1.8 Trafikkledelse og ordregiving

Kongsvingerbanen ledes fra Oslo togledersentral.

Ordregiving til det enkelte tog skjer ved hjelp av sirkulærer eller ”ordre til tog”. Dette er Jernbaneverkets og den enkelte trafikkutøvers ”informasjonskanal” til det enkelte tog. I de utgitte sirkulærer var det ingen begrensinger for Kongsvingerbanen den 18. juli 2002.

Spesialtransport- vognene og vognene med farlig gods i togene både den 18. juli og den 13. august var korrekt merket og angitt for lokfører med egen ordre om fremføring av spesialtransport i toget. Transportene hadde ingen betydning for hendelsesforløpene.

Det forelå ikke noen særskilt sikkerhetsinformasjon relatert til avsporingen for denne togfremføringen, verken til togets sammensetning, fremføring eller banestrekningen toget skulle fremføres på.

1.9 Samband

Banestrekningen er utstyrt med togradio. CargoNet AS sine lokomotiver har togradio, og er i tillegg utstyrt med mobiltelefon, samt en GPS - enhet som gir CargoNet AS posisjonskontroll av togene.

1.10 Driftsform og signalsystem

Kongsvingerbanen er en fjernstyrt strekning og er utstyrt med sikringsanlegg type NSI 63. Banestrekningen er utstyrt med ATC (Automatisk togkontroll).

1.11 Registrerende hastighetsmålerutstyr og datalogger

Havarikommisjonen har gjennomgått registrerende hastighetsrull og restveisskive type Hasler RT12 + R12 fra lokomotivene. Disse viser at lokførernes kjøremønster ikke har hatt betydning for hendelsene. ATC var innkoblet på lokomotivet ved begge avsporingene. Hastigheten var i begge tilfeller lav, hhv. omkring 40 km/t og 30 km/t.

1.12 Skadebeskrivelse (Involvert materiell og infrastruktur)

Avsporet vogn fikk skader på fremre hjulgang samt malingskader grunnet steinsprut. Det manglet to bremsekklosser som antas å ha falt av under fremføring etter avsporing.

Kjøreveien fikk skader på sviller og svillefester over en strekning på 3 – 5 km. Det hadde pågått arbeid i eller i nærheten av sporet før og umiddelbart etter avsporingen den 18. juli.

Tabellen viser en oversikt over utført arbeid ved Fetsund stasjon sommeren 2002

Dato	Handling
27.05.	Periodisk målevognkjøring med Roger 1000
11.06.	Håndpakking av parti inn mot Fetsund bro - medførte ikke saktekjøring
	Forberedelser til svillebytte, masseutskifting i partiet inn mot broa, samt forlengelse av guardskinnen ut til broenden - selve arbeidet ikke startet
18.07.	1. avsporing
26.07.	Nivellement og beregning av sporjustering utført av JBV Hovedkontoret
12.08.	Hastighet nedsatt til $V = 40$ km/t for km 29,22 - 34,18
12.08.	SPOT (sporombyggingstog) kjørt f.o.m. spv. 2 på Fetsund stasjon mot Fetsund bro, med graver for masseutskifting. Gikk så dypt som mulig (30 cm under svilleunderkant).
13.08.	Svillebytte og justering med pakkmaskin avsluttet mellom spv. 2 og broa: km 29,22 til km 29,35
13.08.	2. avsporing
24.08.	Svillebytte og justering med pakkmaskin avsluttet for hele strekningen mot Guttersrud, km 34,180
30.08.	Hastighet satt opp til $V = 60$ km/t for hele strekningen
31.08.	Hastighet satt opp til full hastighet for strekningen Fetsund bro - Guttersrud, km 29,35 - 34,180
08.09.	Hastighet satt opp til full hastighet for strekningen Fetsund spv. 2 - Fetsund bro, km 29,22 - 29,35
20.09.	Nivellement og beregning av gjenværende sporjustering utført av JBV Hovedkontoret

1.13 Medisinske forhold

Det er ikke fremkommet forhold som har medvirket til ulykken.

1.14 Brann

Det oppstod ikke brann.

1.15 Overlevelsesaspekter

Avsporingen fikk ingen konsekvenser for personers sikkerhet. Det er imidlertid viktig å være klar over at avsporinger i forkant av for broer kan medføre alvorlige konsekvenser hvis passasjerer eller farlig last er involvert. Det tenkes da spesielt på faren for skader på bærende elementer på broen og muligheter for at vogner med personer eller farlig last skal falle i elven.

1.16 Spesielle undersøkelser

Firma TrainTech Engineering Sweden AB har vært engasjert av HSLB for å se på samspillet mellom rullende materiell og infrastruktur ved å gjennomføre gangdynamiske simuleringer. De har utarbeidet rapporten ”Urspårning av Lgjns-vagnar i Norge”. Rapporten konkluderer med at avsporingen med stor sannsynlighet skyldes dårlig kvalitet på sporet. Med utgangspunkt i de gjennomførte gangdynamiske simuleringene anbefaler de også endringer rettet mot det rullende materialet. Rapporten anbefaler å gå over fra trapes- til parabelfjærer på Lgjns-vogner. Dette vil øke vogntypens løpeegenskaper betraktelig når vognen er tom eller lett lastet. Rapporten anbefaler også å gjøre tiltak som kan minske de gjennomgående kreftene i tog. Det tenkes på da på forhold rundt togsammensetning, valg av bremsegruppe på fremre del av eller hele toget, samt å benytte gasshydrauliske buffere.

Rapporten fra TrainTech Engineering AB ligger i sin helhet som vedlegg til denne rapporten.

1.17 Organisasjoner og ledelse

1.17.1 Lover og forskrifter

Lover og forskrifter i denne sammenheng er samlet i ”Kravforskriften”, ”Fordelingsforskriften” og ”Tillatelsesforskriften”. Disse forskriftene sammen med Jernbanetilsynets Signal- og Togfremføringsforskrift og CargoNet AS interne prosedyreverk regulerer de gjeldende krav til Jernbaneverket som infrastrukturforvalter og CargoNet AS som trafikkutøver.

”Kravforskriftens” kapittel 2 beskriver de overordnede prinsipper for arbeid med trafiksikkerhet. Det skal arbeides for kontinuerlig forbedring av trafiksikkerheten og for reduksjon av risiko så langt det med rimelighet er gjennomførbart. Det skal også etableres barrierer mot alvorlige konsekvenser av enkeltfeil.

Den daglige togfremføringen foregår etter Statens jernbanetilsyns signal- og togfremføringsforskrift.

Forvalter av kjøreveien, Jernbaneverket, er pålagt gjennom ”Kravforskriften” § 14-4 å forsikre at de maksimum tillatte grenseverdier for sporets geometri sikkerhetsmessig samstemmer med det rullende materiells gangegenskaper og tillatte hastigheter. Med andre ord: sørge for at det sikkerhetsmessige samspillet mellom kjørevei og gangegenskaper i den framførte togstammen er ivaretatt.

Jernbaneverket er ansvarlig for infrastrukturen og er ansvarlig sikkerhetsorganisasjon i denne sammenheng. Jernbaneverkets styringssystem er inndelt i tre nivåer:

Nivå 1, overordnet nivå, (1A).

1A er øverste nivå og angir de overordnede krav til den totale styring av Jernbaneverkets virksomhet. Den gir en beskrivelse av virksomheten, Jernbaneverkets kvalitetspolitikk og sikkerhetsfilosofi, hovedmål og strategier, beskrivelse av styringssystemets oppbygning, prinsippene for ledelse i Jernbaneverket, organisasjon, ansvars- og funksjonsbeskrivelser samt generelle krav til styring av virksomheten basert på ISO 9001 og spesifikke krav til styringssystemet i HMS-lovgivningen og jernbaneloven.

Nivå 2, regionnivåer.

Nivå 2 er styringssystemet for de enkelte hovedenhetene i Jernbaneverket. Nivå 2 skal videreformidle eller respondere på krav gitt i overordnet styringssystem og omfatter dokumenter som gjelder for hele hovedenheten.

Nivå 3, de forskjellige banenivåer.

Nivå 3 er styringssystem for det enkelte ansvarssted (avdeling, bane, kontor, seksjon), prosjekt etc. Alle ansvarssteder og prosjekter skal i nødvendig grad utarbeide styringssystem på nivå 3. Styringssystemet på nivå 3 kan bestå av ulike dokumenttyper så som overordnede krav (fra nivå 2), prosedyrer, instruksjoner, sjekklister og stillingsbeskrivelser.

CargoNet A/S er som trafikkutøver underlagt ”Kravforskriften” § 13 som spesifiserer de krav som spesielt rettes mot dem som skal drive trafikkvirksomhet. Dette omhandler blant annet at trafikkutøver skal ha et sikkerhetsregime som ivaretar og styrer slik at bedriftens egne interne prosedyrer ivaretar de enkelte arbeidsoppgavers utførelse, og sikrer at bedriften har ett sikkert togmateriell og en sikker togfremføring. I dette ligger at virksomhetsutøver til enhver tid, gjennom sikkerhets- og risikoanalyse identifiserer de krav til sikkerhet som virksomheten stiller og at disse blir ivaretatt.

NSB Gods AS ble godkjent som egen trafikkutøver i brev fra Statens jernbanetilsyn datert 21. desember 2001. NSB Gods AS er videreført som CargoNet AS og drives etter de retningslinjer som er gitt i gjeldende forskrifter.

1.17.2 Rutiner for oppfølging av sikkerhetskritiske forhold.

For å ha kontroll med de sikkerhetskritiske forhold skal jernbanevirksomheten ha etablert en sikkerhetsoppfølgingsplan hvis formål er å vise en oversikt over de risikoforhold som virksomheten er forpliktet til å kontrollere ved iverksetting av tekniske og/eller operasjonelle tiltak. Dette skal i henhold til forskriften dokumenteres.

Jernbaneverkets rutiner for kontroll av kjøreveien er beskrevet i det tekniske regelverk, JD 500 – serien.

CargoNet AS' kontroll av rullende materiell, last og vognkontroll er beskrevet i CargoNet's interne prosedyreverk.

1.17.3 Operative bestemmelser og driftsforskrifter

De operative bestemmelser som styrer togfremføringen og trafikkstyringen er ytterligere beskrevet i Statens jernbanetilsyns trafikksikkerhetsbestemmelser, Signal- og Togfremføringsforskrift.

Det forelå ingen henvisninger eller særbestemmelser for Fetsund stasjon og Fetsund bro i Jernbaneverkets Driftshåndbok JD 346 den 18. juli 2002. Det forelå heller ingen aktuelle ordre eller sirkulærer for Fetsund stasjon den 18. juli 2002.

I Jernbaneverkets styringssystem er krav til tilsyn og vedlikehold av kjøreveien beskrevet i nivå 3 i Jernbaneverkets styringssystem.

CargoNet AS' prosedyrer beskriver gjeldende rutiner for klargjøring av tog fra utgangsstasjon. Dette omhandler klargjøring, kontroll og bremseprøve og er beskrevet i dokument G 60, sikkerhetsbestemmelser, produksjon og framføring av godstog. Kapittel 2, punkt 9, beskriver kontroll etter opplasting, kapittel 4 omhandler togsammensetning og kapittel 6 bremseprøving av toget, herunder kontroller som skal gjøres under lading av togets bremsesystem. Prosedyre G-90-P02-CP, beskriver også gjennomføring av bremseprøve og avgangskontroll.

Trekkaggregater klargjøres etter egne prosedyrer, og lokfører kontrollerer egne punkter beskrevet i "UKS", ("uttakskontroll, sikkerhet").

1.17.4 Vedlikeholdsbestemmelser for rullende materiell og kjørevei.

Vognmateriell skal kontrolleres etter CargoNet AS' prosedyrer beskrevet i C-70-P01 K-kontroll av tomvogner, G-90-P06 inngangskontroll og G-90-P09 C-kontroll.

CargoNet AS beskriver sine rutiner for kontroll og oppfølging av fremmede vogner som følger: - For vogner i internasjonal trafikk gjøres kontroll og utveksling i henhold til RIV (internasjonalt vognreglement) og/eller ved bilateral tilleggsavtale som foreligger mellom CargoNet AS og Green Cargo AB. Slike transporter styres i tillegg av COTIF (Overenskomst om internasjonal jernbanetrafikk). Vogner som utveksles internasjonalt skal være RIV-merket av jernbaneselskapet i hjemlandet, eller på annen måte godtgjøre at definerte krav oppfylles. CargoNet AS har ikke satt spesielle sikkerhetskrav til fremmed materiell og har heller ikke foretatt spesielle sikkerhetsanalyser for dette. Det foretas ankomstkontroll på endestasjon/utsettstasjon samt stikkprøvekontroll av ankomsttog fra Sverige. Farlige feil rapporteres og samordnes gjennom CargoNet AS's KYRASS-prosess som er deres system for oppfølging av trafikksikkerhet for godsvogner. Dette rapporteres videre til Green Cargo AB som er overleverende jernbaneselskap. Enkelte ganger rapporteres det også til materielleier. Det holdes regelmessige møter med Green Cargo AB (og Railion) hvor kvaliteten på vogner i internasjonal trafikk gjennomgås. For fremmede vogner i internasjonal trafikk fastsetter og besørger vogneier nødvendig vedlikehold. Vedlikeholdsstatus deklarerer ved påskriften på

vognen og skal følges opp av registrerende jernbaneselskap. Kontroll av vedlikeholdsstatus inngår i ankomstkontrollen, og uregelmessigheter tas opp med overleverende jernbaneselskap. CargoNet AS utfører vanlig ankomst- og avgangskontroll på fremmed materiell i Norge. Ut over dette har ikke CargoNet AS innflytelse på eller kjennskap til slike vogners vedlikeholdsopplegg eller historie -.

Jernbaneverkets rutiner for kontroll og vedlikehold av kjøreveien foregår etter egne prosedyrer og det tekniske regelverk.

- Prosedyre for målevognskjøring, 2B-RØ-Te-108.
- Prosedyre for operative tiltak av tekniske feil og uønskede hendelser, 2B-RØ-Sk-209.
- Fortløpende kontroll av sporet, periodisk målevognskjøring beskrives i JD 532, kapittel 13, avsnitt 1.4.
- Utbedring av innmeldte feil/uregelmessigheter ved kjøreveien, krav til sporjusteringer beskrives i JD 532, kapittel 13.
- Etterkontroll av utførte utbedringer ved kjøreveien, krav til kontroll etter sporjusteringer beskrives i JD 532, kapittel 13, avsnitt 5.3.

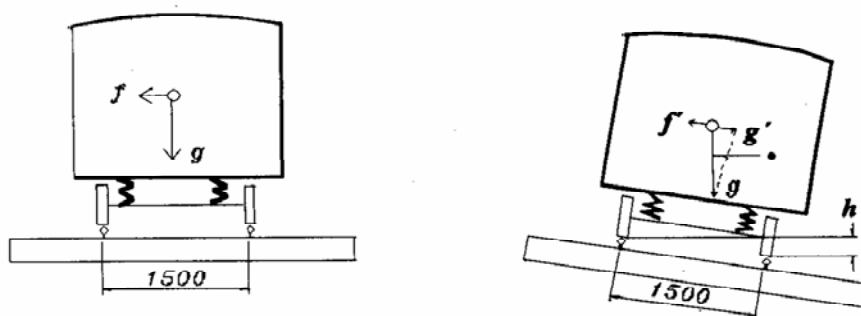
1.18 Andre opplysninger

Undersøkelsen har ikke avdekket at det ble gjort endringer av ordinær ruteplan som kan ha innvirket på planlagt rute.

Overhøyde anordnes i forbindelse med kurver for å kompensere for sideakselerasjon (sentrifetalkraft) som oppstår når toget kjører gjennom en kurve. Kraften i sideakselerasjonen bestemmes blant annet av togets hastighet og kurvens radius. Ved kjøring på en overgangsrampe mot en overgangskurve vil en vogn øke belastningen på det ytre hjulet på den fremste akselen. Dette inntreffer fordi sporet får en skjevhet når det går fra rettspor (ingen Overhøyde) til kurve (konstant Overhøyde). De parametere som styrer hjulavlastningen er sporskjevheten og vognens torsjonsstivhet. Torsjonsstivheten bestemmes av vognkonstruksjonens og bærefjærenes samlede stivhet. Overhøydens (h) størrelse er blant annet anordnet ut i fra normal kjørehastighet i en kurve. h vil være positiv når ytre skinnestreng ligger høyere enn den indre skinnestrengen.

Rullemotstand vil i det vesentlige oppstå i kurvene inn mot og ut fra stasjonen samt i sporveksel en og to. Videre bruk av bremses etter nedbremsingen inn mot stasjonen er ikke nødvendig.

Selv om vognen som sporet av lå i bremsegruppe G (langsomtvirkende bremses), antas det at bremsene hadde "løst ut" etter nedbremsingen inn mot stasjonen. Om bremsene fortsatt var noe tilsatt (lav bremsekraft), ville dette kun ha positiv innvirkning mot en avsporing. Det vil ha bidratt til å gi en "strek" i toget som hadde tvunget avsporet vogn og vognene mellom denne og lokomotivet inn mot senter av kurven og indre skinnestreng og dermed motvirket klatring på ytterste skinnestreng.



En illustrasjon av hvordan sentripetalkraften "oppveies" ved dosering

Forskjellene ved bruk av bladfjærer (trapesfjærer) og parabelfjærer er beskrevet i kapittel 7 i TrainTech Engineering's rapport T01141-0000-2-RES (Bilag 1 til denne rapporten.) Ved lav belastning er parabelfjærer betydelig mykere enn bladfjærer og øker dermed en torsjonsstiv vogn sine muligheter for å oppta sporujevnheter. Hjulavlastningen blir dermed mindre og sikkerhetsmarginene mot avsporing blir større.

2. ANALYSE

CargoNet AS' personale skal i følge selskapets prosedyrer foreta lastkontroll ved klargjøring av togene. Det skal også foretas avgangskontroll og en bremseprøve før avgang fra utgangsstasjon.

Den feillastede containeren ble ikke oppdaget ved kontroll etter opplasting eller ved kontroll før togavgang. Feillastingen gav en forskjell i bufferhøyde på 35mm, noe som reduserte trykket på hjul og ga uheldige bufferkrefter. Denne feilen anses ikke å ha oppstått i forbindelse med avsporingen og skyldes dermed feil under opplastingen av vognen. De gangdynamiske simuleringene utført av TrainTech Engineering AB viste at skjevheter grunnet feil vektfordeling påvirker avsporingfølsomheten betydelig. Ved kjøring på en overgangsrampe og inn i en overgangskurve mot sirkelkurven vil en vogn øke belastningen på det ytre hjulet på den fremste akselen. Dette inntreffer fordi sporet får en skjevhet når det går fra rettspor (ingen overhøyde) til kurve (konstant overhøyde). På samme måte vil belastningen på ytre hjul avta når vognen går fra sirkelkurven og inn i overgangskurven med avtagende overhøyde.

De parametere som sammen styrer hjulavlastningen er sporskjevheten og vognens torsjonsstivhet. En vogns torsjonsstivhet bestemmes av vognkonstruksjonens og bærefjærenes samlede stivhet, samt lastens beskaffenhet. En vogn, som denne, med lang hjulavstand må tåle en større vridning enn en vogn med kortere hjulavstand siden vognen når over en lengre avstand, og derved en større skjevhet. Vognen vil også oppleve en skjevhet mellom fremre og bakre hjulgang. Den avsporede vognen var lastet med en nesten tom, lang, feillastet container og hadde derved sterkt redusert fleksibilitet. Vognens evne til å oppta ujevnheter i sporet var derved dominert av løpeverkets fleksibilitet. I praksis er det ytterst sjelden at klatring oppstår bare gjennom store lateralkrefter (sideveis rettede krefter) på et hjul. Årsaken er at det nesten alltid er vertikalkreftene (nedad rettede krefter) som er kraftig redusert, det vil si betydelig mindre enn den statiske verdien. Lave verdier på vertikalkraften i forhold til de nominelle hjulsatsene oppstår vanligvis når sporet er skjevt og vognen torsjonsstiv.

Ved den andre avsporingen hadde man imidlertid ingen slik feillasting og til tross for dette sporet en vogn av. Dette viser at andre bidrag må ha spilt en vesentlig rolle.

Vognene som sporet av var begge lange, toakslede vogner lastet med stive, lange containere og utstyrt med bladfjærer. Denne kombinasjonen er ikke gunstig med tanke på å oppta vindskjevheter (Spesielt når vognen i tillegg er skjevlastet). Utskifting av fjærer fra blad- til parabelfjærer ville bedret avsporingsegenskapene.

Den 18. juli 2002 passerte toget Fetsund stasjon i spor to i ca 40 km/h og den 13. august 2002 akselererte toget ut fra spor to og hadde ca 30 km/h ved avsporingen. Hastighetene, sentripetal og gjennomgående krefter som trekraft og bremses var dermed relativt små.

Vognopptaket som ble levert lokfører stemte med togsammensetningen bortsett fra den 13. august 2002 da vektene etter kontrollveiling av toget viste seg å være noe høyere i virkeligheten enn det som var angitt. At vekten kan avvike noe er ikke unormalt. Togets sammensetning og bremsegruppe var i henhold til regelverket. Regelverket gir vide rammer for togsammensetningen for at togframføring skal være mest mulig fleksibel ved at vogner kan tas inn i og settes ut av toget uten store begrensninger. Dette gjør at det, for regelverket, ikke spiller stor rolle om vektene avviker, men gangdynamisk spiller valg av bremsegruppe, vekt og plassering i togstammen en stor rolle. En tung vogn som påfølger en eller flere lette vogner vil påvirke togstammen negativt og redusere sikkerhet mot avsporing. (ref. TrainTech Engineerings rapport). At vognopptak stemmer med den virkelige togstamme er av største viktighet for å skille gods som ikke skal transporteres sammen og for å fastslå farepotensialet dersom et uhell eller en ulykke skulle oppstå.

Jernbaneverkets styringssystem sier at Kongsvingerbanen skal kontrolleres og vedlikeholdes etter prosedyrer beskrevet på nivå 3, sone KGB. Unormale forhold ved infrastrukturen som oppdages av kjørende personale eller vedlikeholdspersonale skal umiddelbart varsles togleder slik at nødvendige forholdsregler kan iverksettes. De sporfeil som har fremkommet under undersøkelsen var feil som hadde utviklet seg over tid og antas derfor ikke å ha blitt oppfattet som farlige forhold.

Jernbaneverkets siste spormåling før avsporingen var foretatt den 27. mai. Resultatet fra denne målingen var innenfor den sikkerhetskritiske grensen som er satt, men over akuttgrensen. Dette betyr i henhold til Jernbaneverkets regelverk at sporet skal utbedres så snart som mulig og seinest før neste planlagte spormåling. Dette arbeidet var iverksatt, men ikke avsluttet. At ledeskinnene ikke var tilbakemontert før gjenåpning av sporet var uheldig, men bidro ikke til avsporingen. Det er ikke funnet rutiner som skulle sikret en akseptabel ferdigkontroll av sporet før ordinær trafikk ble gjenopptatt. Utfallet av avsporingen ble ikke forverret av at ledeskinnene manglet. Sporslitasjen var betydelig i kurven, men innenfor kravene. Det grove mønsteret som dannes ved materialflyt og lokal utmatting øker friksjon mellom hjul og skinne og dermed også klatreegenskapene og muligheten for avsporing.

Flensesmøring smører hjulenes hjulflens og minsker friksjonen mellom hjul og skinne. Dette gjør at et hjul løper lettere i kurver. Flensesmøring er et forhold som er viktig for å motvirke hjul- og skinnelitasje.

Overgangsrampen før broa var innenfor normen som Jernbaneverket har fastsatt, men de norske kravene avviker fra normen ellers i Europa. De norske rampene er kortere, og dermed

brattere. Dette er noe som generelt øker faren for avsporing dersom ikke kompensierende tiltak er iverksatt.

Fetsund stasjon er kjent som et vanskelig geoteknisk område. Til tross for dette synes ikke infrastrukturen ved Fetsund stasjon å ha ligget inne i noen sikkerhetsoppfølgingsplan og hadde derfor ingen spesiell oppfølging. Undersøkelsene synes også å avdekke en manglende kritikalitetsrangering mellom en kjørevei som er anlagt i omgivelser hvor en avsporing sannsynligvis vil få små konsekvenser i forhold til en avsporing på en kjørevei som går i en kurve på en fylling, videre inn på en bro hvor avsporet togmateriell kan havne i en brosfagverk eller falle/kjøre ut i en elv.

De høye verdiene for vindskjevhet og overhøyde som ble målt i mai var ikke over det sikkerhetskritiske nivået. Det ble derfor ikke iverksatt spesielle forholdsregler til tross for at området var kjent som vanskelig. Det var ikke lagt restriksjoner på verken kjørehastighet eller materiellets løpeegenskaper som skulle trafikere strekningen. Måleresultatene fra spormålingene var ikke bekjentgjort på noen sirkulærer eller ordre og var derfor ukjent for tredjeperson som skulle trafikere strekningen. Etter avsporingen i juli ble det foretatt en manuell oppmåling av området. Ved denne målingen ble det registrert en kraftig (sikkerhetskritisk) vindskjevhet ved km 29,350 inne på broen. Den alvorligste vindskjevheten var på 45 millimeter på 9 meters basis og det er over sikkerhetsgrensen for denne typen feil. Sikkerhetsgrensen for denne type feil er 43 millimeter på 9 meters basis og 14 millimeter på 2 meter basis. Dette måleresultatet førte heller ikke til at det ble lagt spesielle restriksjoner for togfremføringen i området.

De oppgitte krav til verdier for vindskjevheter og vertikale sporfeil tillater togfremføring uten restriksjoner hva angår kjørehastighet, type vognmateriell og togsammensetning. Dagens regler for tillatte sporfeil kan muliggjøre avsporing med vognmateriell som i utgangspunktet krever et spor av en annen kvalitet enn hva som var tilfellet ved Fetsund stasjon. Bakgrunnen for dette er de krav til sporet som ligger i det samspill som alltid vil være tilstede ved en togfremføring. Togene vil alltid variere med hensyn til vogntype, vekt og sammensetning med tilhørende variasjoner i togets gjennomgående krefter og brytninger som følge av horisontale krefter skapt av sideakselerasjon, buffere, trekraft og bremses. Sporets kvalitet skal være den faste verdi som må danne grunnlag for en sikker togfremføring. Man må allikevel, på grunn av skiftende klimatiske forhold, akseptere noe variasjon i sporets standard. De maksimale verdier som aksepteres bør uansett bli gjenstand for en gjennomgang.

Involvert personell ved avsporingene den 18. juli og 13. august anses å ha hatt akseptable arbeidsforhold. El 16 lokomotiver anses å gi lokomotivfører gode arbeidsforhold. Alnabru skiftestasjon er en standard godsterminal og CargoNet AS' hovedbase på Østlandsområdet og skulle gi gode muligheter for kontrollfunksjonene av toget før avgang. De generelle arbeidsforhold til banepersonalet anses ikke å ha innvirket på hendelsen. Verken signalanlegg eller togledelse har vært bidragsyttere til avsporingen.

3. KONKLUSJON

I de to aktuelle tilfellene som er gransket i denne undersøkelsen var det den uheldige kombinasjonen av skjevt spor, stor friksjon mellom skinne og hjul og en torsjonsstiv containervogn som forårsaket avsporingene. De særskilte risikoforholdene relatert til

infrastrukturen og omgivelsene ved Fetsund stasjon synes ikke å ha vært kartlagt/analysert og har derfor heller ikke vært gjenstand for særskilt oppfølging.

Sporets tekniske tilstand anses å ha bidratt til avsporingene. Dette underbygges ved at to helt uavhengige avsporinger har inntruffet på samme sted. De to avsporede Lgjns-vognene anses ikke som problemvogner i Sverige. Grunnen til at vognene sporet av i Fetsund og ikke i Sverige er trolig at sporkvaliteten på avsporingstidspunktene var utilfredsstillende ved Fetsund.

