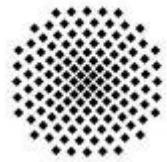


ENERGIESPEICHER RIEDL

**DONAU-
KRAFTWERK
JOCHENSTEIN
AKTIENGESELLSCHAFT**

Planfeststellungsverfahren

Technischer Bericht

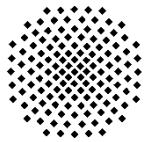


Universität
Stuttgart

Instationäre hydraulische Berechnung



Erstellt	Deutsche Energie Agentur	V. Brost	21.10.2011
Geprüft	Deutsche Energie Agentur	Ruprecht, Riedelbauch	12.01.2012
Freigegeben	DKJ / ES-R	D. Mayr <i>D. Mayr</i>	25.05.2012
	Unternehmen / Abteilung	Vorname Nachname	Datum



Universität Stuttgart

Institut für Strömungsmechanik und
Hydraulische Strömungsmaschinen

Prof. Dr.-Ing. S. Riedelbauch

Pfaffenwaldring 10
D-70550 Stuttgart
Telefon (0711) 685-3260
Telefax (0711) 685-3255

Bericht Nr. 321/2011

Energiespeicher Riedl

**Druckstoßberechnung
für die neue Auslegung**

Auftraggeber: Donaukraftwerk Jochenstein AG, Passau

Stuttgart, den 21.10.2011

Dipl.-Ing. V. Brost
(Sachbearbeiter)

Dr.-Ing. A. Ruprecht
(Abteilungsleiter)

Prof. Dr.-Ing. S. Riedelbauch
(Institutsleiter)

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung.....	3
2	Modellierung der Wasserführung	3
3	Hydraulischen Maschinen und Stelleinrichtungen	5
4	Durchgeföhrte Druckstoßuntersuchung.....	6
5	Ergebnisse der Druckstoßuntersuchung.....	7
6	Schlussfolgerungen.....	9
A	Kugelschieber-Charakteristik nach Voith.....	10
B	Ergebnis-Diagramme	12

1 Aufgabenstellung

Das Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen (IHS) der Universität Stuttgart wurde von der Donaukraftwerk Jochenstein AG (DKJ) beauftragt, für das Projekt Energiespeicher Riedl (ES-R) Druckstoßuntersuchungen für die aktualisierte Wasserführung (aufgrund der Verlegung des Ein-/Auslaufbauwerks in das Oberwasser des Kraftwerks Jochenstein) durchzuführen. Neben der Wasserführung haben sich auch die Auslegungsdaten für die Maschinen geändert, so dass eine neuerliche Untersuchung notwendig wird. Es soll wiederum die Drucklinie des minimalen Drucks entlang der Unterwasserführung bestimmt werden.

2 Modellierung der Wasserführung

Für die Modellierung der Wasserführung wurden von AHP/DKJ die folgenden Unterlagen zur Verfügung gestellt:

- Energiespeicher Riedl, Planfeststellungsverfahren Bericht, Fallhöhenverluste Triebwasserweg, JES-A001-PERM1-B30001-00-CFE
- ES-R: Zusammenstellung Kenndaten, ohne Unterlagernummer, Mail Hr. Wolf vom 21.07.2011
- ES-Riedl: Anlagen- und Maschinenkennlinien, ohne Unterlagernummer, Mail Hr. Wolf vom 21.07.2011
- ES-Riedl: Trafo-Leistung, ohne Unterlagernummer, Mail Hr. Wolf vom 21.07.2011
- Triebwasserweg Längsschnitt und Regelprofile, JES-A001-PERM1-A30002-00-IFE
- Triebwasserweg Bereich Kraftstation Längsschnitt, JES-A001-PERM1-A30004-00-CFE
- Triebwasserweg Längsschnitt und Regelprofile, JES-A001-PERM1-A30002-00-GPE
- Triebwasserweg Lageplan, JES-A001-PERM1-A30003-00-FPE
- Triebwasserweg Bereich Kraftstation Längsschnitt, JES-A001-PERM1-A30004-00-APE
- Triebwasserweg Bereich Kraftstation Lageplan, JES-A001-PERM1-A30005-00-APE
- Kugelschieber-Charakteristik nach Voith (siehe Anhang A)

