



Lauftechnische Simulation der TrackSplit-Kabine

Johannes Stephanides, A-Wien, Roland Müller, CH-Belp, Walter Kik, D-Templin

Voraussetzungen für TrackSplit-Kabinen

Um auf einer eingleisigen Strecke zugelassen zu werden, müssen die Kabinen den Strecken wie durch die Signale vorgegeben folgen. Dazu ist es nötig, dass sie dem Streckenverlauf entsprechend der Weichenstellung folgen. Für die Räder mit Flanken innen ist das kein Problem. Die Räder mit Flanken außen finden keine Spurrille und hier muss eine passive Führung die vorgegebene Fahrt ermöglichen. Aktiv würden die Räder einfach entsprechend angehoben. Beim Versagen der aktiven Steuerung würden die Kabinen möglicherweise entgleisen oder die Fahrt nicht entsprechend der Weichenstellung fortführen. Damit dies passiv geschieht sind an manchen Stellen Kletterhilfen nötig. Diese gilt auch für die Räder auf der zusätzlichen mittleren T-Schiene, wenn deren Laufflächen unterhalb der Schienenoberkante liegen. Das wäre eine Verletzung der Hüllkurve zwischen den Schienen. Liegt die Lauffläche der zusätzlichen T-Mittelschiene auf Schienenoberkante, wird die Mittelschiene erheblich aufwendiger.

Modellbeschreibung Laufwerk

Damit Weichen mit passiven Aufkletterhilfen an den Schienen durchfahren werden können genügen direkte Aufhängungen der Räder nicht. Kletterfähig werden die Räder mit Aussenflanken wenn sie über eine Wiege angelenkt werden. (Möglicherweise kann gleiches durch gekoppelte Luftfedern erreicht werden.)

Werden die Wiegen zu Deichseln verlängert und sind um die Hochachse drehbar gegenüber dem Querbalken, verbessert dies das Bogenlaufverhalten, insbesondere in engen Bögen. Neben den profilierten Eisenbahnrädern gibt es Räder mit Reifen. An Bahnübergängen können diese abgesenkt werden und das Fahrzeug kann auf den Reifen rollend das Gleis verlassen. Gelenkt wird über das Hinterrad, dadurch ist die Kabine sehr wendig.

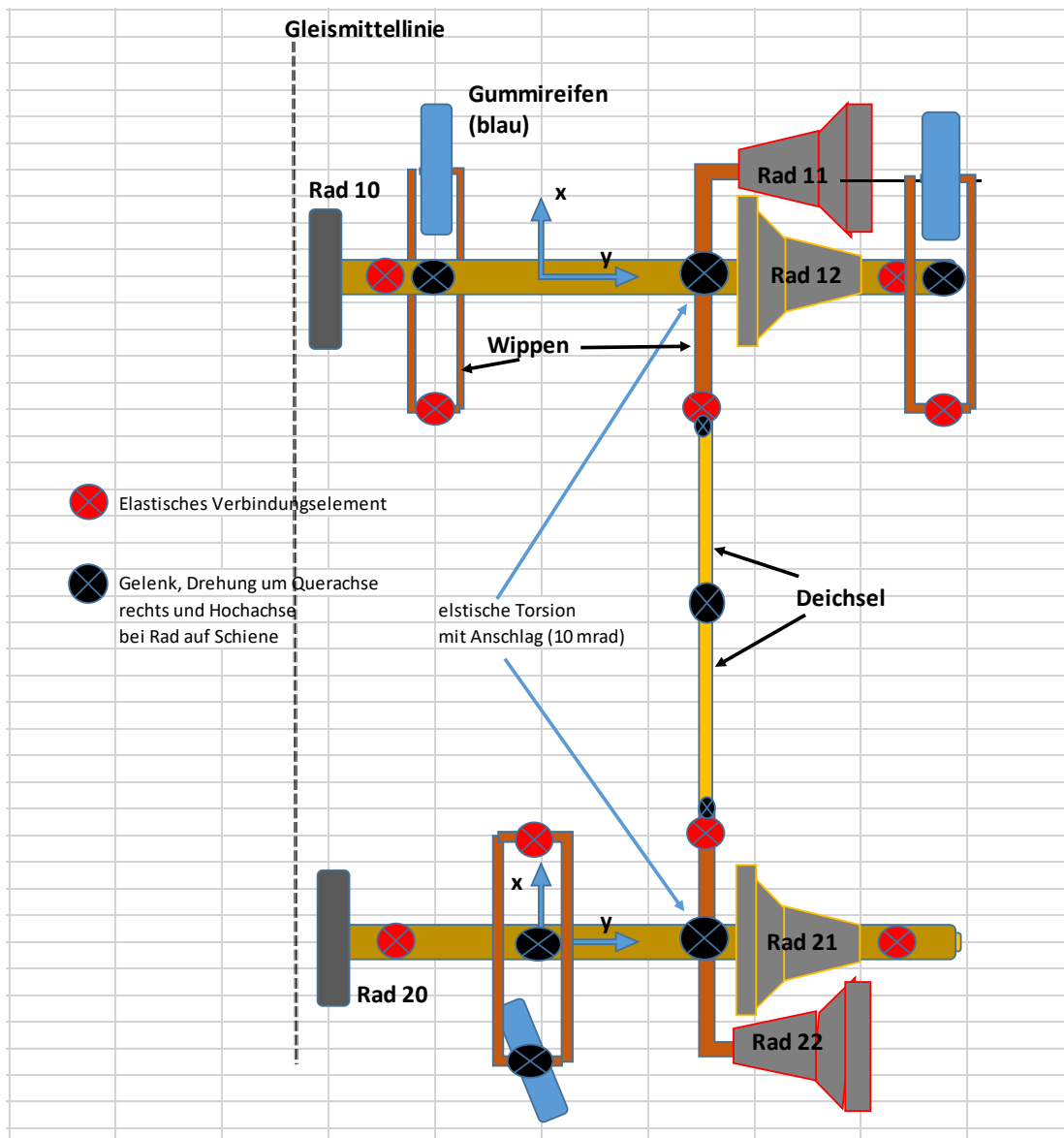


Fig. 1: Schematisches Fahrgestellmodell der TrackSplit-Kabine



Inhalt

Voraussetzung für TrackSplit-Kabinen	1
Modellbeschreibung Laufwerk	1
Legende	7
Simulationsergebnisse	8
Weichen	8
Simulationen nach EN14363	10
Gerades Gleis und sehr große Bogenradien, V=88 km/h	10
Gerades Gleis und sehr große Bogenradien, V=60 km/h	13
Große Bogenradien, Bogenradius 700 m, Überhöhung 90 mm	17
Kleine Bogenradien, Radius 450 m, Überhöhung 165 mm	23
Sehr kleine Bogenradien, Bogenradius 250 m, Überhöhung 150 mm, Überhöhungsfehlbedarf 115 mm	29
Sehr kleine Bogenradien, Bogenradius 250 m, Überhöhung 150 mm, Überhöhungsfehlbedarf 0 mm	35
S-Bogen 150 m Radius, Überhöhung 0 mm, Geschwindigkeit 40 km/h	41
Gerade, Windlast, Fahrgeschwindigkeit 90 km/h	47
Verschleißsimulation	65



Abbildungsverzeichnis

Fig. 1: Schematisches Fahrgestellmodell der TrackSplit-Kabine	2
Fig. 2: Radprofile relativ zur Schiene inklusive rechte Hälfte Mittelschiene	8
Fig. 3: Zunge – Weiterfahrt in der Geraden 7101-60 kmh.mp4	8
Fig. 4: Herzstück zwischen gerader und abbiegender Schiene 7702-60kmh.mp4	9
Fig. 5: Zunge von der Wurzel zu Spitze 7201-60kmh.mp4	9
Fig. 6: Herzstück auf abbiegendem Gleis	9
Fig. 7: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, $\sum Y$, Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz	10
Fig. 8: Verhältnis $Y/Q_{ij,i,j=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$	11
Fig. 9: $\sum Y_i$, $i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$	11
Fig. 10: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel $yaw_{ij,i=1,2,j=0:2}$	12
Fig. 11: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen quer und vertikal	12
Fig. 12: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal	13
Fig. 13: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, $\sum Y$, Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz	13
Fig. 14: Verhältnis $Y/Q_{IJ,I,J=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$	14
Fig. 15: $\sum Y_i$, $i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$	14
Fig. 16: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel $yaw_{ij,i=1,2,j=0:2}$	15
Fig. 17: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen	15
Fig. 18: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal	16
Fig. 19: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, $\sum Y$, Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz	17
Fig. 20: Verhältnis $Y/Q_{IJ,I,J=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$	18
Fig. 21: $\sum Y_i$, $i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$	19
Fig. 22: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel $yaw_{ij,i=1,2,j=0:2}$	20
Fig. 23: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen	21
Fig. 24: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, $\sum Y$, Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz	23
Fig. 25: Verhältnis $Y/Q_{IJ,I,J=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$	24
Fig. 26: $\sum Y_i$, $i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$	25
Fig. 27: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel $yaw_{ij,i=1,2,j=0:2}$	26
Fig. 28: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen	27
Fig. 29: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal	28
Fig. 30: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, $\sum Y$, Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz	29
Fig. 31: Verhältnis $Y/Q_{IJ,I,J=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$	30
Fig. 32: $\sum Y_i$, $i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$	31
Fig. 33: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel $yaw_{ij,i=1,2,j=0:2}$	32
Fig. 34: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen	33
Fig. 35: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal	34
Fig. 36: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, $\sum Y$, Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz	35
Fig. 37: Verhältnis $Y/Q_{IJ,I,J=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$	36
Fig. 38: $\sum Y_i$, $i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$	37



Fig. 39: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel $yaw_{ij,i=1,2,j=0:2}$	38
Fig. 40: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen	39
Fig. 41: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal	40
Fig. 42: Grenzwertbezogene Werte von $y^*.., z^*.., \sum Y, Y_{qst}, Q_{qst}, Y/Q, dz$, links mit Deichsel, rechts ohne Deichsel	41
Fig. 43: Verhältnis $Y/Q_{IJ,I,J=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$, oben mit Deichsel, unten ohne	42
Fig. 44: $\sum Y_i, i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$, oben mit Deichsel, unten ohne	43
Fig. 45: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel yaw , oben mit Deichsel, unten ohne	44
Fig. 46: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen	45
Fig. 47: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal	46
Fig. 48: $\sum Y_i$, Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	47
Fig. 49: Grenzwertbezogene Werte von $y^*.., z^*.., \sum Y, Y_{qst}, Q_{qst}, Y/Q, dz$, Böenanregung 2,6 kN (links) und 5,6 kN (rechts)	48
Fig. 50: Verhältnis $Y/Q_{IJ,I,J=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	49
Fig. 51: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel yaw , Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	50
Fig. 52: Kastenbeschleunigungen quer und vertikal über Laufwerken, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	51
Fig. 53: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken, Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	52
Fig. 54: $\sum Y_i, i=1,2$, Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	53
Fig. 55: Grenzwertbezogene Werte von $y^*.., z^*.., \sum Y, Y_{qst}, Q_{qst}, Y/Q, dz$, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	54
Fig. 56: Verhältnis $Y/Q_{IJ,I,J=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	55
Fig. 57: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel yaw , Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	56
Fig. 58: Kastenbeschleunigungen quer und vertikal über Laufwerken, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	57
Fig. 59: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken, Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	58
Fig. 60: $\sum Y_i, i=1,2$, Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	59
Fig. 61: Grenzwertbezogene Werte von $y^*.., z^*.., \sum Y, Y_{qst}, Q_{qst}, Y/Q, dz$, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	60
Fig. 62: Verhältnis $Y/Q_{IJ,I,J=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	61



Fig. 63: Radanhebung $dz_{ij,i=1,2,j=0:2}$ und Anlaufwinkel $yaw_{ij,i=1,2,j=0:2}$ Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	62
Fig. 64: Kastenbeschleunigungen quer und vertikal über Laufwerken, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	63
Fig. 65: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken, Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)	64
Fig. 66: Gewählte Referenzstrecke	65
Fig. 67: Einteilung der Reibwertbereiche auf Rad11 (Aussenflanke)	66
Fig. 68: Vergleich der Abtragsflächen mm^2 als $f(\text{Laufleistung } T_{km})$ aller Räder ohne (4403) und mit konditionierter Flanke (4405), links der Räder mit Außenflanke, Mitte mit Innenflanke und rechts Räder auf Mittelschiene	66
Fig. 69: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 11, links ohne, rechts mit Konditionierung Rad11	66
Fig. 70: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 12, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11	67
Fig. 71: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 10, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11	67
Fig. 71: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 21, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11	67
Fig. 73: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 22, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11	68
Fig. 74: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 20, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11	68



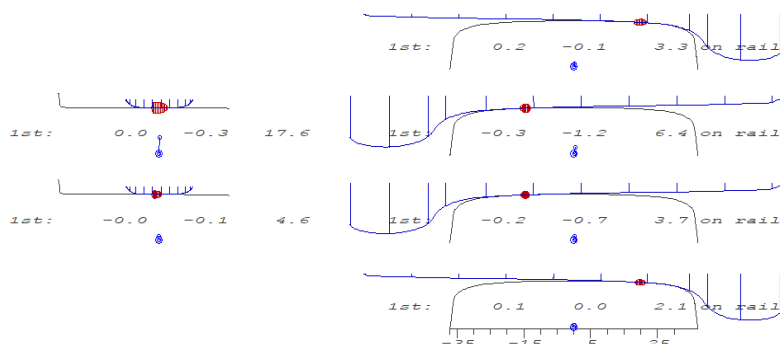
Legende

I	- Rad, 1 Laufwerk I vorne, 2 Laufwerk II hinten
J	- 0 – Rad Mittelschiene, 1 - Rad mit Flanke rechts (Aussenflanke), 2- Rad mit Flanke Links (Innenflanke)
K	- I vorlaufendes Laufwerk, II nachlaufendes Laufwerk
λ	- Prozentualer Grenzwert der Variablen
Y/Q_{ij}	- Verhältnis Querkraft / Radlast
Y_oQ_{ij}	
$\sum Y_i$	kN - Gleisverschiebekraft ΣY
Q_{ij}	kN - Radlast oder vertikale Kraft auf Schiene
Y_{ij}	kN - Querkraft auf Schiene
dz_{ij}	mm - senkrechte Anhebung des Rades
yaw_{ij}	mrad - Anlaufwinkel des Rades an Schiene
$Y..*_k$	m/s^2 - Querbesehleunigung über Laufwerkmitte vorne
$Z..*_k$	m/s^2 - Vertikalbesehleunigung über Laufwerkmitte vorne
$Y*_k$	m - Querverschiebung der Kabine über Laufwerkmitte vorne
$Z*_k$	m - Vertikalrverschiebung der Kabine über Laufwerkmitte vorne
fx^*	rad - Drehung um Längsachse (Rollen) der Kabine
fz^*	rad - Drehung um Hochachse (Wenden) der Kabine
rms	m/s^2 - Wurzel-quadratischer Mittelwert (root means square)
latal	mm - Gleislagefehler quer
verta	mm - Gleislagefehler vertikal
boe	kN - Maximalkraft Windboe
s	- Standardabweichung und
e	- Extremwerte im Streckenabschnitt (oben/unten), ganze Strecke (rechts)
v	km/h - Geschwindigkeit



Simulationsergebnisse

Dass das Konzept des TrackSplit laufdynamisch funktioniert, zeigt das Video des Laufs im S-Bogen mit 150 m Radius.



Gezeigt wird die Stellung der Radprofile gegenüber der Schiene und die in die Zeichenfläche geklappten Kontaktflächen zwischen Rädern und Schienen. Die Zahlen sind die Werte der Kontaktkäfte längs, quer und normal zur Kontaktfläche.

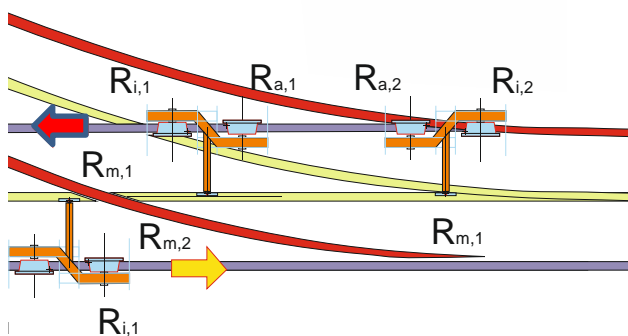
Fig. 2: Radprofile relativ zur Schiene inklusive rechte Hälfte Mittelschiene



8003-S-Bogen-150m.mp4

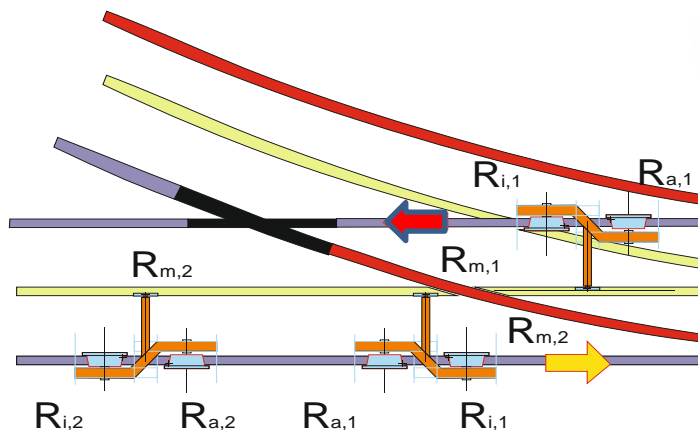
Weichen

Wichtig für TrackSplit sind passive Weichendurchfahrten. Bei der Weichendurchfahrt sind die Räder mit Aussenflanken - also rechts - ein Problem. Diese Räder müssen über Weichenteile klettern. Sie würden sonst manchmal ‚falsch‘ der Schiene folgen. An Zungen und den Überfahrten der Räder auf den Mittelschienen sind Aufkletterhilfen nötig. An Herzstücken hängt es von den Profilen im Herzstück ab ob Kletterhilfen nötig sind. (siehe ‚Weichen bei TrackSplit‘)



Damit das Aussenflankenrad nicht der abweichenden Schiene folgt, muss es durch eine Kletterhilfe angehoben werden. In der Gegenrichtung sind keine zusätzlichen Massnahmen erforderlich.

Fig. 3: Zunge – Weiterfahrt in der Geraden (roter Pfeil) [7101-60 kmh.mp4](#)

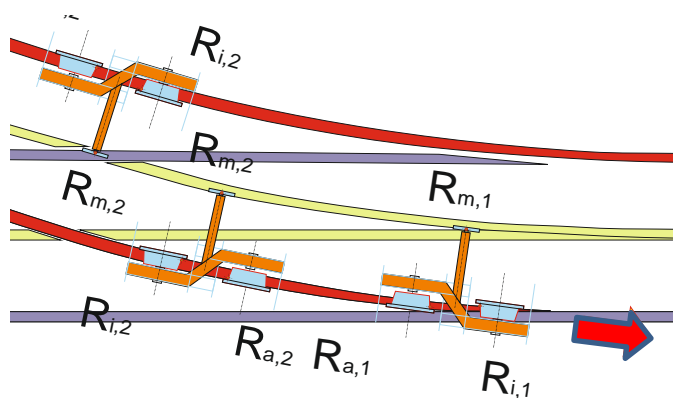


Im Herzstück von gerader und abweichender Schiene ist keine Kletterhilfe bei dem vermessenen Herzstück nötig. Das Rad mit Aussenflanke klettert durch die gegebene Topografie im Herzstück von alleine auf.

Fig. 4: Herzstück zwischen gerader (rot) und abbiegender Schiene [7702-60kmh.mp4](#)

Die Führungsschienen auf der gegenüberliegenden Seite sind wirkungslos. Für Sicherheit der TrackSplit-Kabine sorgen die Flügelschienen im Herzstückbereich. Im Video ist zu sehen, wie diese tuschiert werden.

Die Räder auf der Mittelschiene klettern über die abbiegende Schiene. Bei direkt auf den Schwellen aufliegender T-Schiene müssen Rampen das Überfahren des Rades ermöglichen. Wäre die Weichenstellung so, dass der abweichenden Schienen gefolgt werden muss, ist die Zugendurchfahrt kein Problem.



Anders in der Gegenrichtung. Hier sollte an der Schienenzunge eine Kletterhilfe angebracht werden um das Rad mit der Aussenflanke anzuheben um ein „Aufschneiden“ zu verhindern. Auch wenn es im Video unproblematisch von statten geht

Fig. 5: Zunge von der Wurzel zu Spitze [7201-60kmh.mp4](#)

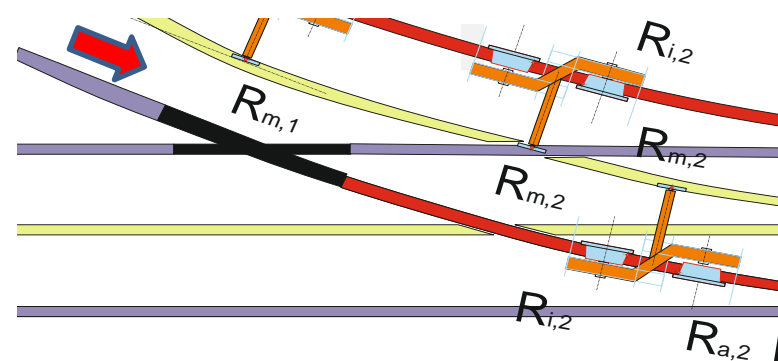


Fig. 6: Herzstück auf abbiegendem Gleis [7802-60kmh.mp4](#)

Mit der verwandten Kreuzungsgeometrie ist auch hier keine Aufkletterhilfe nötig, die Flügelschienen sorgen zusätzliche Führung.



Simulationen nach EN14363

Bei den Simulationen der Prüfbereiche wird mit Gleisqualität QN2 gerechnet. Störungen sind die Abweichungen der einzelnen Schiene quer und vertikal.

Y/Q wurde nach Nadal mit Flankenwinkel 75 Grad berechnet (1,44). Der Grenzwert wäre bei einem Fahrzeug nach Norm 0,8. Bei TrackSplit wird statt Y/Q die Radanhebung von 5 mm genommen.

ΣY wurde für die 3 Räder eines Laufwerks gebildet. Die Stellung der Laufwerke ist meist Freilauf des nachlaufenden Laufwerks, bzw. Spießgang.

Die Balkendiagramme enthalten normierte prozentuale Werte. Die für die Normierung verwandten Grenzwerte stehen in Klammern. Durch graue Querstriche werden quasistatische Werte von Q und Y, der Maximalwert der Radanhebung und bei den Beschleunigungen der rms-Wert.

Gerades Gleis und sehr große Bogenradien, V=88 km/h

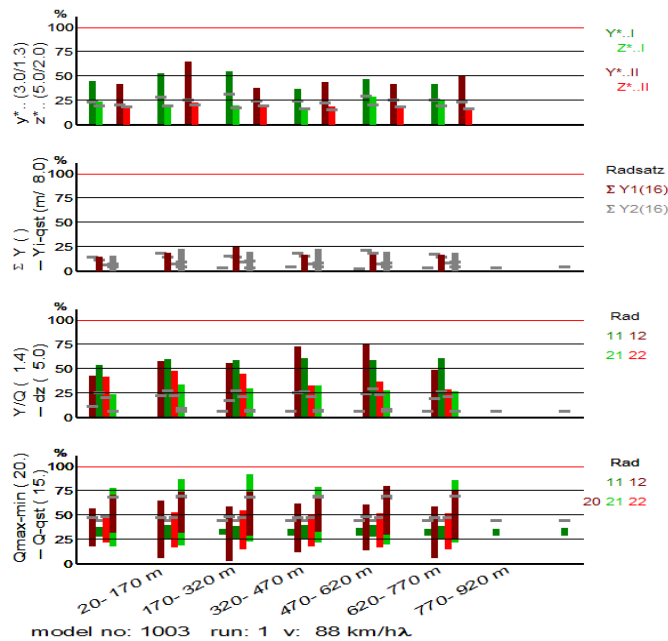


Fig. 7: Grenzwertbezogene Werte von $y^* \dots$, $z^* \dots$, ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz

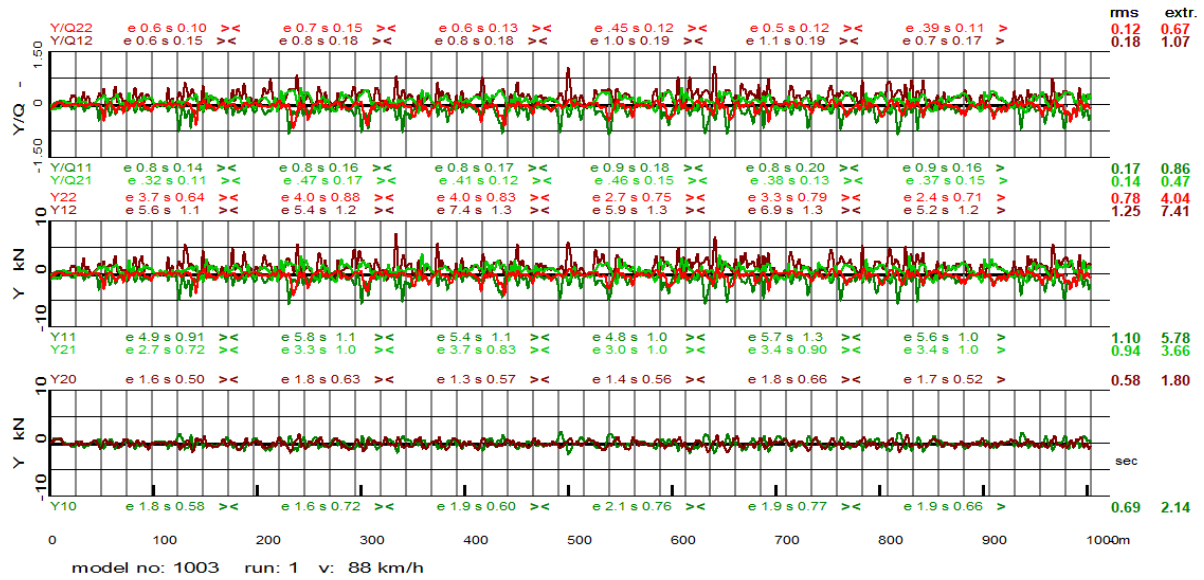


Fig. 8: Verhältnis $Y/Q_{ij,i,j=1,2}$ und Querkräfte $Y_{ij,i=1,2,j=0:2}$

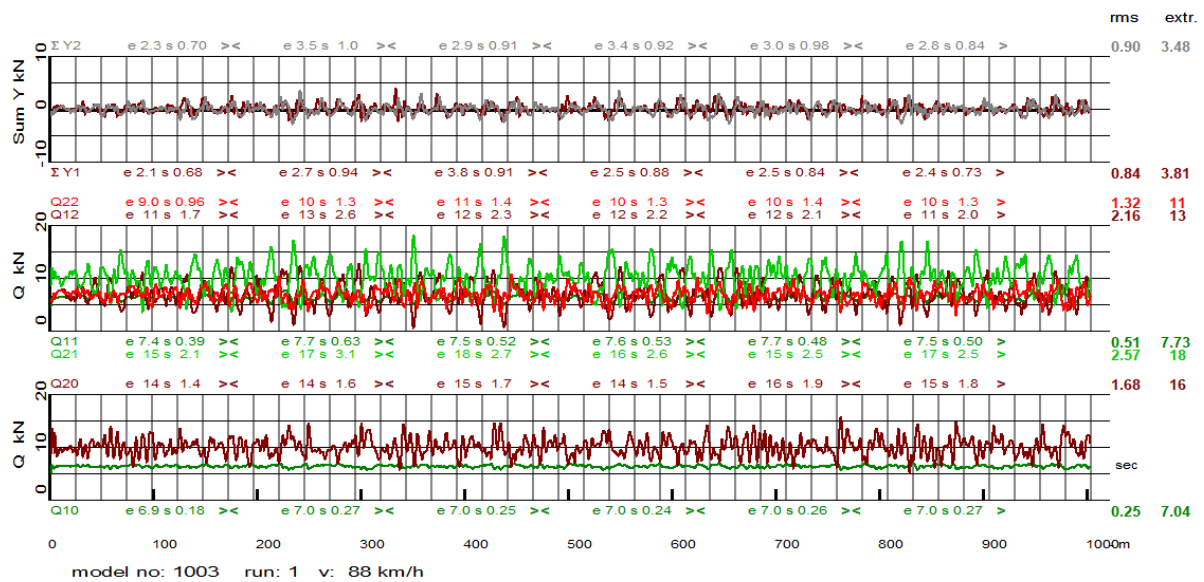


Fig. 9: $\sum Y_i, i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij,i=1,2,j=0:2}$

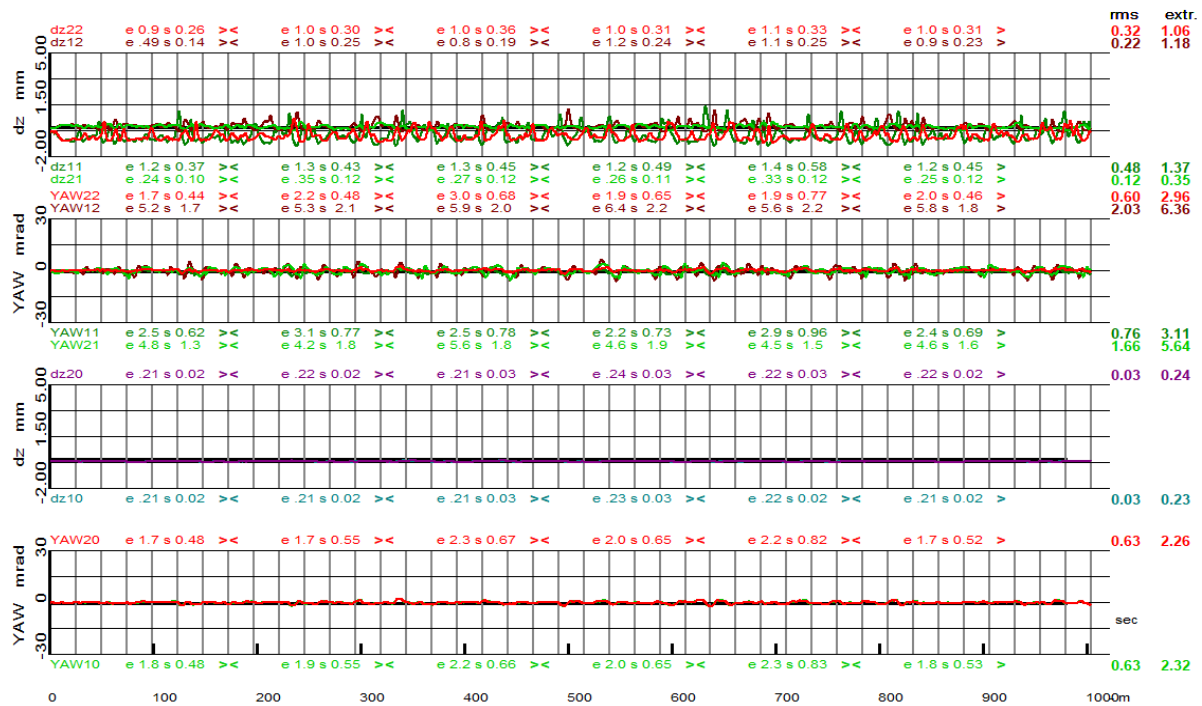


Fig. 10: Radanhebung $dz_{ij}, i=1,2, j=0:2$ und Anlaufwinkel $yaw_{ij}, i=1,2, j=0:2$

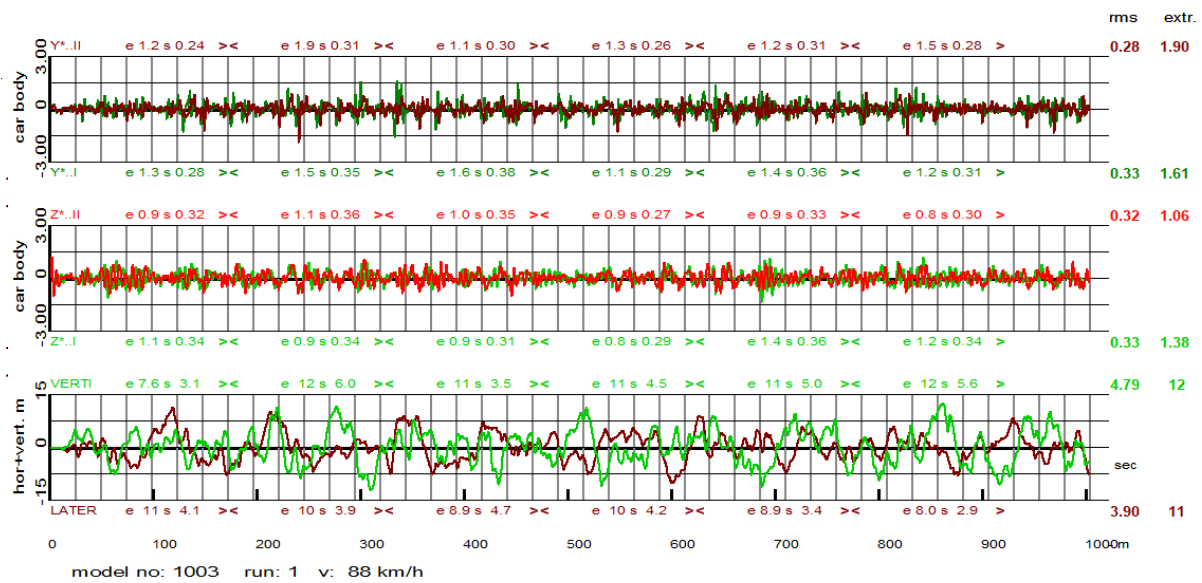


Fig. 11: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und chienenstörungen quer und vertikal