Ved opplasting av vogn Lgjns-w, nr. 4274 443 0881-6, ble det ved klargjøring av containerpiggene på vognen lagt opp en feil containerpigg. Dette gjorde at det ene av containerens hjørner ble hvilende oppe på denne piggen, noe som gjorde at vognens vektfordeling ble skjev. De gangdynamiske simuleringene har vist at skjevhet påvirker avsporingfølsomheten betydelig. Da en galt påsatt container har stor innvirkning på den statiske hjullastfordelingen bør det sikres at rutinene for opplasting og kontroll er formålstjenlige og fungerer. De samme vognene utstyrt med parabelfjærer og ikke bladfjærer ville vært mer motstandsdyktig mot avsporing. Den galt pålastede containeren vurderes å ha vært en medvirkende årsak til den første ulykken selv om det var en korrekt lastet vogn som sporet av i den påfølgende 13. august.

Sporslitasjen i kurven var betydelig. Det grove mønsteret som var dannet ved materialflyt og lokal utmatting økte friksjonen mellom hjul og skinne og dermed også klatreegenskapene og muligheten for avsporing. Friksjonen mellom hjul og skinne reduseres ved smøring av hjulenes flenser. Det bør ses på muligheten for bedret flensesmøring på utsatte steder.

Vognoptak gir stor frihet med hensyn til vektor, brems, type vogn og plassering av disse i toget. Skal denne frihetsgraden opprettholdes må det settes store krav til kjøreveien.

Det synes som om samspill og koordinasjon mellom kjørevei og det rullende materiell/avsporede vogner ikke har vært tilstrekkelig. Det anses derfor nødvendig å foreta en ny gjennomgang av det rullende materiells løpeegenskaper mot infrastrukturens minstekrav for kurvatur og godkjente overhøyder, vindskjevheter og sporgeometri. For at Jernbaneverket skal kunne møte kravet i Kravforskriftens § 14-4 (grenseverdier for sporgeometri, hastighet og materiellets gangeegenskaper) er det behov for kvantifiserbare verdier fra trafikkutøverne.

Når det registreres redusert sporkvalitet, bør det vurderes en endring av de gjeldende normer for når varsling skal gis til trafikkutøverne på jernbanenettet. Dette for at togsammensetningen kan forsøkes bedre tilpasset til de endrede forhold.

I forkant av avsporingen den 13. august hadde det pågått arbeider i sporet ved Fetsund stasjon på bakgrunn av måleresultatene den 26. juli. Dette arbeidet ble forsinket, blant annet på grunn av dårlig vær (kraftig regn). Etter avsporingen ble det konstatert at dette arbeidet ikke var slutført på en tilfredsstillende måte. Rutinene som ligger til grunn for sluttkontroll og godkjenning for å gjenåpne en strekning for ordinær trafikk etter reparasjon eller omlegging bør gjennomgås for å se om de er tilfredsstillende og setter de nødvendige krav til personalet som skal foreta denne kontrollen.

Verken togledelse eller signalanlegg har vært bidragsyttere ved avsporingene den 18. juli og 13. august 2002.

Ved begge avsporingene fulgte lokfører gjeldende prosedyre og foretok en kontrollert stoppbremning av togene da avsporingene ble oppdaget. Verken kjørehastighet eller andre forhold ved togfremføringen ved de to avsporingene anses å ha hatt noen innvirkning på hendelsesforløpet.

Ved definering av sporfeil benyttes begrepene ”akuttgrense” og ”sikkerhetskritisk grense”. Ved feil over ”akuttgrense”-verdier må sporet utbedres innen en gitt tidsramme. Intuitivt virker dette ut fra begrepet ”akutt” å være noe som må utbedres umiddelbart. Dette er et innarbeidet begrep innen fagmiljøet, men kunne med fordel blitt gitt et begrep som mer beskriver kravene til utbedrings- og tidsplaner.

4. SIKKERHETSTILRÅDINGER

Denne undersøkelsen har avdekket flere områder hvor det anbefales å sette inn tiltak som har som formål å øke trafiksikkerheten:

- Havarikommisjonen tilrår at Jernbaneverket i samråd med trafikkutøverne vurderer kravene til sporkvalitet hva angår skinneslitasje og aksepterte verdier for akuttgrense og sikkerhetskritisk grense, samt gjennomgår normene for varsling om redusert sporkvalitet. (JB Tilrådning nr. 10/2003).
- Havarikommisjonen tilrår Jernbaneverket å vurdere forbedring av rutinene for kontroll av et spor før gjenåpning for ordinær trafikk etter slutført vedlikeholds- og utbedringsarbeide. (JB Tilrådning nr. 11/2003).
- Havarikommisjonen tilrår CargoNet AS å gjennomgå rutinene for opplasting og etterkontroll med henblikk på opplæring, kompetanse samt øvrig tilrettelegging for etterlevelse. (JB Tilrådning nr. 12/2003).
- Havarikommisjonen tilrår CargoNet AS å vurdere å benytte godsvogner med løpeegenskaper som vil bedre vognenes evne til å takle avvik og feil i sporet. (JB Tilrådning nr. 13/2003).
- Havarikommisjonen tilrår Jernbaneverket og trafikkutøverne å vurdere muligheten for å få bedret flensesmøringen av rullende materiell. (JB Tilrådning nr. 14/2003).
- Havarikommisjonen tilrår Jernbaneverket å gjennomgå og oppdatere risikoanalysen av Kongsvingerbanen med fokus på lokale/særskilte risikoforhold som eksempelvis denne undersøkelsen har avdekket ved Fetsund stasjon. De avdekkede forhold kritikalitetsrangeres og legges inn i sikkerhetsoppfølgingsplan. (JB Tilrådning nr. 15/2003).

5. BILAG

Rapport fra TrainTech Engineering AB Sweden, ”Urspårning av Lgjns-vagnar i Norge”, rapport T01141-0000-2-RES.

6. DEFINISJONER

Betegnelse	Definisjon
A- og B ende av vognen	Godsvogner er vanligvis like i begge ender. For å kunne definere en vogns komponenter (hjulganger, buffere, kobbel og lignende) er vognene benevnt med ende A og B.
Akseptkriterier	Uttrykk for akseptabelt nivå av risiko
Akuttgrense	Grense for sporfeil som gjør at sporet må utbedres innen et gitt tidsrom.
Barriere	Tiltak, innretning, og/eller egenskap som har til hensikt å arrestere/forhindre en feilmekanisme til å utvikle/forplante seg til en ulykke
Bremsegruppe	Det er bremsegruppe G, P og R. Bremsegruppe R og P er hurtigvirkende bremses. R benyttes kun i persontog. P benyttes av persontog og godstog. G er langsomtvirkende bremses. Benyttes i godstog da denne gir en jevnere tilsetning av bremsene gjennom toget
Bremseventil	Hver av vognene i en togstamme har egen ventil i vognens bremsesystem som kan stilles slik at vognens bremsesystem får den ønskede ytelse (rask eller langsomtvirkende, eller ved feil ved systemet avstengt)
Containerpigg	Forankringspigger installert i hvert hjørne på en åpen godsvogn som benyttes for å styre og forankre en container som settes opp på disse piggene
Fremmede vogner	Vogner som eies av andre enn den trafikkutøver som er ansvarlig for fremføringen av toget.
Infrastruktur	Består av de elementer som inngår i kjørevei
Infrastrukturforvalter	Den som forvalter og drifter kjørevei
Kjørevei	Kjørevei består av sporanlegg med tilhørende under- og overbygging, signal- og sikringsanlegg, strømforsyningsanlegg og tele- og datakommunikasjonsanlegg
Km	Alle banestrekninger er merket med kilometeranvisning. For Sør - Norge angir kilometermerkene avstanden fra Oslo Sentralstasjon. For banestrekninger nord for Trondheim angir kilometermerkene avstanden fra Trondheim stasjon.
Kravforskriften	Forskrift 4. desember 2001 nr. 1334 om krav til jernbane, herunder sporvei, tunnelbane og forstadsbane m.m.
Kritikalitetsrangere	Sette prioritet på risikoforholdene rangert etter hvor alvorlig de er for sikkerheten til passasjer og tredjemann
Overbygging	Består av ballast/pukk, sviller og sporveksler.
Overgangsrampe	Sporet begynner å bygge opp en dosering ved at den

	skinnen som vil ligge ytterst i en kurve heises i forhold til den andre skinnen.
Overhøyde	Overhøyde anordnes i forbindelse med kurver for å kompensere for den sideakselerasjon (sentrifugalkraft) som oppstår når toget kjører gjennom en kurve. Kraften i sideakselerasjonen bestemmes av togets hastighet og radien på kurven (hvor krapp kurven er).
Risiko	Uttrykk for kombinasjon av sannsynlighet for at skade på reisende, eget personell, tredjemann eller omgivelsene ellers oppstår og alvorlighetsgraden av denne skaden.
Risikopotensiale	Den størrelsesorden på den sikkerhetsmessige trussel som kan inntreffe hvis noe går galt. For eksempel en avsporing.
Samspill	Beskriver hvordan to eller flere funksjoner til sammen skaper en sikker aktivitet eller ved fravær skaper en usikker aktivitet
Sikkerhetskritisk forhold	Forhold som ved teknisk og/eller operasjonell aktivitet og /eller handling i jernbanevirksomhet som ved feil, uteblivelse, endret operasjonskarakteristikk inklusive utilsiktet og/eller uautorisert aktivering kan forårsake tap av menneskeliv eller alvorlig personskade.
Sikkerhetskritisk grense	Grense for sporfeil som gjør at sporet må utbedres umiddelbart.
Sikkerhetsoppfølgingsplan	En oversikt der risikoforhold som har fått et spesifisert kontrolltiltak blir listet opp i en plan hvor hvem som er ansvarlig for oppfølging av risikoforholdet og hvor ofte denne oppfølgingen skal utføres blir angitt.
Sikkerhetsregime	Det totale system som ivaretar sikkerheten
Sikkerhetsstyringssystem	Et system for å lede og administrere på en planmessig, styrt og organisert måte av de risikoforhold som virksomheten måtte representere
Sporgeometri	Beskriver hvordan sporet er lagt i terrenget
Tillatelsesforskriften	Forskrift 4. desember 2001 nr. 1333 om tillatelse til å drive jernbane, herunder sporvei, tunnelbane og forstadsbane m.m., samt tilgang til å trafikkere det nasjonale jernbanenettet
Togstamme	Togstamme utgjør individuelle vogner som er koblet sammen og deretter koblet til et lokomotiv eller vogn med fremdriftsmaskineri. Vogner som er koblet sammen uten å ha eget fremdriftsmaskineri benevnes som slerke.
Underbygging	Består av massen som jernbanesporet – sviller og skinner – ligger på.
Vindskjevhet	Togskinner som ikke lengre er parallelle når de betraktes i vertikalplanet
Vertikal sporfeil	En eller begge skinner har en dump eller kul.

Vognopptak	Togstammens manifest som angir hvordan hver vogn er lastet
------------	--

HAVARIKOMMISJONEN FOR SIVIL LUFTFART OG JERNBANE (HSLB)
Lillestrøm, desember 2003

Urspåring av Lgjns-vagnar i Norge

Vid två olika tillfällen, men i samma kurva har två svenska godsvagnar spårat ur på Kongsvingerbanan i Norge. Detta har inträffat under utkörning från stationen i Fetsund. Efter att ha passerat en spårväxel så går spåret in på en bro. Det är i utgången från kurvan och övergången till bron de två urspåringarna har inträffat.

De urspårade vagnarna var båda av typen Lgjns-w, det vill säga tvåaxliga containervagnar med bladfjädrar. Båda vagnarna ägs av Green Cargo. Vid den första urspåringen 18 juli 2002 (refereras till som Fetsund I i denna rapport) var axelavståndet på den aktuella vagnen (Lgjns-w⁸³¹) tio meter. Vid det andra tillfället 13 augusti 2002 (kommer refereras till som Fetsund II i denna rapport) var axelavståndet nio meter på den urspårade vagnen (Lgjns-w⁸⁶¹). Vid båda tillfällena var vagnarna nästan olastade. Vid båda tillfällena var det den första axeln på de aktuella vagnarna som spårade ur. Vid det första tillfället kunde konstateras att containern efter urspåring inte låg trädd över tappen. Det kan inte uteslutas att denna avhakning är ett resultat av olyckan, se Figur 1. Denna studie indikerar att om containern rider på någon tapp kan detta öka urspårningsrisken väsentligt.



Figur 1 Den urspårade vagnen efter den första urspåringen Fetsund I. Observera att containern sitter snett på vagnen.

Kund/Uppdragsgivare HSLB – Haverikommisjonen for Sivil Luftfart og Bane		Kundens ref, tel Hans Bjørnseth, +47 64 84 57 60	
Ansvarig författare Johan Oscarsson och Paul Sundvall	Granskad av Mikael Wrang	Godkänd av Hugo von Bahr	
Uppdrag benämning Urspåring av Lgjns-vagnar i Norge		Uppdrag nr T-01141	Datum 2003-03-21
Dokumentbeteckning T01141-0000-2-RES		Revision 1	Delrapport X
Sekretess Får endast spridas till uppdragsgivaren		Pärmar 4	Antal sidor 54

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	SPÅRET PÅ OLYCKSPLATSEN	4
1.1	Allmän beskrivning av spåret	4
1.2	Geometrin av spåret på olycksplatsen	4
1.3	Rälens kondition på olycksplatsen	5
1.4	Arbeten och inmätningar på olycksplatsen	5
2.	BANVERKETS RIKTLINJER ANGÅENDE SPÅRGEOMETRI	6
2.1	Rälsförhöjning	6
2.1.1	Teoretisk rälsförhöjning, rälsförhöjningsbrist och rälsförhöjningsöverskott	6
2.1.2	Riktlinjer för val av rälsförhöjning	8
2.2	Kurvradie på linje och i huvudspår	8
2.3	Övergångskurvor och rälsförhöjningsramper	9
2.4	Skyddsräler	10
2.4.1	Skyddsräler på broar med ballast	10
2.4.2	Skyddsräler på broar med direkt spåruppläggning (utan ballast)	11
2.4.3	Skyddsräler i tunnlar	11
2.4.4	Konstruktiv utformning	11
3.	TÅGEN VID URSPÅRNINGARNA	12
3.1	De urspårade vagnarna	12
3.2	Tågsammansättning vid urspårningarna	12
4.	TÄNKBARA ORSAKER TILL URSPÅRNINGAR AV DENNA TYP – EN SAMMANFATTNING	15
5.	FLÄNSKLÄTTRING	16
6.	RÄLSLITAGE	18
7.	EFFEKT PÅ HJULAVLASTNING VID BYTE AV FJÄDERTYP	18
7.1	Härledning av uttryck för hjulavlastning som funktion av fjäderstyvhet och torsionsstyvhet	19
7.1.1	Indata	19
7.2	Styrande ekvationer	19
7.3	Bestämning av torsionsstyvheten	21
7.4	Bestämning av hur hjulavlastningen förändras med fjäderstyvheten	21
7.5	Kontroll av om provet genomförs i det linjära området	22
7.6	Slutsats avseende fjädertyp	22
8.	LONGITUDINELLA TRYCKKRAFTER	23
8.1	Urspårningsmekanismer vid höga tryckkrafter	23
8.2	Allmän diskussion avseende vagnars urspårningskänslighet med avseende longitudinella tryckkrafter	23
8.3	Tryckkrafter vid bromsning	23
8.4	Slutsatser angående longitudinella tryckkrafter	24
8.5	Rekommendationer	24
9.	GÅNGDYNAMISKA SIMULERINGAR	24
9.1	Historik	24
9.2	Simuleringsmodell	25

9.2.1	Allmän information	25
9.2.2	Definitioner	25
9.2.3	Tågsammansättning	25
9.2.4	Spårets egenskaper	26
9.2.5	Modellering av Lgjns-w 831	27
9.2.6	Modellering av vagnstyp "Enkel"	30
9.2.7	Modellering av vagnstyp "Dummy"	31
9.2.8	Vagnskopplingar – typ 1	31
9.2.9	Vagnskopplingar – typ 2	32
9.3	Simuleringsstrategi	33
9.3.1	Studerade utdata	33
9.4	Stokastiska metoder	33
9.4.1	Introduktion till Latinsk hyperkub med korrelationskontroll.....	33
9.4.2	Introduktion till perturbationsmetoden	37
9.5	Utvärderingsmetoder.....	37
9.6	Resultat från de gångdynamiska simuleringarna	38
9.6.1	Nominella fallet	38
9.6.2	Indata till parameterstudie	40
9.6.3	Resultat av parameterstudie	41
9.7	Diskussion av simuleringsresultat.....	46
10.	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER.....	47
11.	REFERENSER	48
	APPENDIX 1.....	51
	APPENDIX 2.....	52
	APPENDIX 3.....	53
	APPENDIX 4.....	54
	TILLÄGGSBESTÄLLNING	55

1. Spåret på olycksplatsen

1.1 Allmän beskrivning av spåret

Fetsund är en tvåspårsstation som ligger på Kongsvingerbanan. Utfartsväxeln mot bron (riktning mot Sverige) ligger på träsliprar i en horisontalkurva. Strax efter växeln börjar ett betongslipersspår och kurvan övergår i en snävare kurva. I övergångskurvan ligger en kort vägbro, cirka 5 meter lång. Den snäva cirkulärkurvan övergår sedan i en övergångskurva till rakspår som sträcker sig en bit in på bron.

1.2 Geometrin av spåret på olycksplatsen

Utfartsväxeln mot bron ligger i en horisontalkurva med en teoretisk radie på 862 meter och en teoretisk rälsförhöjning på 55 millimeter. Strax efter växeln börjar en övergångskurva, vars teoretiska längd är 37 meter, in till en cirkulärkurva med en teoretisk radie på 289 meter och med en teoretisk rälsförhöjning på 120 millimeter. Den snäva cirkulärkurvan är teoretiskt 82 meter lång och övergår i en övergångskurva, vars teoretiska längd är 42 meter, som sträcker sig en bit in på bron. Detta åskådliggörs i Figur 16.

Enligt Løfteskjemat av spåret på olycksplatsen så skall egentligen hela spåret ligga helt plant från cirka 90 meter (km 29,2541) innan bron (km 29,3478 – 29,7678) till cirka 60 meter (km 29,8270) efter bron, men verkligheten är en annan. Mätningar, som utfördes den 26 juli 2002, visar tydligt att spåret lutar, se Tabell 1.

Vilka regler som gäller i Sverige för spårlutningar och vertikalkurvor finns upptagna i [6] och [28].

Tabell 1 Vertikalkurvaturen av spåret på olycksplatsen.

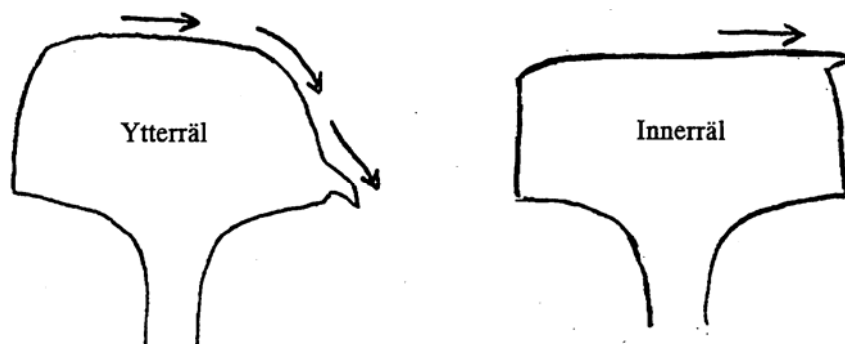
Från km	Till km	Stigning (%)
29,2826	29,2970	0,0
29,2970	29,3250	-1,0
29,3250	29,3640	1,0
29,3640	29,8077	0,0

Den största tillåtna vindskevheten i Norge vid projekteringskrav i dagsläget är 2,5‰ (1:400). Detta motsvarar 22,5 millimeter ändring av den anlagda rälsförhöjningen på 9 meter basis. I Fetsund är detta värde större, 120 millimeter på 42 meter, vilket ger en vindskevhet på cirka 2,86‰. Ytterligare information om skevhet i spåret finns i avsnitt 2.3.

I Norge är minsta tillåtna kurvradie på normalspår satt till 130 meter, detta kan jämföras med 289 meter som den snäva kurvan i Fetsund har enligt Løfteskjemat.

1.3 Rälens kondition på olycksplatsen

Figur 2 illustrerar två typer av rässlitage. Detta typiska utseende hade rälerna vid besök av TrainTech den 10 september 2002 i Fetsund. Framförallt var slitaget väldigt markant på rälerna i 289-meters kurvan. Dessutom observerades det att rälerna hade en tydlig kortvågig korrugerering på framförallt innerrälerna i den snäva cirkulärkurvan.



Figur 2 En schematisk illustration av rässlitage på yttre- och innerräl i kurvor. Huvudsaklig riktning för friktionskrafter har markerats med pilar i figuren.

För att minska problemet med rässlitage i kurvor rekommenderas att framför allt snäva kurvor smörjs kontinuerligt av stationära smörjutrustningar för att minska friktionen mellan hjul och räl. Flera olika typer av stationär smörjutrustning finns kommersiellt tillgängliga.

För mer information om rässlitage hänvisas till sektion 6.

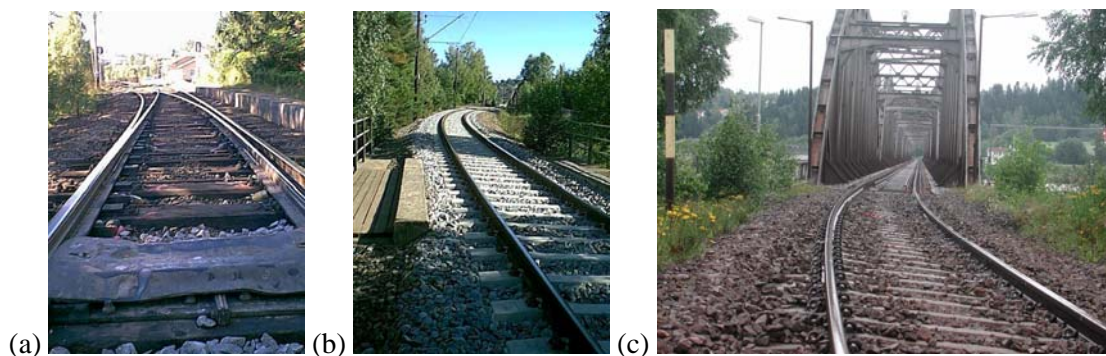
1.4 Arbeten och inmätningar på olycksplatsen

En spårgeometrimätning med mätvagn, Roger 1000, genomfördes den 27 maj 2002. Vid denna mätning observerades ett kraftigt skevningsfel (ungefär vid km 29,350) inne på bron. Den allvarligaste vindskevheten var cirka 36 millimeter över 9 meters basis, vilket är över akutgränsen för denna typ av fel. Dessutom inmättes ett stort höjdfel, också detta över akutgränsen, för rälerna omedelbart före bron. Med anledning av detta genomfördes spårarbeten på platsen. Träsliplarna byttes ut mot betongsliprar och spåret riktades. Emellertid förblev ungefär 20 sliprar omedelbart före bron ej utbytta.

Den 18 juli 2002 spårade en containervagn ur cirka 5-8 meter före bron. Det syntes tydligt på rälerna att den aktuella vagnen hade börjat klättra cirka 5-6 sliprar före själva urspårningen. Den 26 juli 2002 genomförde personal från Jernbaneverkets huvudkontor (Asbjørn Hansen och Christopher Schive) en manuell inmätning av vertikalläget och skevningsfelet av spåret på olycksplatsen och föreslog hur spårgeometrin skulle kunna förbättras. Vid denna mätning observerades ett kraftigt (säkerhetskritiskt) skevningsfel (ungefär vid km 29,350) inne på bron. Den allvarligaste vindskevheten var på 45 millimeter över 9 meters basis och det är över säkerhetsgränsen för denna typ av fel. Säkerhetsgränsen för denna typ av fel är i Norge 43 millimeter över 9 meter basis och 14 millimeter över 2 meter basis. Enligt gällande regler i Norge skall spåret justeras omedelbart om inmätning påvisar att man överskrider säkerhetsgränsen. Om akutgränserna överskrids så justeras felen snarast, allra senast innan nästa mätning. Den 12 augusti 2002 pågick arbete i spåret. Arbetet blev försenat bland annat på grund av dåligt väder (kraftigt regn). Den 13 augusti spårade ytterligare en containervagn ur vid km 29,340, cirka 12 sliprar före bron. Denna gång hade klättringen av den aktuella vagnen påbörjats cirka 6-8 sliprar innan urspårningen. Efter urspårningen konstaterades att arbetet inte var slutfört på ett fullgott sätt.

Sammanfattningsvis kan här påpekas att Jernbaneverket har följt gällande regler eftersom mätningarna den 27 maj inte påvisade att några värden översteg säkerhetsgränserna utan bara akutgränserna. När Jernbaneverket utförde den kompletterande mätningen den 26 juli uppdagades säkerhetskritiska fel och dessa började man åtgärda omedelbart.

För ytterligare information angående utförda arbeten på olyckplatsen så hänvisas till Appendix 4.



Figur 3 (a) Vy mot växeln. I bakgrunden skymtas Fetsunds station (b) Vy från den korta vägbron mot den längre bron Den korta vägbron ligger mellan Fetsunds station och den längre bron. (c) Vy mot bron och urspårningsplatsen.

2. Banverkets riktlinjer angående spårgeometri

Anledningen till att utförlig beskrivning av Banverkets riktlinjer angående spårgeometri presenteras i denna rapport är att så önskades av uppdragsgivaren. I framförallt kapitel 1 presenteras några av Jernbaneverkets riktlinjer angående spårgeometri.

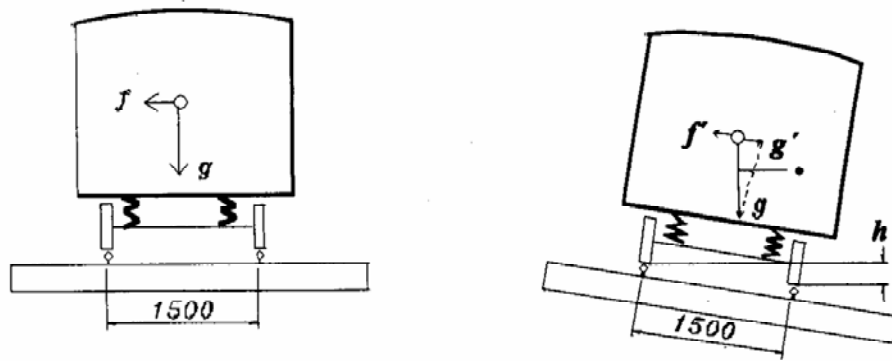
Banverket har en handbok [6] som beskriver hur spåret skall utformas geometriskt. Handboken tillämpas vid byggnation av spår på ny terrass samt så långt det är möjligt även vid spårupprustningar. Handboken [6] bygger på BVF 586.41 [28] som anger de minimikrav som ställs på spåret. Handboken [6] beskriver hur spårets geometri skall utformas med hänsyn till de marginaler som skall finnas gentemot de minimikrav som stipuleras i [28]. Handboken [6] ger allmänna råd och anvisningar för den geometriska utformningen samt bakgrund till de gränsvärden som beskrivs. I detta kapitel har de essentiella delarna för den aktuella studien av [6] sammanfattats.

2.1 Rälsförhöjning

I en kurva ligger den yttre rälen normalt högre än den inre. Denna anordnade höjdskillnad mellan rälen kallas rälsförhöjning och förkortas h_a . Rälsförhöjningen har positivt tecken då yttre rälen ligger högre än innerrälen (normalfallet) och följaktligen negativt tecken då innerrälen ligger högre än yttre rälen (så kallad falsk rälsförhöjning).

2.1.1 Teoretisk rälsförhöjning, rälsförhöjningsbrist och rälsförhöjningsöverskott

I detta avsnitt ges en kortare introduktion till den bakomliggande teorin när det gäller rälsförhöjning, rälsförhöjningsbrist och rälsförhöjningsöverskott. Huvudanledningen till att detta avsnitt har inorporerats i denna rapport är att öka förståelsen för de resonemang som presenteras i avsnitt 2.1.2.