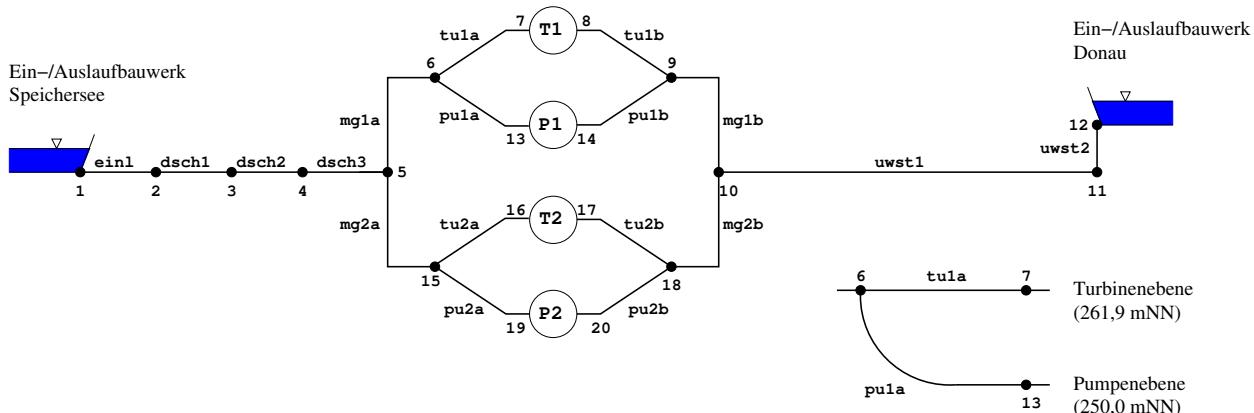


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Wasserführung (Stand Juli 2011)

Die Wasserführung des Pumpspeicherwerks ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Vom Oberbecken wird das Wasser durch einen etwa 100 m langen Einlauf, einen 300 m langen Schrägschacht und einen 900 m langen Schrägstollen zu den Verteilleitungen der Maschinen-

gruppen geführt. Unterwasserseite wird das Wasser nach der Zusammenführung der Maschinengruppen durch einen 170 m langen Unterwasserstollen und schließlich durch einen 50 m langen Lotschacht geleitet. Der Lotschacht mündet in das Ein-/Auslaufbauwerk an der Donau.

Die Leitungen sind vom Schrägstollen (dsch3) bis zu den unterwasserseitigen Verteilrohr- bzw. Sammelleitungen gepanzert oder als Stahlrohrleitungen ausgeführt. Für diese Leitungsabschnitte wird eine Wellenlaufgeschwindigkeit von 1300 m/s angesetzt. Für den nicht gepanzerten Unterwasserstollen sowie den ersten Abschnitt, der ebenfalls nicht gepanzert ist (Einlauf am Speicher und Schrägschacht), wird eine Wellenlaufgeschwindigkeit von 1100 m/s verwendet. Eine Zusammenstellung von Durchmesser, Länge, Rohreibungsbewert und Wellenlaufgeschwindigkeit für alle Leitungsabschnitte enthält Tabelle 1. Die Rohreibungsbewerte sind mit den angegebenen Dimensionen und Rauhigkeiten nach Colebrook berechnet:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot D} \right)$$