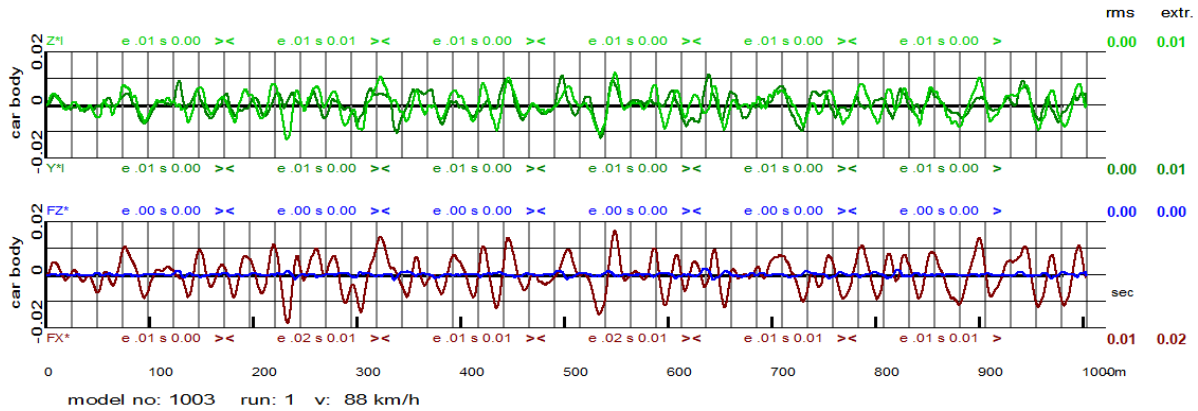


Fig. 12: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal

Gerades Gleis und sehr große Bogenradien, V=60 km/h

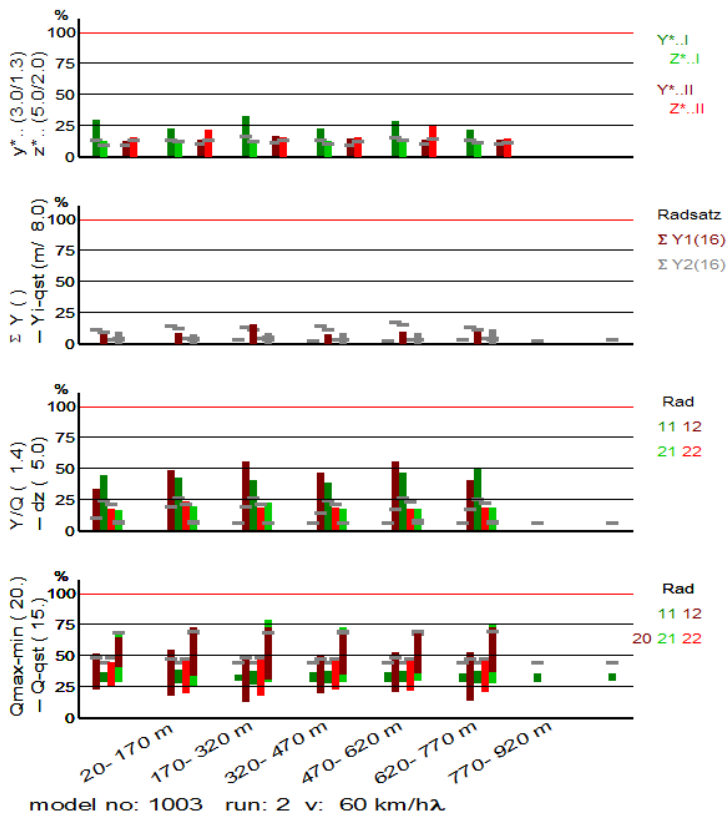


Fig. 13: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz

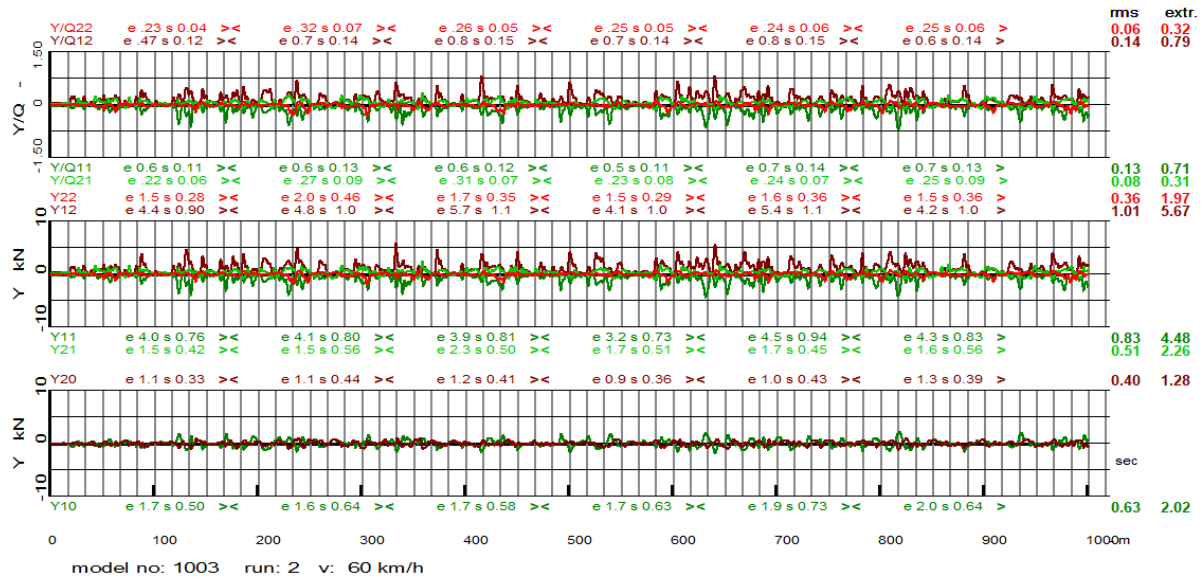


Fig. 14: Verhältnis Y/Q_{I,J=1,2} und Querkräfte Y_{ij,i=1,2,j=0:2}

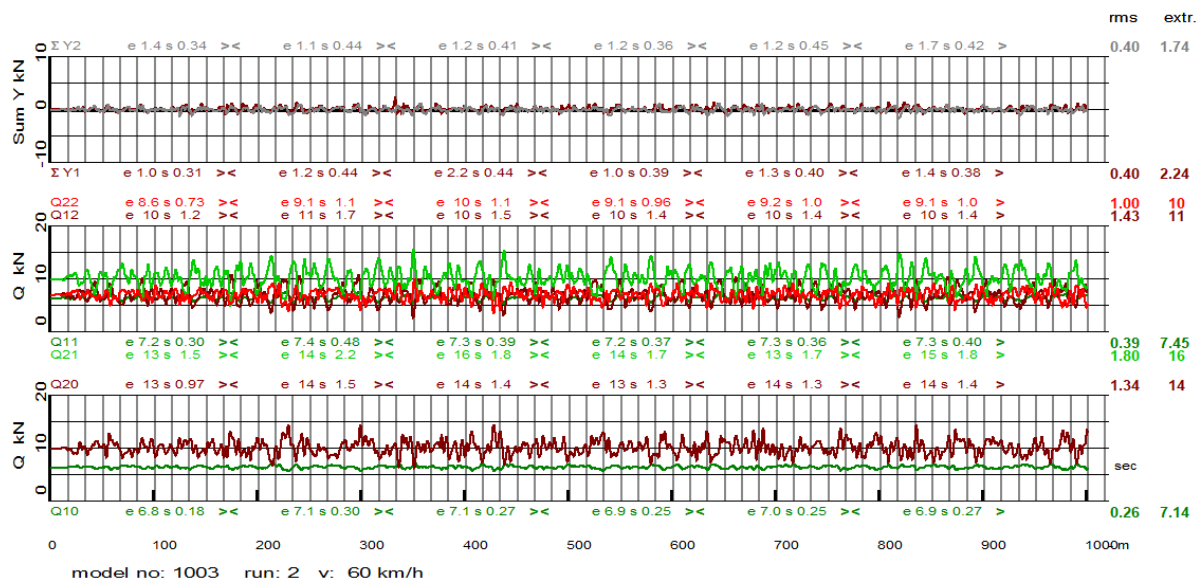


Fig. 15: $\sum Y_i, i=1,2$ und Radlasten Q_{ij,i=1,2,j=0:2}

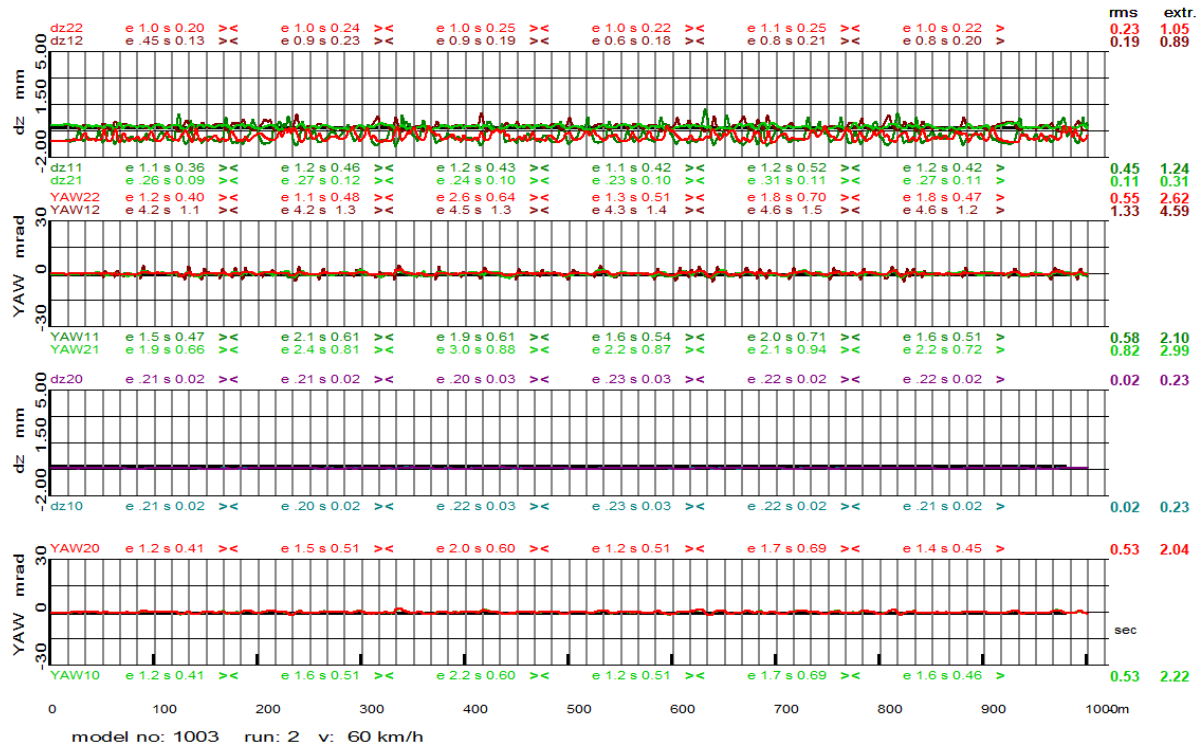


Fig. 16: Radanhebung dzij,i=1,2,j=0:2 und Anlaufwinkel yawij,i=1,2,j=0:2

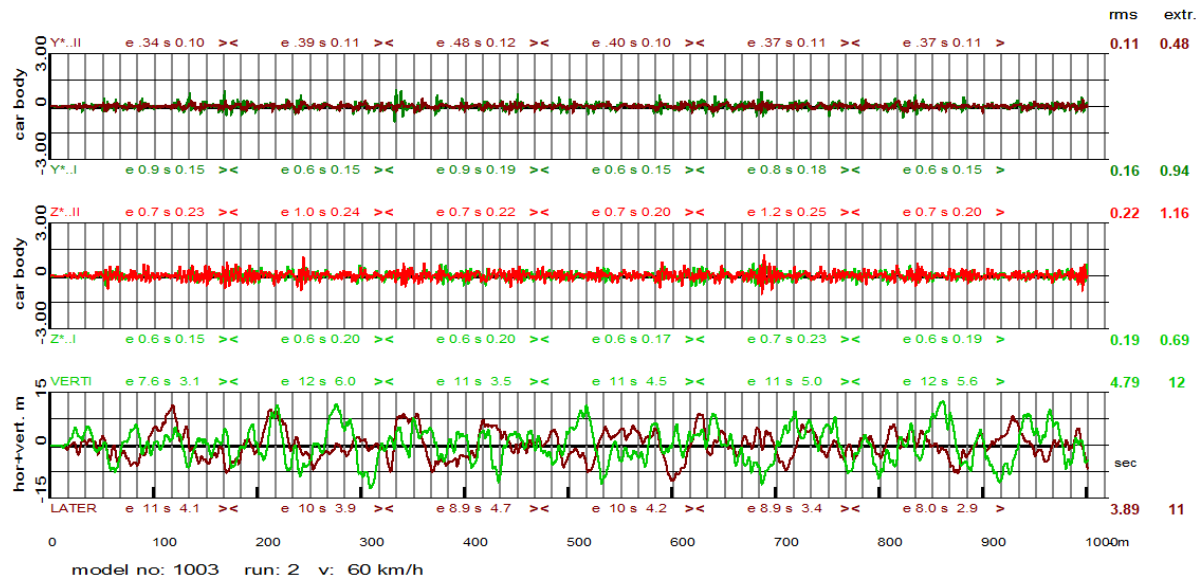


Fig. 17: Kastenbeschleunigungen quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen

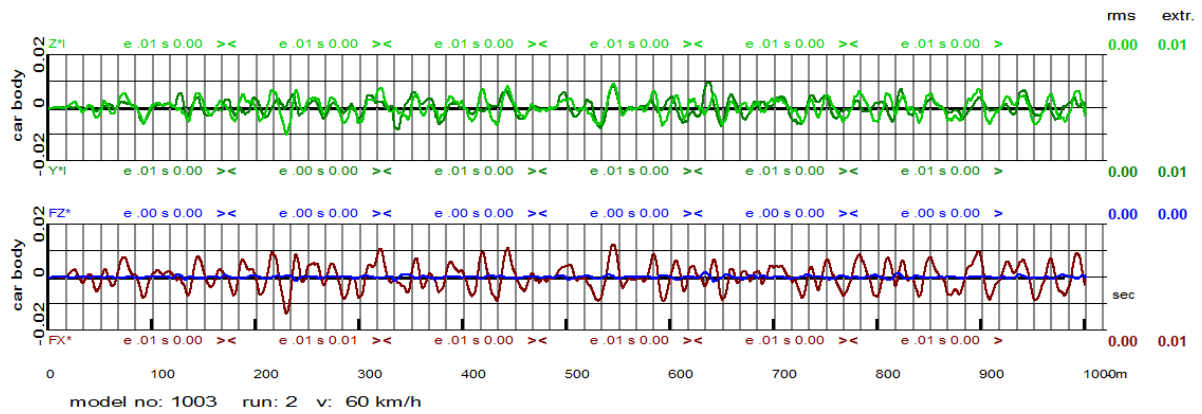


Fig. 18: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal



Große Bogenradien, Bogenradius 700 m, Überhöhung 90 mm

Rechtskurve run 1, Linkskurve run3, Überhöhungsfehlbedarf 80 mm

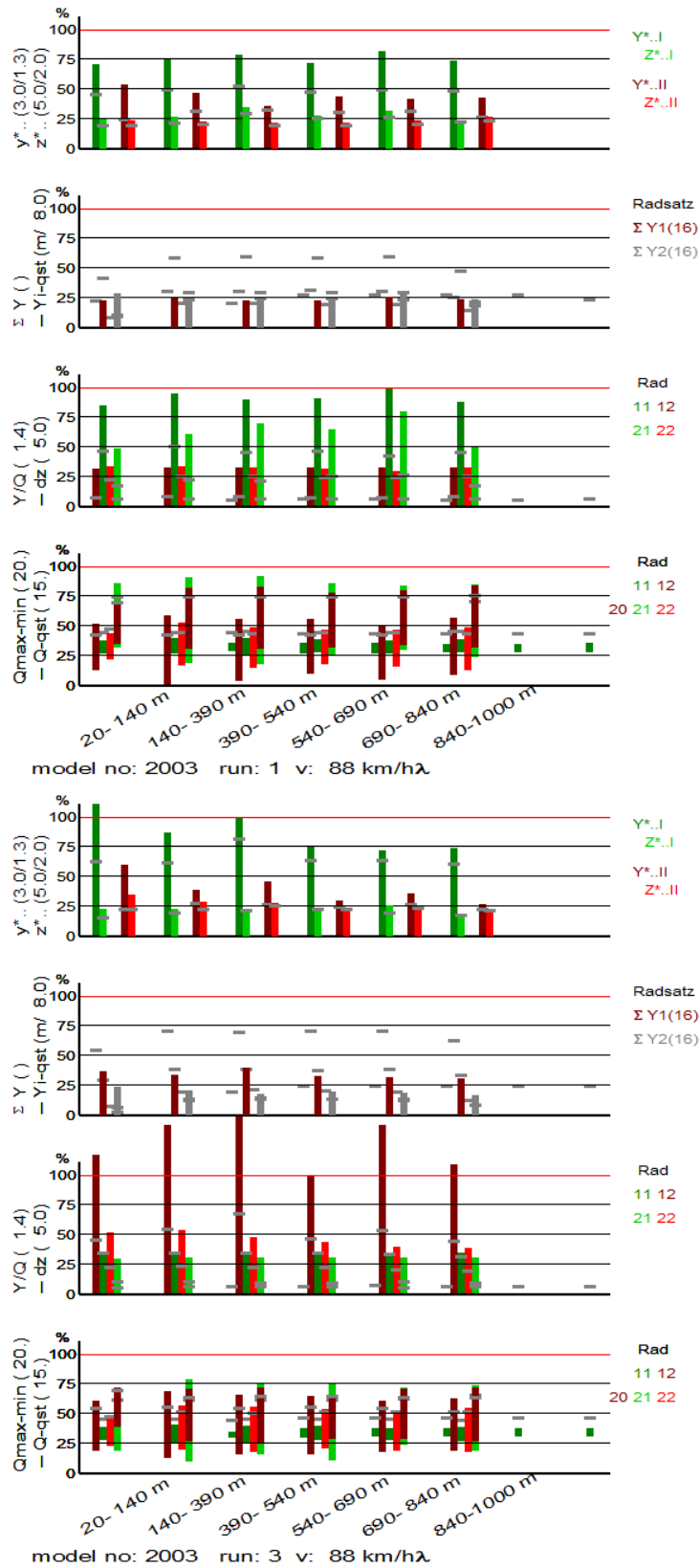


Fig. 19: Grenzwertbezogene Werte von y^* ., z^* ., ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz

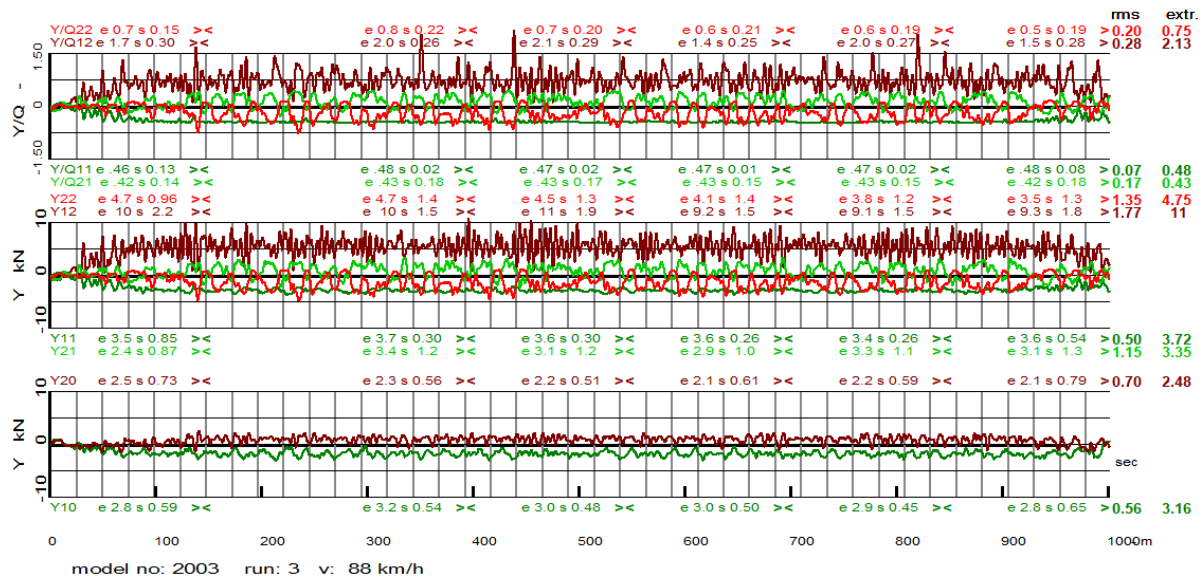
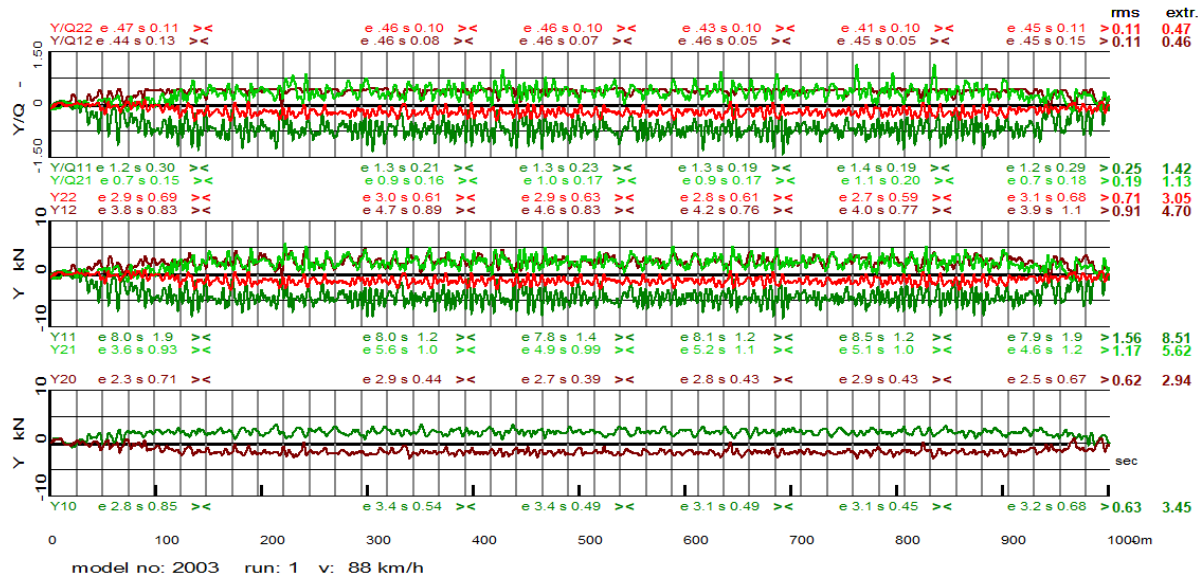


Fig. 20: Verhältnis Y/Q_{ij}, i, j=1, 2 und Querkräfte Y_{ij}, i=1, 2, j=0: 2

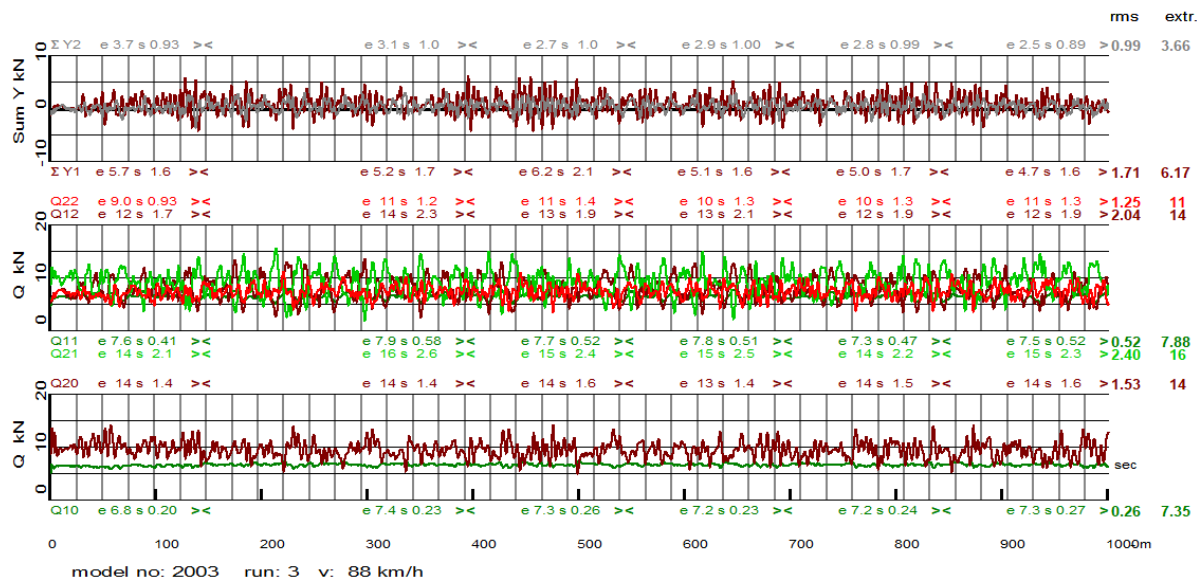
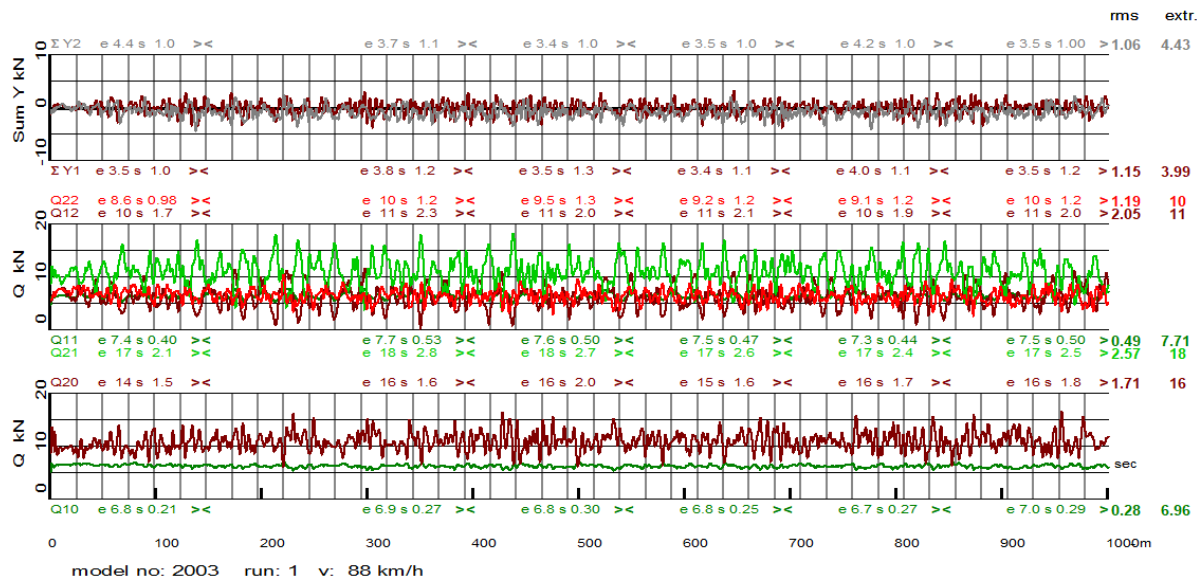


Fig. 21: $\Sigma Y_i, i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij}, i=1,2, j=0:2$

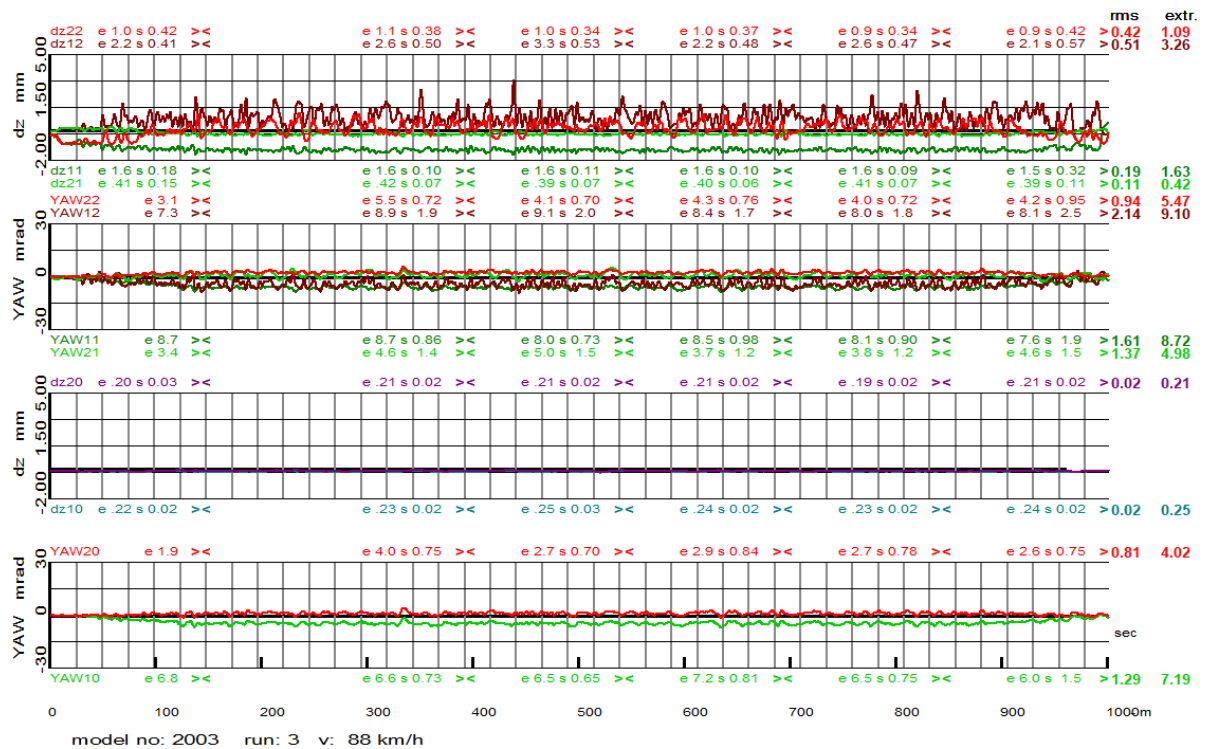
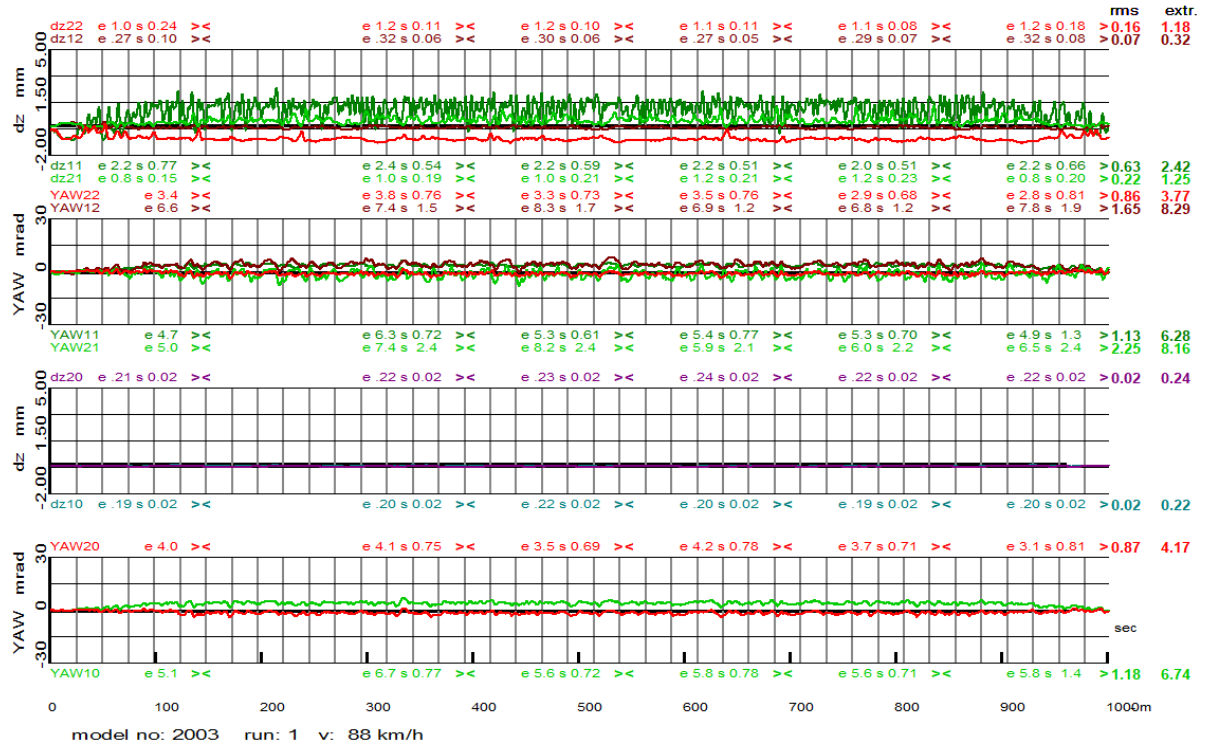