Figur 4 Schematisk illustration på hur rälsförhöjning h och sidoacceleration f definieras.

Den rälsförhöjning som skall anordnas för att kompensera bort all sidoacceleration för en given hastighet kallas för teoretisk rälsförhöjning och förkortas h_t .

Då ett fordon kör genom en horisontalkurva uppkommer en sidoacceleration (centripetalaccelerationen) f , se Figur 4, som bestäms av storleken på hastigheten v och radien på kurvan R enligt:

$$f = \frac{v^2}{R} \quad \text{då vinkeln är liten gäller} \quad f \approx f',$$

f' definieras i Figur 4.

För att kompensera bort all sidoacceleration skall följande villkor gälla $f' = g'$. Detta ger

$$f = g' = g \cdot \sin \beta = g \cdot \frac{h}{1500}$$

där 1500 är det laterala avståndet mellan hjulen uttryckt i millimeter. Den rälsförhöjning som skall anordnas i spåret för att kompensera bort all sidoacceleration beskrivs med andra av följande ekvation:

$$f = \frac{v_{\text{m/s}}^2}{R_{\text{m}}} = g \cdot \frac{h_{\text{mm}}}{1500} \quad \Rightarrow \quad h_{\text{mm}} = \frac{v_{\text{km/h}}^2 \cdot 1500}{R_{\text{m}} \cdot 9,81 \cdot 3,6^2} = \frac{11,8 \cdot v_{\text{km/h}}^2}{R_{\text{m}}}$$

I Sverige är enligt Banverkets förordningar största tillåtna rälsförhöjning 150 millimeter [6]. Huvudanledningen till denna begränsning är att stillastående fordon riskerar lastförskjutning/diskomfort. Dessutom anordnas rälsförhöjning normalt inte på spår med största tillåtna hastighet mindre än 50 km/h.

Skillnaden mellan teoretisk rälsförhöjning för viss hastighet och anordnad rälsförhöjning kallas rälsförhöjningsbrist, h_b , när h_t är större än h_a . Den okompenserade sidoaccelerationen är proportionell mot rälsförhöjningsbristen, under förutsättningar att småvinkel approximationen gäller, och får inte bli för stor beroende på att:

- Komforten blir dålig för passagerare
- Spåret kan förskjutas i sidled
- Fordonet kan klättra över ytterrälen
- Fordonet kan välta

Skillnaden mellan anordnad rälsförhöjning och teoretisk rälsförhöjning för långsamma tåg kallas rälsförhöjningsöverskott, $h_ö$, det vill säga när h_t är mindre än h_a .

Tillåten rälsförhöjningsöverskott och rälsförhöjningsbrist i Sverige anges i BVH 586.40 [6].

2.1.2 Riktlinjer för val av rälsförhöjning

Rälsförhöjning i huvudspårskurva anordnas, förutom de presenterade i avsnitt 2.1.1, enligt följande riktlinjer i Sverige:

- Större rälsförhöjning än den som ger $h_b=20$ millimeter för skyltad hastighet för tåg kategori A anordnas normalt inte. Där inga andra begränsningar finns, anordnas normalt cirka 2/3 av den teoretiska rälsförhöjningen för tåg kategori A.
- På linjer som trafikerats med tåg kategori och/eller konventionella tåg kategori B anpassas rälsförhöjningen också för dessa tåg.
- På linjer med blandad trafik (person- och godståg) väljs rälsförhöjningen så att rälsförhöjningsbristen för tåg kategori A och rälsförhöjningsöverskottet för de långsammaste godstågen blir lika stora.
- I kurva vid plattform där de flesta resandetåg stannar bör minsta rälsförhöjning anordnas. Normalt bör inte större rälsförhöjning än 70 millimeter anordnas. Högre rälsförhöjning än 100 millimeter får dock aldrig anordnas vid plattform.
- I plankorsning mellan spår och väg läggs flerspårig banas räler så att ändringen i vägbanans längslutning blir liten. Om möjligt bör alla räleras överkanter läggas i ett och samma lutande plan.
- För spårväxel som ligger i kurva anordnas rälsförhöjning så att god resandekomfort i första hand erhålls i huvudtågvägen. Det från huvudtågvägen avvikande spåret skall medge lägst 40 km/h.

2.2 Kurvradie på linje och i huvudspår

I Sverige bör inte kurvradien understiga 300 meter på spår med största tillåtna hastighet större än 40 km/h. För att få ett riktvärde på vilken radie man minst bör ha så sätts den teoretiska rälsförhöjning till 250 millimeter i den i avsnitt 2.1.1 härledda formeln :

$$R_{rikt} = \frac{11,8 \cdot (\gamma \cdot v_{dim})^2}{250}.$$

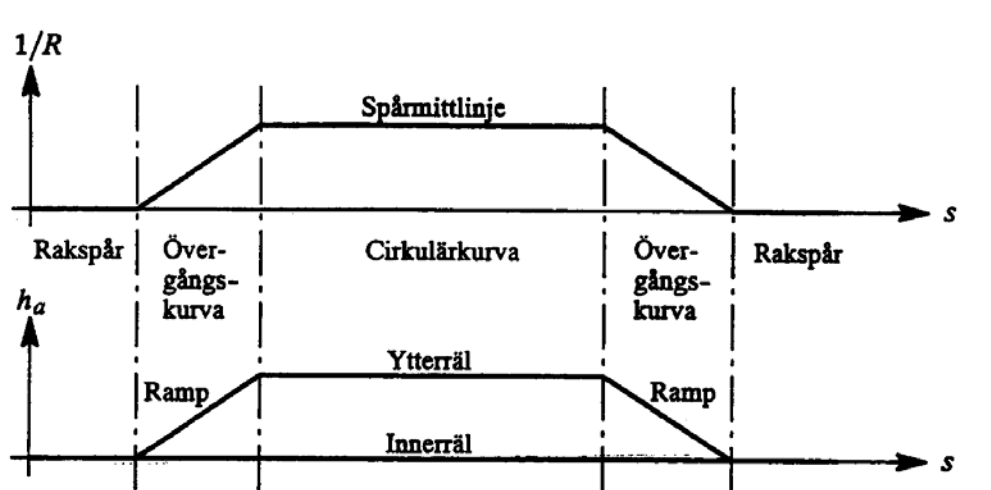
Den dimensionerande hastigheten v_{dim} multipliceras här med faktorn γ för att erhålla marginal med hänsyn till resandekomfort och framtida högre hastigheter. Hastighetsfaktorn γ väljs i normalfallet till 1,3.

Kurvradiens minimivärde är det värde på radien som erhålls då den teoretiska rälsförhöjning sätts till 250 millimeter och ingen marginal finns för resandekomfort och kommande hastighetshöjningar således γ sätts till 1.

2.3 Övergångskurvor och rälsförhöjningsramper

En cirkulärkurva med rälsförhöjning kan i sina ändrar inte direkt ansluta till rakspår (utan rälsförhöjning). Övergångar mellan dessa två typer av nominella spårgeometrier är därför nödvändiga.

Normalt ändras då kurvradien (eller kurvans krökning) successivt på dessa mellanliggande spåravsnitt, så kallade övergångskurvor. Med nödvändighet ändras rälsförhöjningen successivt och man erhåller så kallade rälsförhöjningsramper, se Figur 5.

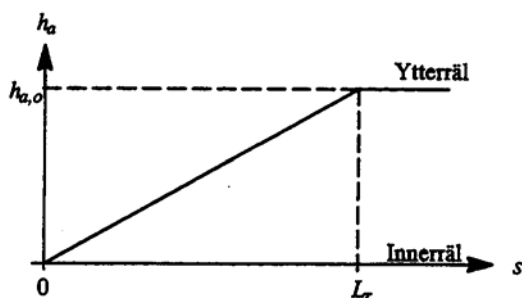


Figur 5 Exempel på nominellgeometri för en horisontalkurva. I övergångskurvorna förändras krökningen $1/R$ linjärt och i rälsförhöjningsramperna förändras rälsförhöjningen h_a linjärt. Figuren är hämtad från [29].

För en linjär eller rak ramp ändras rälsförhöjningen således linjärt och rälsförhöjningen kan skrivas som

$$h_a(s) = \frac{s}{L_r} \cdot h_{a,0} \quad \text{där} \quad 0 \leq s \leq L_r$$

där L_r är den raka rampens längd, $h_{a,0}$ är rälsförhöjningen för cirkulärkurvan och $s=0$ definierar rampens början. En schematisk illustration visas i Figur 6



Figur 6 Rak (linjär) rälsförhöjningsramp. Figuren är hämtad från [29].

Den raka rampens lutning kan beskrivas med uttrycken

$$\text{Ramplutning } h'_a(s) = \frac{h_{a,0}}{L_r}$$

$$\text{Ramptal } n_r = \frac{1}{h'_a} = \frac{L_r}{h_{a,0}}$$

Rälsförhöjningsramp innebär en skevhet i spåret. Om fordon med styv vertikalfjädring körs över ett skevt spår kan vissa hjul lättas så mycket att risken för urspårning föreligger. Med hänsyn till bland annat denna risk måste rampens lutning begränsas. Största tillåtna ramplutning i Sverige är 1:400, se BVF 586.41 [28].

Tillåten hastighet i rälsförhöjningsramp och i övergångskurva anges i BVF 586.41 [28].

2.4 Skyddsräler

Skyddsräler anordnas för att mildra konsekvenserna vid en eventuell urspårning [7]. Skyddsräler skall därför anordnas i tågspår på sådana spåravsnitt där konsekvenserna av en urspårning kan bli särskilt allvarliga. Skyddsrälernas huvuduppgift är att vid en urspårning hjälpa fordonet att följa rälen.

2.4.1 Skyddsräler på broar med ballast

Enligt Banverkets föreskrifter skall skyddsräler anordnas på broar när den enskilda, eller vid närliggande broar den sammanlagda, brolängden överstiger 30 meter med nedanstående undantag:

- Kantbalkens eller huvudbalkens överyta når högre än 100 millimeter över rälsunderkant. Det krävs att kantbalken har en bredd av minst 350 millimeter och är hoparmerad och hopgjuten med broöverbyggnaden. Kantbalk och huvudbalk är brotermer [7].
- Ballastdjupet är större än 300 millimeter mellan broplattans överyta och sliperns underkant samtidigt som avståndet mellan spårmittpunkt och kantbalkens innerkant överstiger 2,5 meter.

Skyddsräler skall anordnas, oavsett brolängd, om urspårning kan medföra särskild risk för brons bärförmåga.

2.4.2 Skyddsräler på broar med direkt spåruppläggning (utan ballast)

Enligt Banverkets föreskrifter skall skyddsräler anordnas på broar med direkt spåruppläggning om den enskilda, eller vid närliggande broar den sammanlagda, brolängden överstiger 30 meter. Dessutom skall skyddsräler anordnas, oavsett brolängd, om urspårning kan medföra särskild risk för brons bärförmåga.

2.4.3 Skyddsräler i tunnlar

Skyddsräler skall anordnas i tunnel med mer än ett spår och en längd överstigande 100 meter. Tunnlar i följd med enskild längd över 50 meter eller sammanlagd längd över 100 meter och med mindre fritt mellanrum mellan tunnelmynningarna än 100 meter räknas som en kontinuerlig tunnel [7].

2.4.4 Konstruktiv utformning

När det gäller den konstruktiva utformningen av hur skyddsräler skall anordnas finns krav på rälsprofil, utformning, utspetsning, montering, avstånd till farräl, baliser och jordning [10]. Nedan följer ett utdrag av det nödvändigaste angående den konstruktiva utformningen. För ytterligare information hänvisas till [7].

Rälsprofil

Som skyddsräler används normalt samma rälsprofil som i spåret eller närmast mindre rälsprofil. I speciella fall kan annan avbärande anordning användas. Utförandet skall då godkännas i varje enskilt fall.

Utformning

Skyddsräler utförs som skarvspår utan skarvjärn med en spaltöppning på 30-40 millimeter mellan rälsändarna. Maximal rälslängd på enskild skyddsräler får vara högst 40 meter. Skyddsrälerns överkant skall ligga på samma nivå som farrälernas eller högst 40 millimeter under. Skyddsrälerna placeras normalt innanför farrälerna på ett givet avstånd. Detta framgår av avsnitt nedan, *Avstånd till farräl*.

Utspetsning

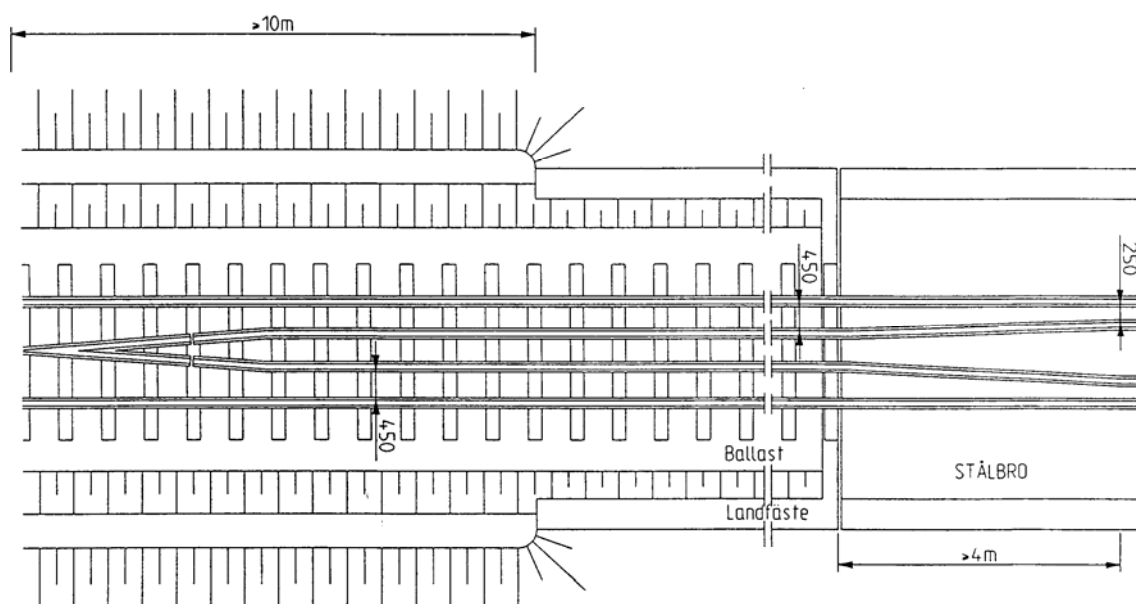
Skyddsräler, inklusive utspetsning, skall nå minst 10 meter utanför båda ändarna av det objekt där skyddsräler monteras, se Figur 7. På broar mäts avståndet från landfästets inre avslut. Reglerna för skyddsräler är samma i Norge och Sverige: skyddsräler skall användas på stålbroar och utspetsning skall nå minst 10 meter utanför landfästet, se igen Figur 7. I Fetsund så var skyddsrälerna kapade vid broänden, med andra ord så uppfyllde man inte regelverket när det gällde skyddsräler. Att inte lägga skyddsräler på ett riktigt sätt kan i det värsta scenariot få katastrofala konsekvenser.

Avstånd till farräl

Fria utrymmet mellan skyddsräler och farrälens räls huvud skall vara:

- 250 millimeter på bro med direkt spåruppläggning. Dock skall på en sträcka av minst 4 meter skyddsräler föras in mot spårmittpunkt så att avståndet mellan skyddsräler och farräl blir 450 millimeter vid broöverbyggnadens slut, se Figur 7.

- 450 millimeter i övriga fall.



Figur 7 Skyddsräler övergång bro-land. Figuren är hämtad från [7].

3. Tågen vid urspårningarna

Nedan följer en sammanställning av tågsammansättningarna vid de två urspårningarna.

3.1 De urspårade vagnarna

Som nämndes i sammanfattningen så var vagnarna vid båda urspårningarna av typen Lgjns-w det vill säga tvåaxliga containervagnar med bladfjädrar. Vagnarna ägs av Green Cargo. Vid den första urspårningen var axelavståndet på den aktuella vagnen tio meter och vid den andra nio meter. Vid båda tillfällena var vagnarna i princip olastade. Det var första axeln på de aktuella vagnarna som spårade ur vid båda händelserna. Dessutom var vid första tillfället containern på den urspårade vagnen eventuellt snett påsatt på vagnen, se Figur 1. Det är dock lika troligt att containern har hoppat av tappen vid själva urspårningen. För mer information beträffande de två vagnstyperna, Lgjns-w 831 och Lgjns-w 861, så hänvisas till <http://www2.sjgods.sj.se/godsvagnar/>.

3.2 Tågsammansättning vid urspårningarna

I Tabell 2 har tågsammansättningarna vid de två urspårningarna listats. Efter den andra urspårningen så vägdes alla vagnar i det aktuella tåget och det är dessa värden som presenteras i tabellen. Den totala vagnsvikten vid vägning var 824.1 ton, vilket skiljer sig mot uppgifter på arket Godsvognoptak til togfører där vikten anges till 842 ton. Om man studerar Godsvognoptak til togfører så gick dessutom den urspårade vagnen, nummer 427444311034, som nummer 8 men enligt Jernbaneverkets man som var ute i Fetsund precis efter olyckan så var det vagn 5 som spårade ur. Dock hade vagnen rätt individnummer. Enligt Asbjørn Hansen på Jernbaneverket är det inte ovanligt att Godsvognoptak til togfører ger felaktig information. Det rekommenderas att dessa rutiner ses över.

Tabell 2 Tågsammansättning vid första respektive andra urspårningen. Informationen är hämtad dels från arken Godsvagnsopptak til togfører (värdena för Fetsund I) och dels från vägning av vagnar som skedde efter den andra urspårningen. Vänstra tabellen är tågsammansättningen vid första urspårningen och högra tågsammansättningen vid andra urspårningen. A i bromskolumnen står för att bromsen var avstängd. De urspårade vagnar är markerade i fet stil.

Fetsund I		
Vagn Nr.	Vikt i ton enligt Godsvagnsopptak til togfører	Broms
1	16	P
2	16	P
3	16	P
4	36	P
5	16	P
6	16	P
7	16	P
8	31	P
9	24	P
10	17	P
11	24	P
12	15	P
13	31	A
14	15	A
15	16	A
16	15	P
17	16	P
18	16	P
19	15	P
20	27	P
21	27	P
22	16	P
23	80	P
24	27	P
25	27	P
26	27	P
27	15	P
28	16	P
29	16	P
30	16	P
31	15	P
32	26	P
33	14	P

Fetsund II		
Vagn Nr.	Vikt i ton enligt vägning	Broms
1	29,1	P
2	88,9	P
3	16,6	P
4	22,7	P
5	22,5	P
6	12,5	P
7	25,0	P
8	20,2	P
9	16,9	P
10	17,5	P
11	40,8	P
12	68,6	P
13	27,3	P
14	26,9	P
15	22,3	P
16	15,8	P
17	15,1	P
18	15,4	P
19	37,7	A
20	40,4	P
21	39,9	P
22	23,1	P
23	25,5	P
24	25,7	P
25	22,1	P
26	89,6	P
27	16,0	P

För de vagnar närmast de urspårade samt de urspårade vagnarna har ytterligare information tagits fram, se Tabell 3 och Tabell 4.

Tabell 3 Vagnarna runt den urspårade vagnen vid första urspårningen, Fetsund I. Urspårad vagn markerad i fet stil. Förkortningen dl betyder dubbellänkad.

Vagn Nr.	Individ Nr.	Littera	Längd över buffertar [m]	Hjulbas [m]	Löpverk
9	42 74 443 0 741 2	Lgjns 746	17,1	10	UIC, dl, trapetsfj.
10	42 74 443 0 696 8	Lgjns 746	17,1	10	UIC, dl, trapetsfj.
11	42 74 443 0 881 6	Lgjns-w 831	17,1	10	UIC, dl, trapetsfj.
12	21 74 225 1 406 7	Hbis 763	14,34	9	UIC, dl, parabelfj.
13	23 80 292 2 063 5	Hirrs	-	9+9	UIC, dl, parabelfj.

Tabell 4 Vagnarna runt den urspårade vagnen vid andra urspårningen, Fetsund II. Urspårad vagn markerad i fet stil. Förkortningen dl betyder dubbellänkad.

Vagn Nr.	Individ Nr.	Littera	Längd över buffertar [m]	Hjulbas [m]	Löpverk
6	21 74 335 3 937 6	Kbps 741	13,86	9	UIC,dl, trapetsfj.
7	43 80 433 4 307 0	Laadks	-	9-->0<--9	UIC,dl,gemensam mittaxel.
8	42 74 443 1 103 4	Lgjns-w 861	15,5	9	UIC,dl, trapetsfj.
9	42 74 443 1 264 4	Lgjns-w 871	17,1	10	UIC,dl, trapetsfj.
10	42 74 443 1 280 0	Lgjns-w 871	17,1	10	UIC,dl, trapetsfj.
11	32 74 993 0 009 0	Uaai	20,84 Boggi	13,9	3-axliga boggier

Efter första urspårningen observerades det att containern hade hoppat ur sitt läge vid urspårningen eller eventuellt att den var snett påsatt från början, se Figur 1. Vagnen vägdes med containern ur sitt läge och med containern korrekt placerad, se Figur 8. Som tydligt syns i Figur 8 så blev vagnens lastfördelning sned på grund av att containern inte satt ordentligt på plats. Eftersom en snett påsatt container har stor inverkan på den statiska hjullastfördelningen så bör det säkras att rutinerna för hur containrar sätts på plats är ändamålsenliga och att de fungerar. De gångdynamiska simuleringarna visar att skevhet påverkar urspårningskänsligheten markant, mer om detta i kapitel 9.

x = 7,6	x = 4,7
xx = 6,2	xx = 5,8
B-ände	A-ände
x = 5,0	x = 7,4
xx = 6,5	xx = 5,8

Figur 8 Hjulvikter när containern var korrekt placerad (xx) och hjulvikterna när containern var felaktigt placerad (x). Det var vid A-ändens vänstra sida som containern ej satt ordentligt på plats efter urspårningen. A-änden gick först i körriktningen vid urspårningen, Fetsund I.

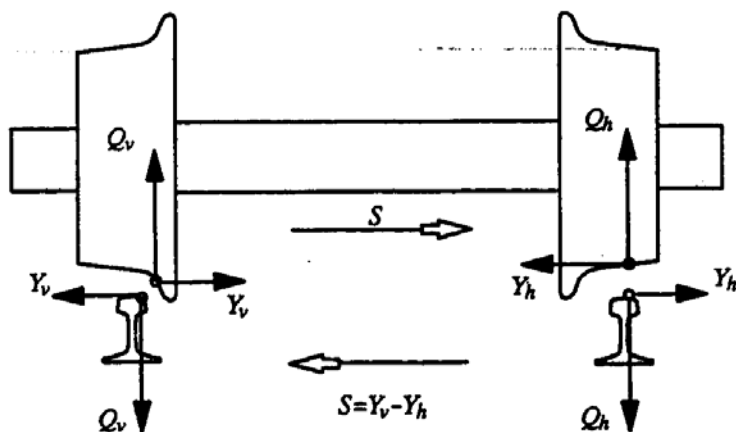
4. Tänkbara orsaker till urspårningar av denna typ – en sammanfattning

Nedan listas tänkbara anledningar till varför urspårningarna i Norge har skett. Det mest sannolika är ett samspel mellan några av de upptagna orsakerna. I kapitel 5 till 9 diskuteras de presumtiva orsakerna utförligare.

- Problemet med eventuell hjulavlastning för containervagnar.
 - Historik: UIC förändrade på 1980-talet tapparnas utformning, för att hindra att containrarna vid rangering och extrema sidvindar lättade från tapparna. Ändringen bestod i att breddmättet ökades med cirka 2 millimeter. Detta för att kompensera den förslitning som sker. Eftersom toleransen mellan bottenhålen i containern och tappens fortfarande är stort och måste så vara för att tillåta en snabb omlastning, har detta i realiteten ingen påverkan på vagnens torsionsstyvhet. Således är det egentligen enbart containerns anliggning mot vagnunderredet som orsakar en förhöjd torsionsstyvhet. Containerns bidrag till den förhöjda torsionsstyvheten kan i sin tur leda till att ytterhjulet på en halvlastad (eller olastad) vagn (med hög flänsklättringskvot Y/Q) släpper i utgången från en kurva. En diskussion gällande flänsklättring redovisas i kapitel 5.
 - En metod som har används i Sverige och i andra länder för att lösa hjulavlastningsproblemet är att övergå från trapetsfjädrar (konstant styvhet) till parabelfjädrar (progressiv styvhet). En noggrann genomgång av vad detta innebär samt hur det skulle påverka hjulavlastningen redovisas i kapitel 7.
 - Höga laterala krafter i buffertarna kan leda till urspårning. Ett resonemang angående höga laterala krafter i buffertarna presenteras i kapitel 8.
- Tryckkrafter (longitudinella krafter) i tåg på grund av bromsning, backning och rangering (de två sista är inte aktuella i detta fall) är ofta, åtminstone i kurva/växel, en dominerande orsak till urspårning. Kraftsamverkan, både lateralt, longitudinellt och i viss mån även vertikalt, i buffertar vid tryck och kurvgång kan lyfta vagnen ur spår. Ett resonemang angående höga longitudinella tryckkrafter och åtgärder för att sänka dessa presenteras i kapitel 8.
 - Tänkbar åtgärd för att minska tryckkraften vid bromsning är att, för långa tåg, lägga loket, eller lok och de första vagnarna, eller allra helst hela tåget i bromsläge G.
 - Tänkbar åtgärd är att utbilda förare om problemsambanden.
 - Tänkbar åtgärd för att minska tågs urspårningskänslighet vid bromsning kan vara att införa restriktioner i tågsammansättningen till exempel att placera tomma vagnar sist i tåg.

5. Flänsklättring

Om sidokraften och friktionen mellan fläns och räl blir tillräckligt stor kan hjulflänsen ”klättra” över rälen och urspårning är ett faktum. Med andra ord, flänsen klättrar upp längs rälen om vertikalkraften Q blir liten i förhållande till lateralkraften Y . Detta fall svarar mot en friktionskraft på flänsen som tenderar att lyfta upp hjulet. En schematisk illustration hur dessa krafter verkar visas i Figur 9.

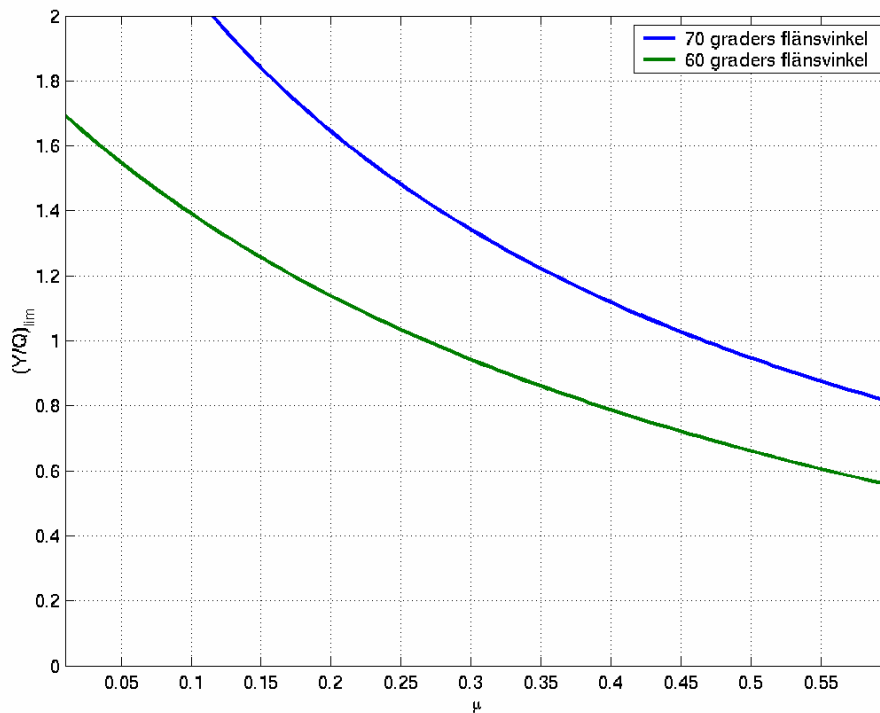


Figur 9 Krafter mellan fordon och spår. Lateralkrafter Y_v och Y_h , vertikalkrafter Q_v och Q_h och resulterande spårförskjutningskraft S . Hjulparet sett bakifrån. I figuren visas positiva kraftriktningar. Bilden är tagen från [29].