Leitung	Name	D [m]	L [m]	λ [-]	a [m/s]
Einlauf	einl	5,42	94,18	0,05523	1100
Schrägschacht/-stollen	dsch1	4,80	308,95	0,01468	1100
	dsch2	4,80	119,86	0,02173	1100
	dsch3	4,30	785,94	0,01088	1300
Verteilrohrleitung Maschinengruppe 1	mg1a	3,00	33,07	0,03935	1300
Druckleitung Turbine 1	tu1a	3,00	48,51	0,05719	1300
Druckleitung Pumpe 1	pu1a	2,60	48,51	0,00490	1300
Saugleitung Turbine 1	tu1b	3,40	26,70	0,05255	1300
Saugleitung Pumpe 1	pu1b	3,40	20,44	0,05169	1300
Sammelleitung Maschinengruppe 1	mg1b	3,40	13,00	0,19293	1300
Verteilrohrleitung Maschinengruppe 2	mg2a	3,00	33,07	0,03935	1300
Druckleitung Turbine 2	tu2a	3,00	48,51	0,05719	1300
Druckleitung Pumpe 2	pu2a	2,60	48,51	0,00490	1300
Saugleitung Turbine 2	tu2b	3,40	26,70	0,05255	1300
Saugleitung Pumpe 2	pu2b	3,40	20,44	0,05169	1300
Sammelleitung Maschinengruppe 2	mg2b	3,40	16,90	0,15048	1300
Unterwasserstollen	uwst1	4,80	178,56	0,01796	1100
	uwst2	10,00	50,42	1,47347	1100

Tabelle 1: Hydraulische Eigenschaften der Rohrleitungsabschnitte (Stand Juli 2011)

Oberbecken und Donau

Das Pumpspeicherkraftwerk Riedl wälzt Wasser zwischen der Donau und einem Oberbecken um. Der Nutzhalt des Oberbeckens soll 4,24 Mio. m³ umfassen mit den folgenden Stau- und Absenkzielen:

Stauziel Oberbecken	$z_{\text{OW},\text{SZ}} = 630,5 \text{ m ü. NN}$
Absenkziel Oberbecken	$z_{\text{OW},\text{AZ}} = 610,0 \text{ m ü. NN}$

Als Unterwasser wird die Donau verwendet, die nur einen geringen Spiegelunterschied aufweist. Der minimale und maximale Wasserspiegel betragen

minimaler Unterwasserspiegel	$z_{UW,min} = 288,0 \text{ m ü. NN}$
maximaler Unterwasserspiegel	$z_{UW,max} = 290,3 \text{ m ü. NN}$

Die maximale Nettofallhöhe im 2-Turbinen-Betrieb von 323,1 mWS wird erreicht, wenn eine geodätische Höhendifferenz von 342,5 mWS anliegt. Dies ist im Turbinenbetrieb nur bei Stauziel im Oberbecken und geringstem Wasserstand in der Donau möglich. Die maximale geodätische Höhendifferenz beträgt dann 342,5 mWS. Die kleinste geodätische Höhendifferenz beträgt 319,7 mWS.

3 Hydraulischen Maschinen und Stelleinrichtungen

Das Pumpspeicherwerk soll mit getrennten Maschinensätzen ausgestattet werden. Die Nenndaten für den Turbinenbetrieb lauten:

- Drehzahl: $n_N = 500 \text{ U/min}$
- Fallhöhe: $H_N = 322,87 \text{ m}$
- elektrische Leistung: $P_{T,N} = 155 \text{ MW}$
- Durchfluss: $Q_N = 54 \text{ m}^3/\text{s}$

Für den Pumpbetrieb gelten die folgenden Angaben für den Nennbetrieb:

- Drehzahl: $n_N = 500 \text{ U/min}$
- Förderhöhe: $H_N = 335,26 \text{ m}$
- elektrische Leistung: $P_{P,N} = 151 \text{ MW}$
- Durchfluss: $Q_N = 42 \text{ m}^3/\text{s}$

Für die Berechnungen wird mit $J = 548 \text{ tm}^2$ für das Trägheitsmoment von Generator und Pumpe bzw. Turbine gerechnet.

Die Kennwerte für die Turbine und die Pumpe wurden von AHP/DKJ bereits für die letzten Untersuchungen in Form von Excel-Blättern zur Verfügung gestellt und auf die neuen Nenndaten umgerechnet.