Fig. 22: Radanhebung dzij,i=1,2,j=0 und Anlaufwinkel yawij,i=1,2,j=0:2

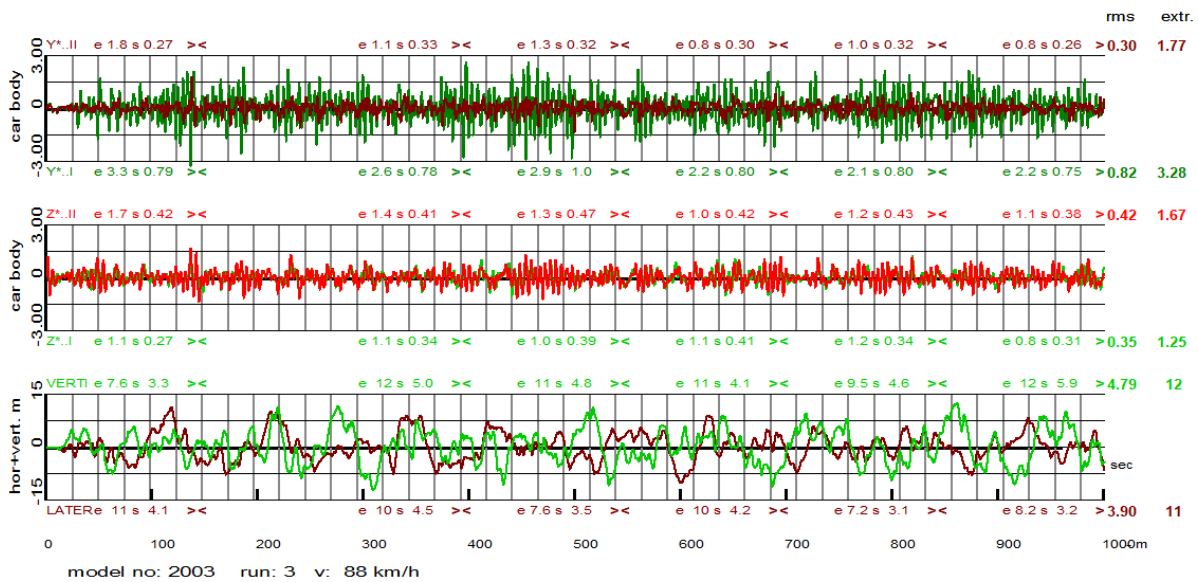
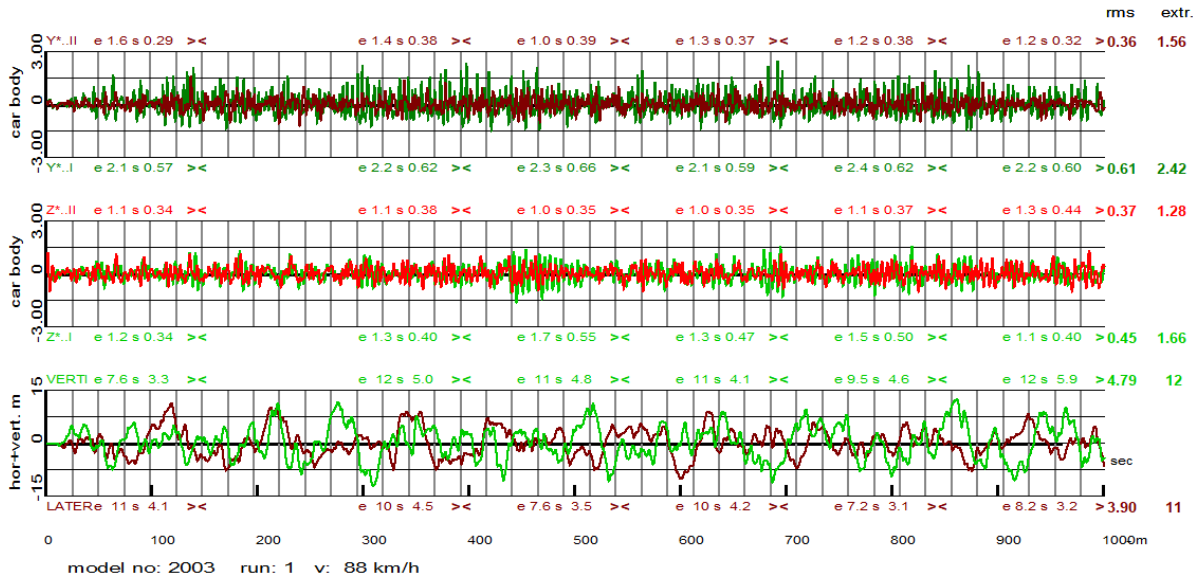
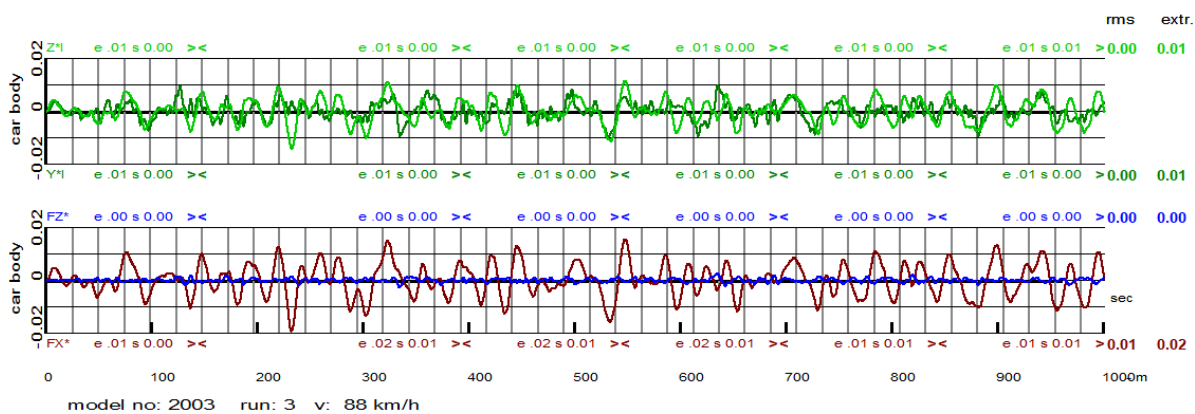
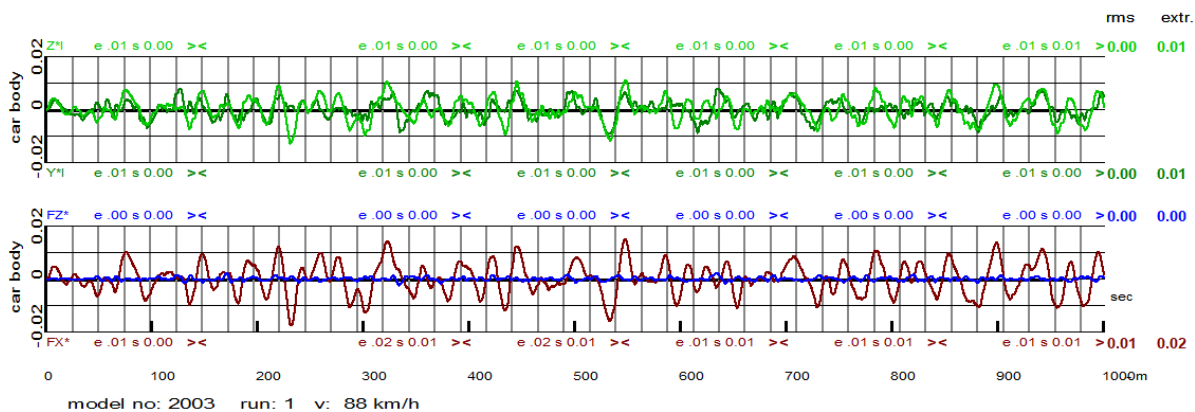


Fig. 23: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen



Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal



Kleine Bogenradien, Radius 450 m, Überhöhung 165 mm

Rechtskurve run 1, Linkskurve run3, Überhöhungsfehlbedarf 80 mm

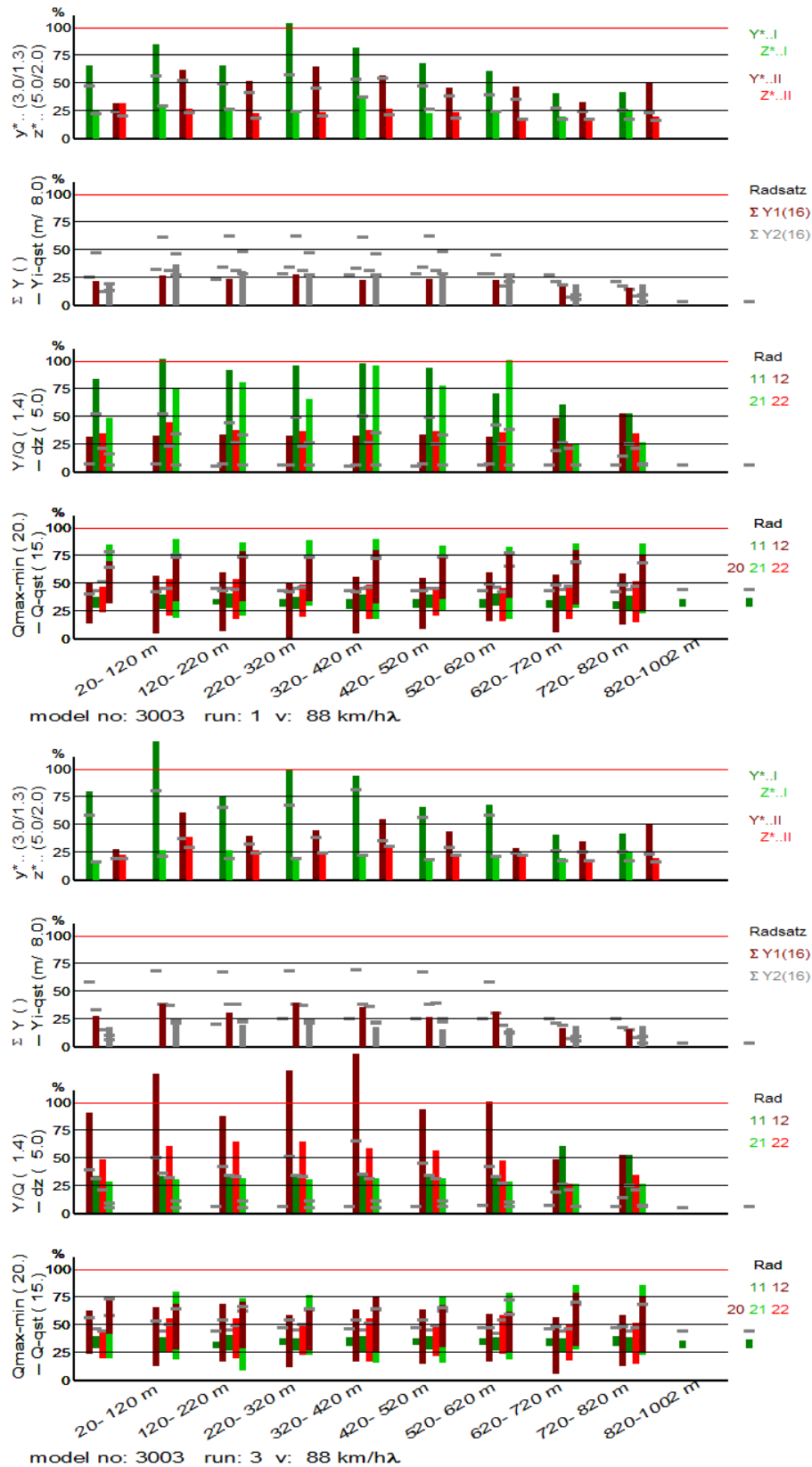


Fig. 24: Grenzwertbezogene Werte von $y^*_{..}$, $z^*_{..}$, ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz

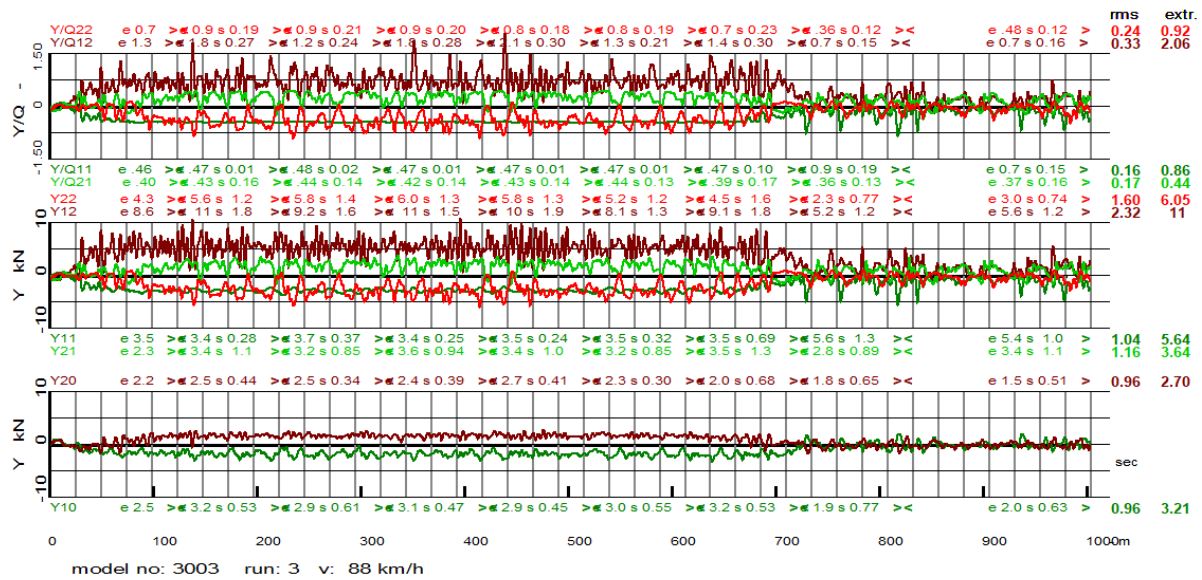
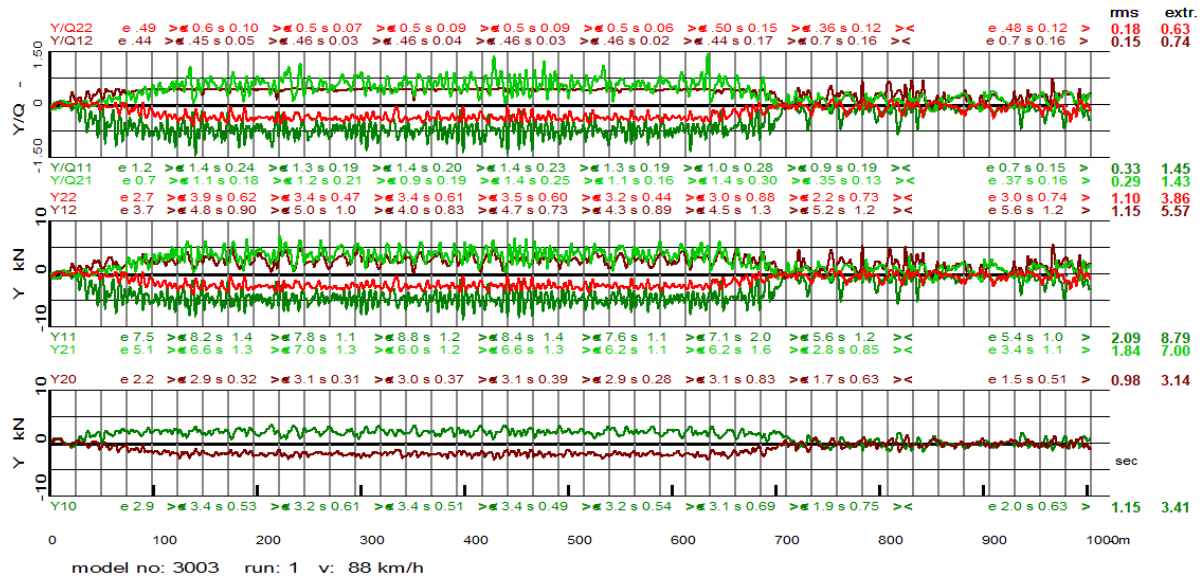


Fig. 25: Verhältnis Y/Q_{l,j}, l,j=1,2 und Querkräfte Y_{ij}, i=1,2, j=0:2

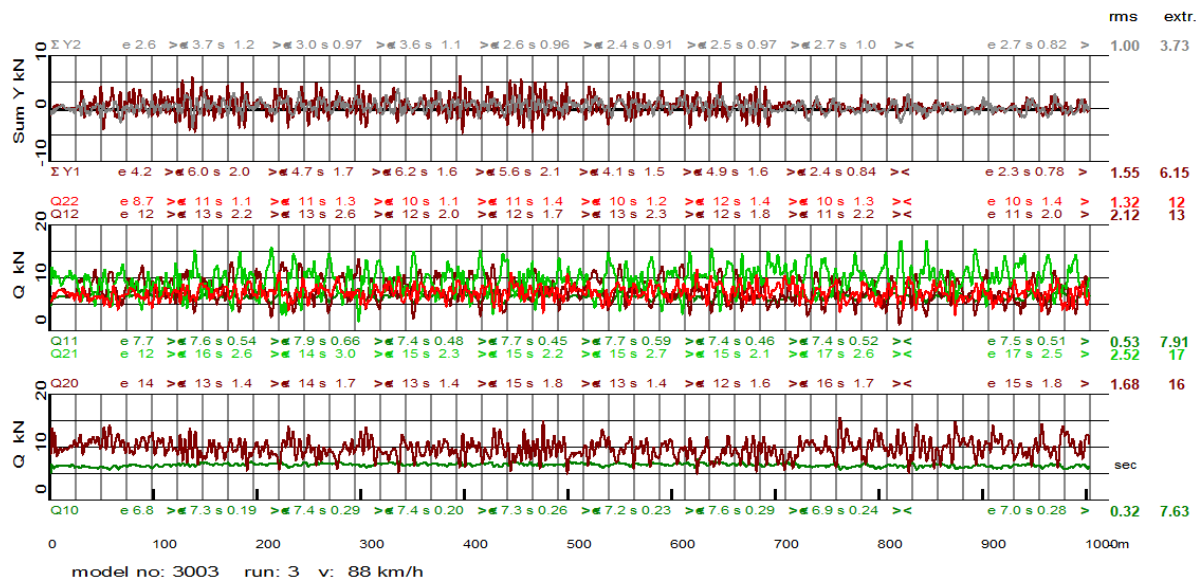
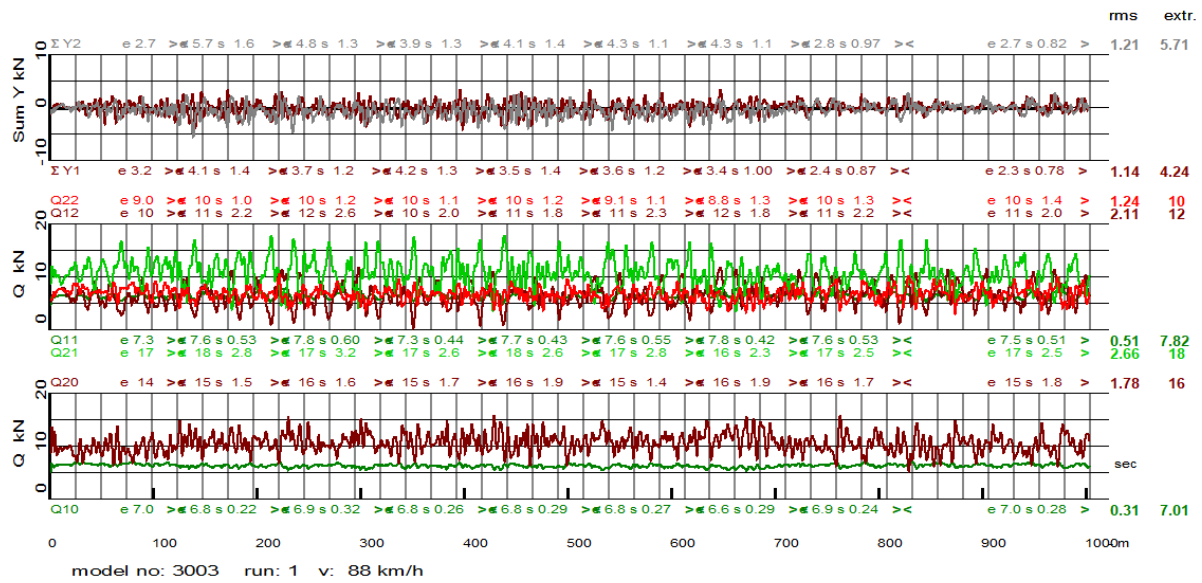


Fig. 26: $\Sigma Y_i, i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij}, i=1,2, j=0:2$

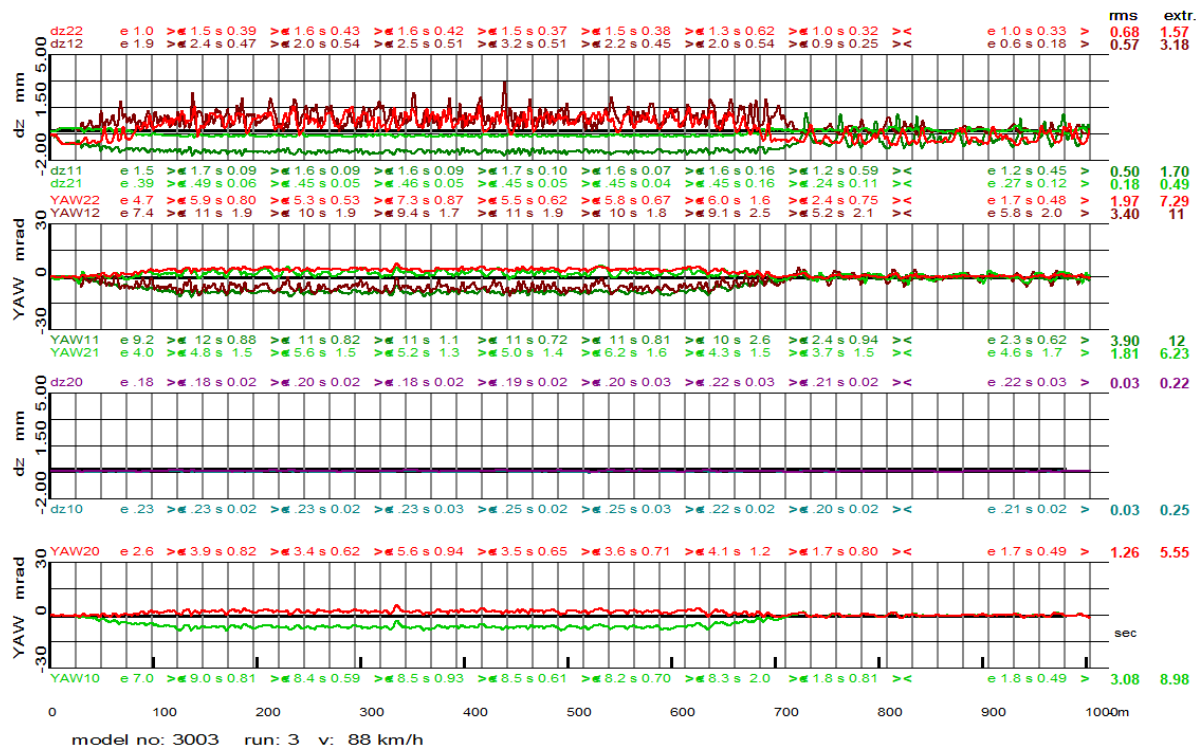
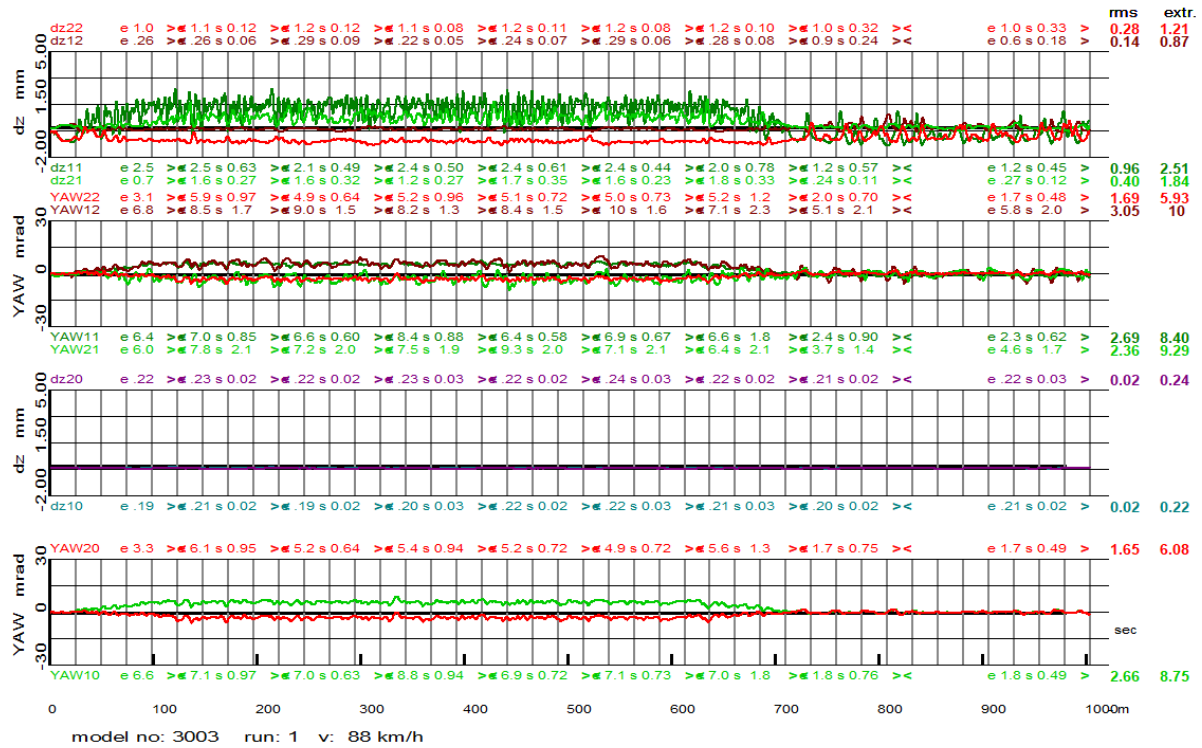


Fig. 27: Radanhebung dzij,i=1,2,j=0:2und Anlaufwinkel yawij,i=1,2,j=0:2

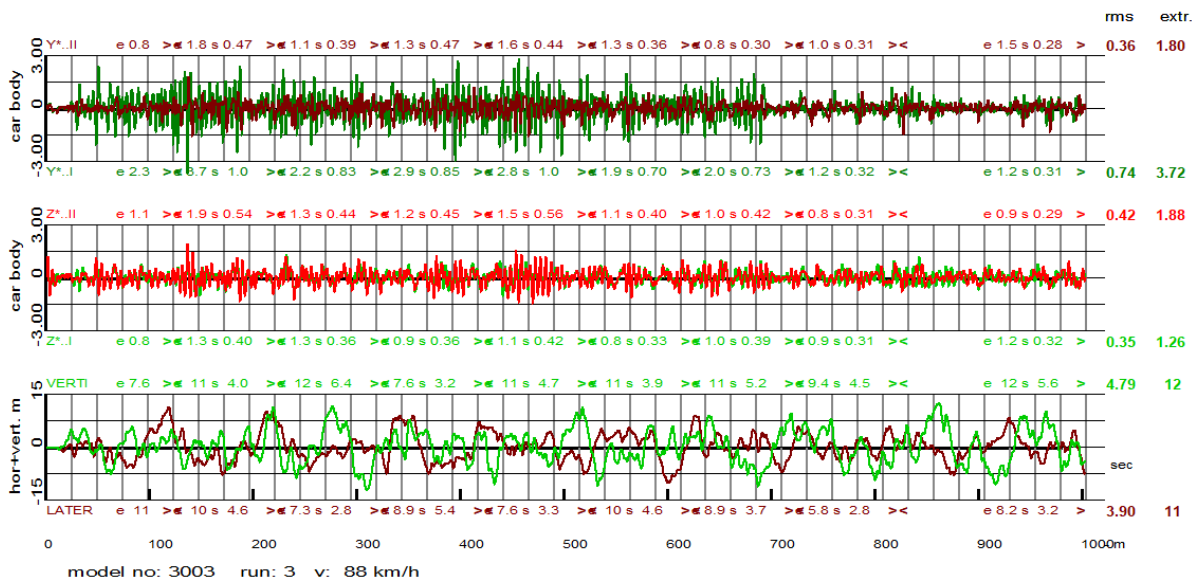
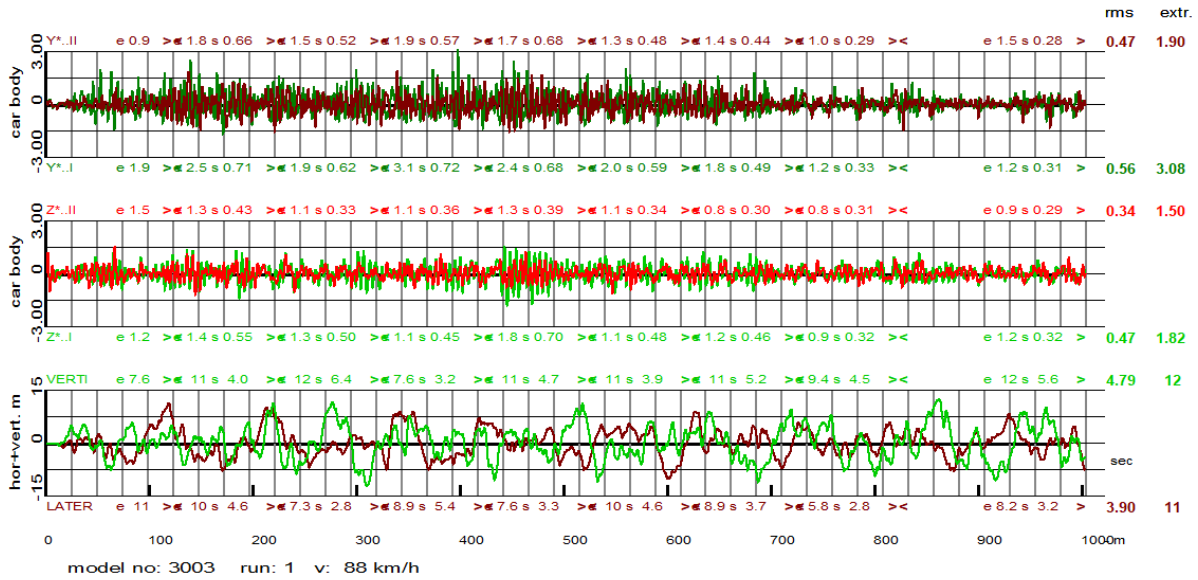


Fig. 28: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen

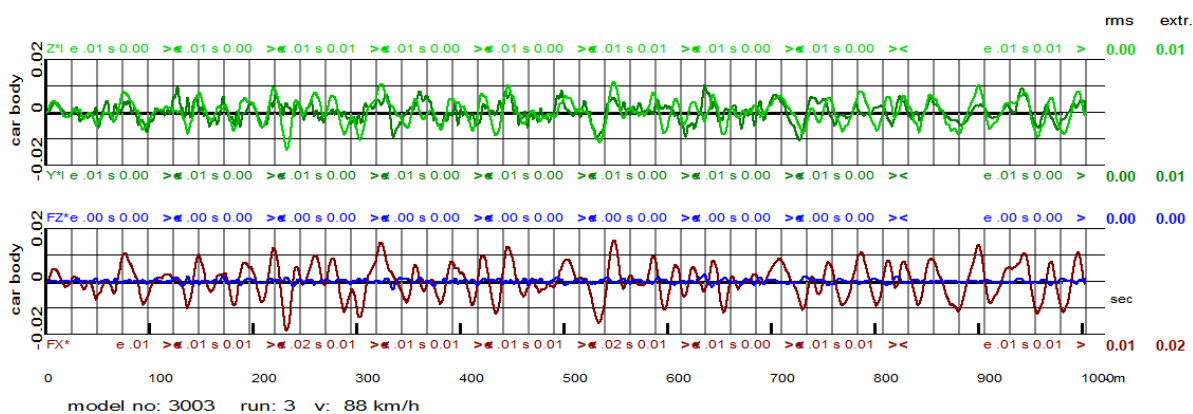
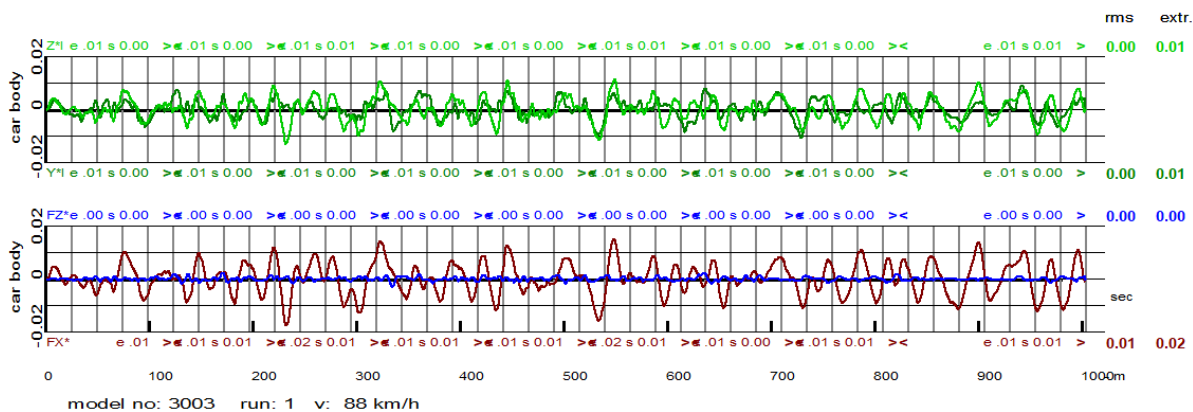


Fig. 29: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal



Sehr kleine Bogenradien, Bogenradius 250 m, Überhöhung 150 mm, Überhöhungsfehlbedarf 115 mm

Rechtskurve run 1, Linkskurve run 3,

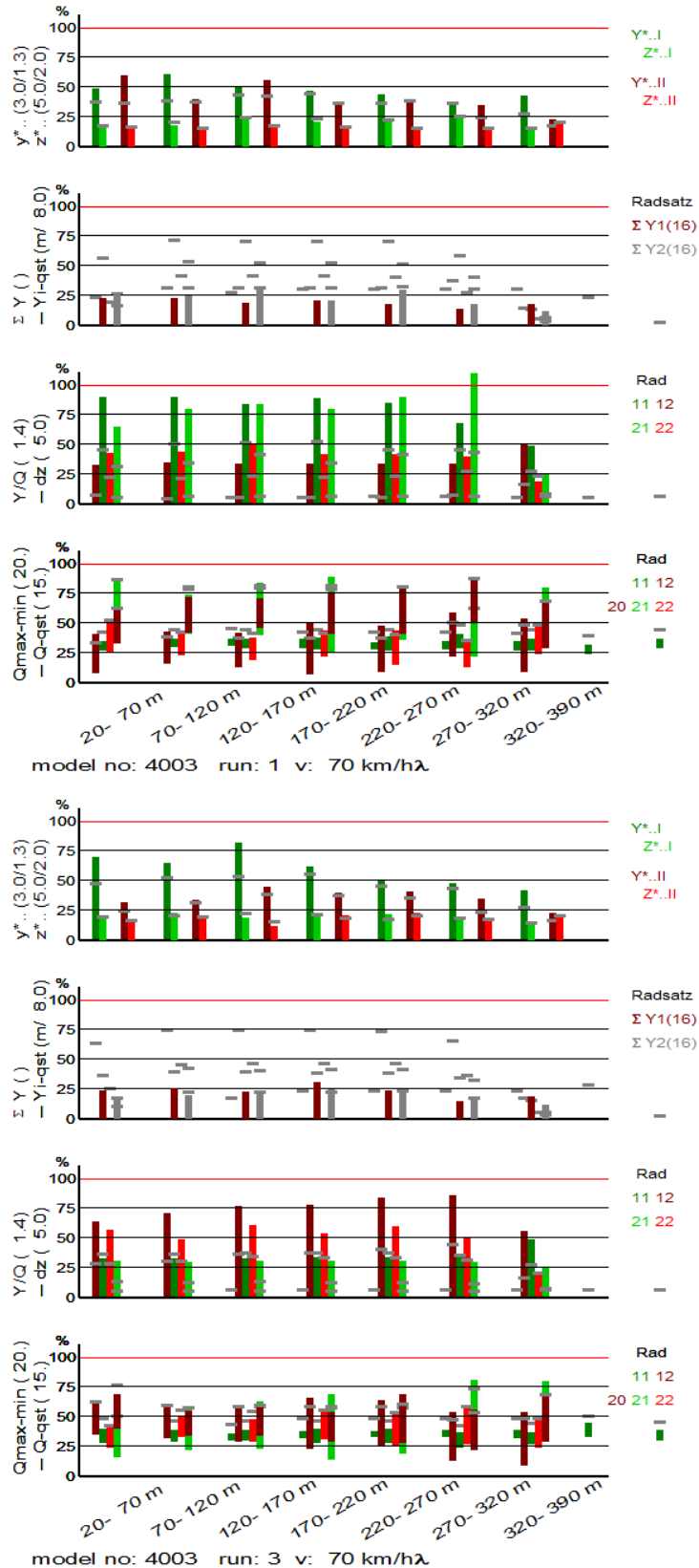


Fig. 30: Grenzwertbezogene Werte von $y^*_{..}$, $z^*_{..}$, ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz

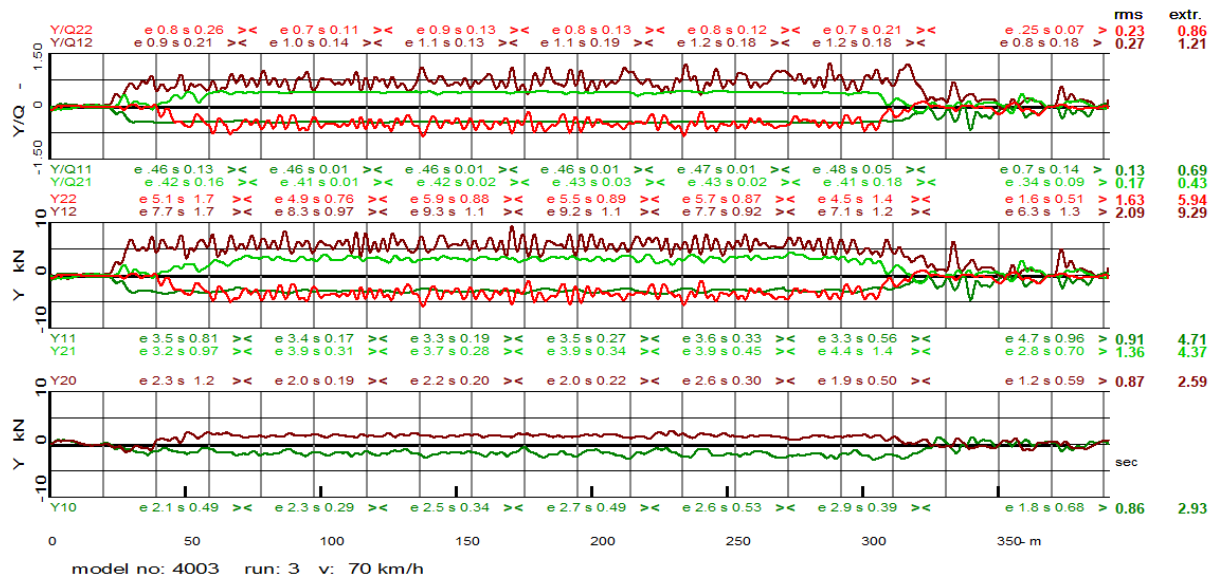
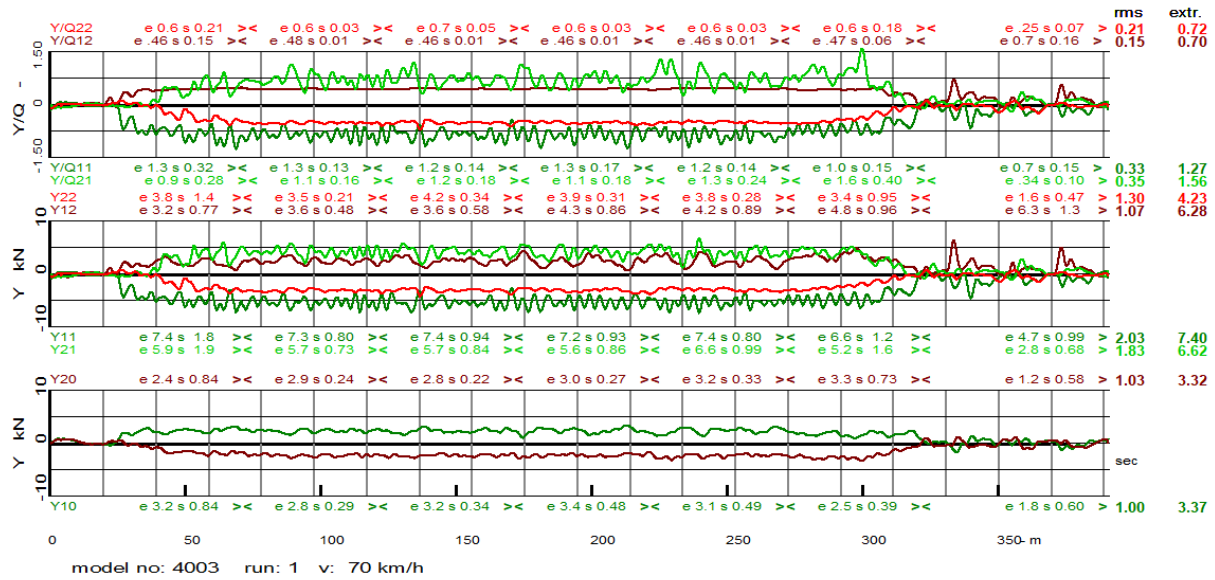


Fig. 31: Verhältnis Y/Q_{I,J}, I,J=1,2 und Querkräfte Y_{ij}, i=1,2, j=0:2

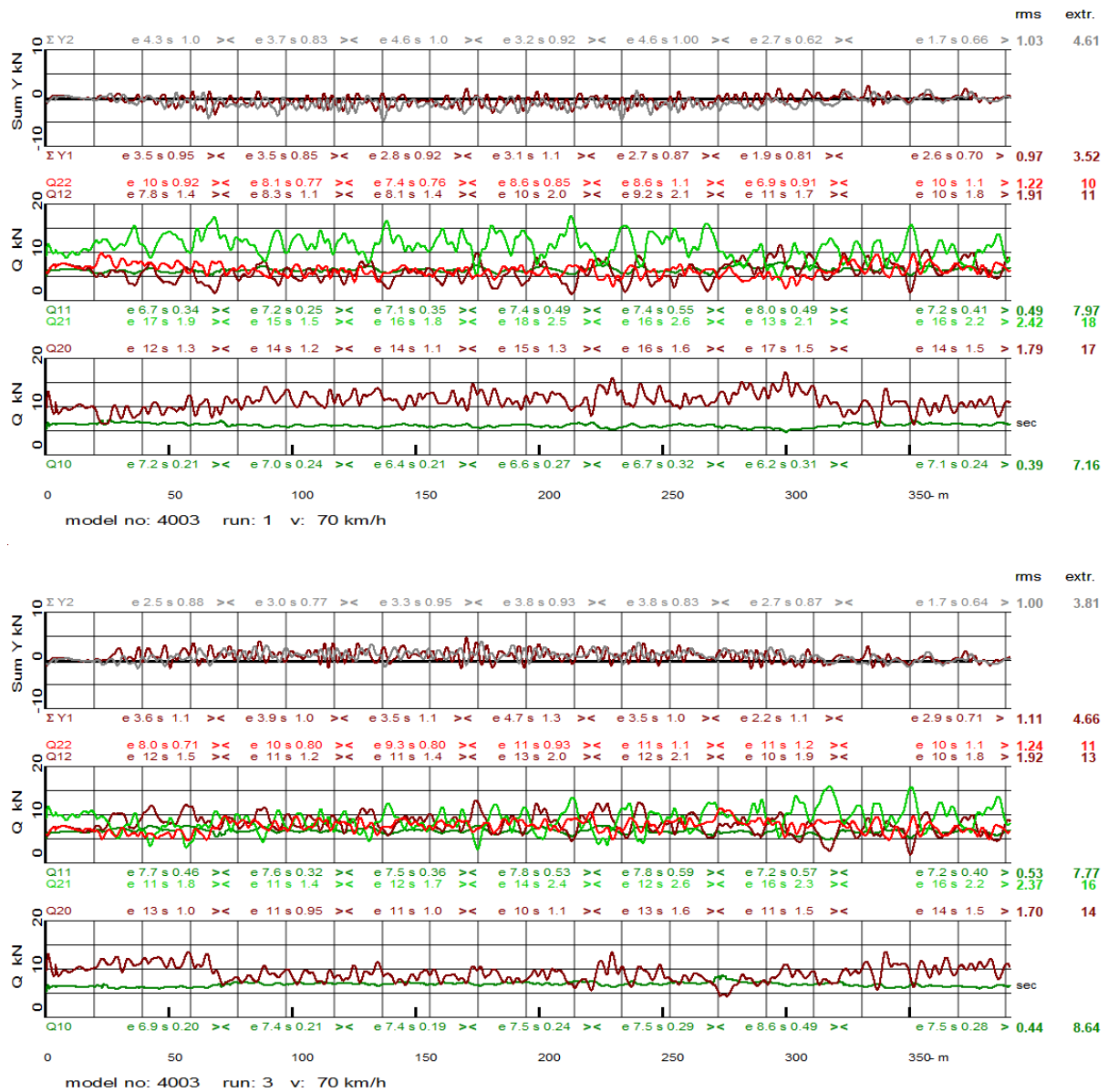


Fig. 32: $\sum Y_i, i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij}, i=1,2, j=0:2$

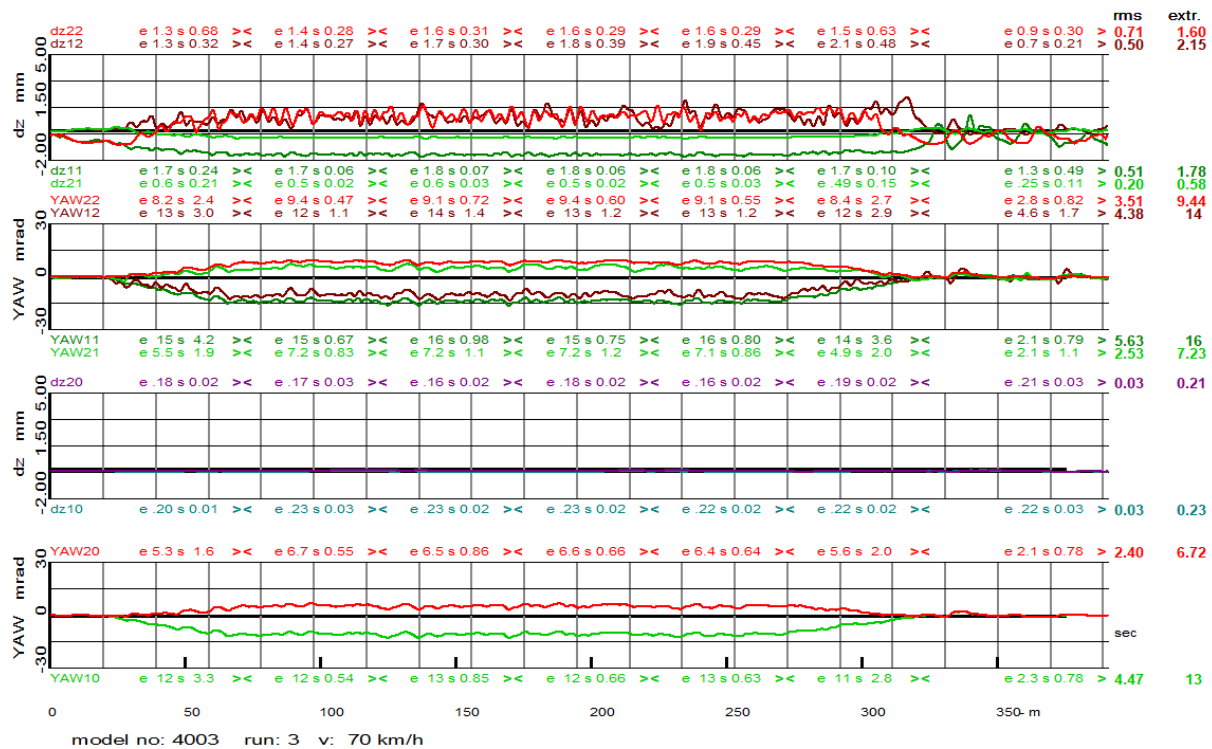
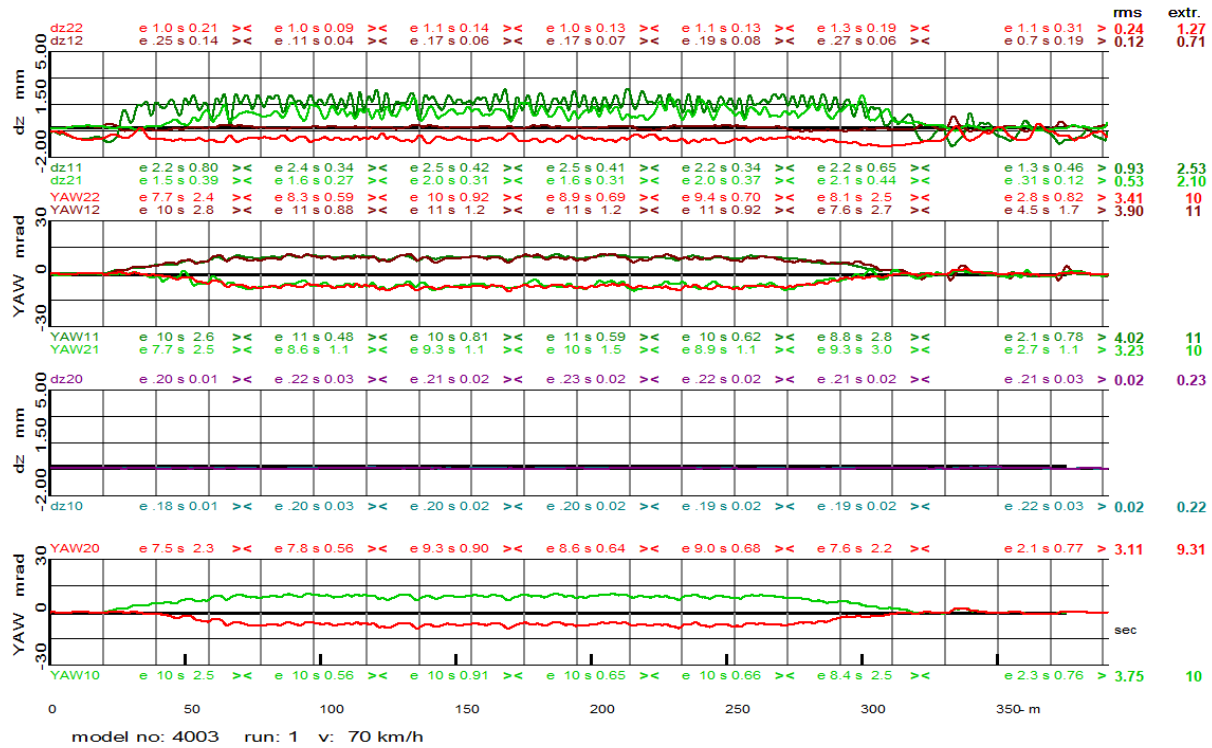


Fig. 33: Radanhebung dz_{ij}, i=1,2, j=0:2 und Anlaufwinkel yaw_{ij}, i=1,2, j=0:2

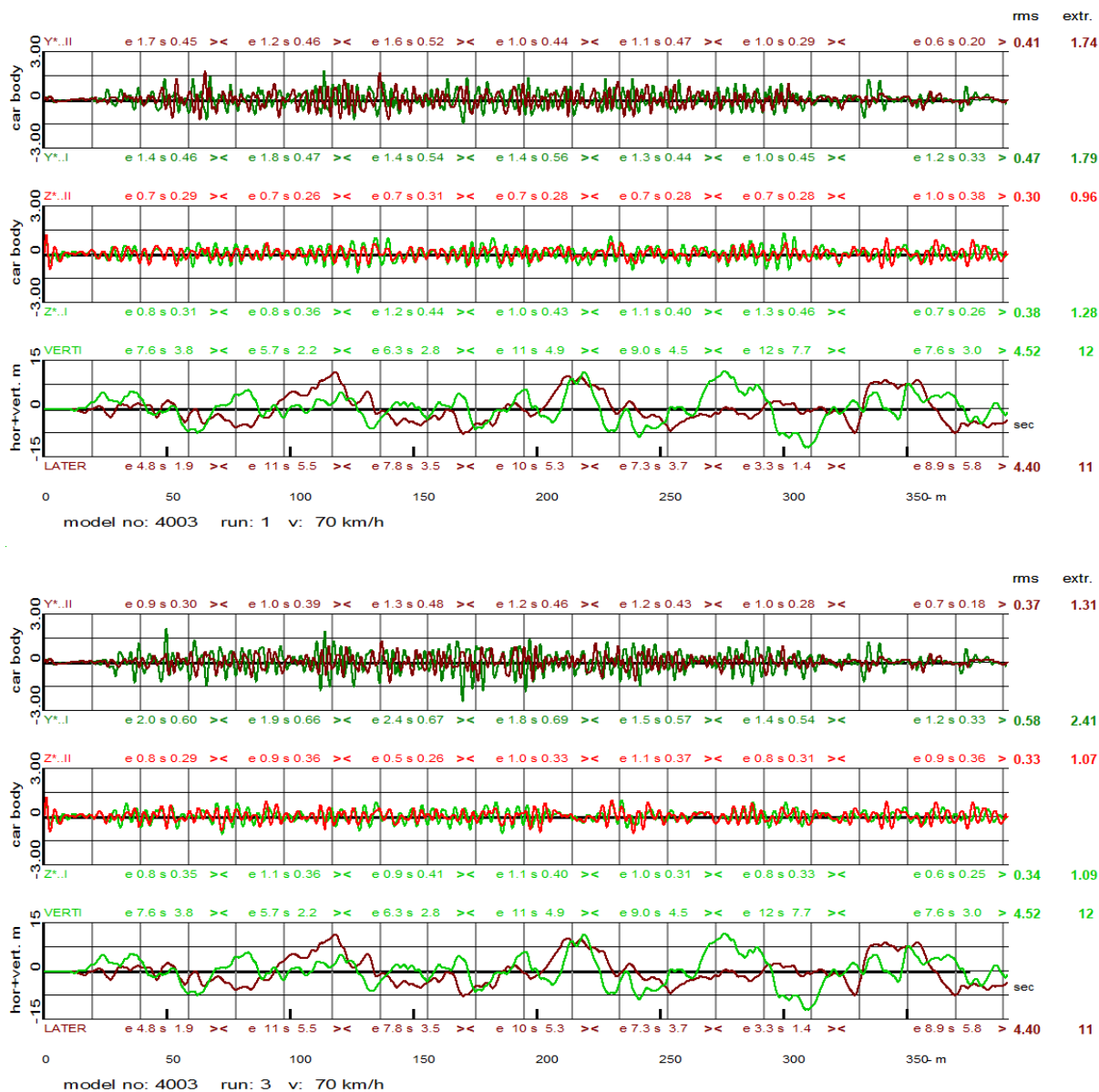


Fig. 34: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen

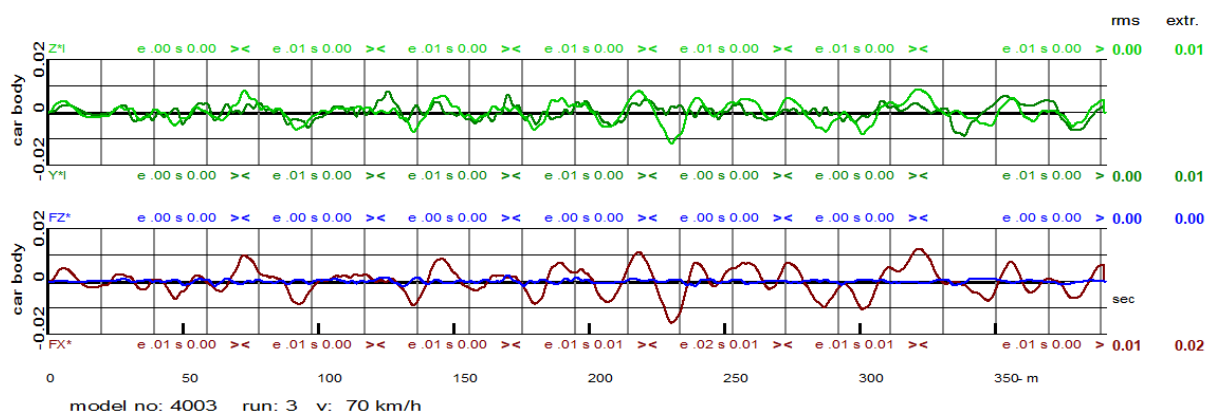
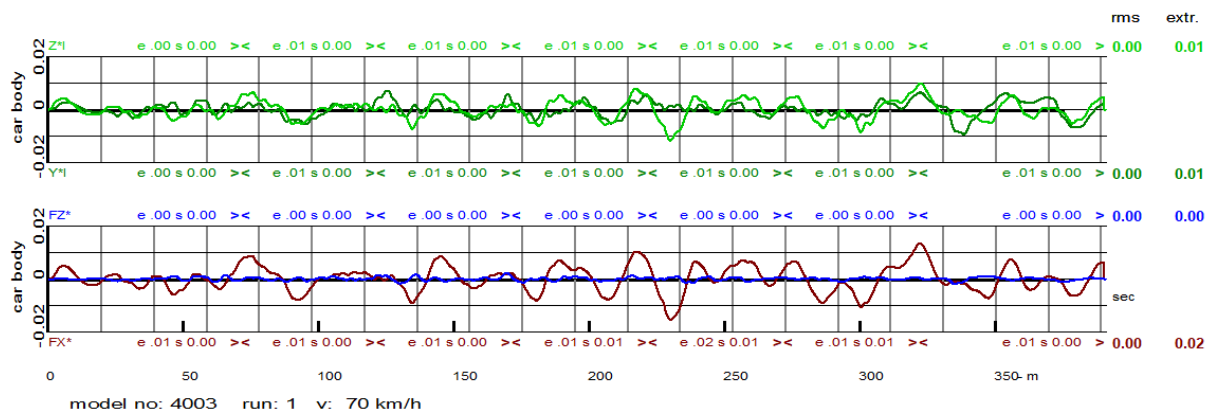


Fig. 35: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal



Sehr kleine Bogenradien, Bogenradius 250 m, Überhöhung 150 mm Überhöhungsfehlbedarf 0 mm

Rechtskurve run 2 , Linkskurve run 4

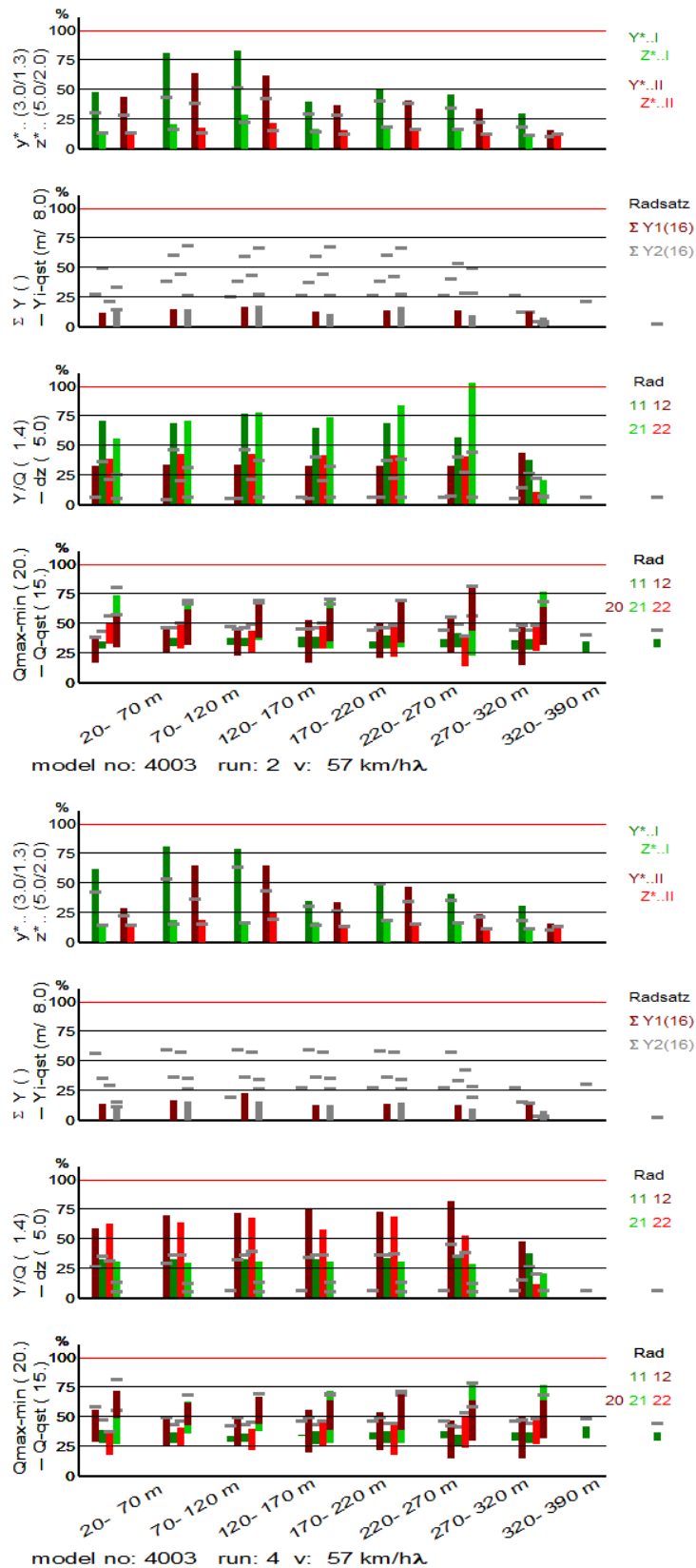


Fig. 36: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz

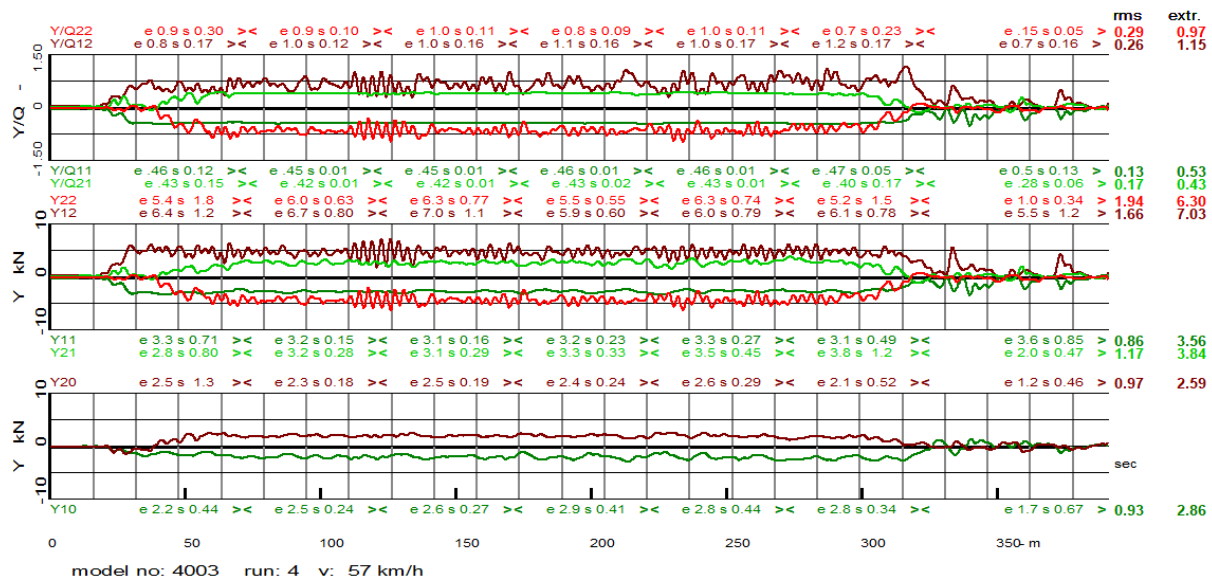
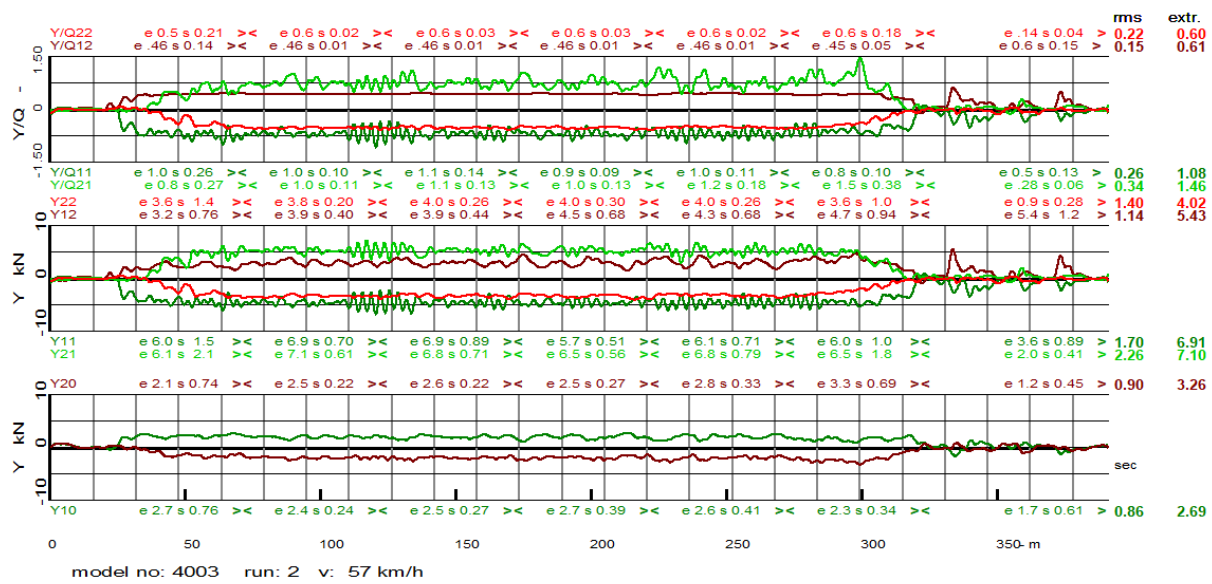


Fig. 37: Verhältnis Y/Q_{I,J}, I,J=1,2 und Querkräfte Y_{ij}, i=1,2, j=0:2

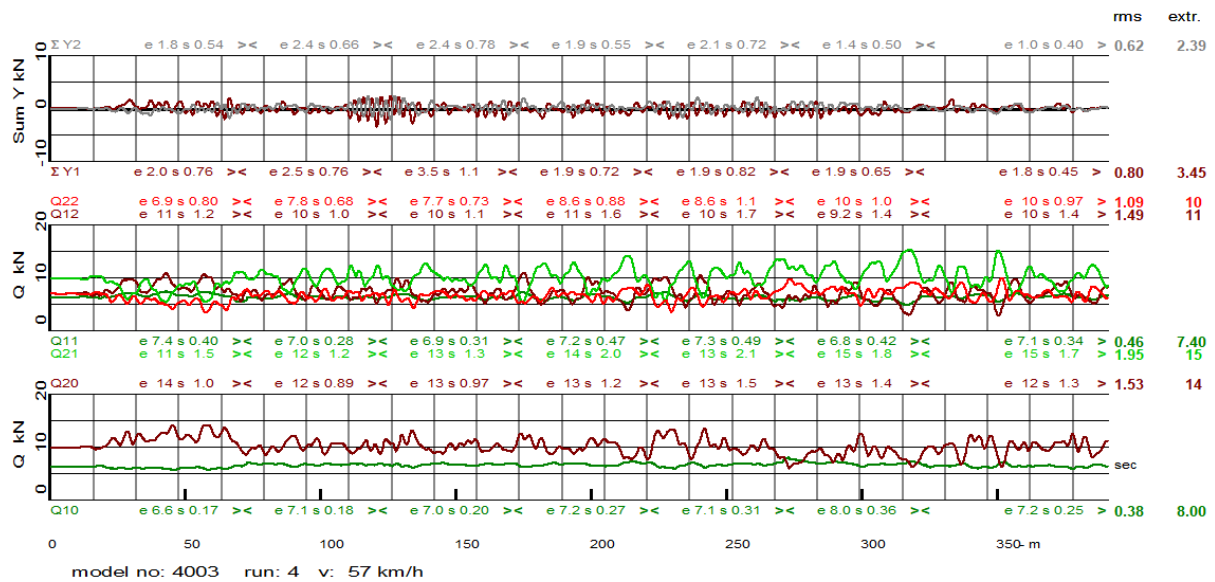
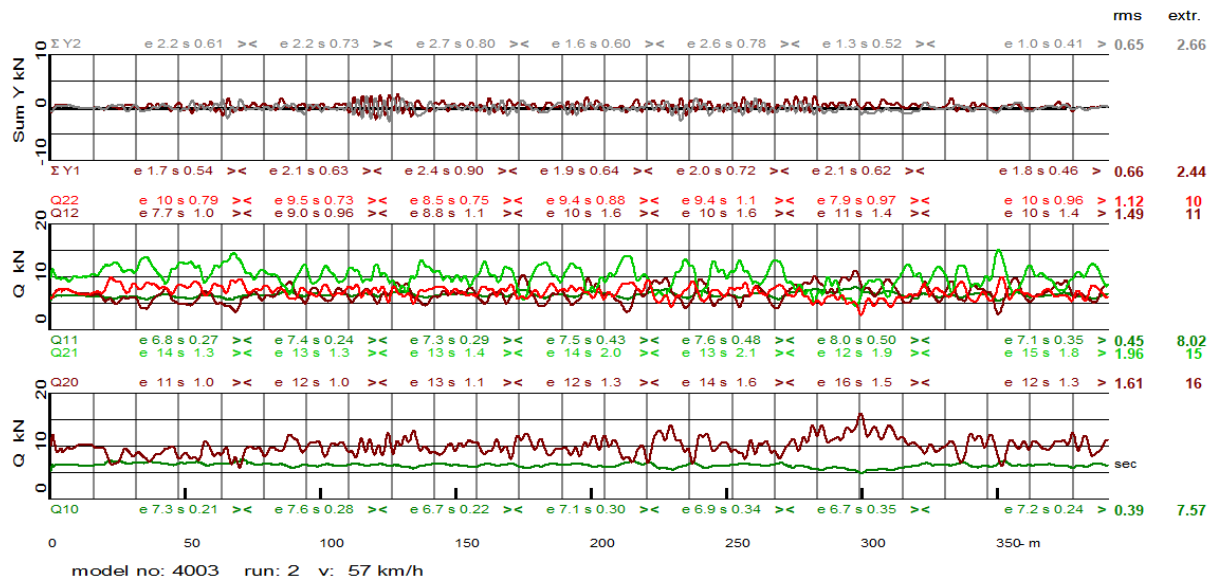