Kriterium för att flänsklättring *inte* skall ske kan skrivas som:

$$\frac{Y}{Q} \leq \left(\frac{Y}{Q} \right)_{\text{ill}} = A.$$

- Gränsvärdet A sätts i UIC 518 [8] till 0.8.



Figur 10 $(Y/Q)_{lim}$ för två flänsvinklar 60° och 70° som funktion av friktionen μ enligt Nadal. I UIC 518 har antagits att flänsvinkeln är åtminstone 60° och att det är sällsynt att friktionskoefficienten överstiger 0,4.

Enligt kriteriet för flänsklättring ovan, som introducerades av fransmannen Nadal, är det således kvoten mellan lateralkraft Y och vertikalkraft Q som avgör om förutsättningar för klättring föreligger.

Nadal kriterium för att flänsklättring *inte* skall ske gäller under förutsättning att:

- Anloppsvinkeln mellan hjul och räl är någorlunda stor ($\geq 0.5^\circ$), så att den lyftande friktionskraften på flänsen blir nära vertikal.
- Friktionen mellan fläns och farkant är någorlunda stor ($\mu = 0.3-0.4$). För ytterligare information se Figur 10.
- Varaktigheten av stora Y/Q är så lång att hjulet hinner klättra tillräckligt högt för att urspårning skall ske.

I praktiken är det ytterst sällan som klättring uppstår enbart genom att lateralkraften på ett hjul är stor. Orsaken är nästan alltid att vertikalkraften är kraftigt sänkt, det vill säga är betydligt mindre än det statiska (nominella) värdet Q_0 . Låga värden på vertikalkraften Q uppstår vanligen när *spåret är skevt* och *fordonet torsionsstyvt* i förhållande till de nominella hjullasterna.

För att förhindra urspårning på skevt spår, brukar det föreskrivas att fordonet inte får ha alltför stor vertikal avlastning på något hjul vid vissa specificerade skevheter i spåret, [2] och [3].

Ett annat vanligt skäl till låga vertikalkrafter med åtföljande urspårningsrisker är att fordonets *fjädersystem* är felaktigt eller feljusterat så att ett flera hjul har lägre last än den nominella hjullasten. Ytterligare en anledning till låga vertikalkrafter kan vara snett påsatt last.

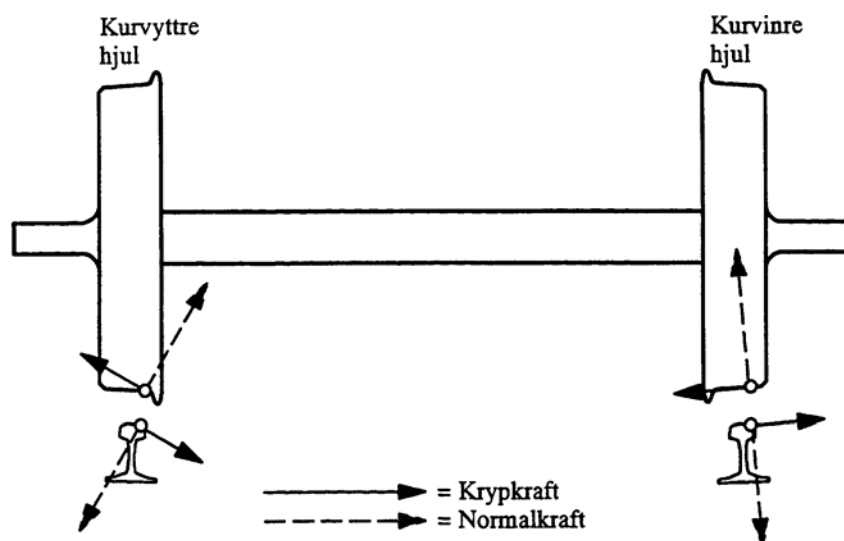
6. Rälslitage

Som nämnts kapitel 5 så orsakas urspårning av att flänsen på hjulet klättrar upp längs rälets farkant. Detta kan förenklas om ytterrälen har slitits som i Figur 2, vänster. Nedan följer en i sammanhanget adekvat beskrivning rörande rälslitage.

Rälsslitage i kurvor kan huvudsakligen delas in i två kategorier.

- *Farkantsslitage*, ofta på kurvors yttre räl (jämför flänsslitage på hjul). Farkantsslitage leder till ökad spårvidd. Tillåtet farkantsslitage begränsas dels av tillåten spårviddsökning och dels av hållfastheten i rälshuvudet. Ofta tillåts ett maximalt farkantsslitage i intervallet 5-10 millimeter, beroende på trafikslag [1].
- *Farbaneslitage*, ofta på kurvors inre räl (jämför löpbaneslitage på hjul). Farbaneslitage och den vertikala belastningen på inre räl kan leda till lokal utmattning, så att rälets farbana blir korrugerad. Rälsslipning blir då nödvändig. Eventuellt kan hela "skal" lossna från räl.

Det ovan beskrivna slitaget kan förklaras med de krafter som verkar mellan hjul och räl vid kurvgång, se Figur 11. Om räl är sliten på ett sätt som underlättar för hjulen att klättra upp så ökar risken för urspårning.



Figur 11 Typiska krafter för ledande hjulpar i ett tvärställt vertikalt plan för hjul-räl vid kurvgång.

7. Effekt på hjulavlastning vid byte av fjädertyp

Tidigare har konstaterats att containervagnar med tomma eller lätt lastade containrar vanligen är mycket torsionsstyva. MTL, föregångaren till TrainTech testcenter, konstaterade genom mätningar att en godsvagn littera Lgs lastad med tom container var mycket torsionsstiv. Detta ökar risken för urspårning, framför allt vid utgång ur kurvor med övergångskurvor med branta ramper. Den typen av kurvor förekommer i högre utsträckning i Norge än i större delen av övriga Europa.

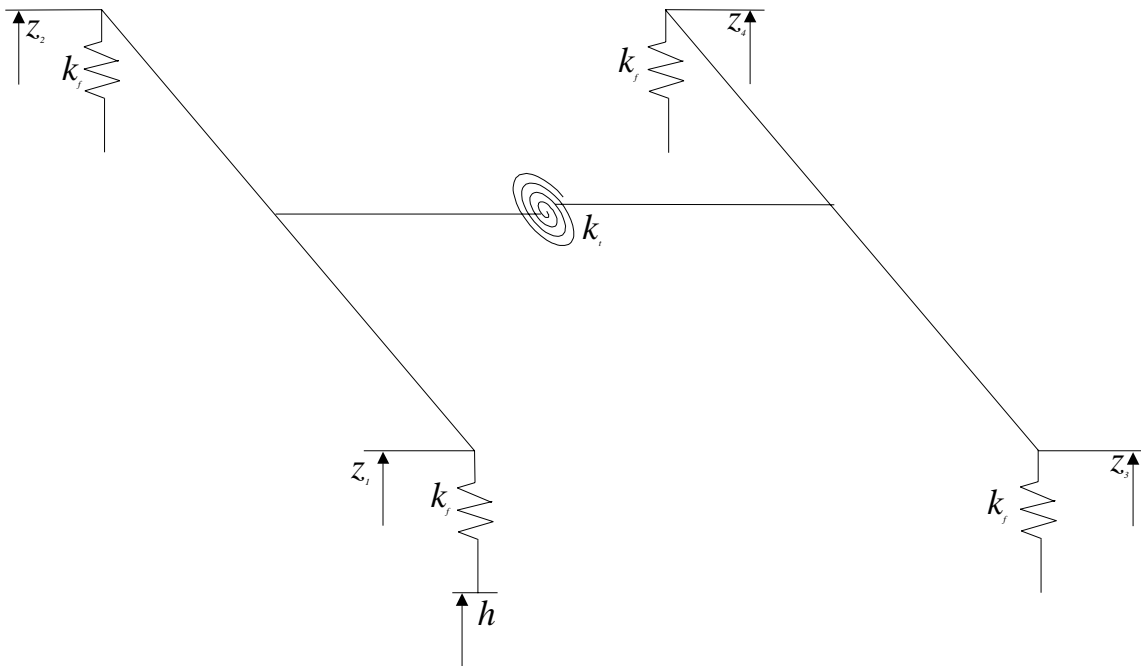
Det finns två vanligt förekommande typer av fjädrar på godsvagnar: parabel- och trapetsfjädrar. Skillnaden mellan dessa två fjädertyper är att parabelfjädern vid låg belastning är betydligt mjukare än trapetsfjädern, vilket ökar säkerhetsmarginalen för urspårning till följd av hjulavlastning vid skevt spår. Detta illustreras genom beräkningar som redovisas i detta kapitel.

Resonemanget i detta kapitel baseras till stora delar på en tidigare utförd studie [9].

7.1 Härlledning av uttryck för hjulavlastning som funktion av fjäderstyvhet och torsionsstyvhet

Den modell ur vilket uttryck för hjulavlastning ska härledas ses i Figur 12. Modellen förutsätter linjär karakteristik. Parabelfjädrarna är progressiva, varför det ska kontrolleras att man under helt lyft med vagn med tom container befinner sig i det linjära området.

Fjäderstyvheten betecknas k_f [N/m] och vagnens torsionsstyvhet betecknas k_t [Nm/rad]. Hjul nummer 1 lyfts till en höjd h [m] varvid fjäderinfästningspunkterna i ramen lyfts till höjden z_i relativt initial höjd.



Figur 12 Modell av tvåaxlig vagn med vertikal fjäderstyvhet och torsionsstyvhet. Figuren är inte skalenlig. Fjäderstyvheten betecknas k_f och vagnens torsionsstyvhet betecknas k_t . Figuren är tagen från [9].

7.1.1 Indata

Indata till beräkningarna:

- Laterala avståndet mellan hjulen = $2b_0 = 1,5$ meter.
- Q_0 = nominella hjullasten, antagen lika för alla hjulen i detta enkla exempel.
- ΔQ_i = hjulavlastningen på hjul nr i ($i=1, \dots, 4$).

7.2 Styrande ekvationer

Enligt ovan beskrivna definitioner får man $Q_i = Q_0 + \Delta Q_i$.

Vagnen kan delas in i en främre halva (hjul nummer 1 och 2), och i en bakre halva (hjul nummer 3 och 4). Dessa två halvor är förbundna med varandra via torsionsfjädersystemet.

Först gäller:

$$\Delta Q_1 = -k_f(z_1 - h), \quad \Delta Q_2 = -k_f z_2, \quad \Delta Q_3 = -k_f z_3 \quad \text{och} \quad \Delta Q_4 = -k_f z_4.$$

Vertikal kraftjämvikt för främre delen ger:

$$(Q_0 + \Delta Q_1) + (Q_0 + \Delta Q_2) - 2Q_0 = 0$$

vilket ger:

$$z_1 + z_2 = h.$$

På samma sätt för bakre delen fås att:

$$z_3 + z_4 = 0.$$

Momentet som utvecklas i torsionsfjäders ges av

$$M_t = k_t \cdot \Delta \phi$$

och

$$\Delta \phi = \frac{z_1 - z_2}{2b_0} - \frac{z_3 - z_4}{2b_0}.$$

Dessutom ger momentjämvikt kring longitudinalaxeln för främre respektive bakre vagnhalvan:

$$(Q_0 + \Delta Q_2) \cdot 2b_0 - 2Q_0 b_0 + M_t = 0$$

$$(Q_0 + \Delta Q_4) \cdot 2b_0 - 2Q_0 b_0 - M_t = 0.$$

Dessa ekvationer ger att

$$\Delta Q_1 = \frac{k_f k_t h}{(2b_0)^2 k_f + 4k_t},$$

$$\Delta Q_2 = -\frac{k_f k_t h}{(2b_0)^2 k_f + 4k_t},$$

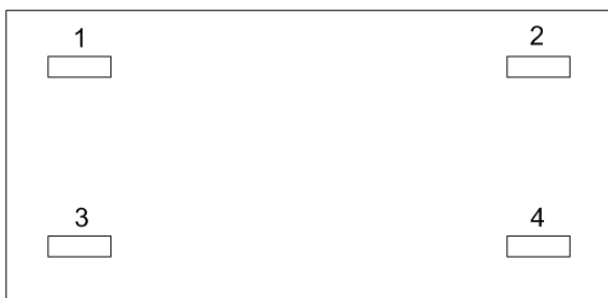
$$\Delta Q_3 = -\frac{k_f k_t h}{(2b_0)^2 k_f + 4k_t} \text{ och}$$

$$\Delta Q_4 = \frac{k_f k_t h}{(2b_0)^2 k_f + 4k_t}.$$

Det är alltså hjul två och tre som avlastas, medan hjul ett och fyra pålastas, en schematisk illustration av den modellerade vagnen visas i Figur 13. Dessutom har gränsvärdesbetraktelser genomförts (med andra ord har värdena på fjäder- respektive torsionsstyvheten gått mot oändligheten), vilka indikerar att resultatet är riktigt. Alltså kan det för hjulavlastningen generellt skrivas:

$$\Delta Q = \frac{k_f k_t h}{(2b_0)^2 k_f + 4k_t}. \quad (1)$$

För att utröna den relativa effekten av att förändra fjäderstyvheten k_f måste torsionsstyvheten k_t bestämmas.



Figur 13 Schematisk illustration av den modellerade vagnen sedd ovanifrån. Hjul två och tre har avlastats och hjul ett och fyra pålastats till följd av att hjul ett har lyfts till en höjd h . Numreringen av hjulen framgår av bilden.

7.3 Bestämning av torsionsstyvheten

De ovan nämnda mätningar på Lgs har använts för att få fram torsionsstyvheten. Mätningarna visar att gränsvärdet enligt ORE B55 rp8 [3] med tom container överskrids med 38-56%.

I torsionsdiagram, se Appendix 1, för Lgs 151-0 har mätning genomförts med blockerade bärfjädrar. Den vagn som uppmättes vid detta tillfälle var en vagn som spårade ur i Norge den 2 juni 1994. Där framgår att:

$$\frac{d\Delta Q}{dz} = \frac{(32,5 - 10) \cdot 10^3}{(20 - 2) \cdot 10^{-3}} \text{ N/m} = 1,25 \cdot 10^6 \text{ N/m}.$$

Vad som eftersöks är torsionsstyvheten vilket är vridmomentets derivata med avseende på vridvinkeln:

$$k_t = \frac{dM}{d\phi} = \left\{ M = 2b_0 \cdot \Delta Q, \phi = \frac{z}{2b_0} \right\} = \frac{d(2b_0 \cdot \Delta Q)}{d\left(\frac{z}{2b_0}\right)} = (2b_0)^2 \frac{d\Delta Q}{dz} = 2,8125 \cdot 10^6 \text{ Nm/rad}.$$

7.4 Bestämning av hur hjulavlastningen förändras med fjäderstyvheten

För att kunna avgöra hur hjulavlastningen enligt ekvation (1) förändras vid övergång från trapets- till parabelfjäder måste de aktuella styvheter bestämmas. I ritningsunderlag (Appendix 2) kan man då finna att styvheten för parabelfjädern är $k_{para} = 782e3 \text{ N/m}$

och att styvheten för trapetsfjädern (Appendix 3) är $k_{tra} = 1724e3 \text{ N/m}$.

Ekvation (1) ger då:

$$\frac{\Delta Q(k_{para})}{\Delta Q(k_{tra})} = \frac{\frac{k_{para} k_t h}{(2b_0)^2 k_{para} + 4k_t}}{\frac{k_{tra} k_t h}{(2b_0)^2 k_{tra} + 4k_t}} = \frac{k_{para}}{k_{tra}} \cdot \frac{(2b_0)^2 k_{tra} + 4k_t}{(2b_0)^2 k_{para} + 4k_t}. \quad (2)$$

Med numeriska värden insatta får vi:

$$\frac{\Delta Q(k_{para})}{\Delta Q(k_{tra})} = 0,5275.$$

Hjulavlastningen kommer alltså att minska till drygt hälften av den ursprungliga vid byte från trapetsfjäder till parabelfjäder.

7.5 Kontroll av om provet genomförs i det linjära området

Enligt ORE B55 rp8 [3] ska skevningen vara ca 3,5 %. Det innebär att lyftet är 3,5 %*9,8=34,3 millimeter. Enligt Appendix 1 ligger vi därmed utanför det linjära området. Den effektiva torsionsstyvheten är alltså något större än vad som antagits. Om man betraktar ekvation (2) ser vi att om vi låter torsionsstyvheten gå mot oändligheten så blir:

$$\lim_{k_t \rightarrow \infty} \frac{\Delta Q(k_{para})}{\Delta Q(k_{tra})} = \frac{k_{para}}{k_{tra}} = \frac{782}{1724} = 0,4536.$$

Det betyder att de beräkningar som genomförts är något konservativa.

7.6 Slutsats avseende fjädertyp

Om man på vagn littera Lgs byter ut trapetsfjädern mot parabelfjäder är det förväntat att hjulavlastningskraven enligt ORE B55 rp 8 [3] innehålls, även i de fall vagnen är lastad med en tom container. Det förväntas att hjulavlastningen hamnar någonstans kring 70-85% av gränsvärdet enligt ORE B55 rp8 [3], jämfört med tidigare 135-160% av gränsvärdet. Dessa beräkningar är något konservativa varför det kan förväntas att värdet hamnar i den nedre delen av intervallet.

I detta fall blir troligen fallet lätt lastad container det värsta, dvs då containern är lastad precis så mycket att hela parabelfjädern griper in. Det blir dock inte värre än om man använder trapetsfjäder.

Resonemanget runt de ovan beskrivna beräkningarna går naturligtvis att appliceras på vagn littera Lgjs. Anledningen att littera Lgs valdes här för beräkningarna är att där fanns mätdata att tillgå och att den liknar de urspårade vagnarna.

8. Longitudinella tryckkrafter

Hur longitudinella tryckkrafter eventuellt kan sänkas vid rangering/backning diskuteras överhuvudtaget inte i denna rapport.

8.1 Urspårningsmekanismer vid höga tryckkrafter

Urspårningsmekanismerna vid höga tryckkrafter har inte exakt klarlaggats inom ramen för denna utredning. Emellertid baserat på erfarenhet bedöms följande generellt gälla:

- Kraftsamverkan i buffertar vid höga tryck och i kurvgång kan orsaka urspårningar.
- Buffertreaktionskrafterna orsakar stora laterala och/eller vertikala krafter som gör att vagnen kan lyftas/rulla ur spår.
- Urspårningsmekanismerna är likartad både då vagnar bromsas ur och då de rangeras ur.
- De mest ogynnsamma krafter fås i dubbel växelkurva då buffertförskjutningarna är stora. Friktionskrafterna då buffertarna glider mot varandra vid kurvgång har då stor betydelse.
- I samband med att en vagn går ur bryts, åtminstone ibland, bromsledning mellan vagnarna, vilket leder till att nödbroms anbringas. Nödbromsning leder i sin tur troligen till ytterligare urspårningar.

8.2 Allmän diskussion avseende vagnars urspårningskänslighet med avseende longitudinella tryckkrafter

Problemet med urspårning av lätta tvåaxliga vagnar i (växel)kurva har analyserats av bland annat ERRI (European Rail Research Institute) och resultaten har redovisats i ett antal rapporter. Dessa rapporter har legat till grund för vissa UIC-normer.

Låg vagnsvikt, kort hjulbas och stora överhäng ökar urspårningskänsligheten, rimligen därför att sådana vagnar klarar lägre laterala och vertikala krafter men också därför att dessa får stora relativa buffertförskjutningar vid kurvgång. Samtliga godsvagnar som finns kvar som trafikvagnar hos CargoNet och Green Cargo uppfyller gällande UIC-normer och RIV-föreskrifter med avseende på vagnsvikt, hjulbas och överhäng. Lägsta tara, vagnens egenvikt, för en tvåaxlig vagn är 11,5 ton och motsvarande för en boggivagn är 16 ton [5].

Hög friktion mellan buffertar anses ge ökad urspårningskänslighet – smorda buffertskivor är mer fördelaktiga. Bakgrunden till detta är att smörjning minskar de (laterala) krafter som glidningen, som sker mellan buffertarna vid kurvgång, orsakar. Nackdelen är att detta samtidigt ökar buffertförskjutningen. Här bör dock nämnas att buffertskivorna som används idag är dimensionerade för att under inga omständigheter kunna gå om lott. Hårdheten i buffertskivorna (C 60) är fastställd så att de även utan smörjning, inte skall skära ihop med en förhöjd friktion som följd. Merparten av Green Cargos vagnpark är dessutom utrustade med gashydrauliska buffertar som ger ett lågt statiskt motstånd. Detta innebär en stor fördel vid kurvgång eftersom de interna krafterna i buffertarna sänks. Här kan också nämnas att Green Cargo dagligen kör systemtåg med tågvikten 2800-3000 ton, utan problem med dessa buffertar.

Buffertar med stora krökningsradier, 2500/2750 millimeter (föreskrivet på nya vagnar efter 1994) uppges ge minskad urspårningskänslighet. Buffertbredden skall naturligtvis vara tillräcklig.

8.3 Tryckkrafter vid bromsning

Problem med urspårningar i snäva kurvor i samband med bromsning av långa/tunga tåg har analyserats bland annat av ERRI, DB och SBB. Problematiken har dessutom aktualiserats av olika förvaltningars önskan att köra långa tåg med radiostyrda mittlok. Även SJ har studerat de

krafter som uppkommer vid bromsning i samband med projekt *långa tåg* (numera benämnt *radiostyrning i tåg*). Såväl simuleringar som fullskaleprov genomfördes.

Det verkar råda enighet om att tåg, innehållande tvåaxliga tomma vagnar, med tågvikter över 600 ton bör framföras i bromsläge G eller P det vill säga loket skall ha bromsläge G. Det verkar också råda enighet om att det för tågvikter överstigande 1200 – 1600 ton är ändamålsenligt att framföra tågen i bromsläge LL (Lange Lokomotiv) det vill säga att förutom loket så läggs även de fem första vagnarna i bromsläge G. Bäst ur tryckkraftsynpunkt är naturligtvis att framföra tågen i sin helhet i bromsläge G.

Ovanstående åtgärder medför reell minskning av de tryckkrafter som uppstår i tåg vid (nöd)bromsning. Tyvärr medför bromsläge LL respektive G reducerade bromsprestanda vad gäller stoppträcka och följaktligen måste framföringshastigheten sänkas i motsvarande grad.

8.4 Slutsatser angående longitudinella tryckkrafter

Följande sätt att minska risken för urspårningar av lätta vagnar har identifierats:

- Minska tryckkrafterna i tågen.
 - Kan påverkas genom ökad utbildning av förare.
 - Kan åstadkommas genom att köra långa/tunga tåg i annat bromsläge än P.
- Öka vagnarnas tålighet mot tryckkrafter.
- Ändra tågsammansättningen så att de känsliga vagnarna ej utsätts för höga tryckkrafter. Skulle dessutom påverkas i någon mån genom ökad utbildning av tågbildningspersonal. I extremfallet skulle tomma vagnar kunna placeras sist. Emellertid finns det idag inga restriktioner från UIC rörande tågsammansättning.

8.5 Rekommendationer

Åtgärder som skulle kunna vidtagas omedelbart och därför rekommenderas är:

- att för heterogent sammansatta tåg (vagnslasttåg) med tågvikter över 600 ton bör loket och de första vagnarna framföras i bromsläge G.
- att förare informeras ytterligare om problemsambanden.

9. Gångdynamiska simuleringar

9.1 Historik

Det program som används i simuleringarna är Gensys. Gensys är ett generellt program för studier av mekaniska systems dynamik i allmänhet och järnvägsfordon i synnerhet. Programmet används i Norden bland annat av Bombardier i Sverige, DSB, av olika högskolor och universitet samt av TrainTech.

Gensys har deltagit i valideringsprocedurer, så kallade benchmarktester, och resultaten har varit goda. Bland annat deltog GENSYS i de så kallade Manchester benchmarktesterna [4]. För ytterligare information rörande programmet hänvisas till Gensys hemsida (<http://home.swipnet.se/gensys/>).

9.2 Simuleringsmodell

9.2.1 Allmän information

En simuleringsmodell har byggts upp i GENSYS. Simulering har skett med ett tåg bestående av fem vagnar: den studerade vagnen Lgjns-w 831 i mitten, två stycken enklare fordonsmodeller framför och bakom samt två stycken mycket enkla fordon (dummies) i vardera ände. Anledningen är att ha en modell som kan ta hänsyn till längdkrafter i tåget och friktionskrafter i buffertar. Syftet har också varit att ha en mer noggrann modellering ju närmare den studerade vagnen (Lgjns-w 831) man kommer.

För simuleringarna har samma spårfel, spårmodell och hjul/räl-friktion använts för alla fordon.

Den första vagnen har haft tvångsstyrd hastighet, vilken presenteras som tågets hastighet, se Figur 14. De övriga vagnarna har ej haft styrd hastighet men varit kopplade till varandra med olika former av koppel och buffertar.

Simuleringen har utförts i tidsplanet. För att undvika starttransienter har ett flertal jämviktslösningar tagits fram, vilka använts som begynnelsevillkor. Skillnaden mellan de olika startvillkoren är olika höga kompressionskrafter i tåget. Eftersom man studerar ett avsnitt där simuleringen hunnit löpa en sträcka är startvillkoren mindre viktiga.

Simuleringen har inriktat sig på den första olyckan, Fetsund I.

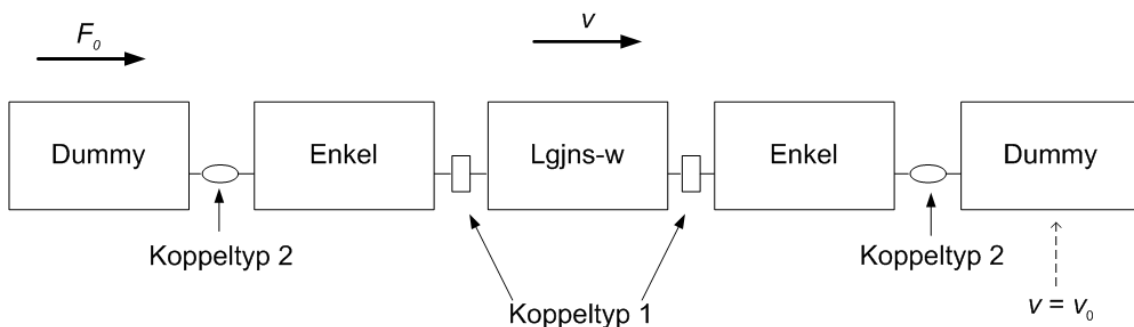
9.2.2 Definitioner

I rapporten används en del förkortningar på storheter. De viktigaste definieras enligt nedanstående tabell:

Q_{ij}	Vertikal spårkraft. Index i är axelnummer, j är 1 för vänster sida och 2 för höger sida. Riktning definieras enligt Figur 11.
Y_{ij}	Lateral spårkraft. Index i är axelnummer, j är 1 för vänster sida och 2 för höger sida. Då hjulet pressas mot rälarna är Y_{ij} positiv. Riktningen är alltså omvänd mellan höger och vänster sida. Se även Figur 11.

9.2.3 Tågsammansättning

Tåget har i de numeriska simuleringarna satts samman enligt Figur 14.



Figur 14 Tågets sammansättning i de numeriska simuleringarna. Den mittersta vagnen är den studerade Lgjns-w 831.

Vagnsvikt, längd över buffertar och hjulbas för de enstaka vagnarna har lagts in i simuleringarna. Indata till simuleringarna har erhållits dels från ”optak til togförer” och dels från Green Cargos hemsida (<http://www2.sjgods.sj.se/godsvagnar/>).