Stellorgane und Stellzeiten

Die Regulierung der Turbinen erfolgt mit einem Leitapparat. Für die vorliegenden Untersuchungen wird der Leitapparat linear, ungestuft geöffnet und geschlossen. Die Öffnungszeit beträgt $t_o = 30 \text{ s}/100\%$, die Schließzeit beträgt $t_s = 60 \text{ s}/100\%$. Als zusätzliches Verschlussorgan besitzen die Turbinen Kugelschieber, die mit einer Geschwindigkeit von $t_{s,KS} = 40 \text{ s}/100\%$ zu schließen beginnen wenn der Leitapparat komplett oder nahezu geschlossen ist.

Die Pumpen besitzen keinen Leitapparat und können nur mit den Pumpen-Kugelschiebern geschlossen werden. Für die Pumpen-Kugelschieber wird ein Stellgesetz mit linearem Schließen mit einer Geschwindigkeit von $t_{o,PSK} = t_{s,PKS} = 20 \text{ s}/100\%$ verwendet. Für die Druckstoßberechnungen dieser Untersuchungen wurde wiederum die Kugelschieber-Charakteristik nach „Voith“ verwendet.

4 Durchgeführte Druckstoßuntersuchung

Die Untersuchungen erfolgen für die in Tabelle 2 zusammengefassten Lastfälle. Die Lastfälle 1 bis 6 sind von DKJ definiert, die weiteren Lastfälle wurden vom IHS zusätzlich in die Betrachtung aufgenommen. Es wurden dieselben zusätzlichen Lastfälle spezifiziert wie bereits bei den letzten Untersuchungen (IHS-Bericht 313/2011), berechnet wurden jedoch nur diejenigen Lastfälle, die sich in den vorigen Untersuchungen als kritisch erwiesen haben.

Die Lastfälle 5 und 6, der Wechsel vom Turbinen- in den Pumpbetrieb und umgekehrt, sind so berechnet, dass nach dem Schließen der Turbine bzw. der Pumpe sofort das Absperrorgan für den jeweils anderen Betriebszustand beginnt zu öffnen. Beim Wechsel in den Pumpbetrieb wird eine Dauer von 20 s zum Ausblasen der Turbine angesetzt, bevor die Pumpenkugelschieber geöffnet werden.

Lastfall	Betriebsart	Fall-/Förderhöhe ¹
1	Anfahren Turbinenbetrieb	H_{min}
2	Anfahren Pumpbetrieb	H_{OWmin}, H_{UWmin}
3	Lastabwurf Turbinenbetrieb	H_{min}
4	Lastabwurf Pumpbetrieb	H_{OWmin}, H_{UWmax}
5	Wechsel Turbinen- in Pumpbetrieb	H_{OWmin}, H_{UWmax}
6	Wechsel Pump- in Turbinenbetrieb	H_{OWmin}, H_{UWmax}
9	zyklischer Turbinenbetrieb	H_{min}
10	Lastabwurf Pumpbetrieb, KS offen	H_{OWmin}, H_{UWmax}
12	Lastabwurf Turbinenbetrieb, LA+KS offen	H_{min}
13	Lastabwurf Turbinenbetrieb, M2 verzögert	H_{min}
14	Lastabwurf Turbinenbetrieb, 25% Teillast	H_{min}
15	Lastabwurf Turbinenbetrieb, 25% Teillast, M2 verzögert	H_{min}
18	Mischbetrieb 25% Tu1 + Pu2, Lastabwurf Tu1	H_{OWmin}, H_{UWmax}
19	Mischbetrieb 25% Tu1 + Pu2, Lastabwurf Pu2	H_{OWmin}, H_{UWmax}
22	Mischbetrieb Tu1 + Pu2, Lastabwurf Tu1	H_{OWmin}, H_{UWmax}
23	Mischbetrieb Tu1 + Pu2, Lastabwurf Pu2	H_{OWmin}, H_{UWmax}
1) minimale Fall-/Förderhöhe: $H_{min} = 610,0 \text{ m ü. NN} - 290,3 \text{ m ü. NN} = 319,7 \text{ mWS}$		
maximale Fall-/Förderhöhe: $H_{max} = 630,5 \text{ m ü. NN} - 288,0 \text{ m ü. NN} = 342,5 \text{ mWS}$		

Tabelle 2: Untersuchte Lastfälle

Lastfall 9 ist der zyklische Turbinenbetrieb mit beiden Maschinen, die zwischen der Leerlaufleistung und der Nennleistung takten.