Fig. 38: $\Sigma Y_i, i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij}, i=1,2, j=0:2$

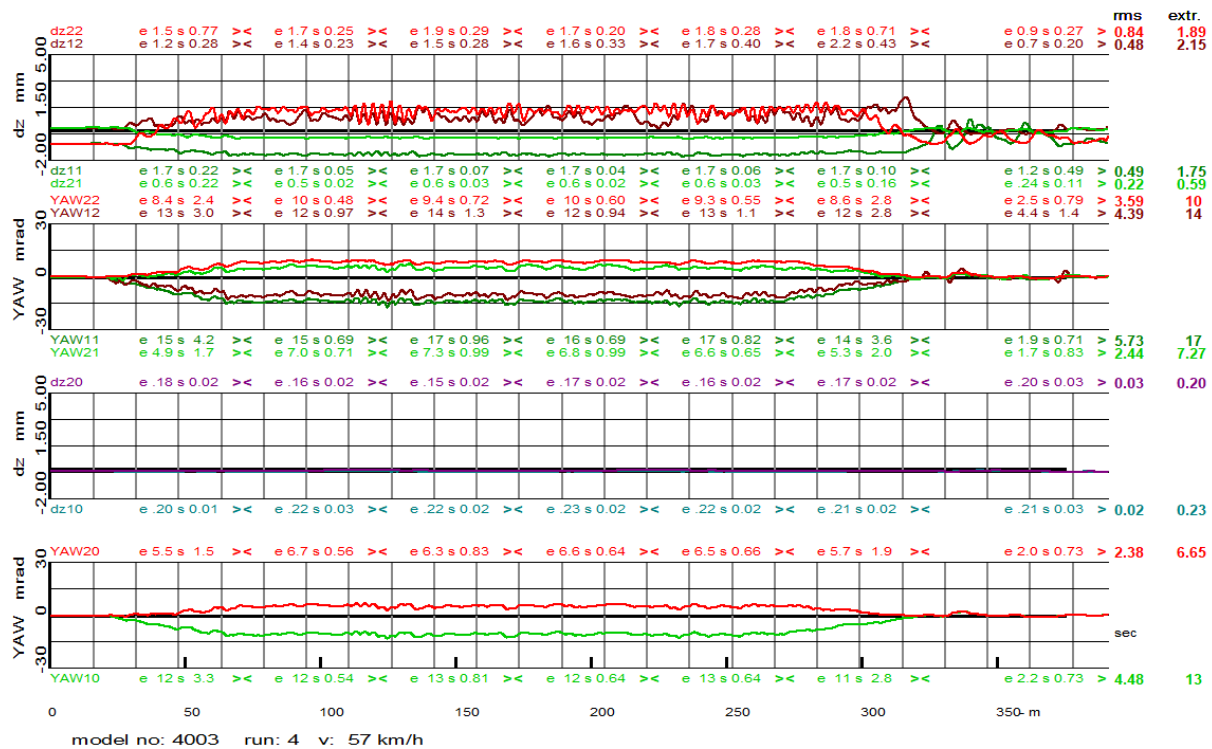
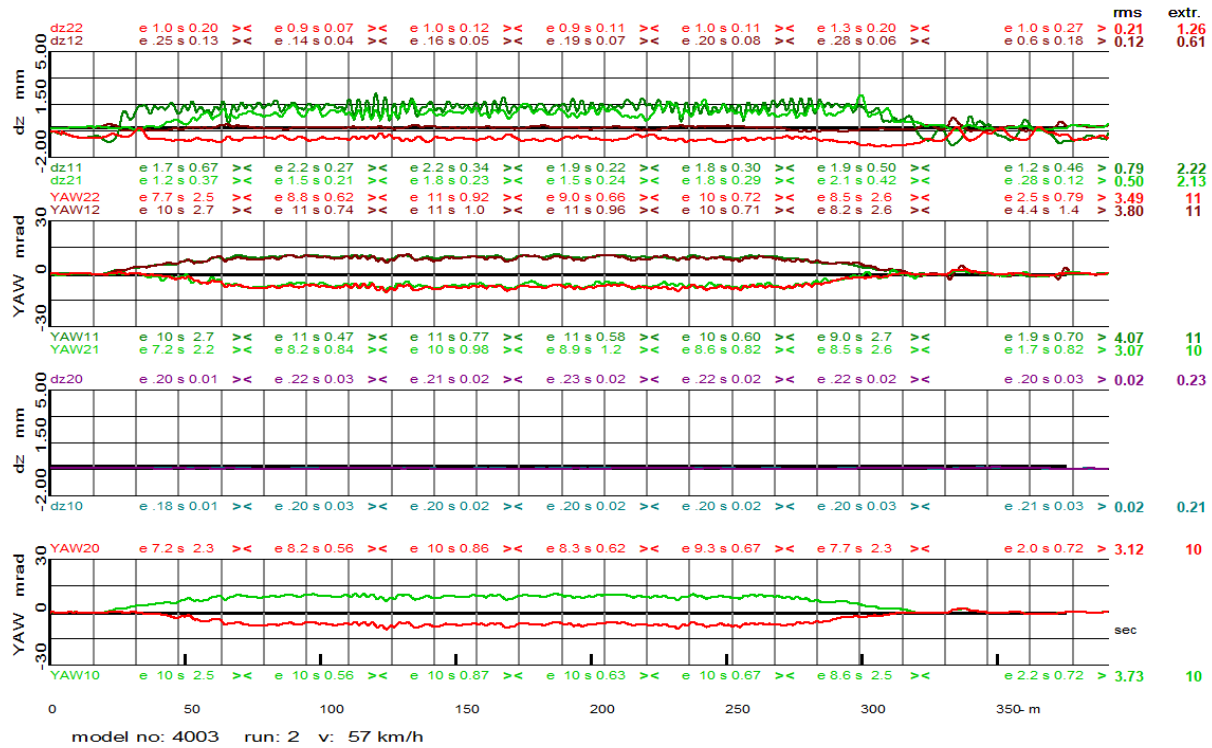


Fig. 39: Radanhebung dz_{ij}, i=1,2, j=0:2 und Anlaufwinkel yaw_{ij}, i=1,2, j=0:2

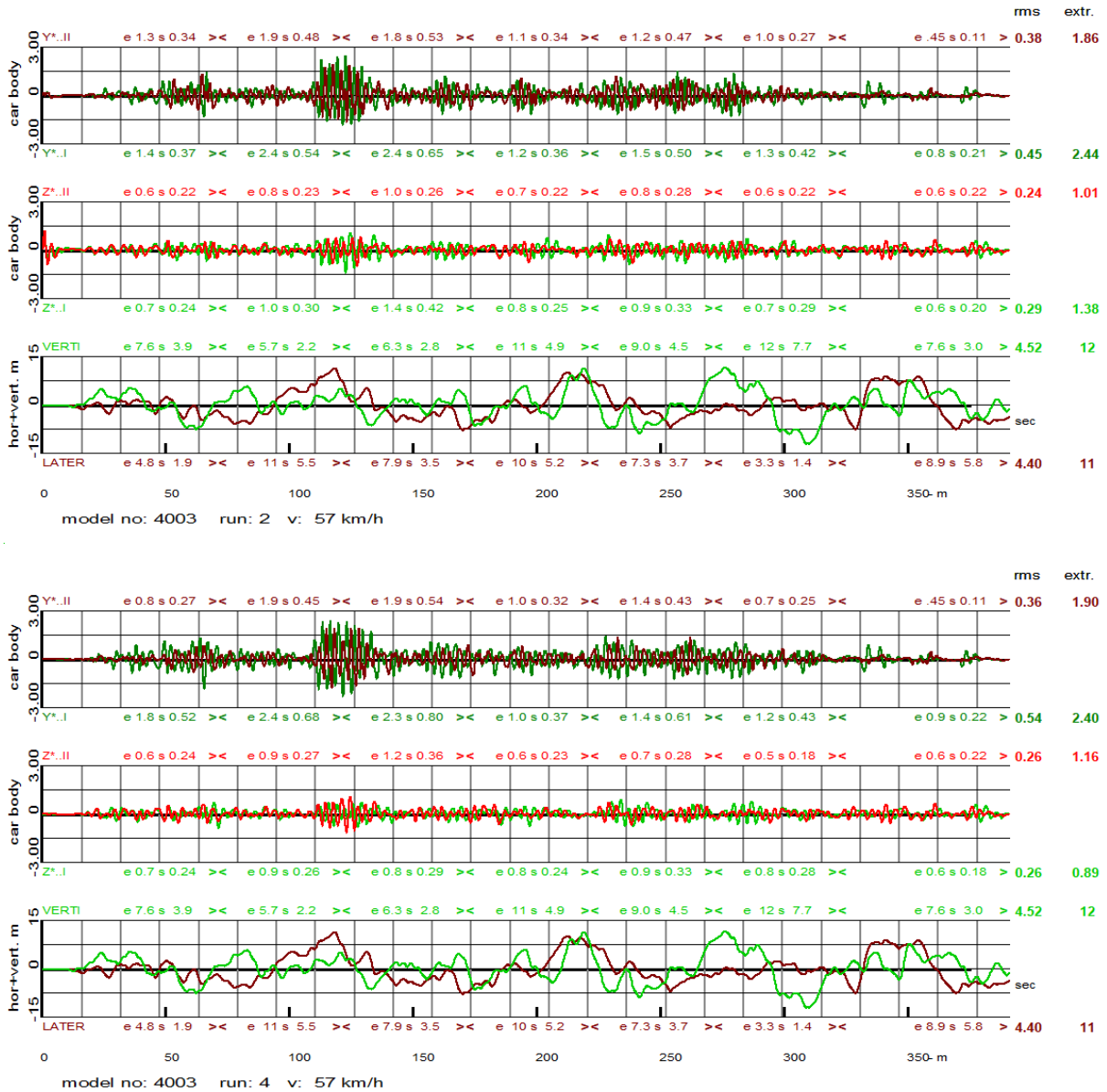


Fig. 40: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen

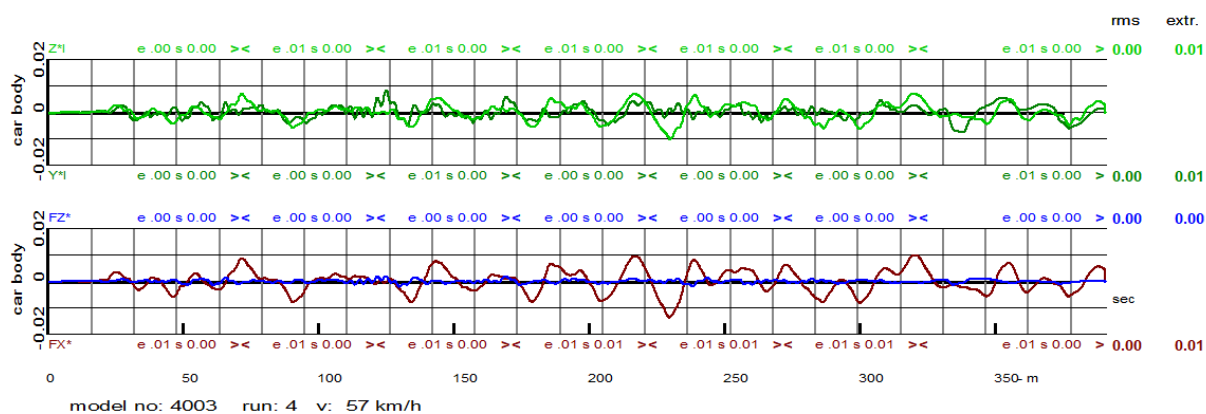
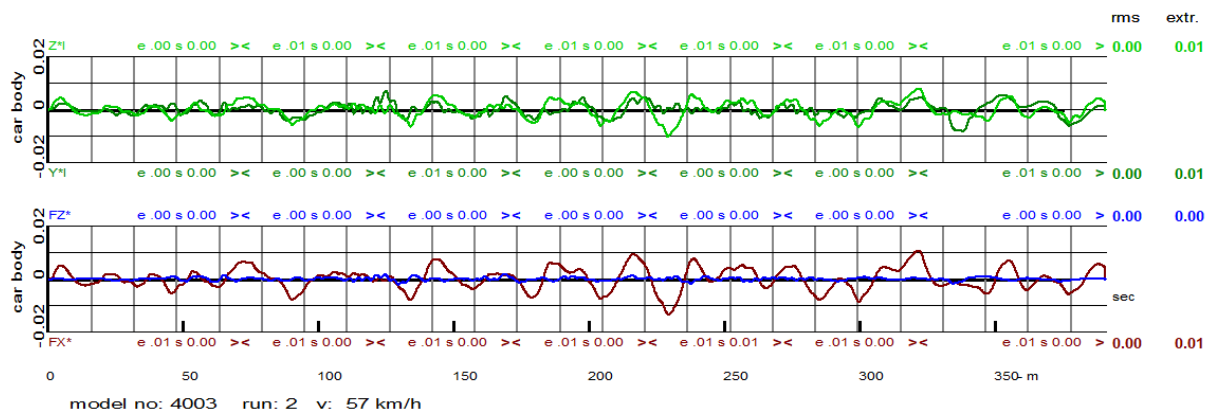


Fig. 41: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal



S-Bogen 150 m Radius, Überhöhung 0 mm, Geschwindigkeit 40 km/h

Störungen nach SBB-Preisberechnung

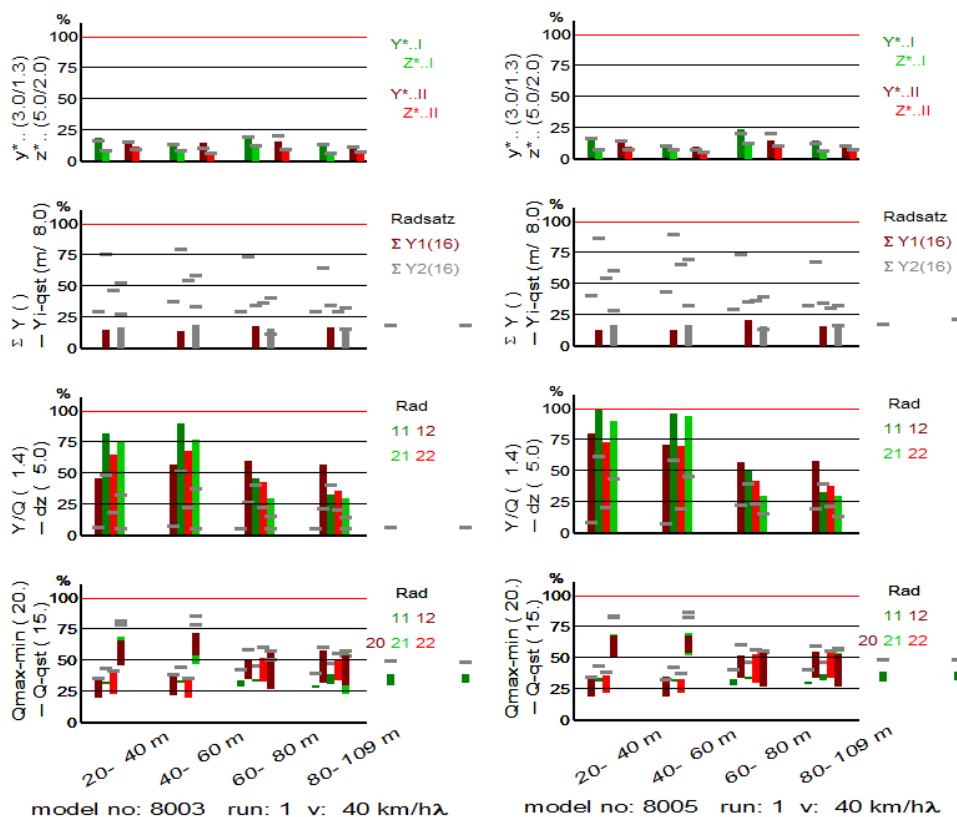


Fig. 42: Grenzwertbezogene Werte von $y^*_{..}$, $z^*_{..}$, ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz , links mit Deichsel, rechts ohne Deichsel

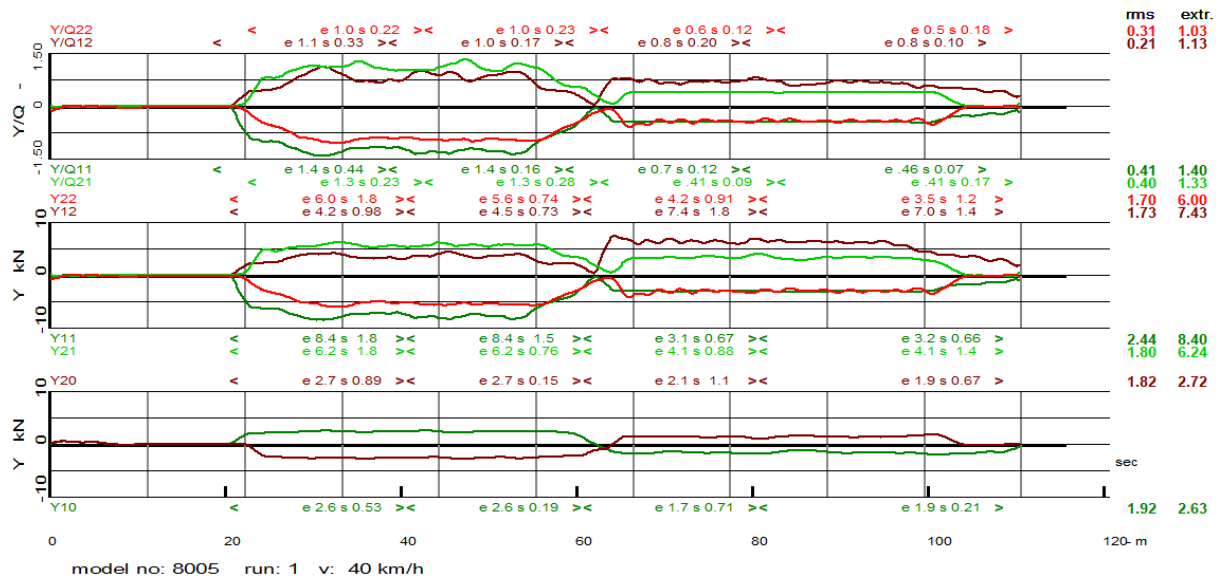
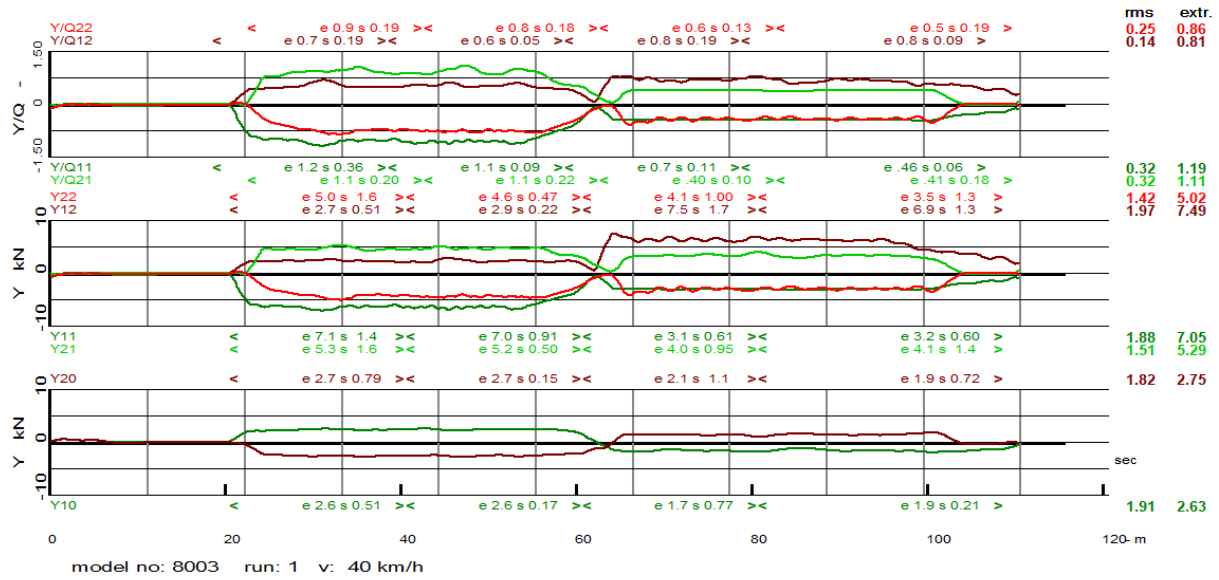


Fig. 43: Verhältnis $Y/Q_{ij}, i, j=1, 2$ und Querkräfte $Y_{ij}, i, j=0:2$, oben mit Deichsel, unten ohne

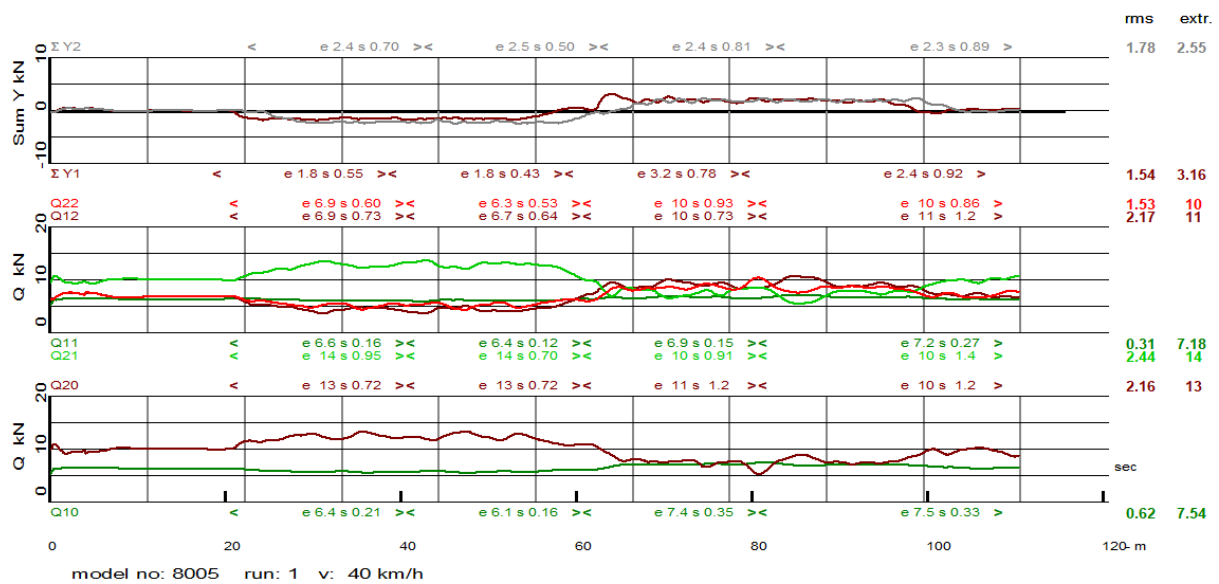
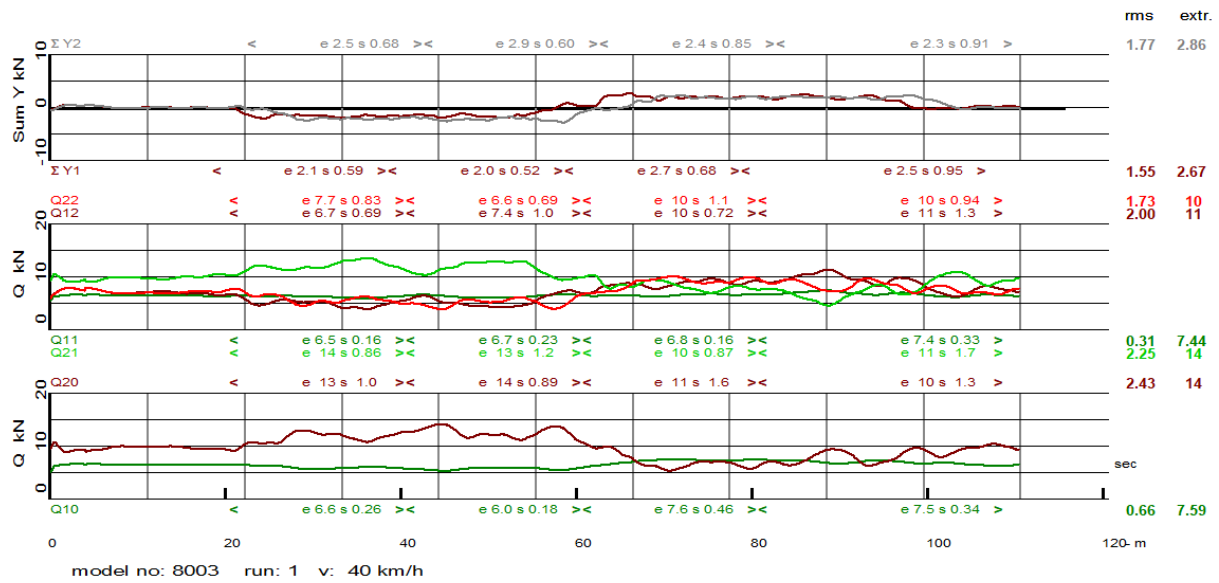


Fig. 44: $\Sigma Y_i, i=1,2$ und Radlasten $Q_{ij}, i=1,2, j=0:2$, oben mit Deichsel, unten ohne

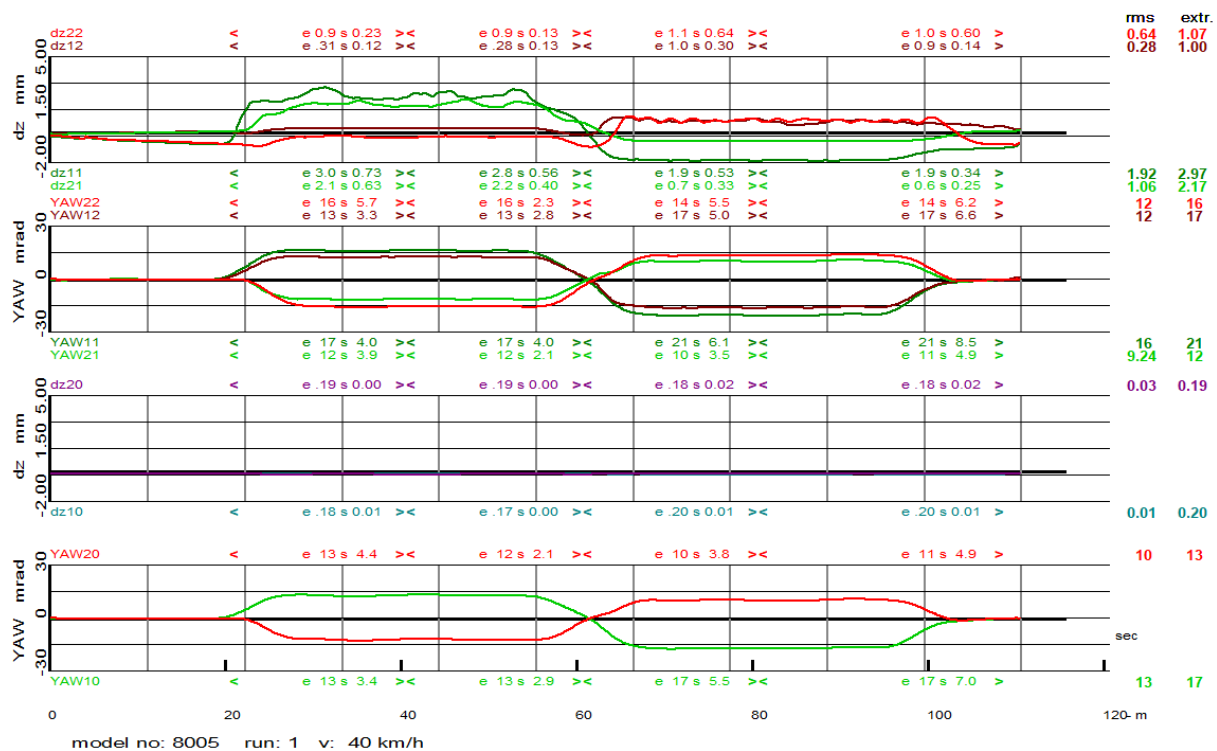
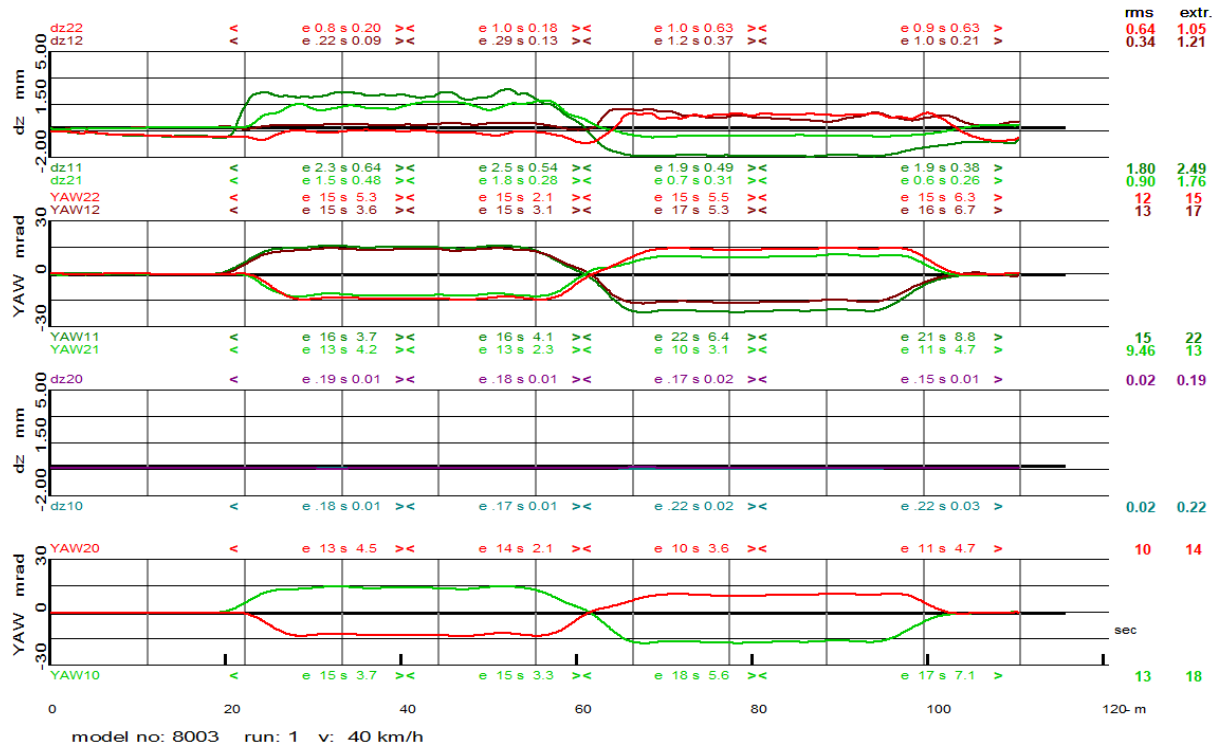


Fig. 45: Radanhebung dz_{ij}, i=1,2, j=0:2 und Anlaufwinkel yaw, oben mit Deichsel, unten ohne