Vagnsnummer	Typ	Vagnsvikt	Hjulbas	Längd över buffertar
9	Dummy	24000 kg	-	17,1 m
10	Enkel	17000 kg	10 m	17,1 m
11	Lgjs-w 831	24000 kg	10 m	17,1 m
12	Enkel	15000 kg	9 m	14,34 m
13	Dummy	31000 kg	-	14 m

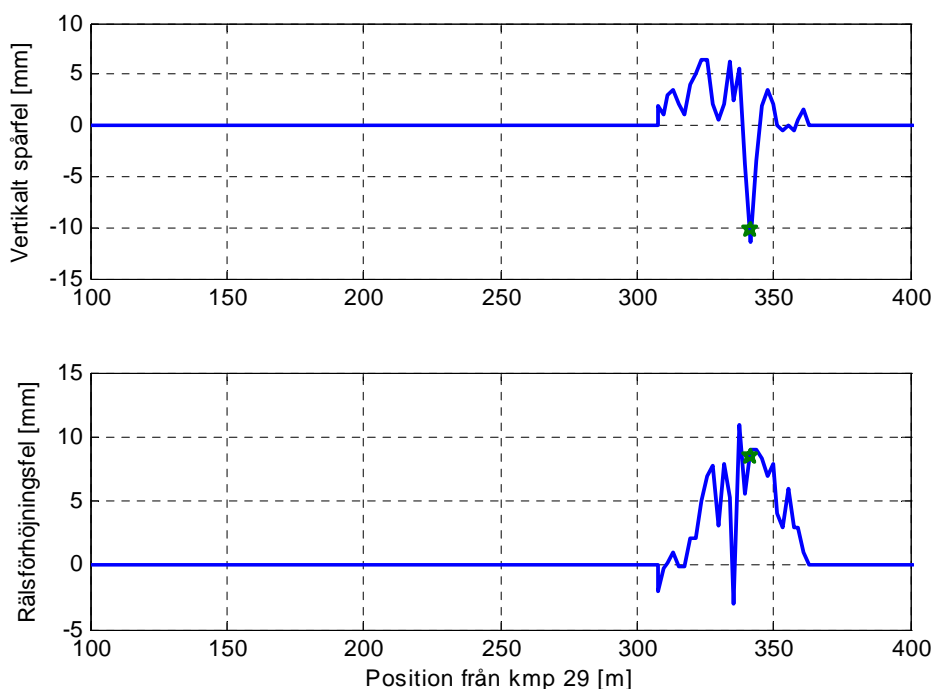
Som nämnts i avsnitt 9.2.1 har hastigheten V_0 för det första fordonet varit konstant under simuleringarna. (Hastigheten har dock varierats från simulering till simulering.)

På det sista fordonet i tåget, av vagnstyp ”dummy”, har en längdkraft F_0 lagts in vilken varit konstant under de enstaka simuleringarna. En positiv kraft innebär att tåget trycks ihop.

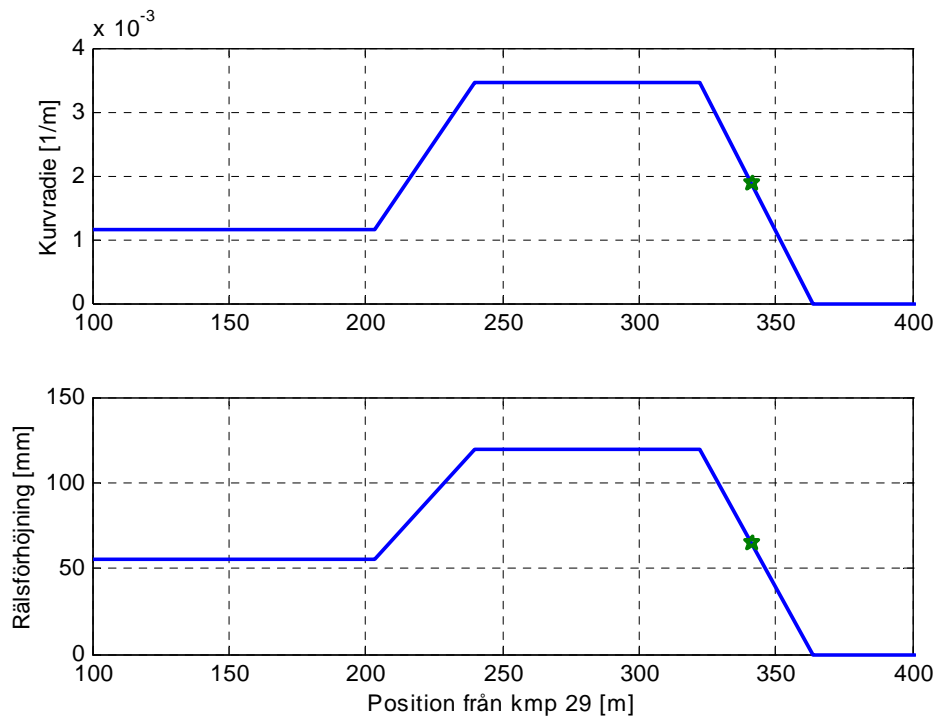
9.2.4 Spårets egenskaper

I simuleringarna har spåret modellerats i enlighet med det som beskrivs i kapitel 1.

Endast det vertikala spårfelet har tagits med i simuleringarna. Data kommer från mätning som utfördes den 26 juli av personal från Jernbaneverket.



Figur 15 Det vertikala spårfelet. Spårvidd och lateralläge är satta till ideala spår lägen. Stjärnan markerar urspårningspunkten.



Figur 16 Den ideala spårgeometrin enligt Löfteskjemat. Stjärnan markerar urspårningspunkten.

Spårets dynamiska egenskaper har modellerats med hjälp av en medföljande massa, rörlig i lateral led. Den medföljande spårbiten har varit förbunden med omvärlden med en linjär fjäder och linjärt viskös dämpare. Massan har varit 1000 kg, fjäderkonstanten 30 MN/m och dämpkonstanten 175 kNs/m.

9.2.5 Modellering av Lgjns-w 831

För det i Fetsund urspårande fordonet, Lgjns-w 831, har en modell byggts upp som bygger på en vid KTH utvecklad löpverksmodell [27]. Parametrar till löpverket (friktionskrafter och styvheter) har skattats dels med hjälp av mätningar och dels med ritningsunderlag enligt Appendix 2. Indata till simuleringarna för det urspårade fordonet framgår av Tabell 5. Denna tabell avser endast vagnskroppen – lasten modelleras som en separat kropp.

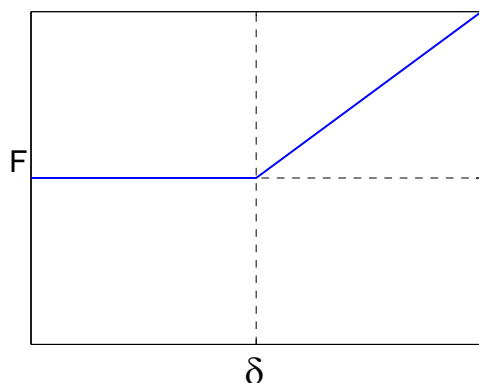
Tabell 5 Indata till fordonsmodellen som har använts i de numeriska simuleringarna.

Egenskap	Värde
Hjulbas	10 m
Längd över buffertar	17,1 m
Girtröghetsmoment	205e3 kgm ²
Rollröghetsmoment	12e3 kgm ²
Nickröghetsmoment	199e3 kgm ²
Hjul/rälprofil	S1002/UIC60 1:30
Vagnsvikt olastad inklusive hjulpar	12500 kg

Tyngdpunkt	Placerad ovanför geometriska centrat, 1,03 meter över rälsöverkant.
------------	---

Vagnen har modellerats som stel – detta stämmer inte när vagnen är tom, men för en containerförsedd vagn är detta en god approximation så länge containern har kontakt med vagnen och så länge bärfjädrarna inte är blockerade.

Lasten har modellerats som stel kropp med tröghetsmoment och tyngdpunkt motsvarande en homogen kropp i form av ett rätblock. Lasten har i lateral och longitudinal led varit förbunden med linjära fjädrar till vagnskorgen. I vertikal led har olinjära fjädrar använts som motsvarar ett ensidigt glapp, se Figur 17.



Figur 17 Last/ deformations-samband för ett ensidigt glapp. Lutningen för den högra delen av kurvan motsvarar fjäderkonstanten.

Lastens egenskaper har valts enligt Tabell 6.

Tabell 6 Indata till Lgjns-vagnens last som har använts i de numeriska simuleringarna.

<i>Egenskap</i>	<i>Värde</i>
Längd	15 m
Höjd	2 m
Bredd	4 m
Tyngdpunktsläge	Ovanför geometriska centrum, 2,175 m över rälsöverkant.
Massa	Beroende på simulering

En modifierad variant av den löpverksmodell som anges i [27] har använts. I huvudsak är fjädringen uppbyggd av en fjäderdel, en friktionsdel och en viskös del i varje riktning x, y och z. Komponenterna verkar oberoende av varandra. Infästningspunkten är axelboxen, 1 meter från fordonscentrum i lateral led.

Tabell 7 Fjäderkaraktistik.

	Fjäderdel (<i>k</i>)	Friktionsdel (<i>k_f</i>)	Viskös del (<i>c</i>)
Vertikal (en)	Olinjär, enligt	Hård friktion i serie med styvhet.	-

per sida)	Appendix 2, förstyvad med faktor enligt parameterstudie.	Glidsträcka satt till 2 mm, friktionskraft till 2,5-10 kN beroende på axellast 6-22,5 ton.	
Lateral (en per sida)	Linjär, ökande med axellasten.	Mjuk friktion (coloumbfriktion). Glidsträcka x_2 motsvarar sträcka för uppbyggnad av halva maximala friktionskraften: satt till 1,1-4 mm beroende på axellast 6-22,5 ton. Maximala friktionskraften satt till 1-5 kN beroende på axellast 6-22,5 ton	Linjär viskös dämpare med seriestyvhet. Dämpkonstant $1e3$ Ns/m. Brytfrekvens k/c motsvarande 5 Hz
Longitudinell (en per sida)	Linjär, ökande med axellasten. Varierad i parameterstudie.	Mjuk friktion (coloumbfriktion). Glidsträcka x_2 motsvarar uppbyggnad av halva friktionskraften: satt till 1,75 mm Friktionskraften satt till 500-2000 N beroende på axellast 6-22,5 ton	Linjär viskös dämpare med seriestyvhet. Dämpkonstant $1e3$ Ns/m. Brytfrekvens k/c motsvarande 5 Hz

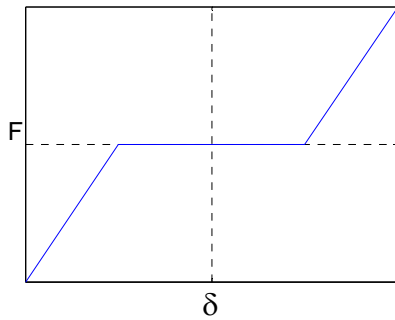
Med brytfrekvens (avseende dämpare) menas den karaktäristiska frekvens där dämpegenskaperna avtar. En dämpare försedd med serieflexibilitet kommer inte att dämpa högfrekventa rörelser i samma utsträckning som lågfrekventa. Dämparen fungerar då som en fjäder. För en enkel modell som använts här bestäms brytfrekvensen entydigt av kvoten mellan fjäderstyvhet och dämpkonstant.

Friktionsbeteendet modelleras här med två olika modeller: här kallade hård respektive mjuk friktion.

Modellen med hård friktion består av en linjär fjäder i serie med ett friktionselement som glider vid krafter som överstiger ett visst värde. Denna karaktäriseras av utlösningskraften och fjäderstyvheten. Fjäderstyvheten kan med fördel karaktäriseras av en sträcka som motsvarar den förskjutning i fjädern som ger upphov till en kraft lika stor som utlösningskraften. Nackdelen med denna modell är att dämpning sker endast vid stora rörelser (i förhållande till glidsträckan).

Modellen med mjuk friktion har ett friktionsbeteende som byggs upp gradvis under rörelsen. Den maximala kraften och glidsträckan, definierad som den glidsträcka som bygger upp hälften av den maximala kraften, parameteriserar elementet. Denna friktionsmodell har en dämpande effekt även för små rörelser till skillnad mot den tidigare nämnda modellen med hård friktion. Se manualen för GENSYS för ytterligare detaljer avseende kopplingselementet *kfkr* (http://home.swipnet.se/gensys/doc_html/).

Axeln är försedd med laterala och longitudinella primärstopp. Dessa modelleras som olinjära fjädrar enligt utseende i Figur 18.



Figur 18 Kraft/förskjutnings-diagram för olinjär fjäder beskrivande ett tvåsidigt glapp – denna modell används här för att beskriva primärstopp.

Vid stora utslag aktiveras stoppen. Därför har de ej särskilt stor betydelse under normala förhållanden. Stoppen karaktäriseras av storleken på glappet samt lutningen på fjäderkurvans yttre delar.

9.2.6 Modellering av vagnstyp "Enkel"

De vagnar som omger det urspårade fordonet har simulerats med en något enklare fordonmodell. Denna består av en stel vagnskropp och två axlar.

Tabell 8 Indata till fordonmodellen som har använts i de numeriska simuleringarna.

Egenskap	Värde vagn 10	Värde vagn 12
Hjulbas	10 m	9 m
Längd över buffertar	17,1 m	14,34 m
Girtröghetsmoment	303e3 kgm ²	180 kgm ²
Rolltröghetsmoment	18e3 kgm ²	15e3 kgm ²
Nicktröghetsmoment	295e3 kgm ²	173e3 kgm ²
Hjul/rälprofil	S1002/UIC60 1:30	S1002/UIC60 1:30
Total massa	17000 kg	15000 kg
Tyngdpunkt	Placerad ovanför geometriska centrat, 1,03 m över rälsöverkant.	Placerad ovanför geometriska centrat, 1,03 m över rälsöverkant.

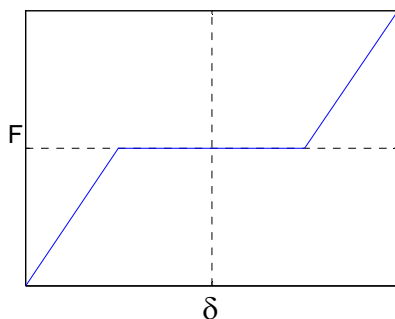
Primärfjädringen har modellerats enligt tabellen nedan. En mer utförlig förklaring av de enskilda komponenterna ges i avsnitt 9.2.5.

Tabell 9 Fjäderkaraktistik.

	Fjäderdel (<i>k</i>)	Friktionsdel (<i>k_f</i>)	Viskös del (<i>c</i>)
Vertikal (en per sida)	Olinjär, enligt Appendix 2	-	Linjärt viskös dämpare med seriestyvhet. Dämpkonstant 100e3 Ns/m. Brytfrekvens <i>k/c</i> motsvarande

			5 Hz.
Lateral (en per sida)	Linjär, ökande med axellasten.	-	Linjärt viskös dämpare med seriestyvhet. Dämpkonstant 200×10^3 Ns/m. Brytfrekvens k/c motsvarande 5 Hz
Longitudinell (en per sida)	Linjär, ökande med axellasten.	-	Linjärt viskös dämpare med seriestyvhet. Dämpkonstant 100×10^3 Ns/m. Brytfrekvens k/c motsvarande 5 Hz

Axeln är försedd med laterala och longitudinella primärstopp. Dessa modelleras som olinjära fjädrar med utseende enligt Figur 19 nedan.



Figur 19 Kraft/förskjutnings-diagram för olinjär fjäder beskrivande ett tvåsidigt glapp – denna modell används här för att beskriva primärstopp.

Vid onormalt stora utslag aktiveras stoppen. Därför har de ej särskilt stor betydelse under normala förhållanden. Stoppen karaktäriseras av storleken på glappet samt lutningen på fjäderkurvans yttre delar.

9.2.7 Modellering av vagnstyp "Dummy"

Vagnstypen dummy har bestått av en massa med endast en frihetsgrad, längdkoordinaten utefter spåret. I övrigt har rörelsen varit styrd efter ett spårföljande koordinatsystem som i längs- och sidled varit placerat i vagnens geometriska centrum.

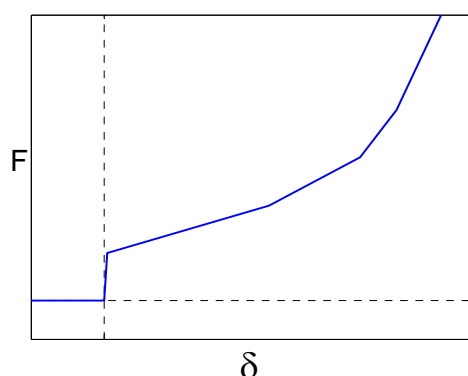
För vagnar av denna typ karaktäriseras beteendet enbart av massan och längden, vilka framgår av tabell i avsnitt 9.2.3.

9.2.8 Vagnskopplingar – typ 1

Lgjnsvagnen och dess grannar har kopplats till varandra med koppling typ 1. Denna består av buffertar och koppel som i sin tur modelleras av flera underkomponenter. Buffertarna har i modellen satts med 1,5 meters avstånd i sidled.

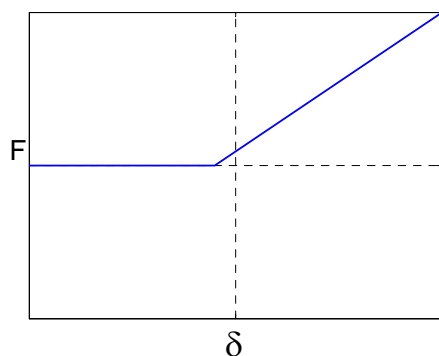
Buffertarna består av två delar: en fjäder och en friktionsdel. Fjädern har olinjär progressiv karaktäristik, motsvarande de longitudinella krafter då buffertarna komprimeras. Värden är valda för att motsvara två buffertar som går emot varandra. Den andra delen består av friktionsdel, verkande i ett vertikalt plan vinkelrätt mot längdriktningen. Buffertarnas tryckkraft används tillsammans med buffertfriktionskoefficienten för att bestämma friktionskrafterna

mellan buffertarna. Friktionen modelleras med en kloss rörlig på ett plan, styrd genom linjära fjädrar samt tvådimensionell friktion verkande i glidplanet.



Figur 20 Buffertens longitudinella kraft/förskjutningsdiagram, principskiss. För negativa förskjutningar är kraften noll (buffertarna går ifrån). Att lyfta bufferten ur sitt ändläge ger en ökning av kraften för små förskjutningar. För stora förskjutningar ökar kraften mer än proportionellt.

Kopplet består av två delar: en olinjär fjäder och en linjärt viskös dämpare. Kopplet har en viss förspänning i normalläget, 10 kN. Ytterligare tryckkrafter i tåget har inte tagits hänsyn till vid skapandet av elementet, detta gör att fordonen i modellen ej automatiskt befinner sig i (longitudinellt) jämviktsläge vid start. För att undvika starttransienter har en stationär jämviktslösning använts som begynnelsevärden.



Figur 21 Kraft/förskjutnings-diagram för koppel.

Den viskösa delen av kopplingen har bestått av en linjärt viskös dämpare med dämpkonstant 100 kNs/m. Samtliga interna Gensys-beräkningar för kopplingen har skett i ett koordinatsystem placerat vid samma längdkoordinat som kopplet. Krafterna har verkat i längsriktningen i detta koordinatsystem.

9.2.9 Vagnskopplingar – typ 2

Vagnarna som modelleras med typen ”dummy ” och ”enkel” har kopplats till varandra med en något enklare koppling. Den består av en linjär fjäder parallellt med en linjärt viskös dämpare. Båda ger upphov till krafter endast i längsriktningen. Fjäders styvhet 10 MN/m och dämparen har styvhet 100 kNs/m.

9.3 Simuleringsstrategi

Simuleringarna har skett i flera omgångar. I ett första steg har modellen byggts upp och verifierats. Därefter har parameterstudier gjorts för en variabel i taget för att verifiera funktionen hos de studerade parametrarna. Därefter har en omfattande känslighetsanalys genomförts.

Eftersom modelleringen av löpverk som har friktionsbeteende är relativt osäker och små ändringar i parametrar kan få stor betydelse är det lämpligt att få en viss spridning på indata. Detta i kontrast till att variera en parameter i taget. Simuleringsresultatet utgörs då av statistiska mått på ett flertal simuleringar snarare än resultat från de enstaka simuleringarna. Detta beskrivs närmare i avsnitt 9.4.

9.3.1 Studerade utdata

För att kvantifiera urspårningsrisken har flänsklätringskvoten Y/Q studerats på Lgjnsvagnen. Y/Q bildas genom att Y och Q lågpåpassfilteras med 20 Hz och sedan kvotbildas. Därefter filteras kvoten med ett löpande medelvärde över 2 meter. Utvärdering av signalerna har skett endast över ett visst avsnitt, kmp 29+280 till kmp 29+380. Det resultat som valts att presenteras är det maximala värdet av Y/Q för alla hjul i det utvalda avsnittet.

9.4 Stokastiska metoder

För att effektivt genomföra en känslighetsanalys på ett problem med många variabler kan man med stor fördel använda stokastiska metoder. För den intresserade följer här en introduktion till stokastiska metoder i allmänhet och till de två mest använda, Monte Carlo-metoden och perturbationsmetoden, i synnerhet.

Slumpmässighet kan definieras som bristen på mönster eller regelbundenhet. Orsaker till de urspårningsmekanismer som studeras i denna undersökning kan till viss del beskrivas som slumpmässiga till sin natur.

Ett deterministiskt eller stokastiskt problem kan formuleras som

$$\Lambda u = f$$

där Λ är en operator, u är responsen och f är exciteringen. Många forskare, se till exempel [24], [25] och [26], har studerat ekvationen ovan med en deterministisk operator och en stokastisk excitering. När operatoren styrs av stokastiska parametrar blir ekvationen signifikant mycket svårare att lösa. Enligt vad författarna till denna rapport anser, existerar det endast approximativa lösningar till ekvationen ovan när operatoren styrs av stokastiska parametrar. De två mest använda och spridda metoderna, Monte Carlo-metoden och perturbationsmetoden, för att lösa denna ekvation beskrivs lite mer utförligt nedan, se avsnitt 9.4.1 och 9.4.2.

I denna studie har indata till de numeriska simuleringarna genererats med Latinsk hyperkub med korrelationskontroll för att undersöka inverkan av utvalda parametrar. Två mycket stora fördelar med denna metod är att den dels kan användas i alla typer av simuleringar och dels att det inte är några restriktioner på variationen och fördelning på de stokastiska parametrarna. Metoden med Latinsk hyperkub är en förfining av standard Monte Carlo-metoden och den introducerades 1979 av McKay, Beckman och Conover [17].

9.4.1 Introduktion till Latinsk hyperkub med korrelationskontroll

För att minska antalet simuleringar har man under årens lopp utvecklat ett antal sofistikerade metoder för att simulera stokastiska processer. Den kanske mest kända och spridda metoden är Monte Carlo-metoden, om vilken det har skrivits ett flertal böcker till exempel av Hammersley

och Handscomb [11], Rubinstein [12], Davis och Rabinowitz [13], Fishman [14] och Dubi [15]. För att kort sammanfatta Monte Carlo-metoden går den ut på att man väljer en uppsättning av indata, utför en deterministisk analys och beräknar den utdata man söker. Detta numeriska experiment repeteras n gånger, med en ny uppsättning av indata varje gång, och den sökta statistiken beräknas sedan från den samlade utdatan. Det första kända användandet av Monte Carlo-metoden som verktyg i forskning skedde vid framtagandet av atombomben under andra världskriget, det så kallade Manhattan-projektet. Far till metoden anses den mycket kända matematikern John von Neumann vara.

För att minska datortiden har ett antal modifierade Monte Carlo-metoder föreslagits i litteraturen de senaste årtionden. En mycket detaljerad sammanställning finns i Olssons uppsats [16]. I denna undersökning har vi valt att använda Latinsk hyperkub-sampling med korrelationskontroll, mer om denna metod finns i [17], [18] och [19]. Här nedan följer en kort introduktion om de bakomliggande teorierna till denna metod.

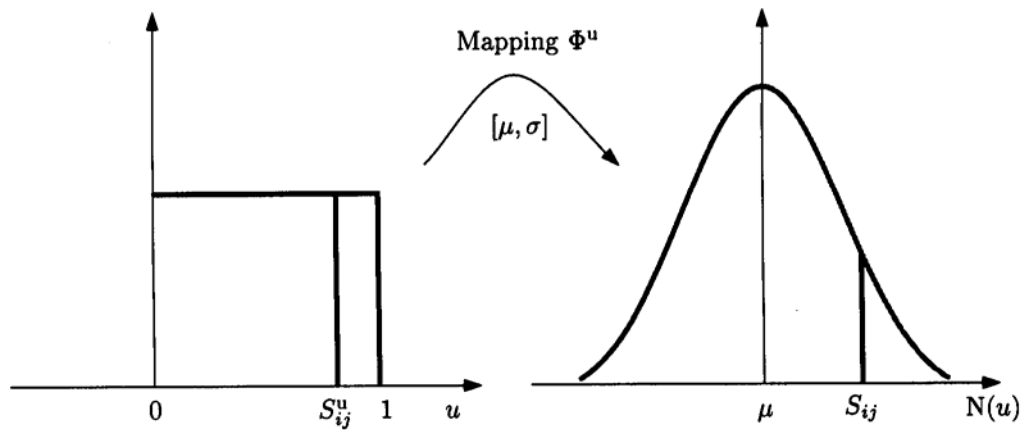
I sampling med Latinsk hyperkubs metoden för att generera indata till simuleringar så startar man med att bestämma en permutationsmatris \mathbf{P} . Storleken på permutationsmatris är $n \times N$, där n är antalet nödvändiga simuleringar och N är antalet stokastiska parametrar. Varje kolumn i \mathbf{P} består av en stokastisk permutation av heltal från 1 till n . En annan matris \mathbf{U} bestående av oberoende stokastiska tal med en likformigfördelning (0,1) skapas också. Med hjälp av dessa två matriser så skapas samplingsmatrisen \mathbf{S} enligt

$$S_{ij} = \Phi^u(S_{ij}^u) = \Phi^u\left(\frac{P_{ij} - U_{ij}}{n}\right) \quad \text{där} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, N \end{array}$$

där Φ^u representerar mappning från likformigfördelning till valfri fördelning, till exempel Gaussikfördelning (normalfördelning) som har använts i simuleringarna i denna studie. En schematisk illustration av hur en sådan mappning går till visas i Figur 22. I denna studie beräknas ett element i samplingsmatrisen \mathbf{S} enligt

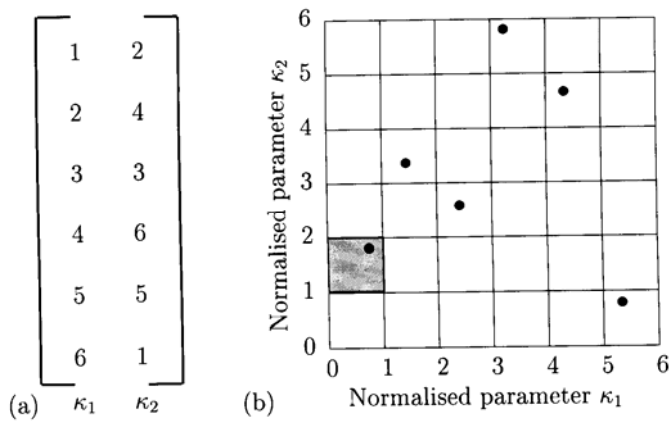
$$S_{ij} = \mu + \sqrt{2}\sigma \operatorname{erf}^{-1}(z) \quad \text{med} \quad z = 2 \frac{P_{ij} - U_{ij}}{n} - 1.$$

I ekvationen ovan är μ lika med medelvärdet för den aktuella stokastiska parametern och σ lika med standardavvikelsen. Här är erf^{-1} lika med inversen på errorfunktionen som till exempel är definierad i Abramowitz och Stegun [20]. Nu innehåller varje rad i samplingsmatrisen indatavärden för en deterministisk simulering.

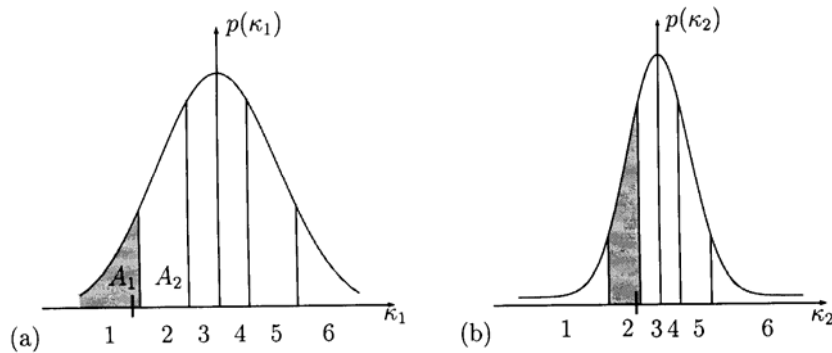


Figur 22 Mappning från likformigfördelning till normalfördelning.

Ett specialfall av Latinsk hyperkub med enbart två stokastiska parametrar, κ_1 och κ_2 , visas i Figur 23. I Figur 24 visas indata till första simuleringen enligt schemat som visas i Figur 23. Positionen av det lilla strecket på abscissan i Figur 24 sammanfaller med placering av punkten i det gråare området i Figur 23(b).

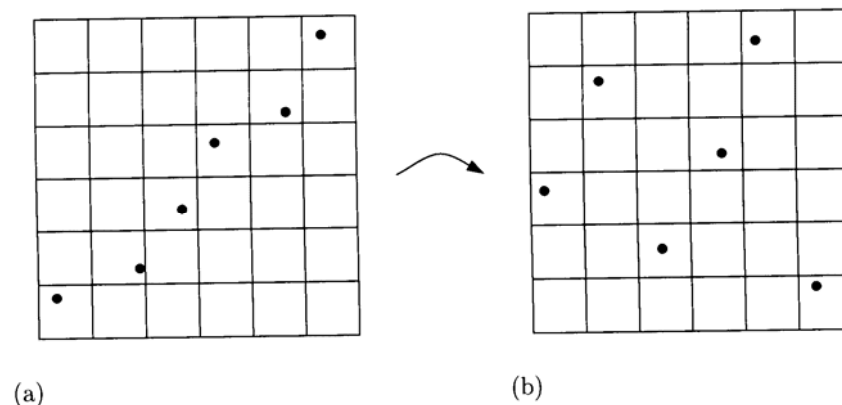


Figur 23 Latinsk hyperkub med två parametrar, κ_1 och κ_2 , och sex realiseringar, alltså $N=2$ och $n=6$. Permutationsmatrisen P illustreras i (a) och i (b) visas realiseringarna.



Figur 24 Exempel på indata till första simuleringen i enlighet med schemat som visas i Figur 23. I (a) och (b) visas sannolikhetsfunktionen för de två stokastiska parametrarna κ_1 och κ_2 . I detta exempel har båda parametrarna en normalfördelning. Observera att areorna under en sannolikhetsfunktion (i detta fall sex stycken) är lika för alla simuleringar, $A_1=A_2=\dots=A_6$.

När man använder samplingschema framtaget med Latinsk hyperkub finns det alltid en risk att man erhåller oönskad korrelation mellan de genererade värdena för de stokastiska parametrarna, detta illustreras i Figur 25(a). Därför har det i denna studie använts en metod som kraftigt reducerar denna oönskade korrelation genom att man modifierar permutationsmatrisen \mathbf{P} . Metoden kallas för *Latinsk hyperkub-sampling med korrelationskontroll* (ibland benämns den *ranked Cholesky*) och för mer information angående detta hänvisas till [19].



Figur 25 Exempel på effekten av korrelationsreduktion för två parametrar i ett samplingsplan (samplingschema).

Första steget i Latinsk hyperkub-sampling med korrelationskontroll är att man dividerar alla element i permutationsmatrisen \mathbf{P} med antalet simuleringar plus ett och mappar till en normalfördelning med medelvärde noll och varians ett, $\Psi_{(0,1)}$, enligt

$$R_{ij} = \Psi_{(0,1)}\left(\frac{P_{ij}}{n+1}\right)$$

Efter att ovan beskrivna operation är utförd så Cholesky-faktoriseras kovariansmatrisen av \mathbf{R} i enlighet med

$$\tilde{\mathbf{R}} = \text{Cov}(\mathbf{R})$$

$$\tilde{\mathbf{L}}\tilde{\mathbf{L}}^T = \tilde{\mathbf{R}}$$

där $\tilde{\mathbf{L}}$ är noll ovanför diagonalen. I tredje steget i Latinsk Hyberkub-sampling med korrelationskontroll så skapas en matris $\tilde{\mathbf{R}}$, vilken inte har någon korskovarians (kovariansen av denna matris är lika med en enhetsmatris), enligt

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(\tilde{\mathbf{L}}^{-1})^T.$$

Den modifierade permutationsmatrisen $\tilde{\mathbf{P}}$ bestäms nu genom storleksordningen på elementen i varje kolumn i \mathbf{R} . Elementen i $\tilde{\mathbf{P}}$ ersätts nu med elementen i den modifierade permutationsmatrisen $\tilde{\mathbf{P}}$ och elementen i samplingsmatrisen \mathbf{S} beräknas. Samplingsmatrisen kommer att innehålla mycket mindre oönskad korrelation. Detta illustreras i Figur 25(b).

Det finns några krav för att kunna använda Latinsk hyberkub-sampling med korrelationskontroll och ett avgörande är att kovariansmatrisen \mathbf{R} måste vara positivt definit. Således måste antal nödvändiga simuleringar n vara större än antalet stokastiska parametrar N . Ibland förekommer det att de stokastiska parametrarna är korrelerade till varandra. Detta kan behandlas med denna metod [19]. I denna rapport behandlas emellertid de stokastiska parametrarna som okorrelerade med varandra.

9.4.2 Introduktion till perturbationsmetoden

Den mesta använda och spridda tekniken, inom ingenjörskonsten, för att analysera stokastiska system är perturbationsmetoden [21]. Huvudanledning torde vara den matematiska enkelheten, detta trots att metoden inte garanterat ger en giltig lösning. Givet vissa villkor så Taylor-utvecklar man de involverade funktionerna runt deras respektive arbetsvärde. Lösning till hela problemet approximeras sedan med de första termerna i den ovan nämnda expansionen, vanligtvis så är två termer tillräckligt för att få acceptabla resultat. En mycket utförlig beskrivning av den bakomliggande teorin för perturbationsmetoder finns i [19].

Antagandet att det finns ett linjärt förhållande mellan karaktäristikan av den sökta responsen, i vårt fall till exempel flänsklätringskvoten, och de stokastiska parametrarna skapar basen för det som vanligtvis brukar kallas för första ordningens perturbationsmetod. Detta antagande kan naturligtvis vara ett ganska stor förenkling av verkligheten i många sammanhang. Man kan sammanfatta det med att giltigheten av förstaordningens perturbationsmetod är begränsad till när de stokastiska elementen enbart uppvisar små fluktuationer kring respektive medelvärde, då perturbationsmetoden ger en relativt god uppskattning av verkligheten [22]. En tumregel man brukar använda när man pratar om perturbationsmetoder är att variationen av den stokastiska parameter som har den största variationen inte skall överstiga 10% av medelvärdet av den aktuella parametern. En annan stor nackdel med metoden är att den inte utan väldigt mycket arbete erbjuder högre ordningens statistiska moment.

Fördelen med perturbations ansatsen är att den är snabb, genom att ganska få numeriska simuleringar måste utföras i jämförelse med andra stokastiska metoder, till exempel viktad integral metod, Neumannserie-utvecklingsmetod och stokastisk variabel-metod. En annan fördel är att metoden är enkel att använda om man har en fungerande modell.

För mer information angående andra stokastiska metoder och deras för- och nackdelar hänvisas till [21] och [23].

9.5 Utvärderingsmetoder

Simuleringarna kan ses som en funktion, ”en svart låda”, som givet värden på inparametrar returnerar en värdefunktion. Här kan värdefunktionen väljas till exempelvis till $\max(Y/Q)$ och inparametrarna hastighet, hjul/räl-friktion och massa. Då kan man skriva

$$Y/Q=f(v, \mu, m)$$

För enkelhetens skull används detta exempel fortsättningsvis. Sambanden och resonemangen gäller dock allmänt.

Ett antal simuleringar görs för olika uppsättningar av värden på v , μ och m . En statistisk bearbetning görs därefter på Y/Q för att finna ett samband mellan parametrarna och värdefunktionen. En enkel ansats är att välja ett linjärt samband:

$$Y/Q \approx a_0 + a_1 * v + a_2 * \mu + a_3 * m$$

Där konstanterna a_0, \dots, a_3 bestäms på något sätt. Ett sätt kan vara störningsräkning vilket innebär att varje parameter störs ett visst (vanligtvis litet) värde. För att bestämma n parametrar behövs då minst $n+1$ utvärderingar av funktionen f . Denna metod har en stor fördel i att den är enkel, men har andra nackdelar.

Man kan istället för att variera en parameter i taget variera alla parametrar samtidigt. Detta gör framtagandet av koefficienterna något svårare men fångar den osäkerhet som finns i parametervärdena. En stor fördel är att ett spridningen i resultat syns tydligare.

Man kan även tänka sig andra modeller än den som presenteras ovan, till exempel en något utökad variant:

$$Y/Q \approx a_0 + a_1 * v + a_2 * \mu + a_3 * m + \dots + a_4 * v * \mu + a_5 * v * m + a_6 * \mu * m$$

Problemet att bestämma konstanterna a_0, \dots, a_6 kvarstår dock.

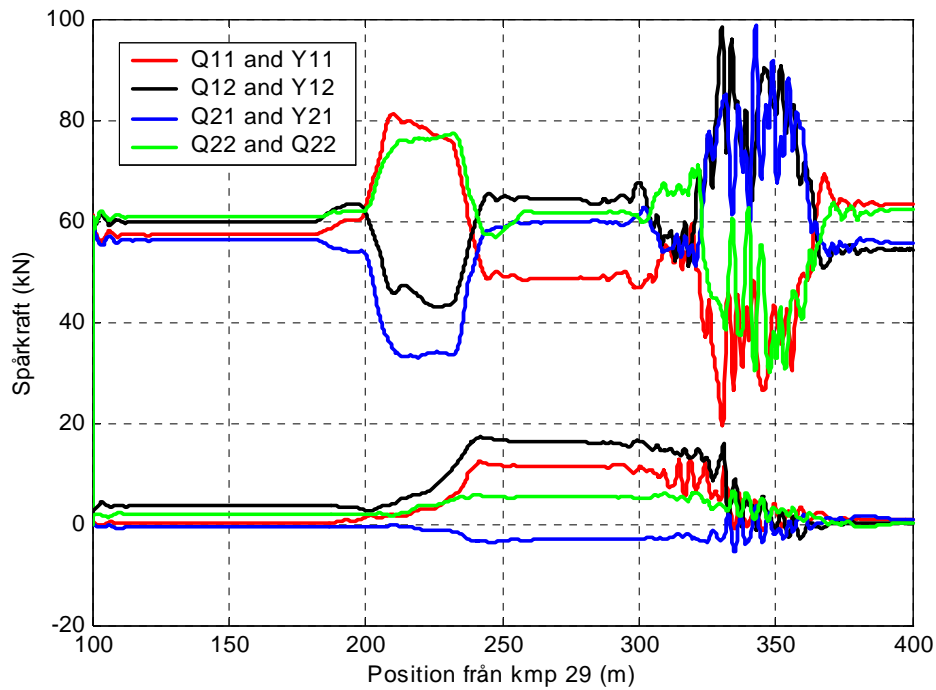
En mer utförlig beskrivning av perturbationsmetoden och dess för- och nackdelar presenteras i avsnitt 9.4.2.

9.6 Resultat från de gångdynamiska simuleringarna

Förutom de verifierande simuleringarna har 476 numeriska simuleringar utförts under parameterstudien.

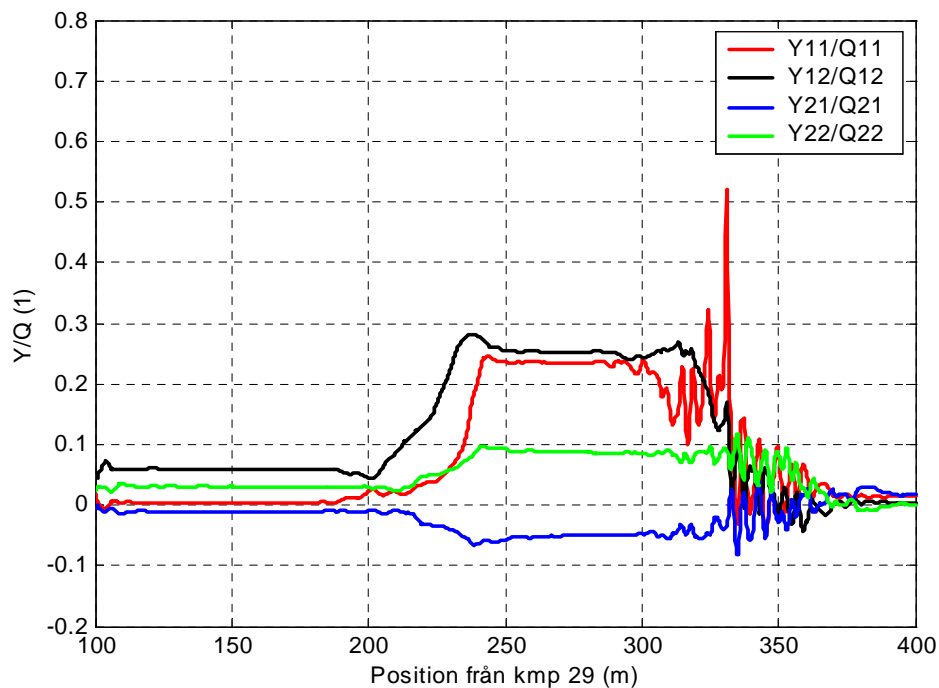
9.6.1 Nominella fallet

Vertikala och laterala spårkrafter för det nominella fallet visas i Figur 26. Alla parametrar har valts enligt avsnitt 9.2.



Figur 26 Spårkrafter för det nominella fallet. Vertikala krafter är de övre fyra kurvorna. De tillhörande laterala krafterna är de fyra undre kurvorna, färgade med samma färg.

För att åskådliggöra variationen av Y/Q presenteras det för det nominella fallet, se Figur 27.



Figur 27 Y/Q för de fyra hjulen för det nominella fallet. I denna figur har ej löpande medelvärdesbildning skett till skillnad mot normal beräkning av Y/Q .

9.6.2 Indata till parameterstudie

Tio parametrar har varierats i känslighetsanalysen. Dessa presenteras i Tabell 10. Parametrarna har valts normalfördelade i studien, vilket gör att de fullständigt beskrivs av sitt medelvärde och standardavvikelse, vilka framgår i tabellen. För att undvika orimliga värden på de stokastiska parametrarna, som till exempel negativ hastighet, negativ hjul/räl-friktion etcetera har samtliga parametrar försetts med min- och maxgräns. Om värdet på parametern hamnat utanför denna gräns har den satts till gränsvärdet. Detta påverkar den stokastiska fördelningen men med stort avstånd mellan medelvärde och gränsvärde mätt i standardavvikelse sker detta för en mycket liten del av populationen. För en normalfördelad stokastisk variabel gäller (för ett stort antal värden) till exempel att 95% av populationen ligger inom 1,96 standardavvikelse från medelvärdet.

Tabell 10 Följande parametrar har varierats i känslighetsanalysen.

<i>Parameter</i>	<i>Nominellt värde</i>	<i>Standardavvikelse</i>	<i>Minvärde</i>	<i>Maxvärde</i>	<i>Enhet</i>
Hastighet	40	10	15	80	km/h
Hjul/rälfriktion μ	0,35	0,1	0,05	0,6	-
Relativ vertikal spårfelsamplitud	1	0,2	0	2	-
Tågkompression	10	100	-250	250	kN
Relativ vertikalstyvhet primärfjädring	1	0,2	0,6	1,5	-
Buffertfriktion	0,2	0,08	0,02	0,6	-
Spårvidd	0	2	-5	8	mm
Longitudinellt glapp (+/-)	20	2	10	30	mm
Skevhet	0	30	-100	100	mm
Totalvikt vagn 11	24000	2000	16000	34000	kg
Multiplikationsfaktor vertikal friktionskraft i primärfjädring	1	0,25	0,01	5	-

Det longitudinella glappet avser avståndet i längdled axeln kan röra sig innan den går i stopp.

Skevheten är inlagd genom att primärfjädringen vid vänster framhjul har flyttats högre upp på ramverket. Ett positivt värde innebär alltså att vänster framhjul (och höger bakhjul) avlastas. Måttet avser den vertikala flyttningen av fjädern. Eftersom endast ett hörn justeras och det laterala avståndet på primärfjädringen är 1 m, kommer 1 mm förflyttning att motsvara en skevhet på 0,5 mrad. Då ramverket är mycket vekt i förhållande till en container kommer en container som sitter snett på sina tappar att bete sig på samma sätt som en förskjuten primärfjädring.

9.6.3 Resultat av parameterstudie

476 simuleringar har utförts i känslighetsanalysen med de 10 valda stokastiska parametrarna. En linjärregression har sedan gjorts på det erhållna resultatet. Före den linjära regressionen har ett sampel med $Y/Q=91$ tagits bort. Det näst högsta samplet har $Y/Q=1.69$ vilket syns i plottarna. Anledningen till att ta bort ett sampel är att en minstakvadratanpassning är känslig för enstaka sampel med mycket höga värden.

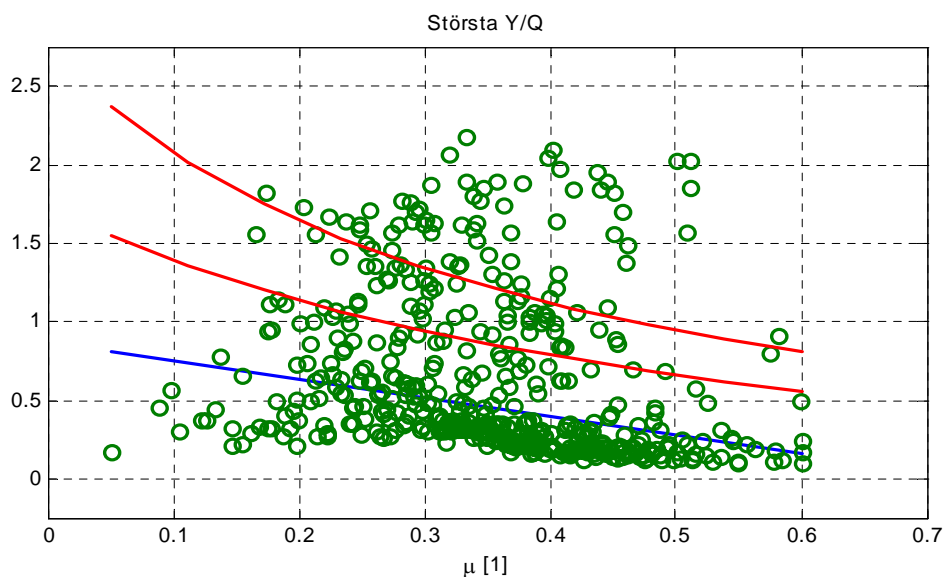
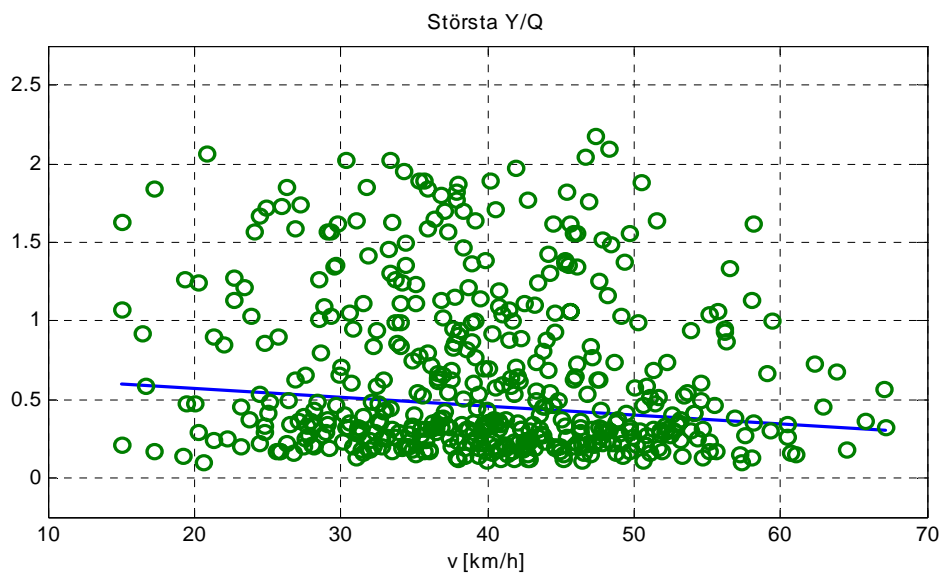
Resultatet av linjärregressionen presenteras som rätta linjer i de figurer som förevisas här, se Figur 28 till Figur 32. De runda cirklar som figurerna motsvarar ett sampel (ett simuleringsfall). Resultaten har endast plottats mot respektive parameter, ingen korrigering har gjorts.

För regressionen har ett 95%-igt konfidensintervall använts för att skatta osäkerheten i koefficienterna a_0, \dots, a_{10} . Detta förutsätter att följande antagande gäller: regressionen antar att målfunktionen kan skrivas som normalfördelat brus överlagrat på ett linjärt samband (avvikelsen från ett linjärt beroende på parametrarna är normalfördelat brus). I Tabell 11 framgår det hur osäker skattningen av parametrarna är. Det är dessa parametervärden som återspeglas i de rätta linjerna i resultatfigurerna.

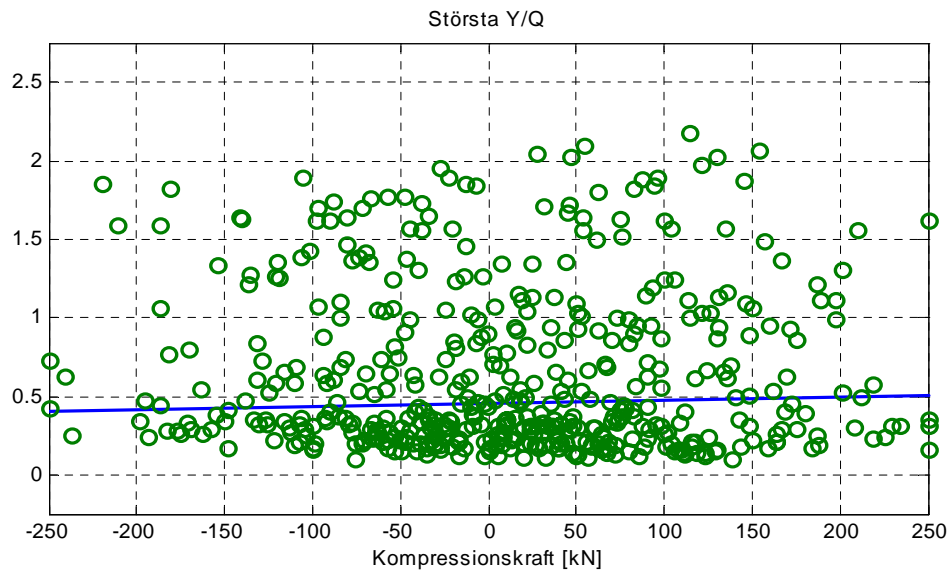
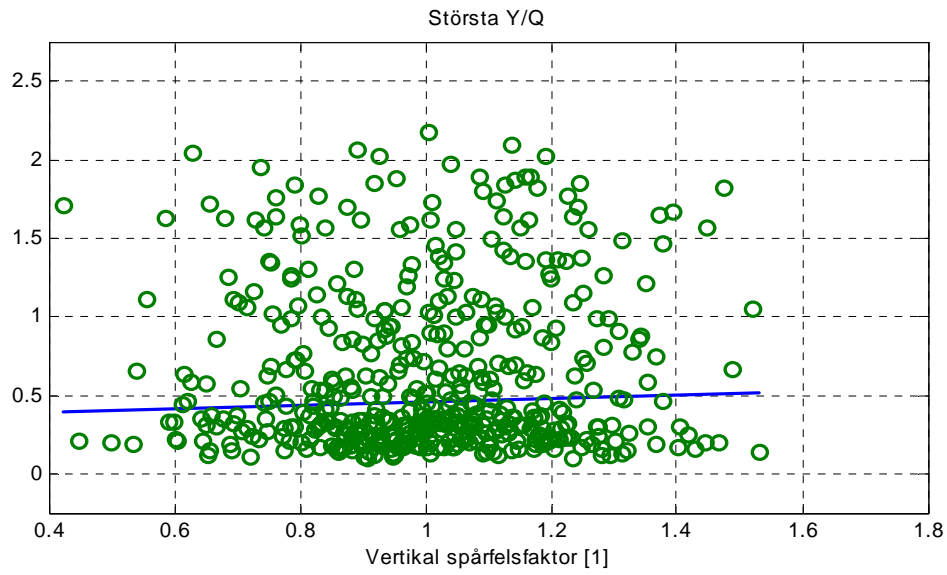
Regressionen har utförts med kommandot regress i programmet Matlab 6.5.

Tabell 11 Resultat från linjärregression för Y/Q . Ett sampel med $Y/Q=91$ har eliminerats. Av denna tabell framgår det hur osäker skattningen av parametrarna är. Det är dessa parametervärden som återspeglas i de rätta linjerna i resultatfigurerna.