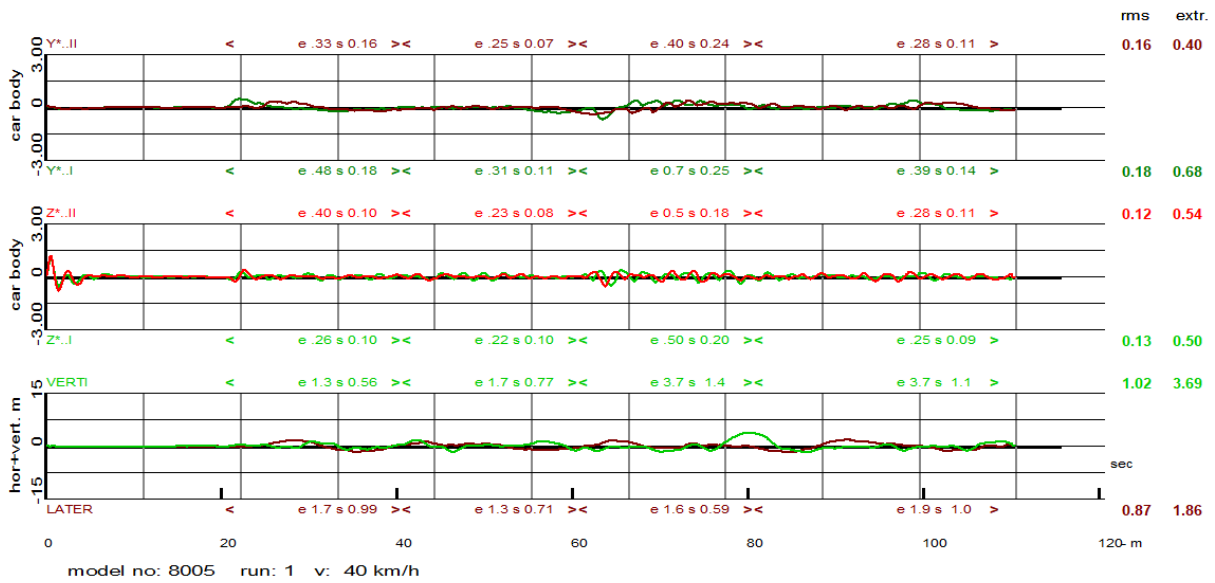
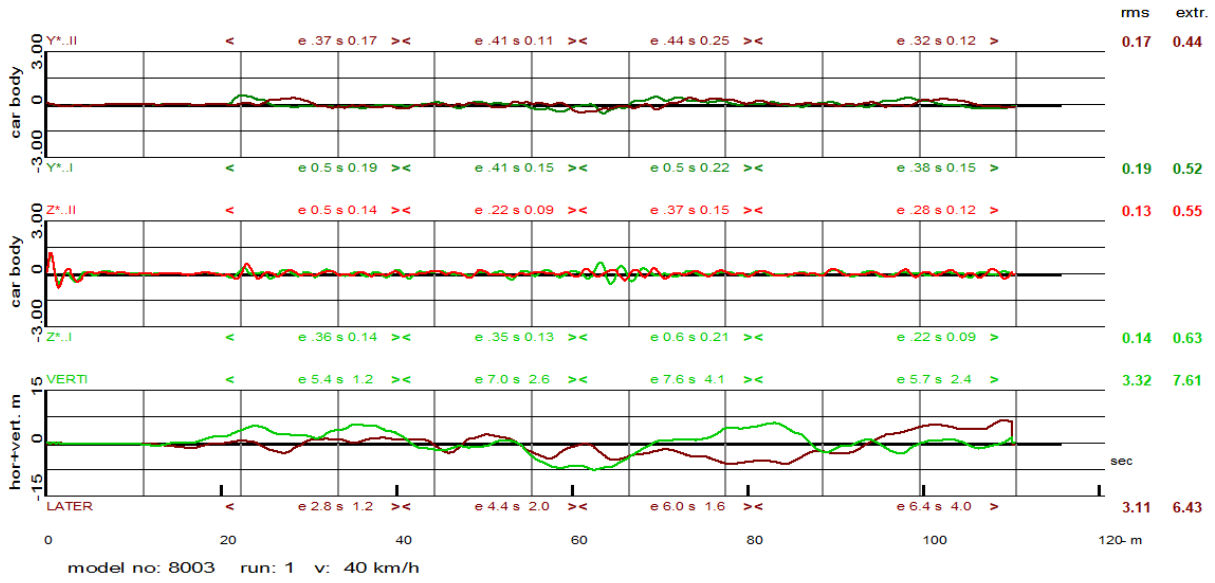


Fig. 46: Kastenbeschleunigungen, quer und vertikal über Laufwerken und Schienenstörungen

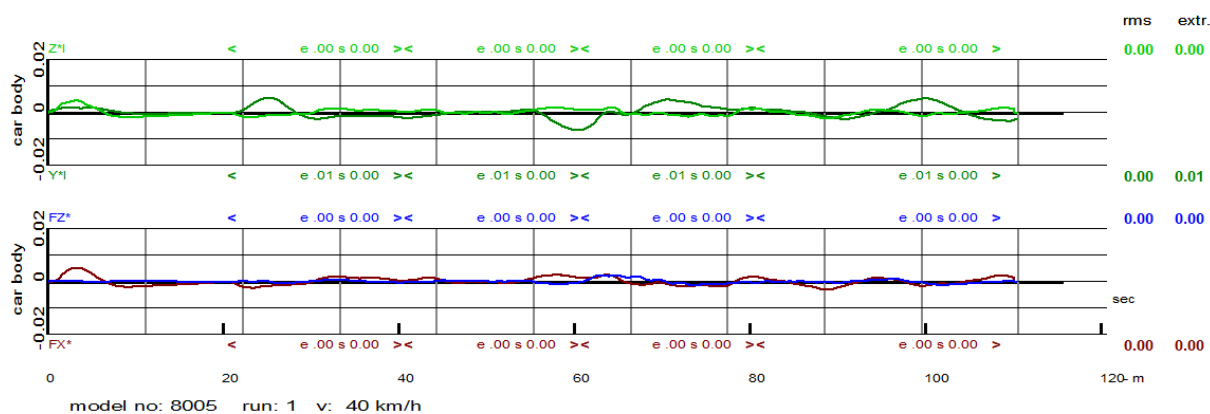
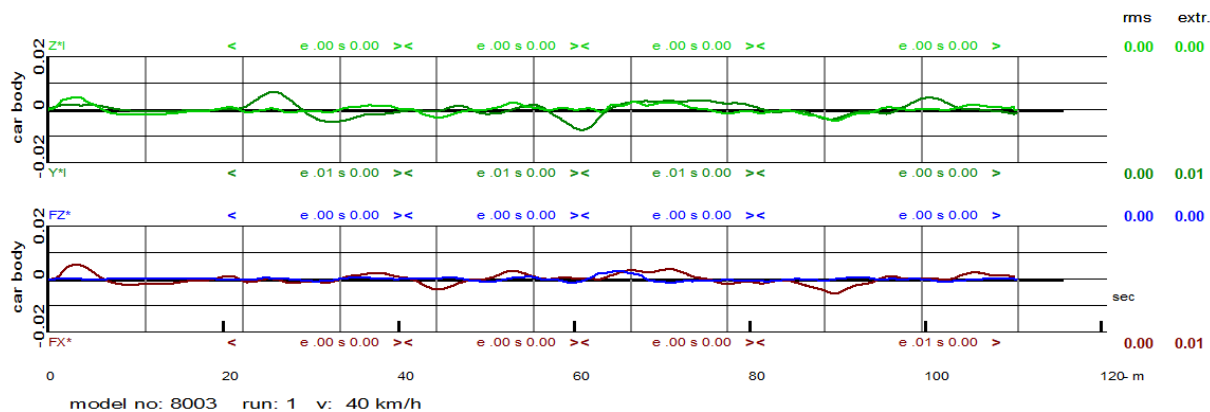


Fig. 47: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken und Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer und vertikal



Gerade, Windlast, Fahrgeschwindigkeit 90 km/h

In der Geraden wurden Windböen unterschiedlicher Form (Halbcosinus und Trapez) und Intensität mit maximaler Windgeschwindigkeit von 120 km/h und 170 km/h simuliert. Die Fläche der Kabine ist 8 m², der Widerstandsbeiwert beträgt 0,5. Bei maximaler Böengeschwindigkeit von 120 km/h ergibt sich eine max. Böenlast von 2,6 kN und bei 170 km/h 5,6 kN. Die Last greift im Flächenschwerpunkt an. Dieser ist auch Massenschwerpunkt. Die Windlasten werden in Fahrtrichtung links und einige Zeit danach rechts aufgebracht. Es werden einmalige Böen und wiederkehrende, mit unterschiedlicher Dauer wirkende, simuliert. Die Böenlast wird als Variable BOE in den Diagrammen aufgeführt.

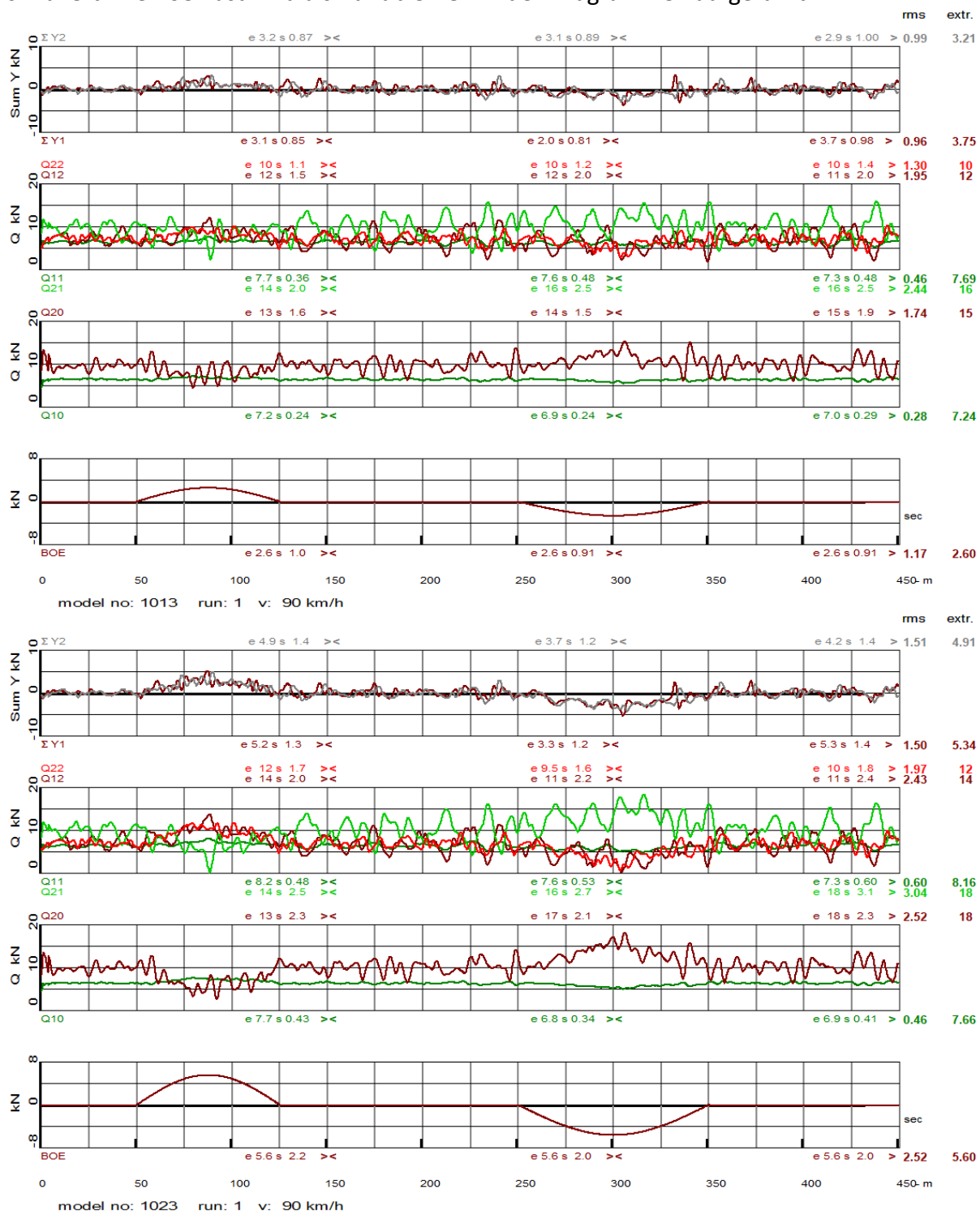
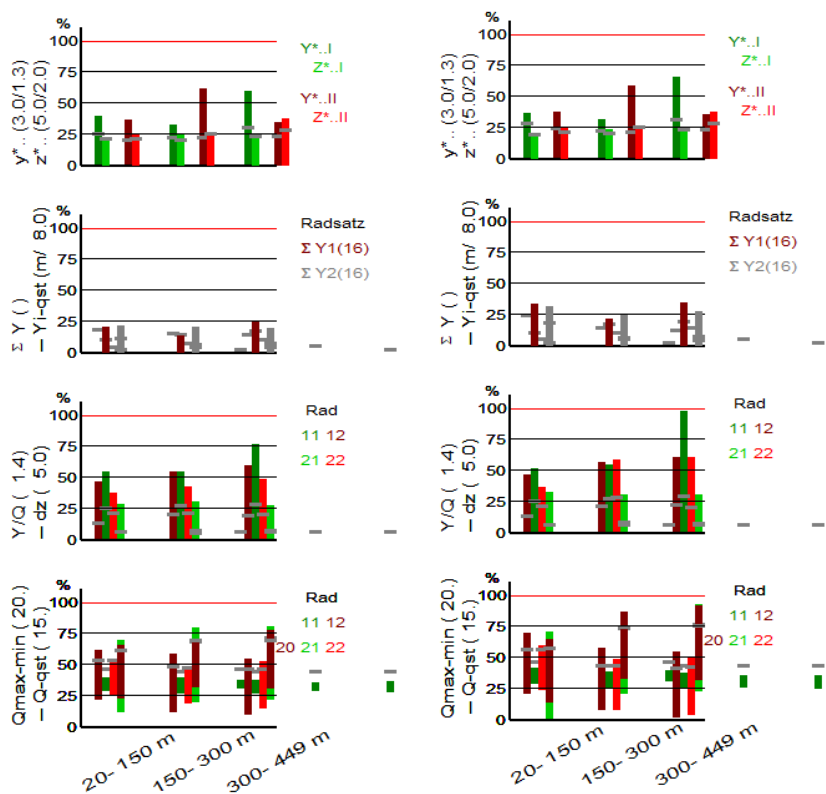


Fig. 48: ΣY_i , Radlasten $Q_{ij}, i=1,2, j=0:2$ und Böenanstegung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)



model no: 1013 run: 1 v: 90 km/h: model no: 1023 run: 1 v: 90 km/h:

Fig. 49: Grenzwertbezogene Werte von $y^*_{..}$, $z^*_{..}$, ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz , Böenanregung 2,6 kN (links) und 5,6 kN (rechts)

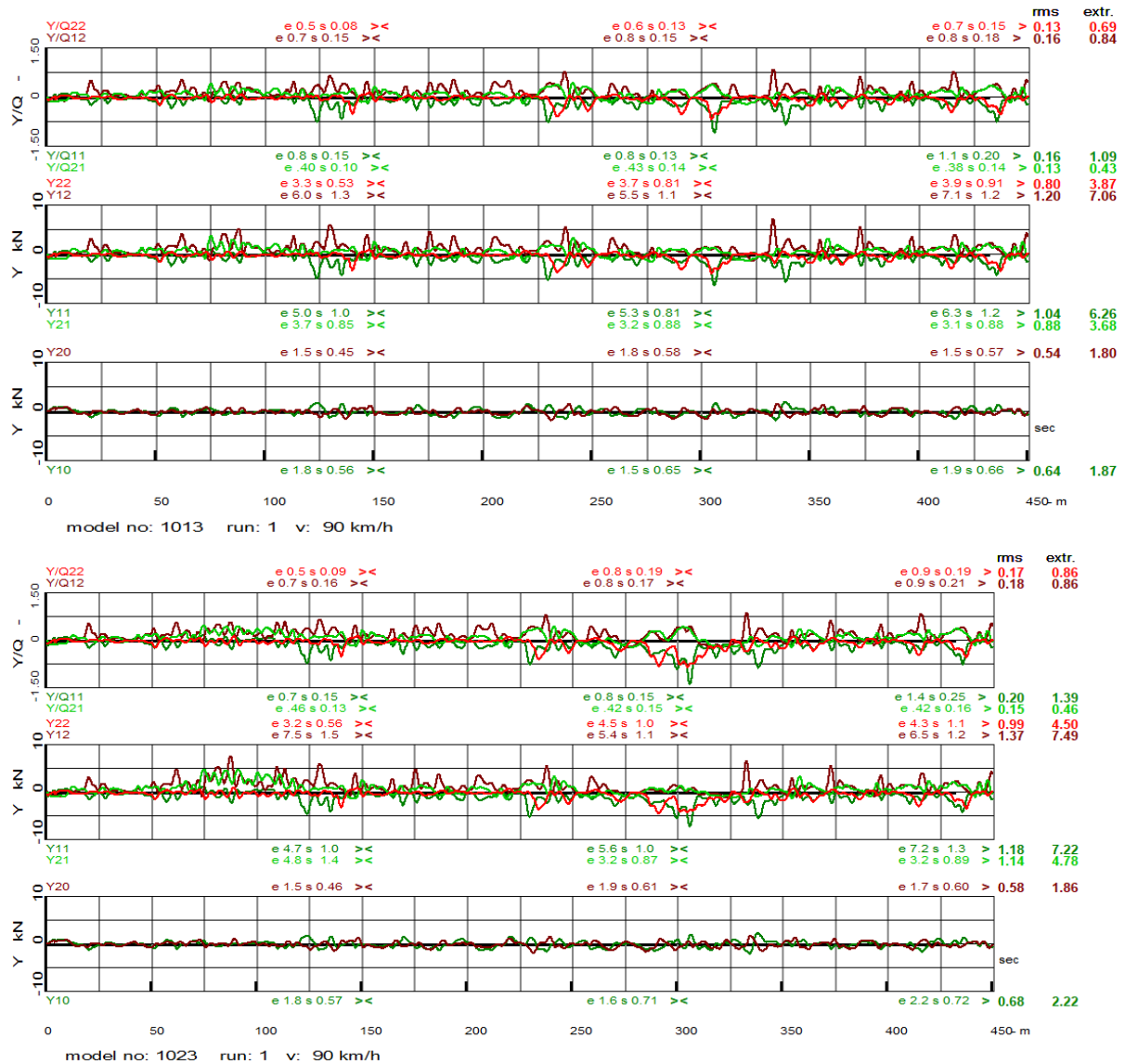


Fig. 50: Verhältnis Y/Q_{ij}, i,j=1,2 und Querkräfte Y_{ij}, i=1,2, j=0:2, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

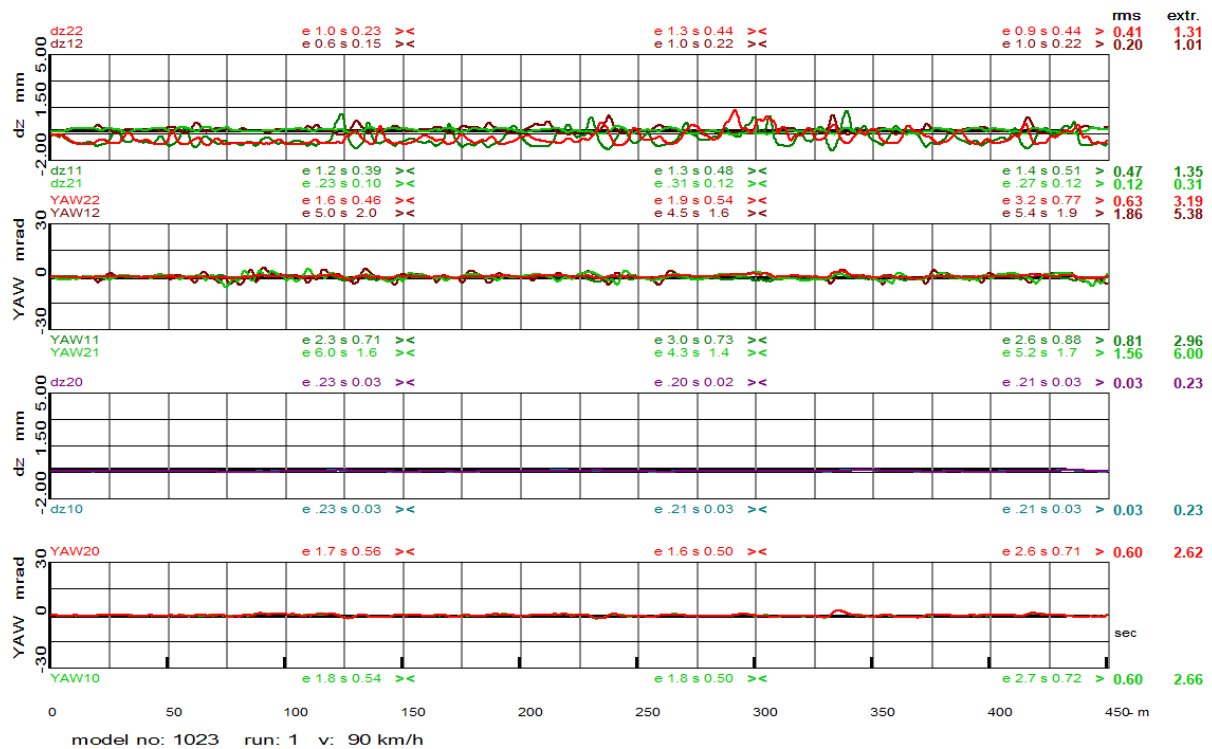
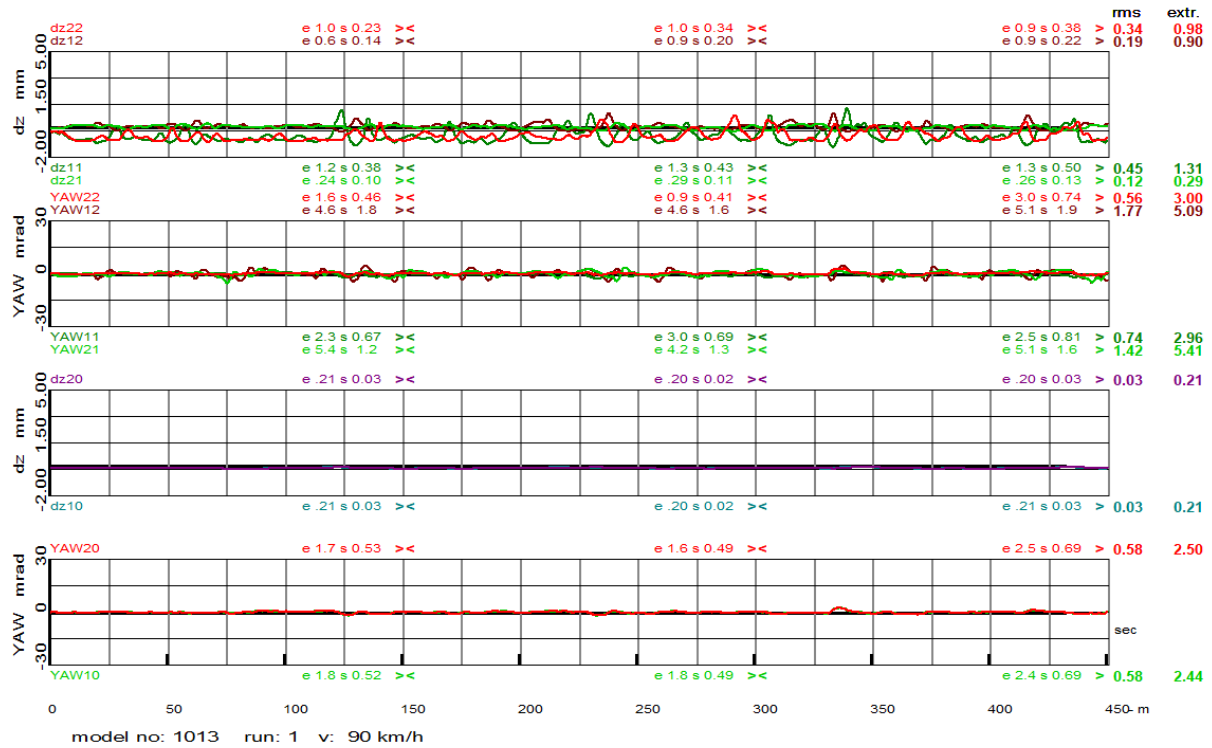


Fig. 51: Radanhebung dz_{ij}, i=1,2, j=0:2 und Anlaufwinkel yaw, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

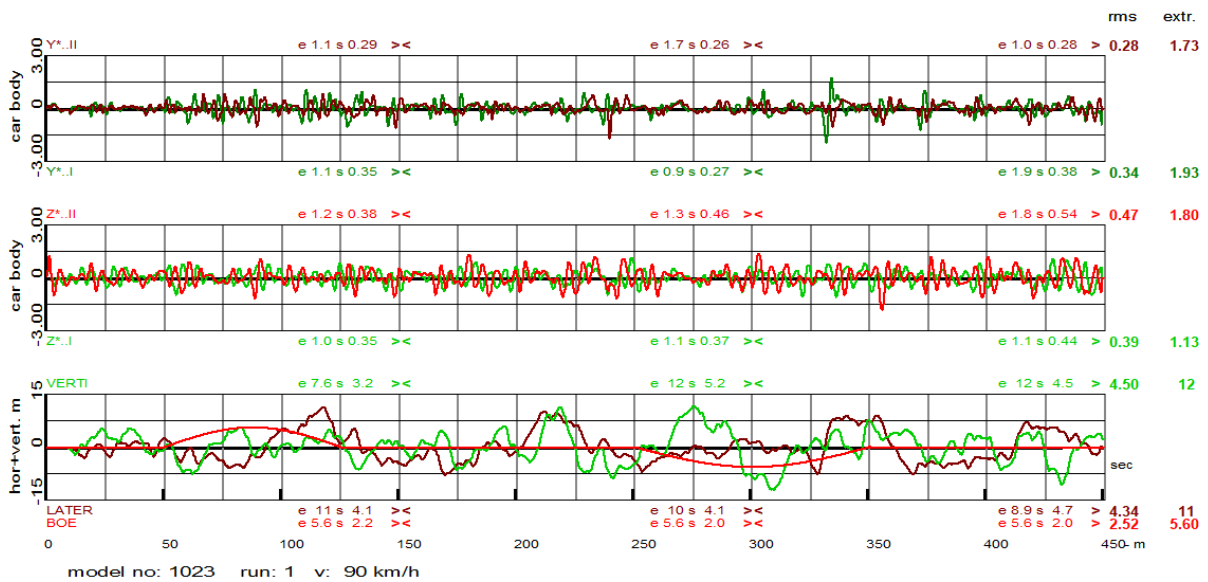
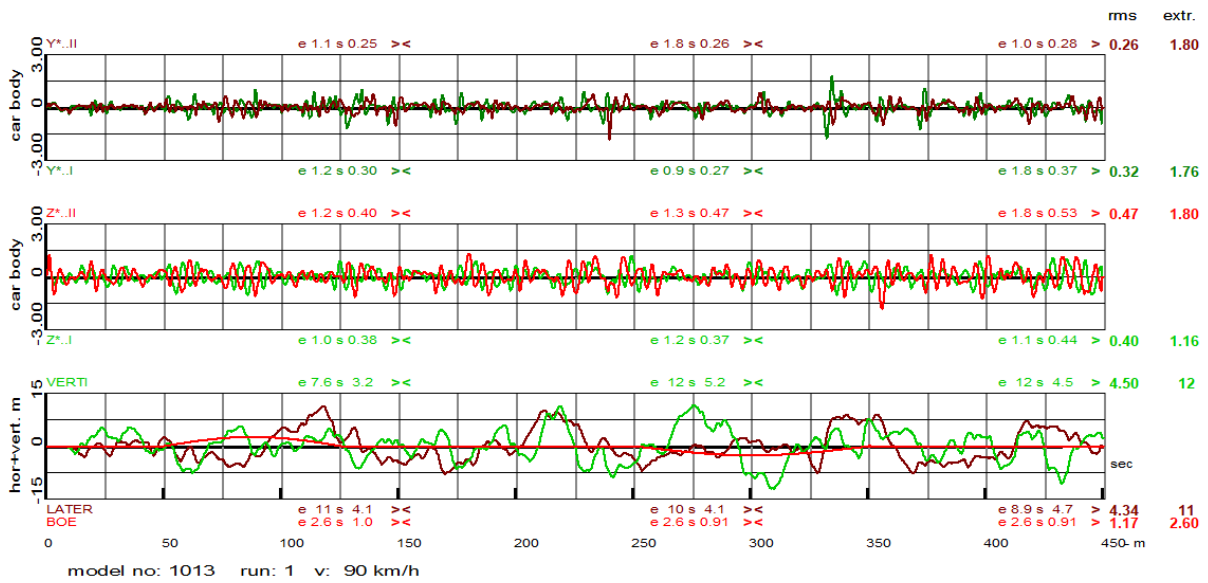


Fig. 52: Kastenbeschleunigungen quer und vertikal über Laufwerken, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

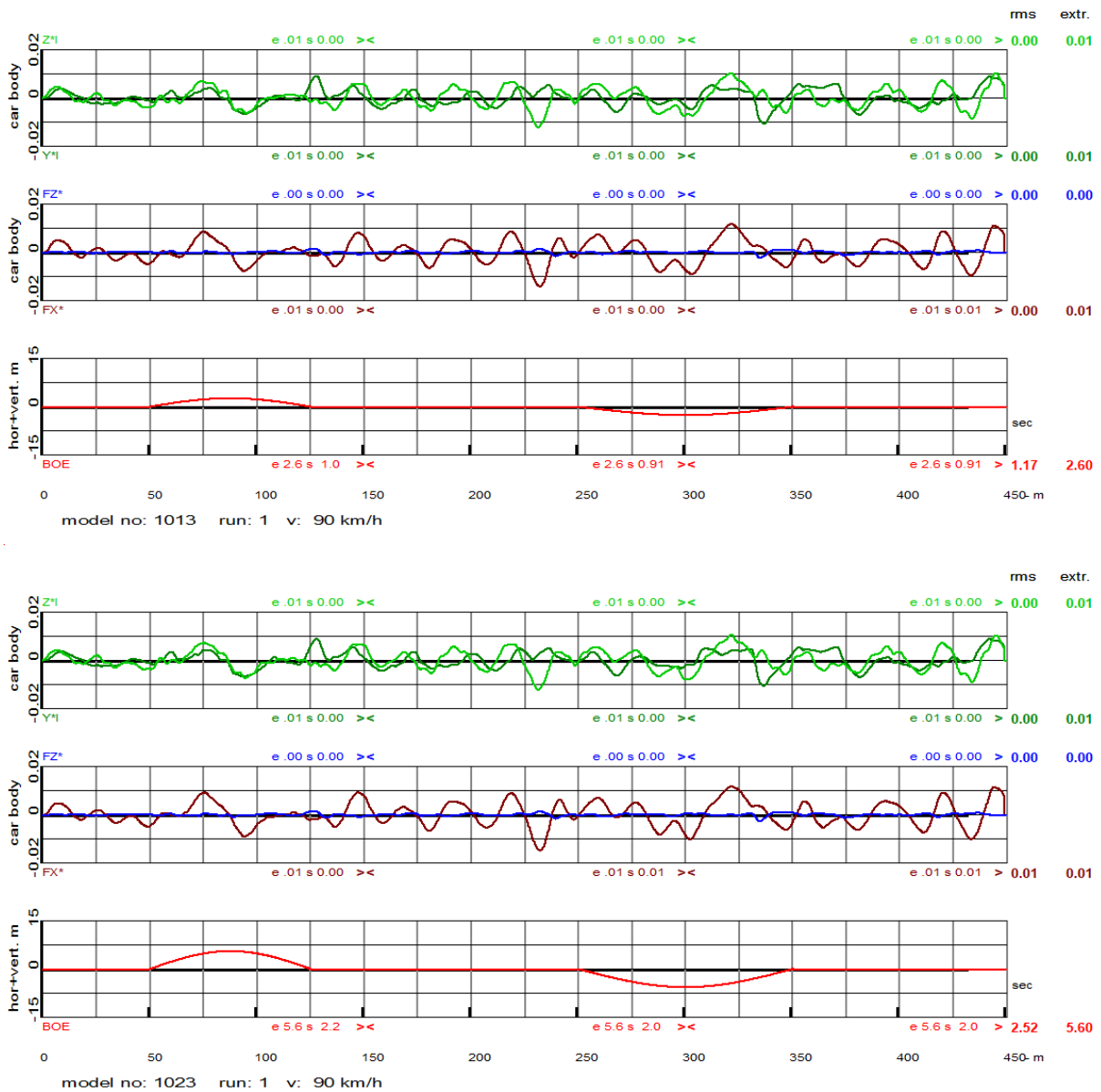


Fig. 53: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken, Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

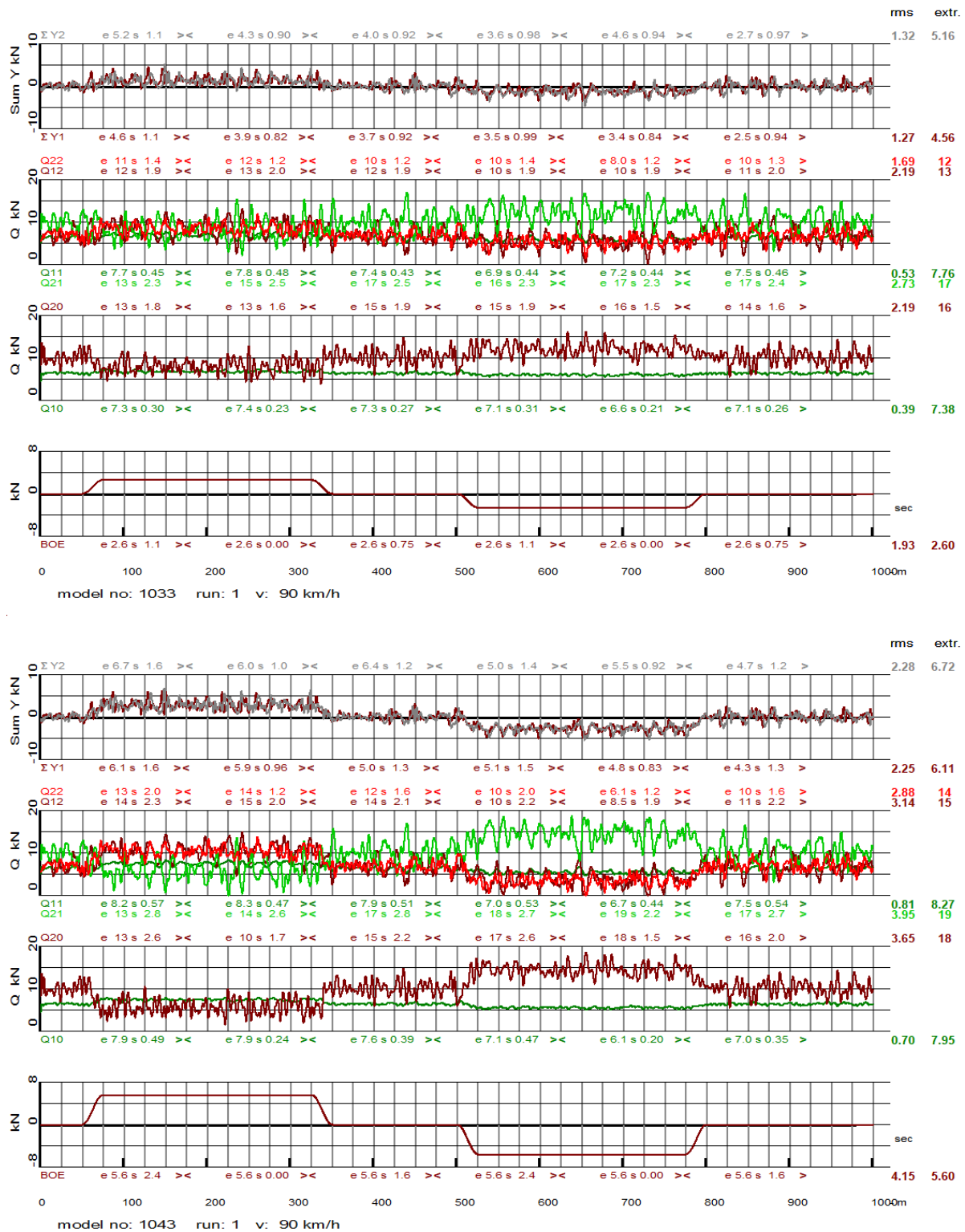


Fig. 54: $\Sigma Y_i, i=1,2$, Radlasten $Q_{ij}, i=1,2, j=0:2$ und Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