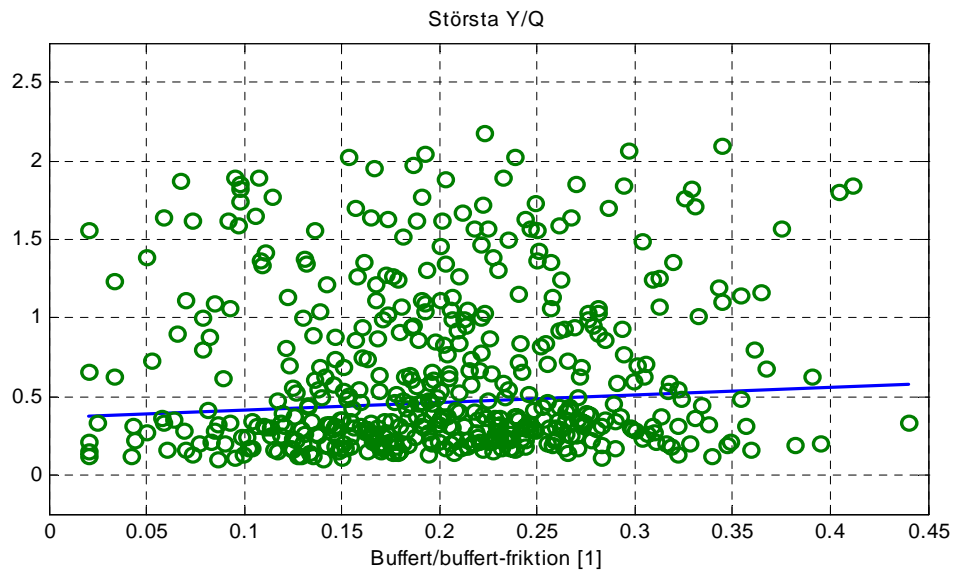
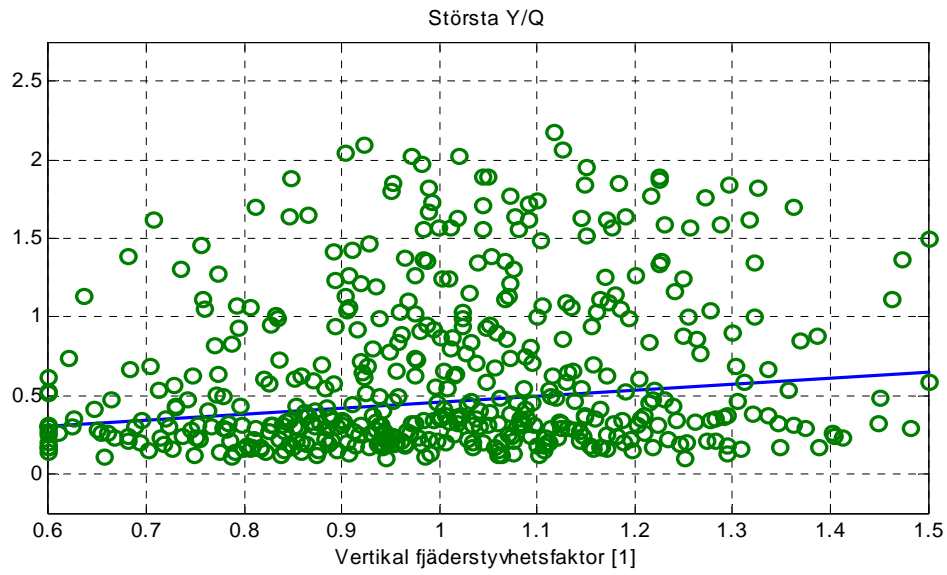
Namn	Undre konfidensintervall	Parametervärde	Övre konfidensintervall	Spridning dividerat med skattning	Enhet
a_0	0.729	1.14	1.55	0.723	1
v	-0.00836	-0.00552	-0.00268	1.03	1/(km/h)
μ	-1.45	-1.17	-0.882	0.489	1
Vertikal spårfelsfaktor	-0.0285	0.115	0.258	2.5	1
Kompressionskraft	-0.000 0685	0.000 217	0.000 503	2.63	1/kN
Vertikal fjäderstyvhetsfaktor	0.229	0.376	0.522	0.78	1
Buffert/buffertfriktion	0.113	0.475	0.836	1.53	1
Spårvidd	-0.0189	-0.00474	0.00946	5.99	1/mm
Longitudinellt glapp	-0.0276	-0.0134	0.000723	2.11	1/mm
Torsionsskevhet	-0.0141	-0.0131	-0.0121	0.149	1/mm
Lastvikt	-0.0298	-0.0156	-0.00141	1.82	1/ton



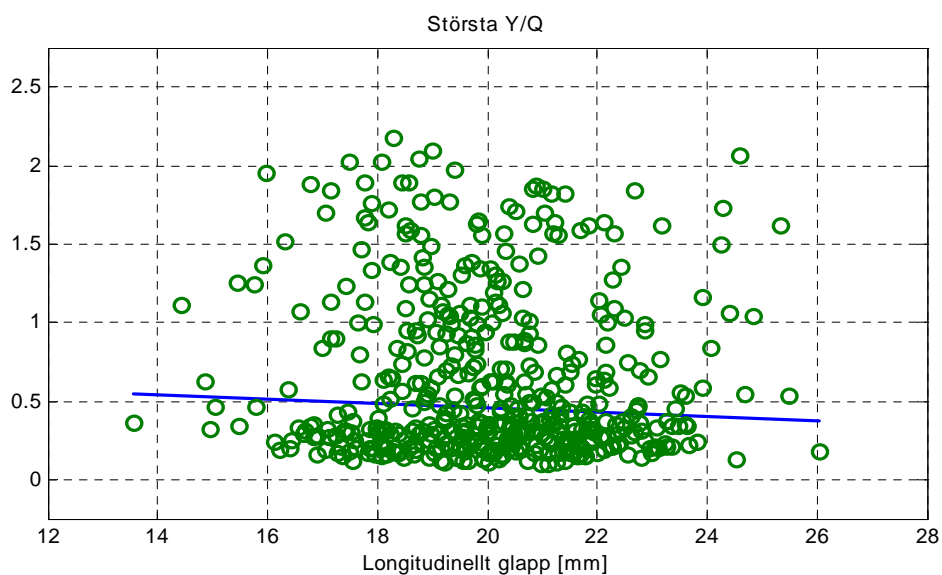
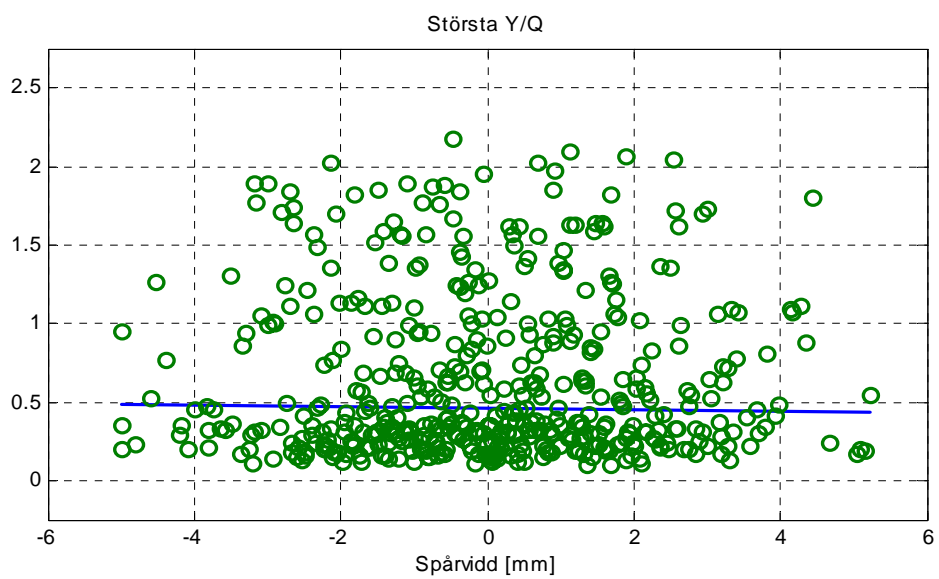
Figur 28 Största Y/Q i varje simulering plottat mot respektive parameter (gröna cirklar) samt skattning från linjärregression (blå linje). Friktionens påverkan på Y/Q bör sättas i relation till det gränsvärde som Nadals formel ger. Nadals gränsvärde är inritat i den nedre figuren ovan som röda streck. Det övre röda strecket motsvarar flänsvinkel 70° och det undre flänsvinkel 60°.



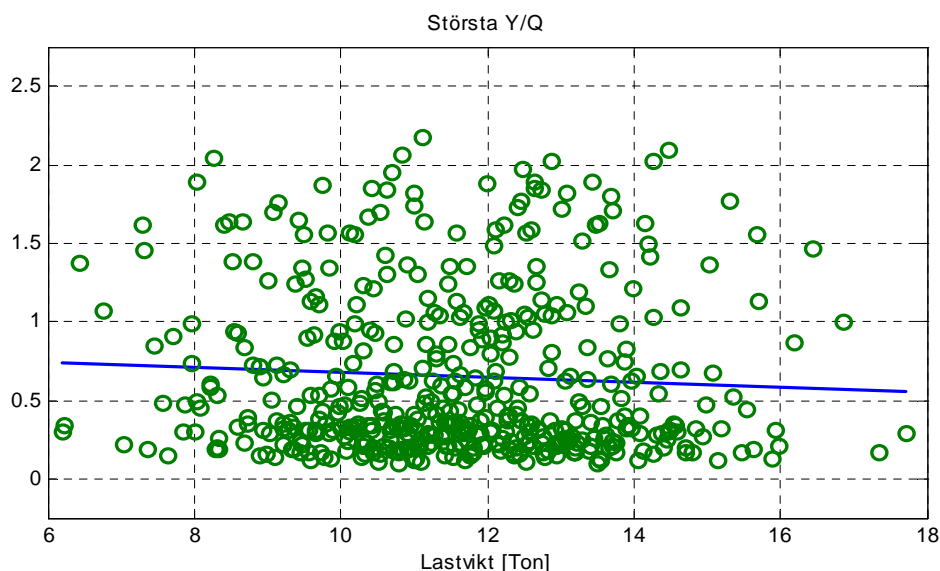
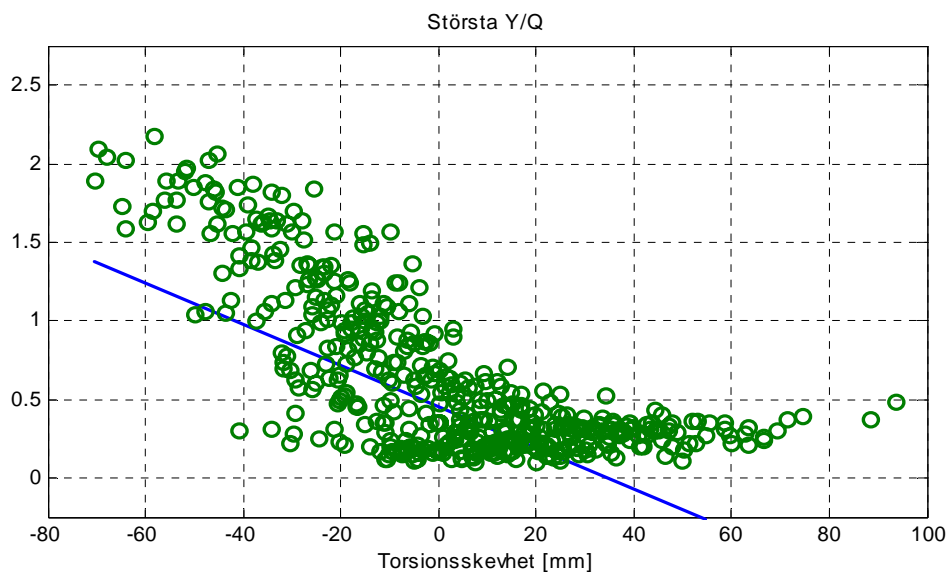
Figur 29 Största Y/Q i varje simulering plottat mot respektive parameter (gröna cirklar) samt skattning från linjärregression (blå linje).



Figur 30 Största Y/Q i varje simulering plottat mot respektive parameter (gröna cirklar) samt skattning från linjärregression (blå linje).



Figur 31 Största Y/Q i varje simulering plottat mot respektive parameter (gröna cirklar) samt skattning från linjärregression (blå linje).



Figur 32 Största Y/Q i varje simulering plottat mot respektive parameter (gröna cirklar) samt skattning från linjär regression (blå linje).

9.7 Diskussion av simuleringsresultat

Resultaten av känslighetsanalysen är ganska svår tolkade. Helt klart är att skevheten har mycket stor inverkan på resultatet, detta illustreras tydligt i Figur 32. Detta kan förstås med tanke på att en omfördelning av den statiska hjullasten påverkar Y/Q genom sänkning av Q .

För att undvika att resultatet maskeras av det stora beroendet på skevheten har ytterligare en analys gjorts, på samma sätt men med ett begränsat urval av data. Urvalet har skett genom att

endast de simuleringar som har genomförts med låg skevhet har utvärderats. En sådan analys bekräftar det som syns i den fulla analysen.

Hjul/räl-friktionen påverkar också – men detta sker ej linjärt. En ökning av friktionen sänker värdet på Y/Q . Detta kan bero på att en ökad friktion ger en förbättrad styrning av hjulparet och därmed minskat värde på Y . Risken för urspårning ökar dock med ökad hjul/räl-friktion, se Nadals formel, åskådliggjord i Figur 10 och i Figur 28. I Figur 28 är Nadals gränsvärde irriterat för två olika flänsvinklar 60° och 70° . Egentligen återspeglar kvoten mellan det erhållna Y/Q och gränsvärdet enligt Nadals formel urspårningsrisken bättre än enbart Y/Q .

Förändring av den vertikala fjäderstyvheten påverkar också värdet på Y/Q , se Figur 30. Kvoten Y/Q ökar i det närmaste linjärt med ökande vertikal fjäderstyvhet. Detta stöder den utförliga diskussionen som presenteras i kapitel 7.

Något överraskande är att det vertikala spårfelet inte påverkar värdet på Y/Q nämnvärt. I den begränsade analysen där skevhetens inverkan begränsats kan dock ses att ett större vertikalt spårfel ökar Y/Q .

Buffertfriktion och kompressionskraft har en liten inverkan på värdet på Y/Q . Detta kan förklaras med att det studerade banavsnittet avser den del av övergångskurvan där kurvradien är stor. Rörelser i buffertarna och vinkelskillnad mellan vagnarna är där ganska små.

En ökad vikt på lasten minskar värdet på Y/Q . Detta kan förklaras genom att fjäderingens vertikala styvhet sjunker i förhållande till massan med ökande lastvikt.

En faktor som inte studerats i dessa simuleringar är rälprofilens inverkan. Denna kan troligen påverka klättringsförfarandet negativt. Ett eventuellt framtida arbete föreslås inkludera variation av rälprofilen, framförallt avseende den slitagebild som uppkommer i hårt slitna kurvor, detta illustreras i Figur 2. En sådan undersökning skulle bringa klarhet i huruvida klättring kan uppkomma på grund av rälprofilens utseende.

10. Slutsatser och rekommendationer

De två urspårningarna i Fetsund beror med mycket stor sannolikhet på det dåliga spåret. Det som stöder den teorin är att två av varandra oberoende händelser, urspårningar, har inträffat på exakt samma position längs spåret. Det bör nämnas att de urspårade Lgjs-vagnarna inte betraktas som problemvagnar i Sverige. Anledning till att vagnarna spårar ur i Fetsund och inte i Sverige, eller för den delen inte i övriga Europa, är troligen att spårkvaliteten är förhållandevis sämre i Fetsund.

I praktiken är det ytterst sällan som klättring uppstår enbart genom att lateralkraften på ett hjul är stor. Orsaken är nästan alltid att vertikalkraften är kraftigt sänkt, det vill säga är betydligt mindre än det statiska värdet Q_0 . Låga värden på vertikalkraften Q i förhållande till de nominella hjullasterna uppstår vanligen när spåret är skevt och fordonet torsionsstyvt. I de aktuella fallen som har granskats i denna studie var det just den olyckliga kombinationen av mycket skevt spår och väldigt torsionsstyva containervagnar.

Om man på vagn littera Lgs byter ut trapetsfjäders mot parabelfjäder är det förväntat att hjulavlastningskraven enligt ORE B55 rp 8 [3] innehålls, även i de fall vagnen är lastad med en tom container. Det förväntas att hjulavlastningen hamnar någonstans kring 70-85% av gränsvärdet enligt ORE B55 rp8 [3], jämfört med tidigare 135-160% av gränsvärdet. Samma resonemang går naturligtvis att använda för littera Lgjs. Med andra ord att byta ut trapetsfjädrarna mot parabelfjädrar skulle avsevärt minska risken för hjulavlastning, se även Figur 30. Detta kostar i storleksordningen 15-20 000 SEK per vagn.

Följande sätt att minska risken för urspårningar av lätta godsvagnar har identifierats:

- Minska tryckkrafterna i tågen.
 - Kan påverkas genom ökad utbildning av förare.

- Kan åstadkommas genom att köra långa/tunga tåg i bromsläge G istället för P. Eller åtminstone att för heterogent sammansatta tåg med tågvikter över 600 ton framföra loket och de första vagnarna i bromsläge G.
- Öka vagnarnas tålighet mot tryckkrafter, kan till exempel åstadkommas med att använda gashydrauliska buffertar.
- Ändra tågsammansättningen så att känsliga vagnarna inte utsätts för höga tryckkrafter. Det bör emellertid nämnas att det idag inte finns några restriktioner från UIC rörande tågsammansättning.

Enligt Asbjørn Hansen på Jernbaneverket är det inte ovanligt att Godsvognoptak til togfører ger felaktig information angående tågsammansättningen. Det rekommenderas därför att dessa rutinerna ses över.

Efter första urspårningen observerades det att containern hade hoppat ur sitt läge vid urspårningen eller eventuellt att den var snett påsatt från början, se Figur 1. Eftersom en snett påsatt container har stor inverkan på den statiska hjullastfördelningen så bör det säkras att rutinerna för hur containrar sätts på plats är ändamålsenliga och att de fungerar. De gångdynamiska simuleringarna visar att skevhet påverkar urspårningskänsligheten markant, se Figur 32. Ett tänkbart scenario för olyckan i Fetsund I är att containern varit snett påsatt alternativt halkat snett under färd, för att sedan orsaka urspårning genom det stora spårfelet.

För minska problemet med räls slitage i kurvor rekommenderas att snäva kurvor smörjs kontinuerligt.

11. Referenser

[1] Banverket: *Räler – Krav på nya och begagnade*, BVF 541.43, 1992.

[2] ORE-B55-RP6, *Bedingungen für das Befahren von Gleisverwindungen; Berechnung und Messung der massgeblichen Fahrseugkennwerte*.

[3] ORE-B55-RP8, *Bedingungen für das Befahren von Gleisverwindungen*.

[4] S Iwnincki, The Manchester benchmarks for rail vehicle simulation. *Vehicle System Dynamics*, Vol 31 (Suppl.), 1999.

[5] UIC 530-2, *Wagons - Running safety*, 4th edition of 1.7.85 - Reprint dated 1.7.97 and set of diagrams (Appendices 1, 2 and 3) with 4 Amendments

[6] Banverket: *Spårgeometrihandboken*, BVH 586.40, 1996.

[7] Banverket: *Skyddsräler – Regler för anordnande och konstruktiv utformning*, BVF 586.65, 1995.

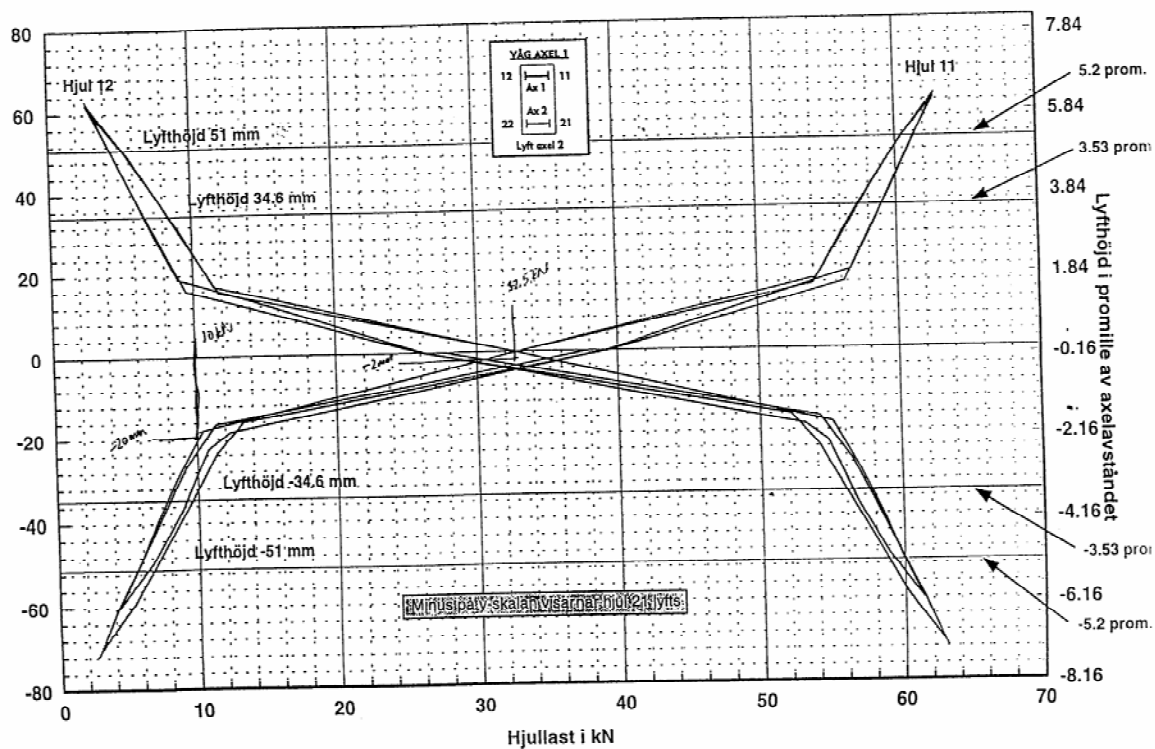
[8] UIC 518, *Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Ride quality*.

- [9] M. Wrang: *Effekt på hjulavlastning vid byte till parabelfjäder på vagn litt Lgs*, TrainTech report, 1999.
- [10] Banverket: *Jordning och skärmning i Banverkets anläggningar*, BVF 510.
- [11] J. M. Hammersley och D. C. Handscomb. *Monte Carlo Methods*. Chapman and Hall, London, England, 1964.
- [12] R. Y. Rubinstein. *Simulation and the Monte Carlo Method*. Probability and Mathematical Statistics. John Wiley & Sons, New York, USA, 1981.
- [13] P. J. Davis och P. Rabinowitz. *Methods of Numerical Intergration*. Academic Press, Orlando, Florida, USA, 2 upplagan, 1984.
- [14] G. S. Fishman. *Monte Carlo – Concepts, Algorithms, and Applications*. Operations Research. Springer, New York, USA, 1996.
- [15] A. Dubi. *Monte Carlo applications in system engineering*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 2000.
- [16] A. Olsson. *Modelling damage and stochastic properties in engineering structures*. Licentiatuppsats, Institutionen för Mekanik och Material, Lunds universitet, Lund, Sverige, 1999.
- [17] M. D. McKay, R. J. Backman och W. J. Conover. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics a journal of statistics for the physical, chemical and engineering sciences*, 21(2):239-245, 1979.
- [18] A. B. Owen. Monte Carlo variance of scrambled net quadrature. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Numerical Analysis*, 34(5):1884-1910, 1997.
- [19] J. Oscarsson. *Dynamic Train-Track Interaction: Linear and Non-Linear Track Models with Property Scatter*. Doktorsavhandling, Institutionen för hållfasthetslära, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sverige, 2001.
- [20] M. Abramowitz och I. A. Stegun. *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*. National bureau of standards – Applied mathematics series 55. U.S. Department of Commerce, Washington, 4 upplagan, 1965.
- [21] R. G. Ghanem och P. D. Spanos: *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*. Springer-Verlag, New York, USA, 1991.

- [22] M. Kleiber och T. D. Hien: *The Stochastic Finite Element Method – Basic Perturbation Technique and Computer Implementation*. John Wiley Sons, Chichester, West Sussex, England 1992.
- [23] H. G. Matthies, C. E. Brenner, C. G. Bucher och C. G. Soares: Uncertainties in Probabilistic Numerical Analysis of Structures and Solids – Stochastic Finite Elements. *Structural Safety* 19(3):283-336, 1997.
- [24] Y. K. Lin: *Probabilistic Theory of Structural Dynamics*. McGraw-Hill, New York, USA, 1967.
- [25] W. T. Thomson: *Theory of vibration with applications*. Tredje upplagan, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1988.
- [26] P. H. Wirsching, T. Paez och K. Ortiz: *Random Vibrations, Theory and Practice*. John Wiley & Sons, New York, USA, 1995.
- [27] H. Lange: *Dynamic analysis of a railway freight car with standard UIC single-axle running gear*, KTH, Stockholm, Sverige, 1996.
- [28] Banverket: *Spårteknik – tillåten hastighet mht spårets geometriska form*, BVF 586.41, 1996.
- [29] E. Andersson och M. Berg: *Järnvägssystem och spårfordon. Del 1: Järnvägssystem*. Järnväggruppen, Järnvägsteknik, Institutionen för farkostteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sverige, 1999.

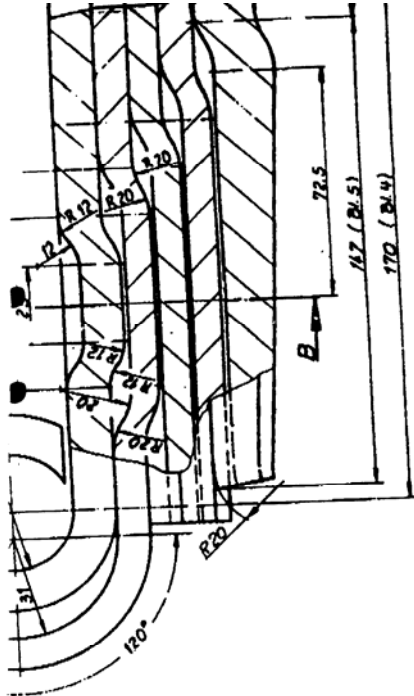
Appendix 1

Torsionsdiagram för Lgs 151-0. Vagnen lastad med tom container. Axel 1 på vågen med blockerade fjädrar.



Appendix 2

Information angående parabelfjäder.

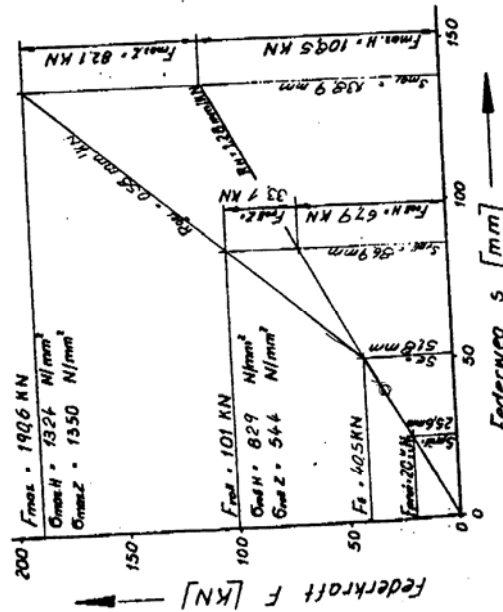


Bez.	Fertigungswerte der Tragfeder	Wert	Dim.
L	Länge der gestreckten Feder (Augenmittellinienabstand)	120073	mm
R _H	Durchbohrung der Hauptfeder bei F = 1 kN im Rollwagen	328:2	mm/LIN
R _{ges}	Durchbohrung der Gesamtfeder bei F = 1 kN im Rollwagen	358:7	mm/LIN
F ₁	Kraft bei Eintritt der Zugfeder im Rollwagen	405	kN
G ₁	Biegespannung in der Hauptfeder bei F = 1 kN	1170	N/mm ²
G ₂	Biegespannung in der Zugfeder bei F = 1 kN	1645	N/mm ²

Bez.	Prüf- u. Abnahme werte der Tragfeder im Rollwagen	Wert	Dim.
H ₁	Traghöhe bei Tragkraft F ₁ = 20 kN	222:	mm
H ₂ /F ₂	Nennzeichnung der Feder auf dem Federband	45/20	mm/LIN
H ₂	Traghöhe bei Tragkraft F ₂ = 100 kN	167:	mm
F ₂	Prüfkraft	160	kN

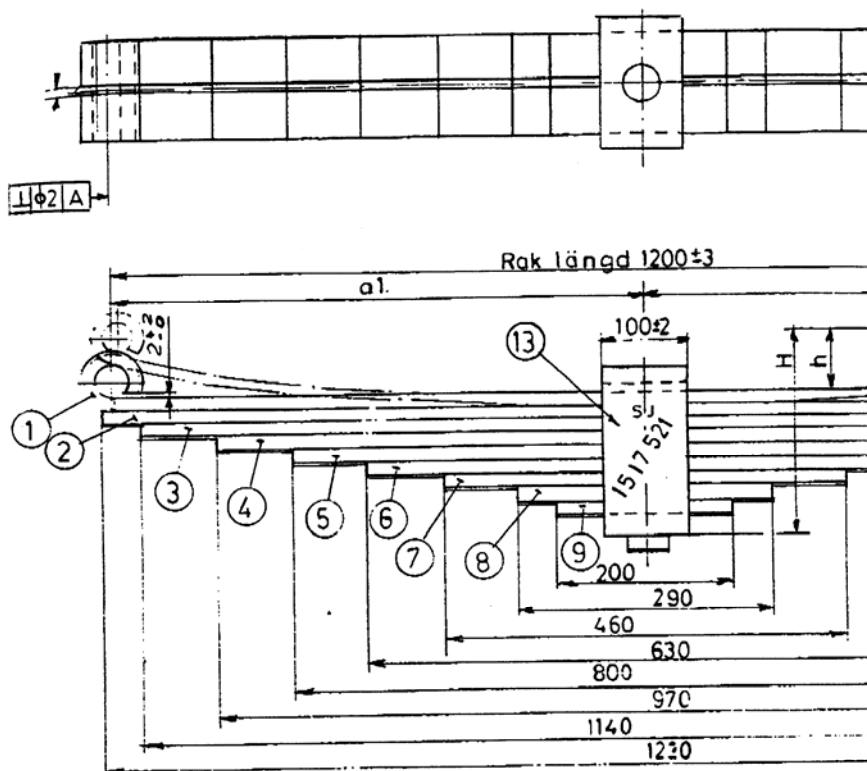
H₁ : Nach TL 918 197 gemessene Traghöhe

Theoretische Kennlinie der Feder
(im Rollwagen)



Appendix 3

Information angående trapetsfjäder.



Belastn. kN	Pilhöjd h mm	Fjäderhöjd H mm	Fjädring $5,8 \pm 0,5$ mm/10 kN
0	46	210	
20	$34 \pm \frac{1}{2}$	$198 \pm \frac{1}{2}$	
80	-1	163	
150	-41	123	Provbelastning

OBS! Ombyggd från fjäder 15 17 520 (ritn. 3MA-13116)
Vid ny tillverkning gäller 15 18 110 (ritn. 3MG-22199)

Appendix 4

Sporarbeider og -målinger ved Fetsund fra 27.05.02 - 20.09.02. Kronologisk oversikt. Schemat nedan har erhållits från Jernbaneverket i Norge.

Dato	Handling
27.05.	periodisk målevognkjøring med Roger 1000
11.06.	håndpakking av parti inn mot Fetsund bru - medførte <i>ikke</i> saktekjøring
	forberedelser til svillebytte, masseutskifting i partiet inn mot brua, samt forlengelse av guardskinnen ut til bruenden - selve arbeidet ikke startet
18.07.	1. avsporing
26.07.	Nivellement og beregning av sporjustering utført av JBV Hovedkontoret
12.08.	Hastighet nedsatt til $V = 40$ km/h for km 29,22 - 34,18
12.08.	SPOT (sporombyggingstog) kjørt f.o.m. spv. 2 på Fetsund stasjon mot Fetsund bru, med graver for masseutskifting. Gikk så dypt som mulig (30 cm under svilleunderkant).
13.08.	Svillebytte og justering med pakkmaskin avsluttet mellom spv. 2 og brua: km 29,22 til km 29,35
13.08.	2. avsporing
24.08.	Svillebytte og justering med pakkmaskin avsluttet for hele strekningen mot Guttersrud, km 34,180
30.08.	Hastighet satt opp til $V = 60$ km/h for hele strekningen
31.08.	Hastighet satt opp til full hastighet for strekningen Fetsund bru - Guttersrud, km 29,35 - 34,180
08.09.	Hastighet satt opp til full hastighet for strekningen Fetsund spv. 2 - Fetsund bru, km 29,22 - 29,35
20.09.	Nivellement og beregning av gjenværende sporjustering utført av JBV Hovedkontoret

Tilläggsbeställning

Vid två olika tillfällen, men i samma kurva har två svenska godsvagnar spårat ur på Kongsvingerbanan i Norge. Detta har inträffat under utkörning från stationen i Fetsund. Efter att ha passerat en spårväxel så går spåret in på en bro. Det är i utgången från kurvan och övergången till bron de två urspårningarna har inträffat. En noggrann undersökning av orsak och verkan har presenterats, se rapport *Urspårning av Lgjns-vagnar i Norge* T01141-0000-1-RES.

I denna rapport har två fenomen studerats mera ingående:

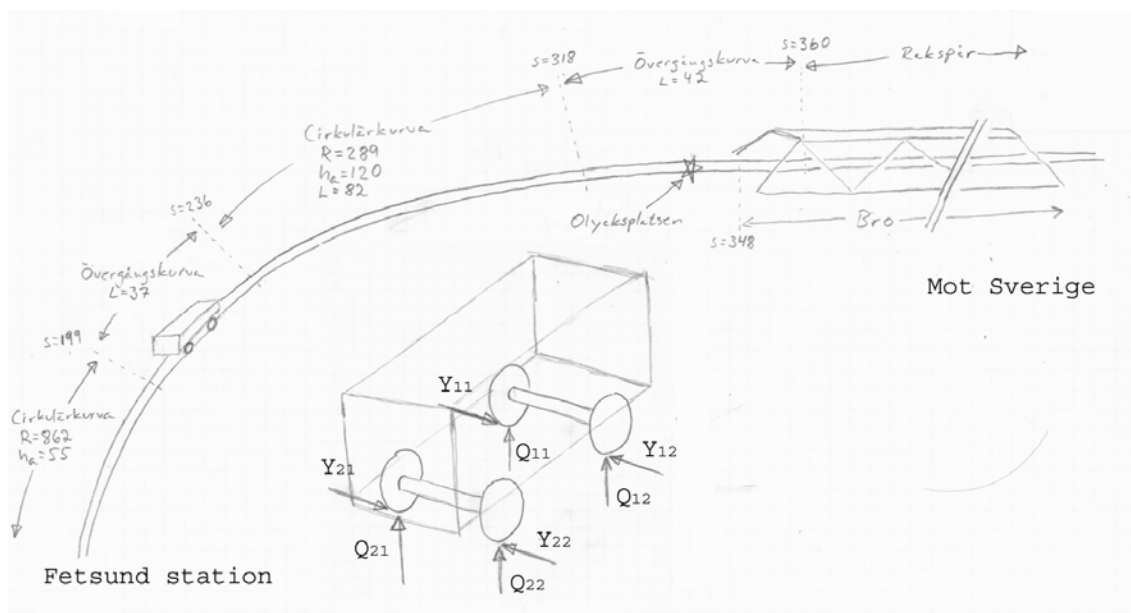
1. Hjulavlastning som funktion av ramplängd.
2. Flänsklätringskvoten, Y/Q , relativt gränsvärdet enligt Nadals formel som funktion av friktionen, μ , mellan hjul och räl.

Dessutom presenteras en detaljerad illustration av olyckplatsen.

12. Spåret på olycksplatsen

12.1 Allmän beskrivning av spåret

Fetsund är en tvåspårsstation som ligger på Kongsvingerbanan. Utfartsväxeln mot bron (riktning mot Sverige) ligger på träsliprar i en horisontalkurva. Strax efter växeln börjar ett betongslipersspår och kurvan övergår i en snävare kurva. I övergångskurvan ligger en kort vägbro, cirka 5 meter lång. Den snäva cirkulärkurvan övergår sedan i en övergångskurva till rakspår som sträcker sig en bit in på bron.



Figur 33 Överblick över spåret på olycksplatsen.

Utfartsväxeln mot bron ligger i en horisontalkurva med en anlagd radie på 862 meter och en anlagd rälsförhöjning på 55 millimeter. Strax efter växeln börjar en övergångskurva, vars anlagda längd är 37 meter, in till en cirkulärkurva med en anlagd radie på 289 meter och med en anlagd rälsförhöjning på 120 millimeter. Den snäva cirkulärkurvan är enligt løfteskjemat 82 meter lång och övergår i en övergångskurva, vars anlagda längd är 42 meter, som sträcker sig en bit in på bron.

Enligt Løfteskjemat av spåret på olycksplatsen så skall egentligen hela spåret ligga helt plant från cirka 90 meter (km 29,2541) innan bron (km 29,3478 – 29,7678) till cirka 60 meter (km 29,8270) efter bron, men verkligheten är en annan.

13. Ramplängdens inverkan på hjulavlastningen

Vid körning i övergångskurva i riktning mot kurvan kommer fordonets att pålasta det yttre hjulet på den främre axeln. Detta sker på grund av att spåret får en skevning då det går från rakspår (noll rälsförhöjning) till kurva (konstant rälsförhöjning).

Vi bortser här från dynamik som härleder från spårfel, rörelser i fjädersystem och liknande. Den dynamik som tillkommer adderas till den omlastning som sker på grund av bangeometrin.

De parametrar som tillsammans styr hjulavlastningen är spårskewheten samt fordonets torsionsstyvhet. Fordonets torsionsstyvhet bestäms av vagnsstrukturens styvhet och bärfejdrarnas styvhet tillsammans. Ett fordon med lång hjulbas måste tåla en större förvriddning

än ett med kort hjulbas eftersom fordonet når över en större längd, och därmed en större skevhet.

Under förutsättning att rampen är rak gäller att rampens förvriddning bestäms av ramptalet n_r . Detta bestäms i sin tur av två parametrar: övergångskurvans längd samt kurvdelens rälsförhöjning, enligt formlerna nedan. Fordonet kommer att uppleva en spår förvriddning $\Delta\varphi$ mellan främre och bakre axel. Sambanden mellan ramptalet n_r , ramplängden L , rälsförhöjningen h_a och $\Delta\varphi$ ges av nedanstående formler:

$$\text{ramptal : } n_r = \frac{L_r}{h_a}$$

$$\text{spåret : } \frac{d\varphi}{dx} = \frac{1}{n_r} \cdot \frac{1}{2b_0}$$

$$\text{fordonet : } \Delta\varphi = L_b \cdot \frac{d\varphi}{dx} = L_b \cdot \frac{1}{n_r} \cdot \frac{1}{2b_0}$$

$$\Delta Q = \frac{k_\varphi \cdot \Delta\varphi}{2b_0}$$

där $2b_0$ är nominella löpcirkelavståndet (1.5 m), L_b fordonets hjulbas och k_φ fordonets torsionsstyvhet (här antagen vara linjär).

Fordonets hjulavlastning ΔQ är alltså proportionell mot hjulbasen och vagnsstyvheten och omvänt proportionell mot ramptalet n_r . Vagnsstyvheten är beroende på vagnsramens styvhet och löpverkets styvhet. Då fordonet är lastat med en tom container är vagnen i det närmaste orörlig och vagnsstyvheten domineras av löpverkets styvhet.

För att minska hjulavlastningen kan man alltså tänka sig flera åtgärder.

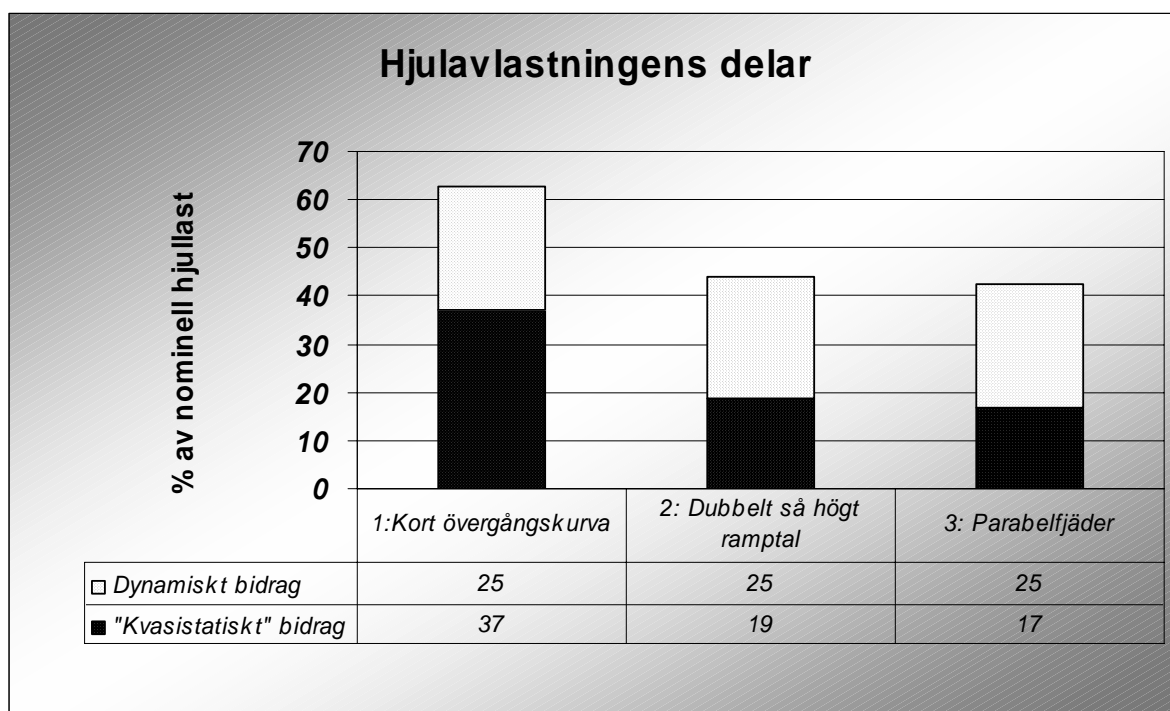
- Minska hjulbasen
- Sänka vagnsstyvheten
- Öka ramptalet

Ramptalet ökas genom att ha en längre övergångskurva eller sänka rälsförhöjningen.

Hjulavlastningen har räknats fram för tre olika fall. Det presenteras här i form av diagram, uttryckta i andel av nominell hjullast. Mer än 100% avlastning innebär hjullyft. Sidoaccelerationens inverkan har ej tagits med.

1. Övergångskurva med 42 m längd och 120 mm rälsförhöjning. Detta är de data som gäller för den övergångskurva urspårningen i Fetsund har skett i. Trapetsfjäder har använts.
2. Övergångskurva med dubbelt så högt ramptal som fall 1 ovan.
3. Övergångskurva likadan som fall 1 ovan, men med parabelfjäder.

I diagrammen har vagnsvikten valts till 24 ton och det dynamiska bidraget satts till 15 kN.



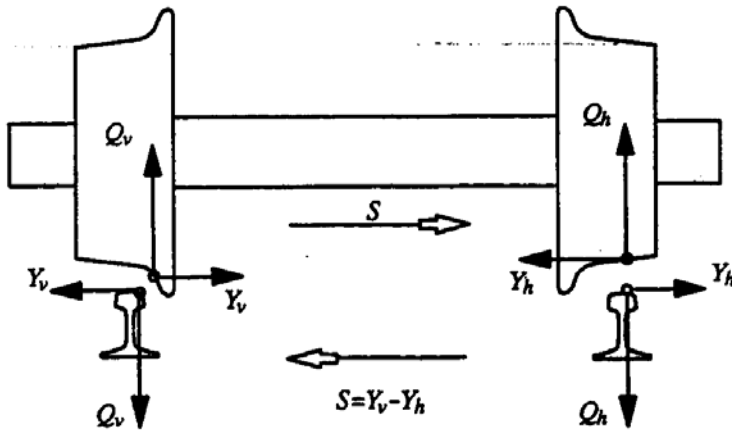
Figur 34 Bidrag till hjulavlastning från bangeometri ("kvasistatisk" del) och dynamisk del. Fall 1 är samma kurva som kurvan där urspårningen skedde, med den fjäderstyvhet som gäller för trapetsfjäder. I fall 2 har en kurva med dubbelt så högt ramptal använts som i 1. I fall 3 har samma kurva som i fall 1 använts, men parabelfjäder har använts istället för trapetsfjäder.

Intressant är att ett byte av trapetsfjäder till parabelfjäder motsvarar samma förändring i hjulavlastning som att ändra ramptalet till det dubbla. En dubbling av ramptalet kan ske genom att fördubbla ramplängden eller att fördubbla rälsförhöjningen.

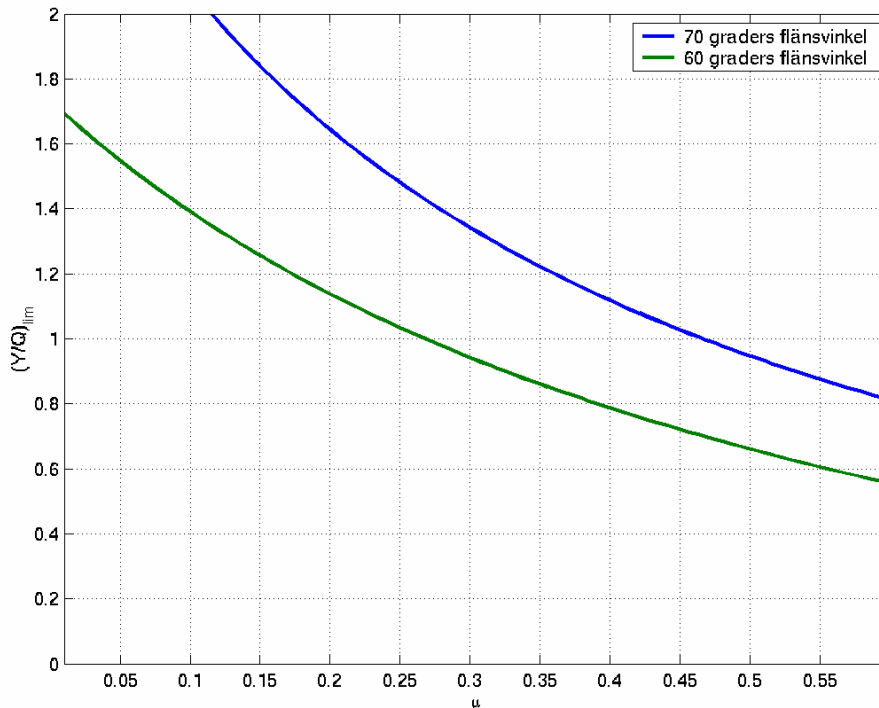
För ytterligare information angående övergångskurvor och rälsförhöjningsramper se T01141-0000-1-RES.

14. Flänsklättringskvoten relativt gränsvärdet som funktion av friktionen

I rapporten T01141-0000-1-RES presenterades de bokomliggande teorierna rörande flänsklättring. I denna rapport kompletteras den beskrivning med några resultat samt att för tydlighet vissa slutsatser repeteras här. Om sidokraften och friktionen mellan fläns och räl blir tillräckligt stor kan hjulflänsen "klättra" över rälen och urspårning är ett faktum. Med andra ord, flänsen klättrar upp längs rälets farkant om vertikalkraften Q blir liten i förhållande till lateralkraften Y . Detta fall svarar mot en friktionskraft på flänsen som tenderar att lyfta upp hjulet. En schematisk illustration hur dessa krafter verkar visas i Figur 9.



Figur 35 Krafter mellan fordon och spår. Lateralkrafter Y_v och Y_h , vertikalkrafter Q_v och Q_h och resulterande spårskjutningskraft S . Hjulpåret sett bakifrån. I figuren visas positiva kraftriktningar.

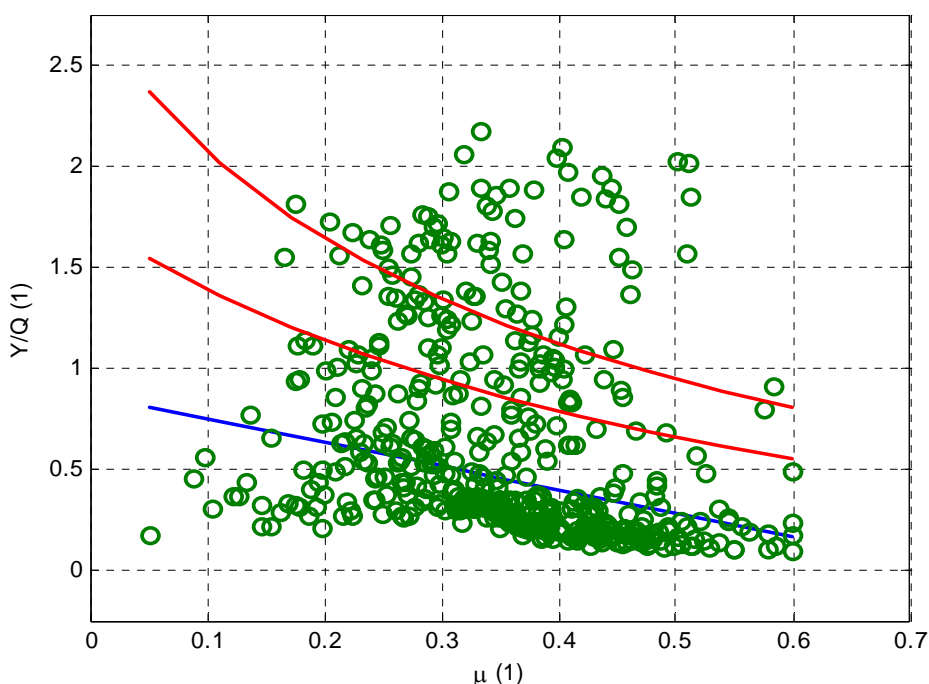


Figur 36 $(Y/Q)_{lim}$ för två flänsvinklar 60° och 70° som funktion av friktionen μ enligt Nadal. I UIC 518 har antagits att flänsvinkeln är åtminstone 60° och att det är sällsynt att friktionskoefficienten överstiger 0,4.

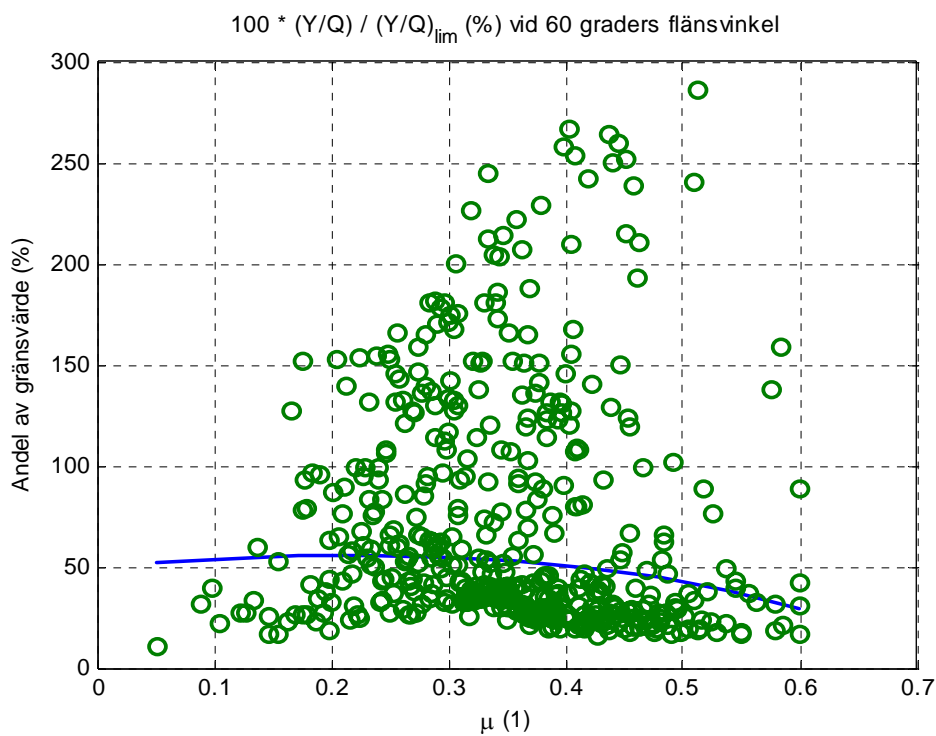
Enligt kriteriet för flänsklättring ovan, som introducerades av fransmannen Nadal, är det således kvoten mellan lateralkraft Y och vertikalkraft Q som avgör om förutsättningar för klättring föreligger.

En simuleringsmodell har byggts upp i GENSYS. Simulering har skett med ett tåg bestående av fem vagnar: den studerade vagnen Lgjns-w 831 i mitten, två stycken enklare fordonsmodeller framför och bakom samt två stycken mycket enkla fordon (dummies) i vardera ände. I rapporten T01141-0000-1-RES presenteras resultat från 476 numeriska simuleringar. En linjärregression har sedan gjorts på det erhållna resultatet. Resultatet av linjärregressionen presenteras som rät linje i Figur 37. De runda cirklar motsvarar ett sampel (ett simuleringsfall).

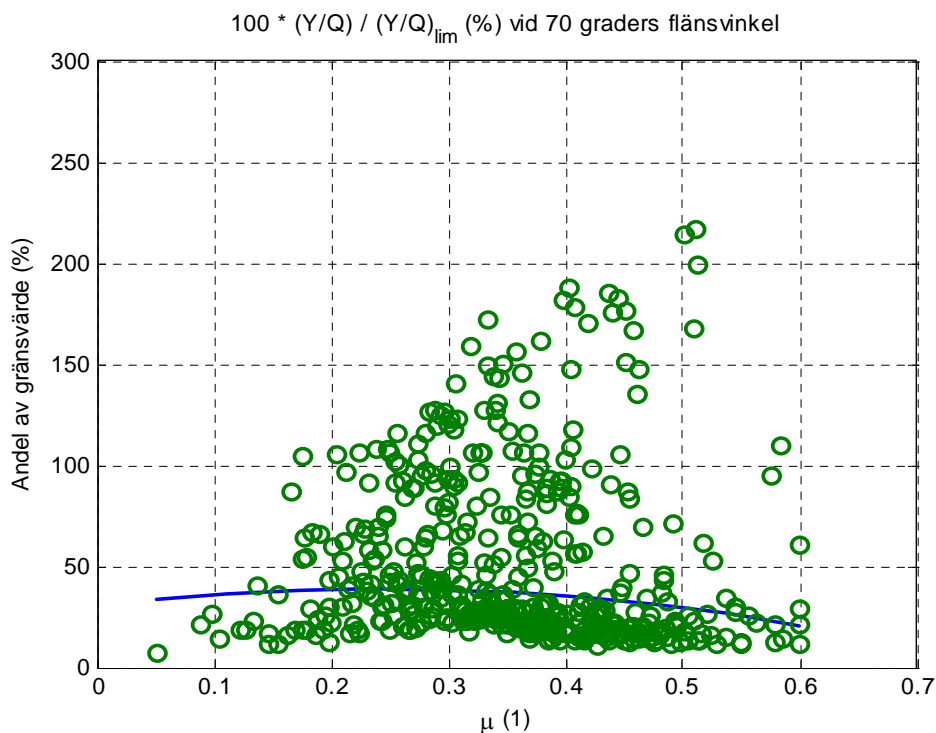
För att återspegla urspårningsrisken är förhållandet mellan flänsklättringskvoten och Nadals formel intressant. Detta visas i Figur 38 och Figur 39. Eftersom detta mått beror på flänsvinkeln, visas måttet för flänsvinkel 60° i Figur 38 och flänsvinkel 60° i Figur 39.



Figur 37 Största Y/Q i varje simulering plottat mot respektive parameter (gröna cirklar) samt skattning från linjärregression (blå linje). Friktionens påverkan på Y/Q bör sättas i relation till det gränsvärde som Nadals formel ger. Nadals formel är inritad för 60° (övre röd kurva) och 70° flänsvinkel (undre röd kurva).



Figur 38 Flänsklättringskvoten, Y/Q , relativt gränsvärdet enligt Nadal som funktion av friktionen, μ , mellan hjul och räl. Gränsvärdet avser 60° flänsvinkel. Den blå linjen är linjärregressionens skattning.



Figur 39 Flänsklättringskvoten, Y/Q , relativt gränsvärdet enligt Nadal som funktion av friktionen, μ , mellan hjul och räl. Gränsvärdet avser 70° flänsvinkel. Den blå linjen är linjärregressionens skattning.

Korrektion av rapport T01141-0000-2-RES

Sammanfattning

Traintech har på HSLBs uppdrag gjort en utredning angående två urspårningar i Fetsund, Norge [1]. I efterhand har uppdagats [2] att Traintech erhållit felaktig information angående tågsammansättningen i den senare urspårningen, vilken skedde 20020813.

Enligt rapporten stämde inte tågets sammansättning i verkligheten med Godsvognoptak til togfører. I efterhand har framkommit att tågsammansättningen överensstämde med Godsvognoptak til togfører, och den urspårade vagnen gick som nummer åtta i tåget. I rapporten anges att vagnen gått som nummer fem.

De felaktiga slutsatser som dras i rapporten till följd av faktafelet gäller därmed ej.

De kapitel som påverkas är kapitel 3.2 Tågsammansättning vid urspårningarna samt kapitel 10 Slutsatser och rekommendationer.

Referenser

[1] Traintech rapport T01141-0000-2-RES Urspårning av Lgjns-vagnar i Norge

[2] Muntlig konversation med Hans Bjørnseth, HSLB 2003-08-04

Huvudförfattare, medförfattare		Dokumentbeteckning	Dokumentdatum	Antal sidor	
Paul Sundvall		T01141-0000-3-RES	2003-08-05	1	
Kvalitetsgranskad av	Signatur	Godkänd av	Signatur	Antal bilagor	Antal bilagesidor
Johan Oscarsson		Mikael Wrang		0	0
Kund					
HSLB – Haverikommissionen for Sivil Luftfart och Bane					
Sekretess			Distribution		
Får endast spridas till uppdragsgivaren			Hans Bjørnseth (HSLB)		
Anmärkning					
-					