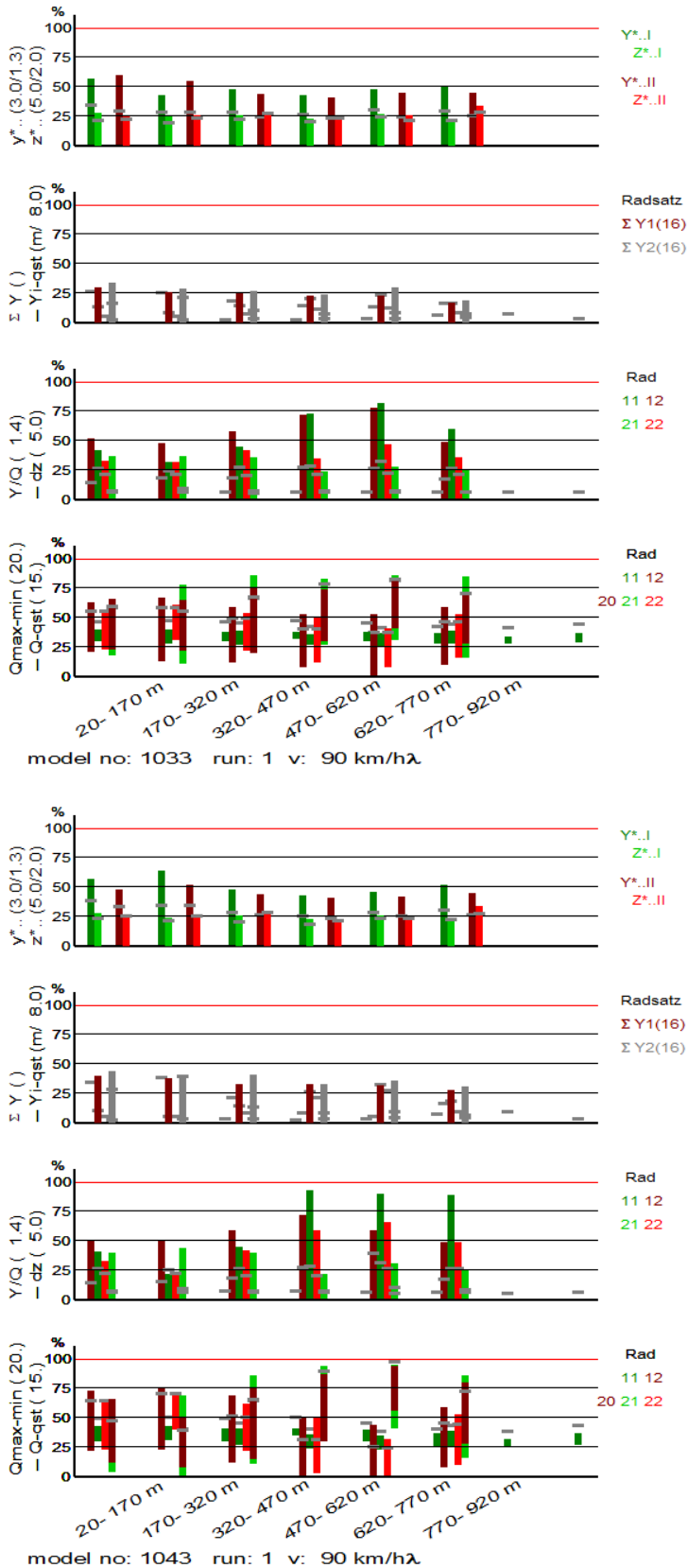


Fig. 55: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz , Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

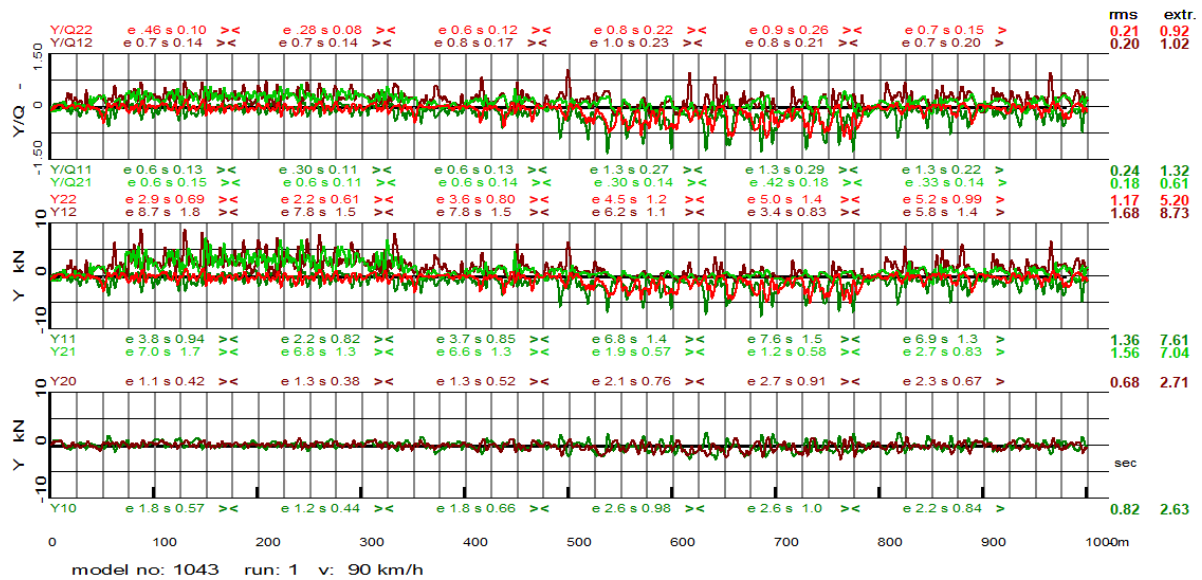
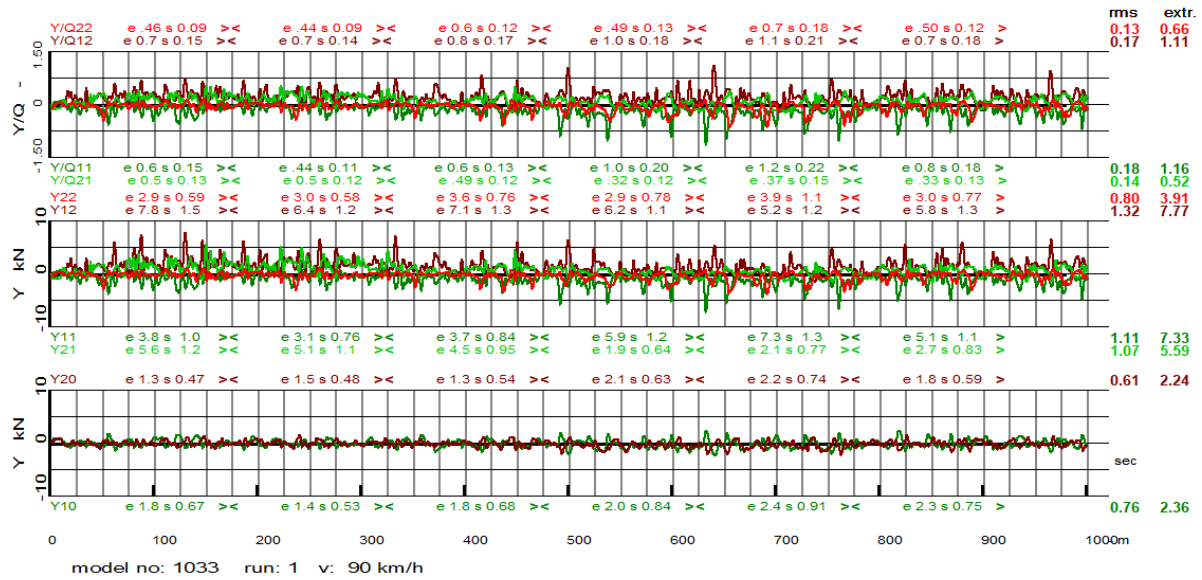


Fig. 56: Verhältnis $Y/Q_{ij}, i, j=1, 2$ und Querkräfte $Y_{ij}, i=1, 2, j=0:2$, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

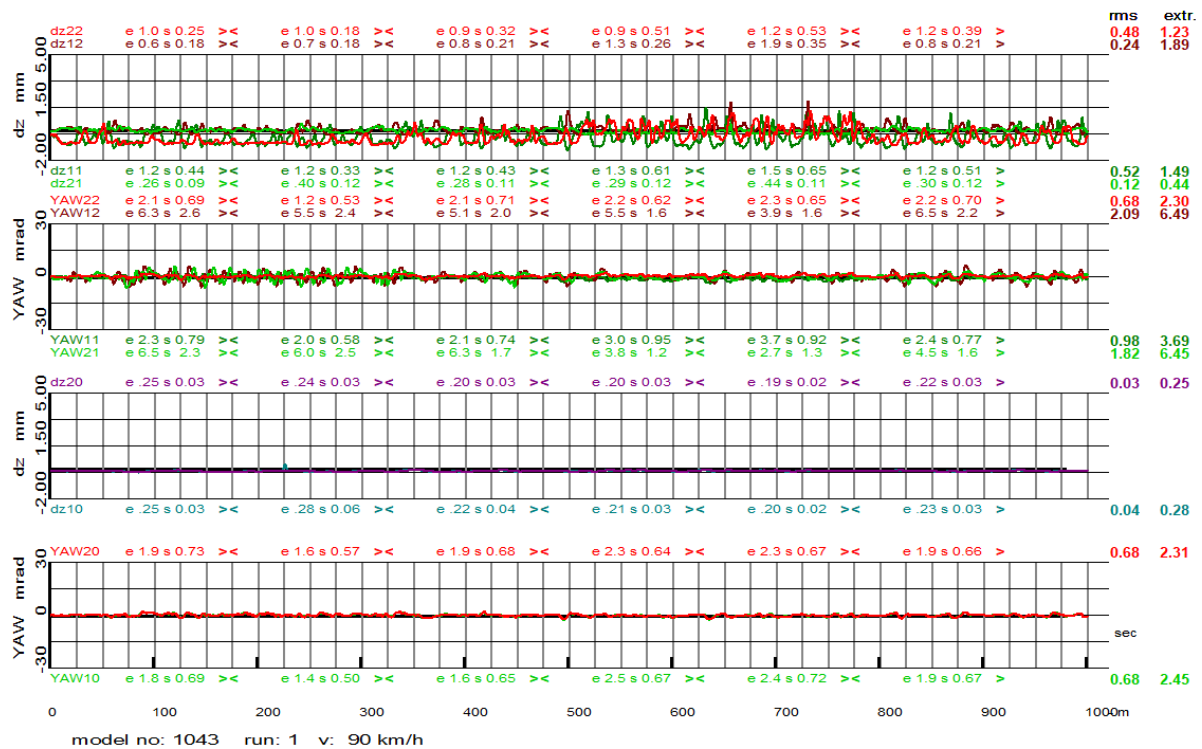
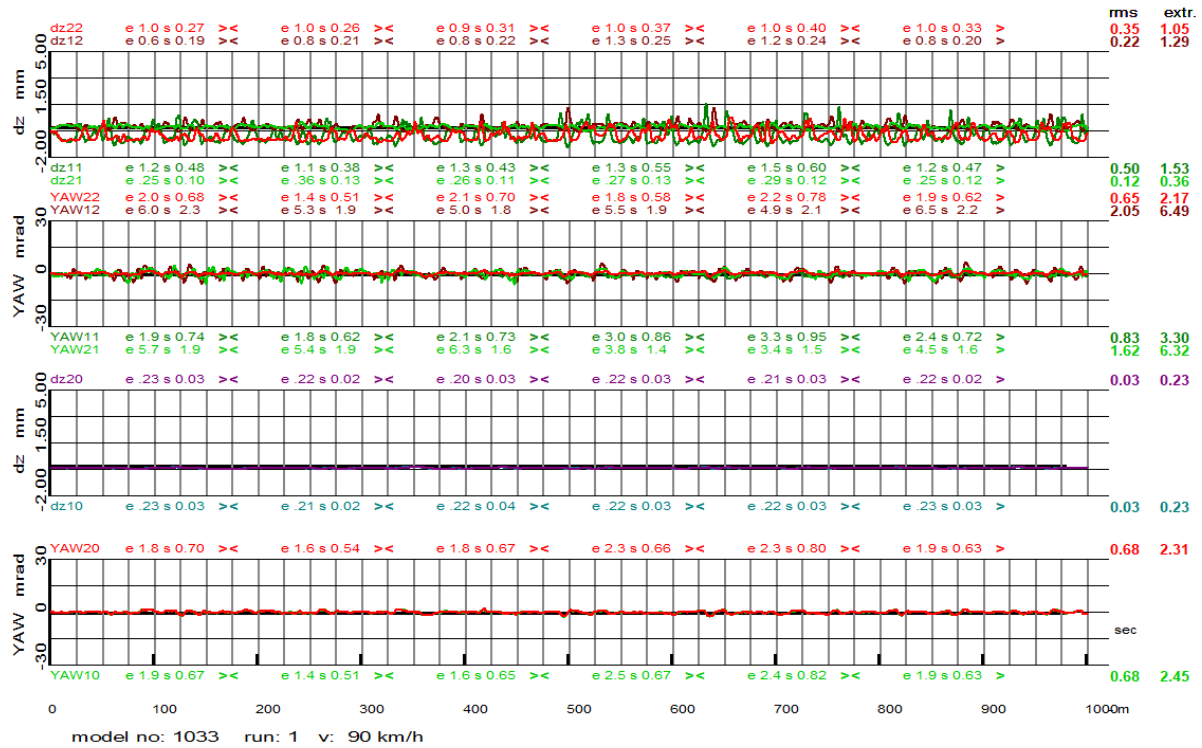


Fig. 57: Radanhebung dz_{ij}, i=1,2, j=0:2 und Anlaufwinkel yaw, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

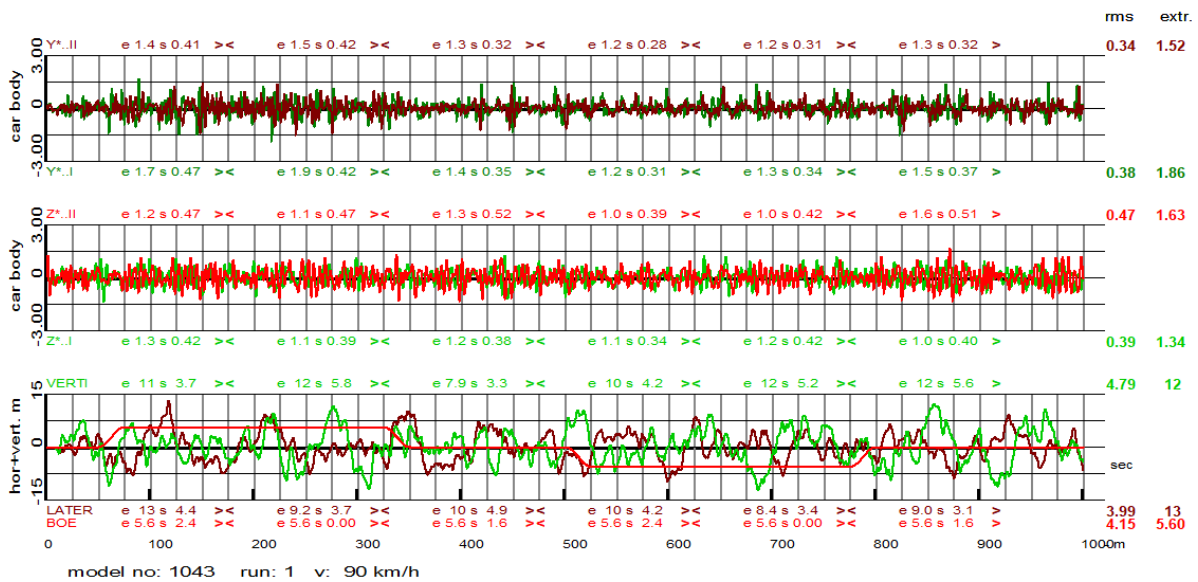
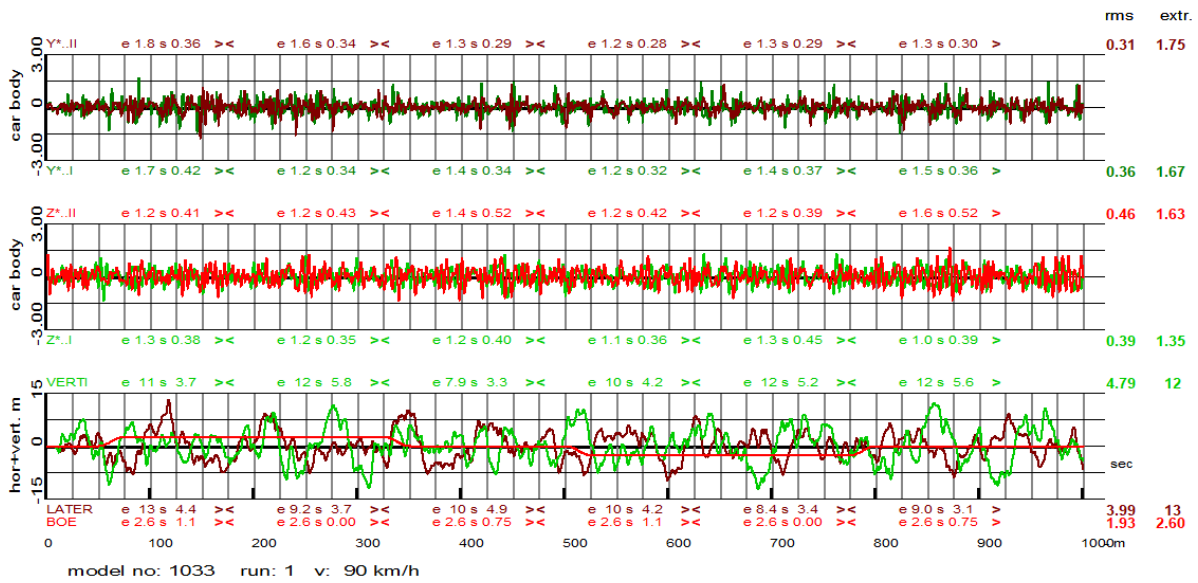


Fig. 58: Kastenbeschleunigungen quer und vertikal über Laufwerken, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

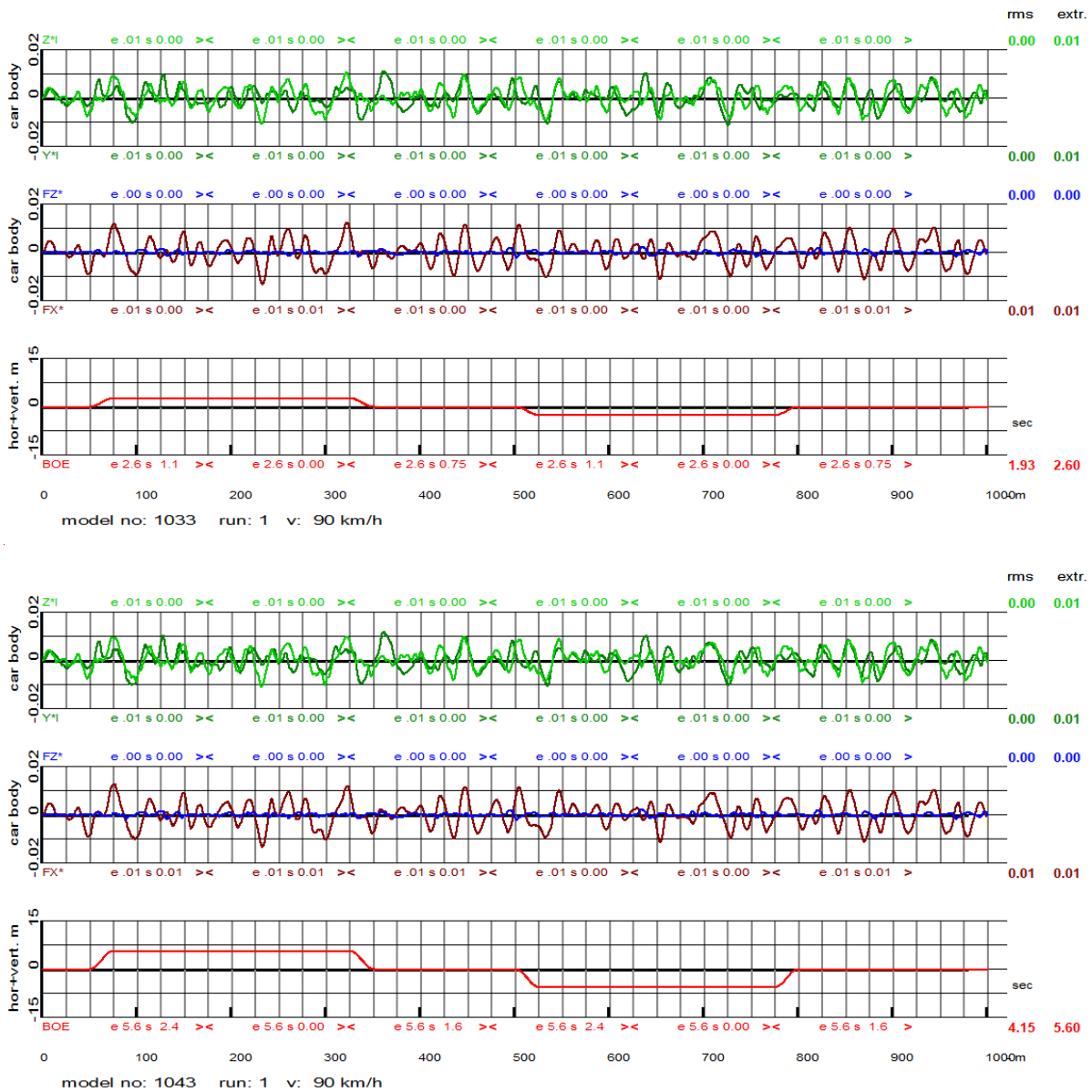


Fig. 59: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken, Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

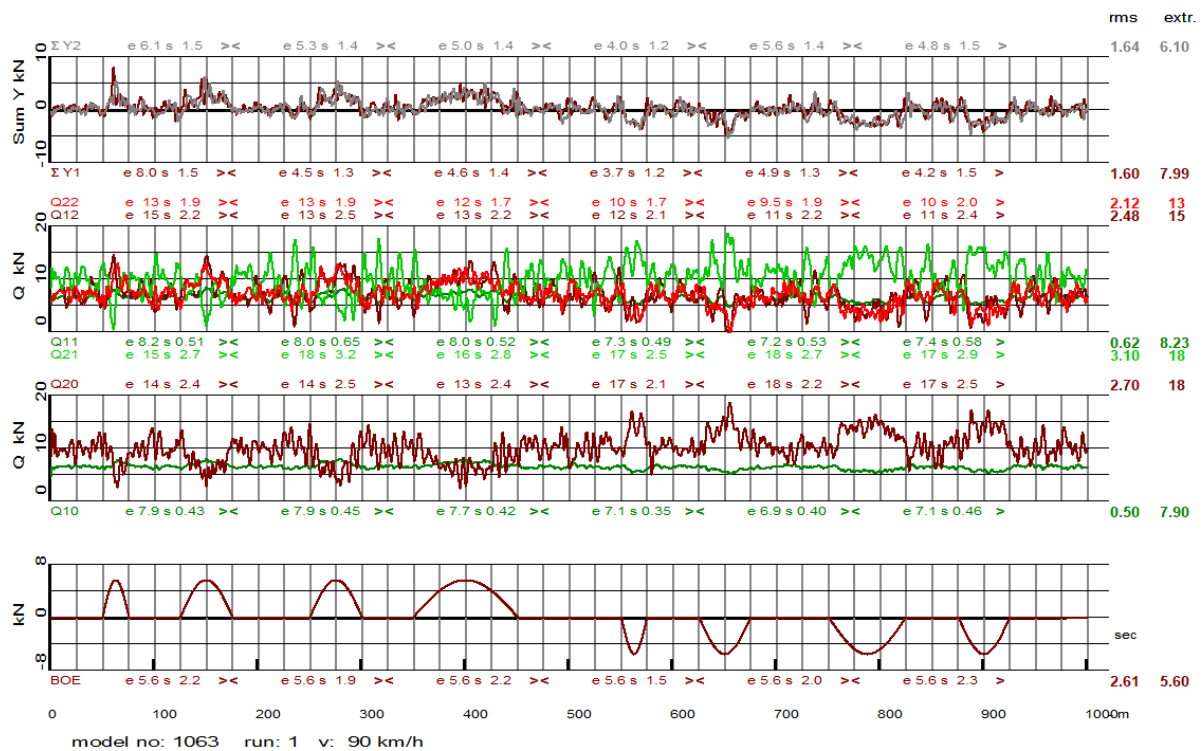
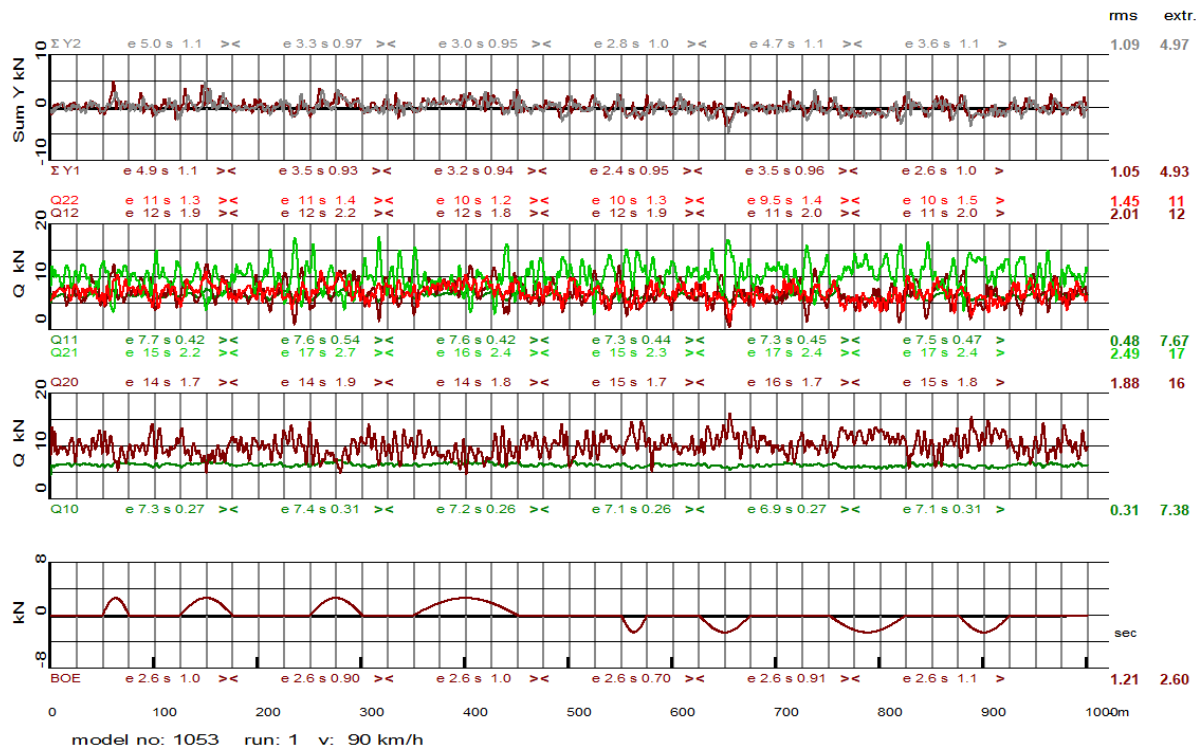


Fig. 60: ΣY_i , $i=1,2$, Radlasten Q_{ij} , $i=1,2, j=0:2$ und Böenanzregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

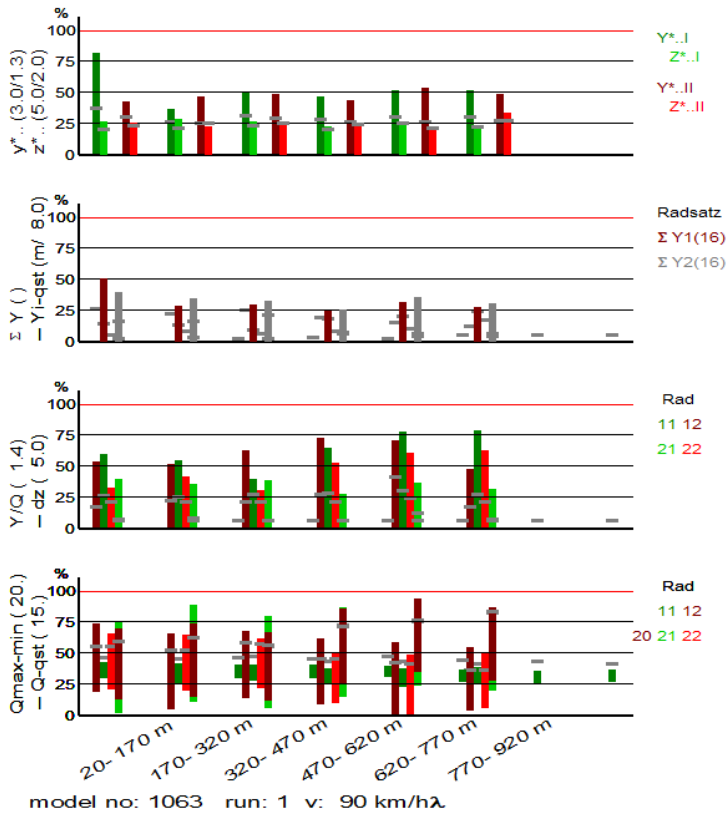
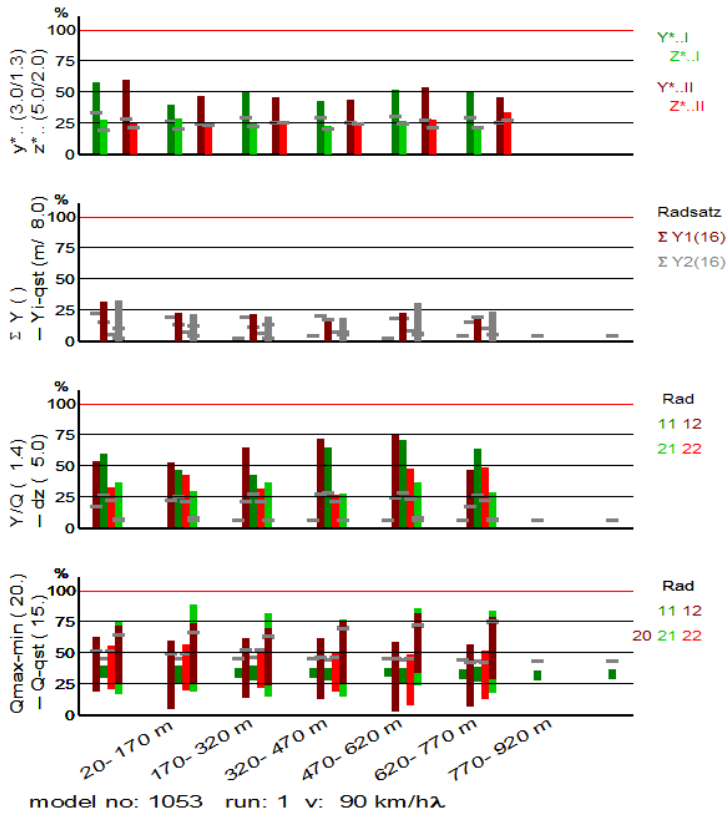


Fig. 61: Grenzwertbezogene Werte von $y^{*..}$, $z^{*..}$, ΣY , Y_{qst} , Q_{qst} , Y/Q , dz , Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

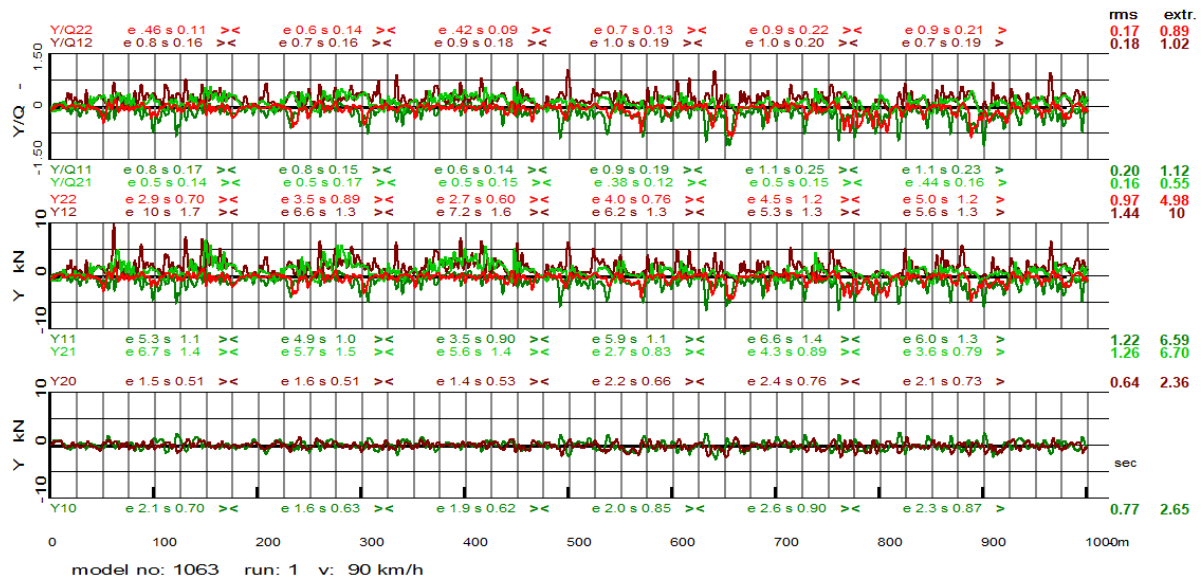
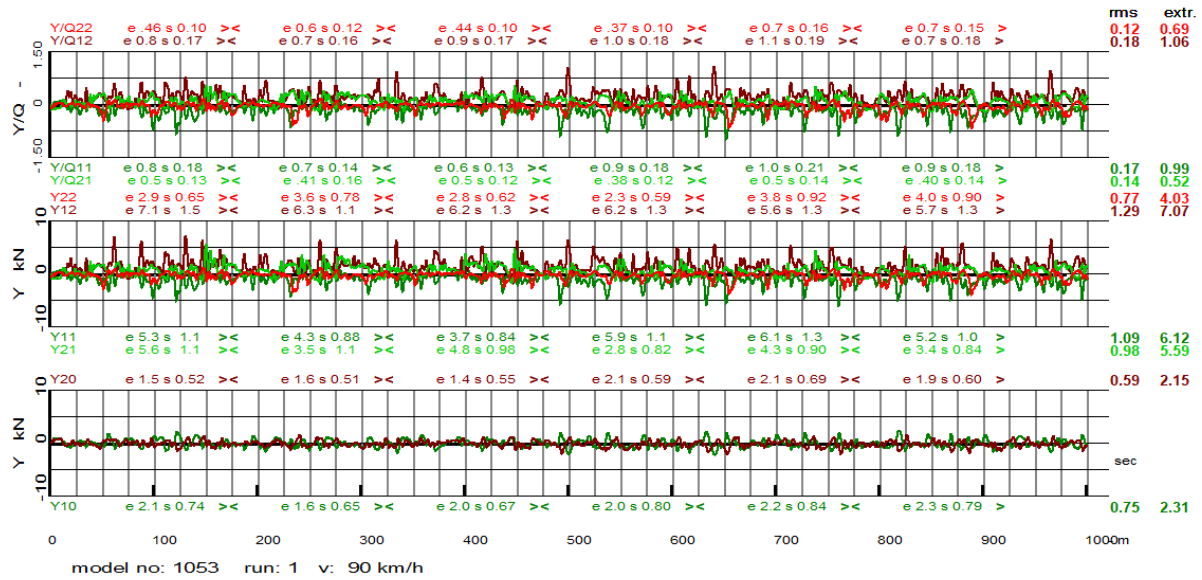


Fig. 62: Verhältnis Y/Q_{I,J}, I,J=1,2 und Querkräfte Y_{ij}, i=1,2, j=0:2, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

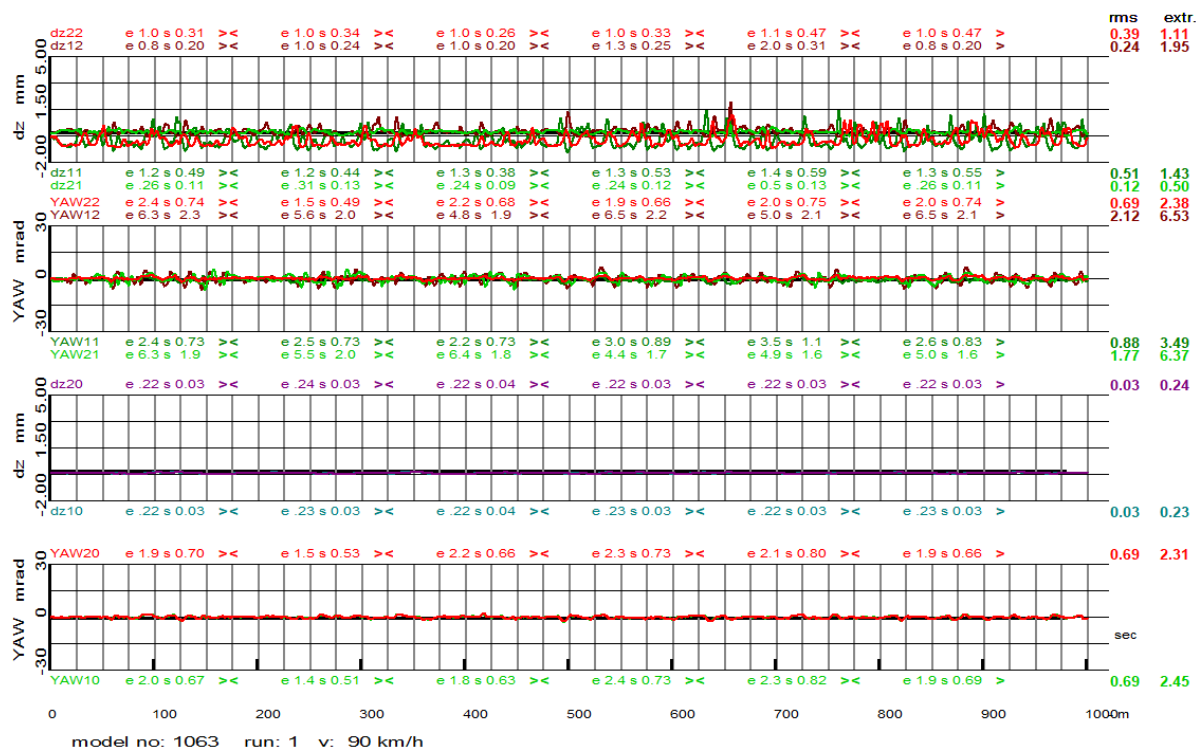
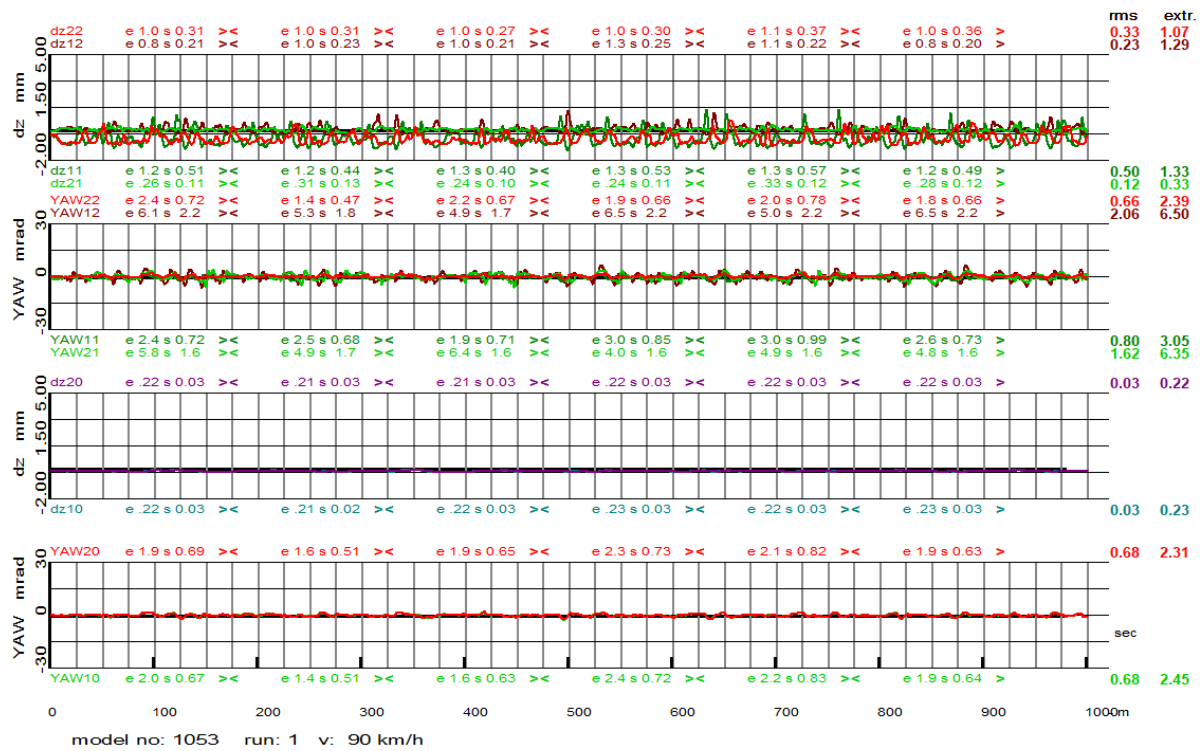


Fig. 63: Radanhebung dz_{ij}, i=1,2, j=0:2 und Anlaufwinkel yaw_{ij}, i=1,2, j=0:2 Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

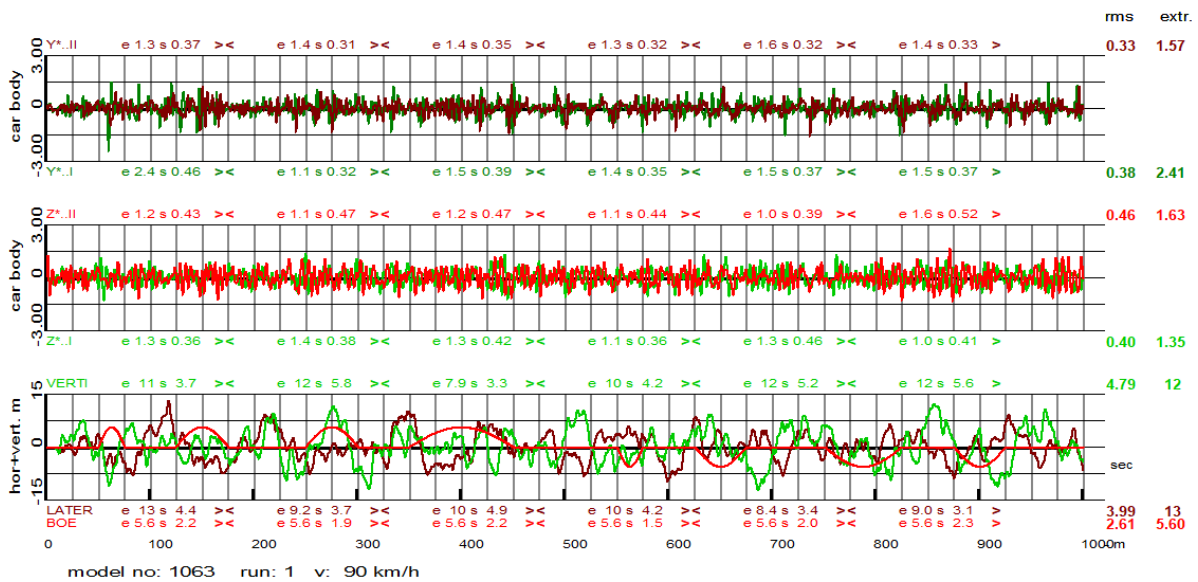
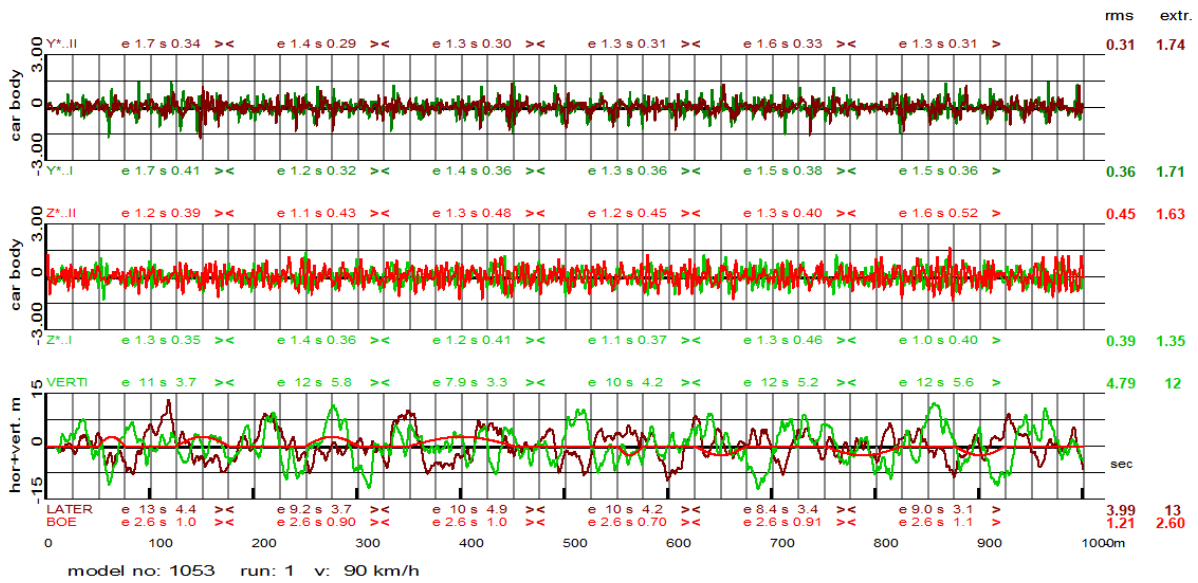


Fig. 64: Kastenbeschleunigungen quer und vertikal über Laufwerken, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)

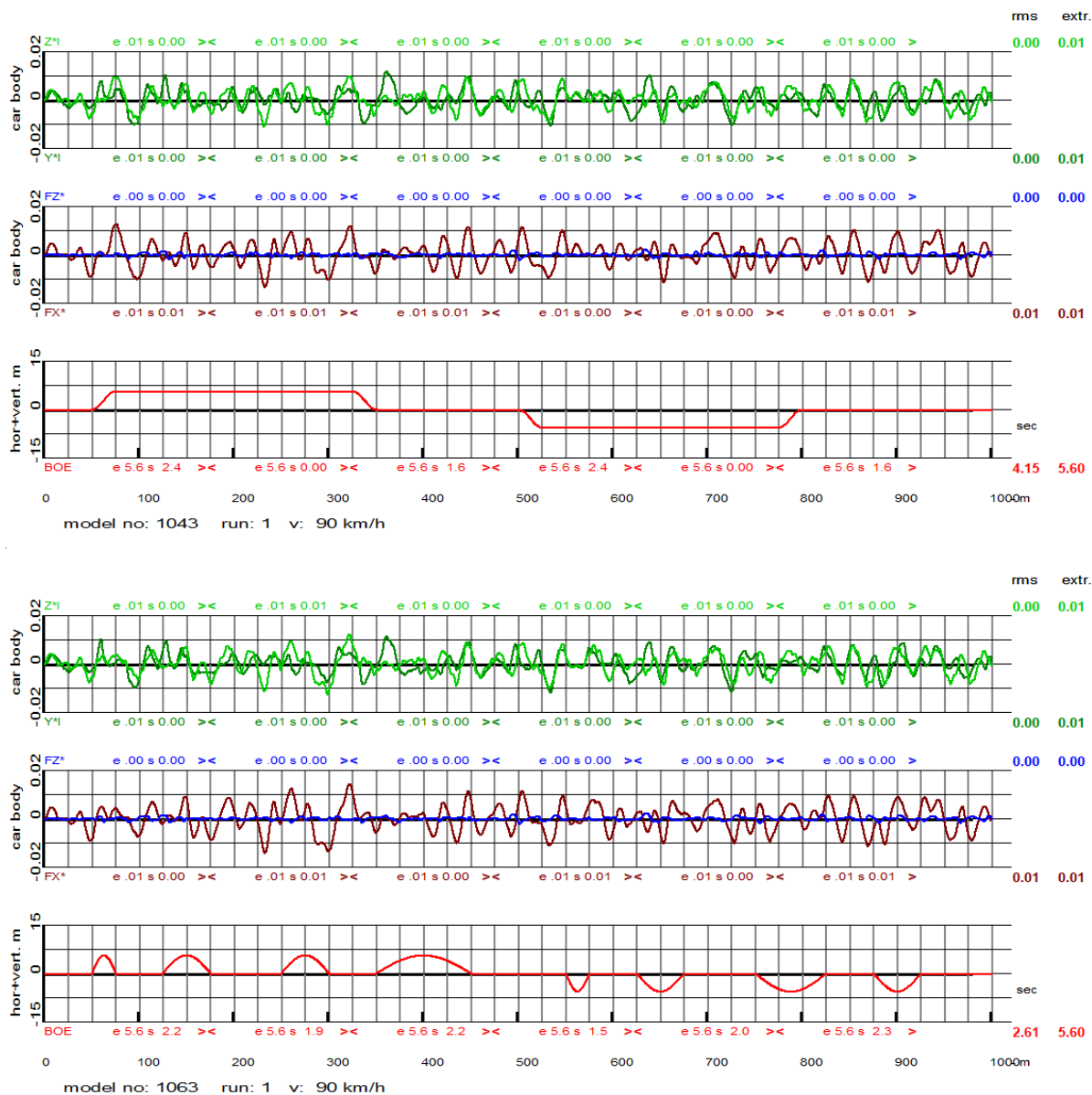


Fig. 65: Verschiebungen quer und vertikal über Laufwerken, Roll- und Wendebewegungen der Kabine, Schienenstörungen quer, vertikal, Böenanregung 2,6 kN (oben) und 5,6 kN (unten)



Verschleißsimulation

Bei der Verschleißsimulation wird im Prinzip zu jedem Schritt des numerischen Integrationsverfahrens der Verschleißabtrag berechnet. Für Systembetrachtungen bezüglich des Verschleißverhaltens wird eine Referenzstrecke aus Geraden und verschiedenen Bögen definiert. Streckennetze werden abhängig von den Bogenradien in Klassen eingeteilt. Für die Referenzstrecke hier wurden 4 Klassen definiert:

1. Geraden und sehr große Bögen,
2. Bögen mit Radien größer 900 m, gemittelt um 1500 m,
3. Bögen zwischen 900 und 600 m, gemittelt mit 750 m,
4. Bögen mit Radien < 600 m, gemittelt mit 450 m.

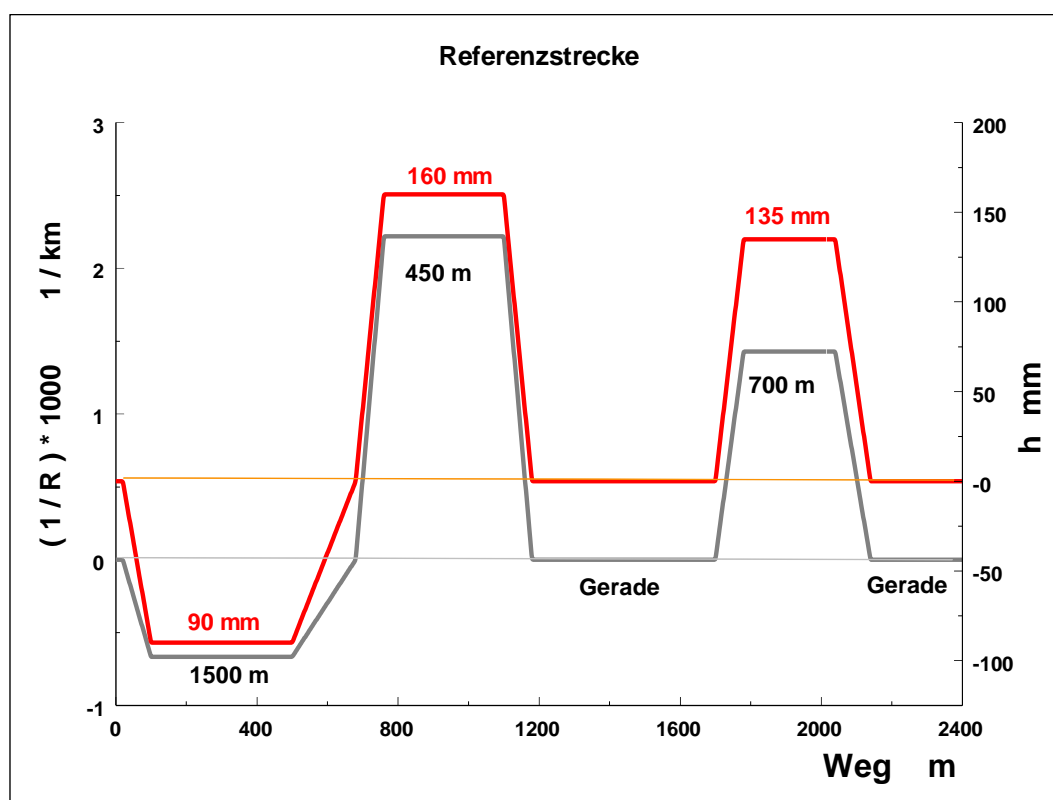


Fig. 66: Gewählte Referenzstrecke

Der Längenanteil der Klassen am Gesamtnetz erfolgt nicht allein durch anteilige Längen der Simulationsstrecken sondern auch durch Anpassung der Verschleißschritte in den Wegstecken der Simulation. Dies kann sowohl durch Steuerung von Zeitschritten als auch Wegschrittlängen geschehen. Die Zahl der Verschleißschritte in den Klassen sollte die Streckenlängen der Klassen am Gesamtnetz wiedergeben.

Für die Verschleißberechnung des TrackSplit sind etwa 70 % der Strecke Geraden oder sehr große Bögen, 14 % Bögen der Klasse mit gemittelten 1500 m Radius und jeweils 8 % der Klasse mit 700 m und 450 m Radius.

Der Verschleiß wurde für jedes Rad berechnet, die Schienenprofile blieben dabei konstant. Für erste Ergebnisse wurde der Reibwert als konstant mit 0,36 über das Radprofil angenommen. Dabei ergab sich am ersten führenden Rad mit Außenflanke gegenüber den anderen Räder größerer Verschleiß. Um den zu reduzieren wurde die Radflanke konditioniert mit einem Übergang vom Reibwert 0,36 auf 0,1.

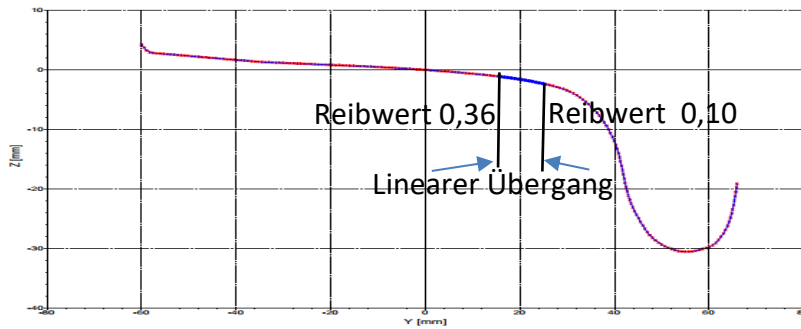


Fig. 67: Einteilung der Reibwertbereiche auf Rad11 (Aussenflanke)

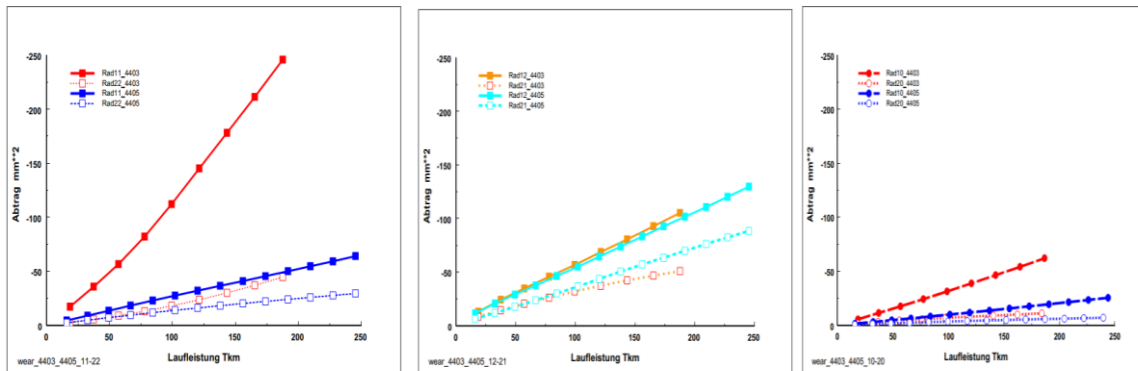


Fig. 68: Vergleich der Abtragsflächen mm^2 als $f(\text{Laufleistung Tkm})$ aller Räder ohne (4403) und mit konditionierter Flanke (4405), links der Räder mit Außenflanke, Mitte mit Innenflanke und rechts Räder auf Mittelschiene

In den folgenden Diagrammen sind die Maßstäbe nicht gleich!

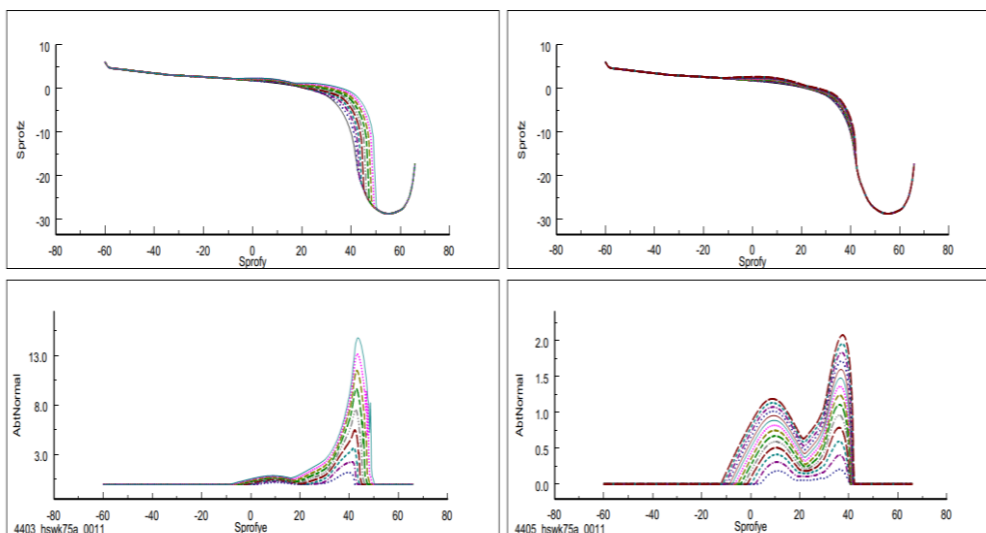


Fig. 69: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 11, links ohne, rechts mit Konditionierung Rad11

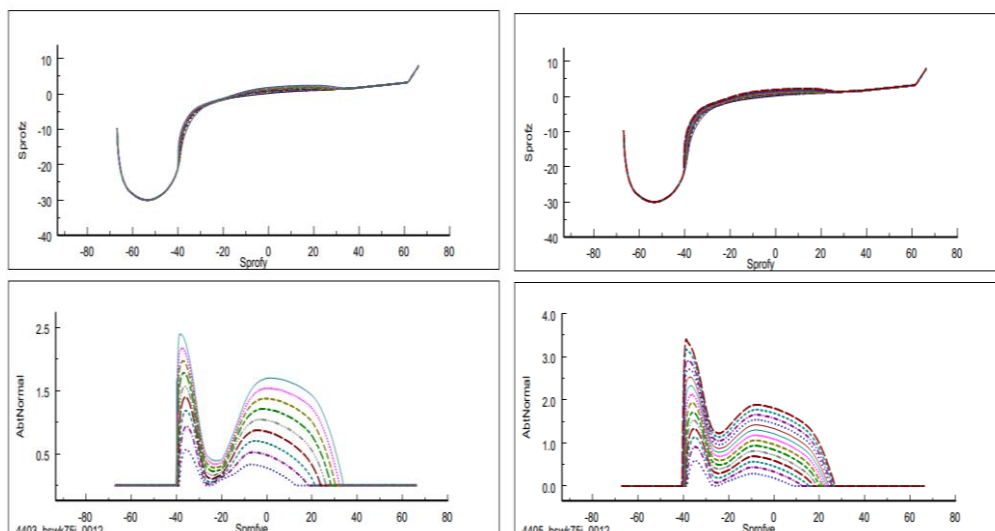


Fig. 70: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 12, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11

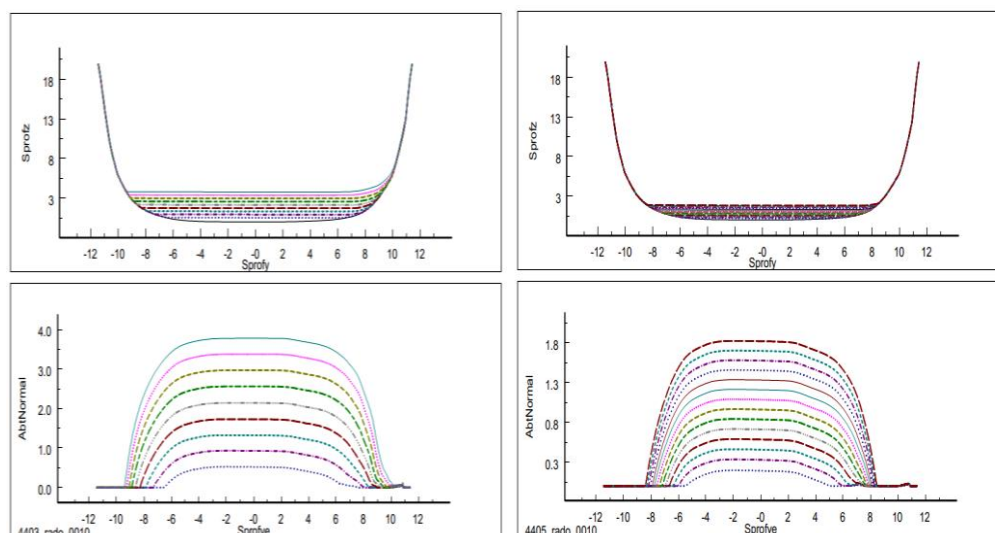


Fig. 71: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 10, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11

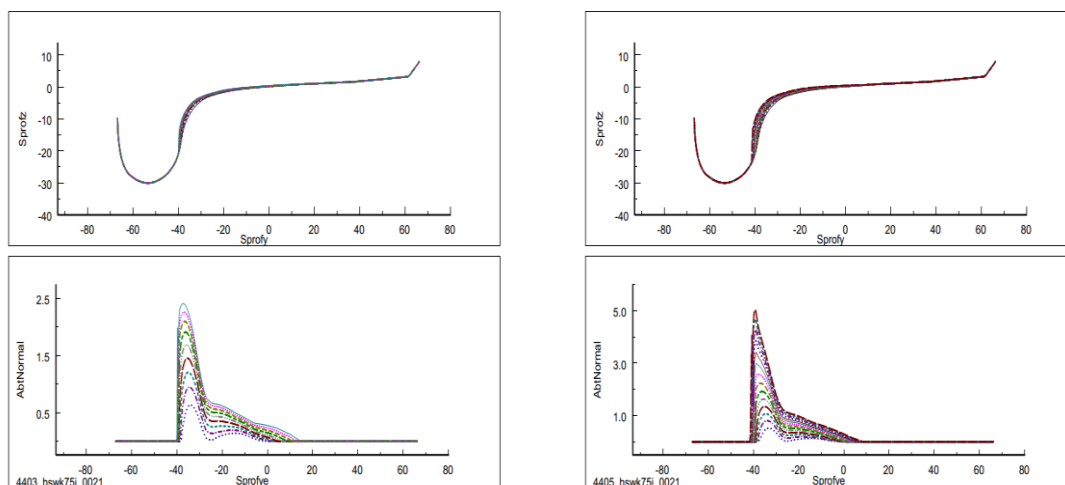


Fig. 72: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 21, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11

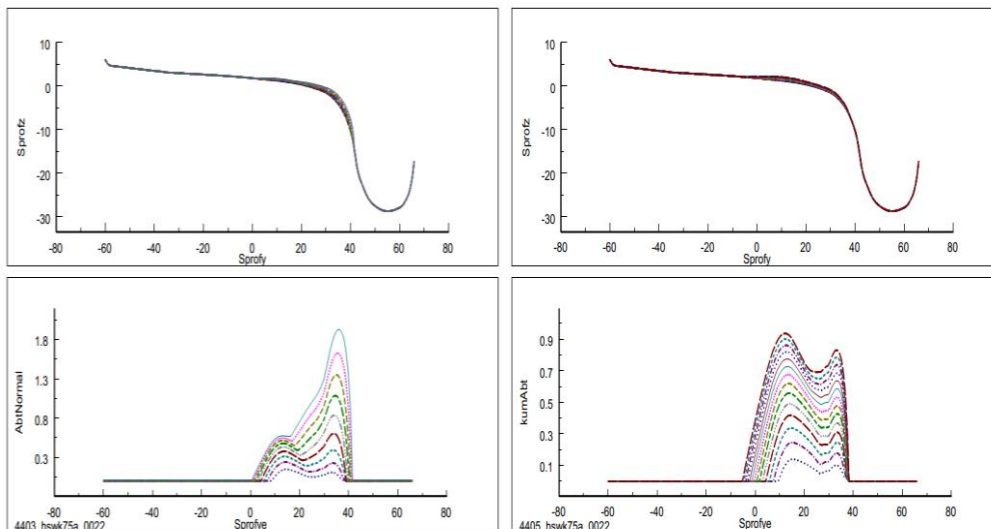


Fig. 73: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 22, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11

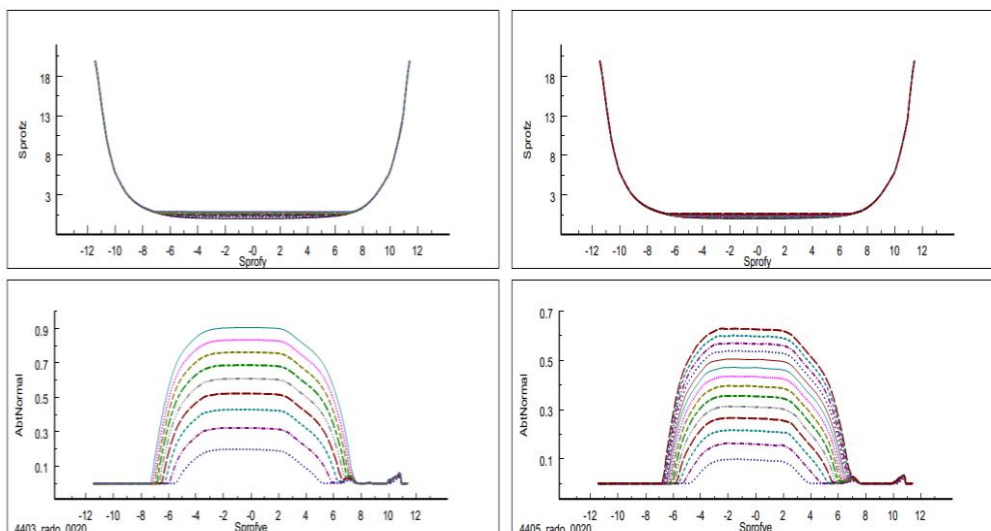


Fig. 74: Profil- und Abtragsflächenentwicklung des Rades 20, links ohne und rechts mit Konditionierung von Rad11