Die Lastfälle 10, 12 und 13 geben das Lastabwurfverhalten bei einfachem Versagen wieder, d. h. für ein verzögert schließendes oder offen bleibendes Absperrorgan.

In den Lastfällen 14 und 15 wird das Verhalten im Teillastbetrieb bei 25% der Nennleistung untersucht.

In den Lastfällen 18, 19, 22 und 23 wird der Mischbetrieb untersucht, bei dem eine Maschine im Turbinenbetrieb am Netz ist, die andere Maschine läuft im Pumpbetrieb.

Diagramme zu den untersuchten Lastfällen

Die Ergebnisdiagramme zu den berechneten Lastfällen sind im Anhang zusammengefasst. Der Anhang enthält Diagramme mit den Zeitverläufen der relevanten Größen sowie den Energielinien entlang der ober- und unterwasserseitigen Wasserführung. In den Diagrammen mit den Zeitverläufen sind die folgenden Größen verwendet:

P_{el}	elektrische Leistung (mit $\eta_{Geno} = 98,0 \%$) in [MW]
Q	Durchfluss in [m^3/s]
n	Drehzahl in [U/min]
h_D	druckseitige (Gesamt-)Energiehöhe an der Maschine (Spirale) in [m ü. NN]
h_S	saugseitige (Gesamt-)Energiehöhe an der Maschine in [m ü. NN]
h_I	(Gesamt-)Energiehöhe am Ende des Unterwasserstollens [m ü. NN]
Y	Öffnung Leitapparat in [%]
KS	Öffnung (Pumpen-)Kugelschieber in [%]

In den Diagrammen mit den Energielinien sind die folgenden Größen verwendet:

h	(Gesamt-)Energiehöhe entlang der Wasserführung in [m ü. NN]
p	Druck- und Geschwindigkeitsenergiehöhe entlang der Wasserführung in [mWS]

Die Energielinien der Lastfälle 1, 4 und 9, die den minimalen und maximalen Druck in der Wasserführung verursachen, sind in einem separaten Diagramm gemeinsam dargestellt. Die Diagramme sind für den ober- und unterwasserseitigen Teil der Wasserführung getrennt erstellt. Es sind Diagramme für die Energiehöhe [m ü. NN] und für die Druckhöhe [mWS] (Gesamtenergiehöhe abzüglich Leitungsachskote) enthalten. Diese Diagramme finden sich am Ende des Anhangs.

5 Ergebnisse der Druckstoßuntersuchung

An den Saugseiten der Pumpen muss mit einer dynamischen Schwankung der Energiehöhe von bis zu 3% der Nennfallhöhe gerechnet werden. Dies entspricht einer Schwankung von $\Delta h_S = 10,5 \text{ mWS}$, die für kavitationsfreien Betrieb als Energiehöhenreserve verbleiben sollte. Bei einer Wassertemperatur von $\vartheta = 5^\circ\text{C}$ beträgt die Dampfdruckhöhe $h_{va} = -10,24 \text{ mWS}^1$. Damit darf die Energiehöhe von etwa +1 mWS nicht unterschritten werden.

In der Unterwasserführung sollte eine Reserve von +5 mWS nicht unterschritten werden.

Die Ergebnisse sind für die berechneten Lastfälle in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Tabelle beinhaltet die Extremwerte für die Drehzahl (positiv: Turbinendrehrichtung), die Energiehöhe an Druck- und Saugseite von Pumpen und Turbinen (jeweils nur Extremwert; graue Angaben stehen für Maschinen, die nicht in Betrieb sind) sowie der Energiehöhe am Fuß des Lotschachts.

Maximale Drehzahlerhöhung

Die größte Drehzahl wird bei einem Lastabwurf aus dem Turbinenbetrieb erreicht, wenn weder Leitapparat noch Kugelschieber schließen. Dabei gehen die Turbinen wiederholt in Durchgang

¹ mit: $p_{va} = 900 \text{ Pa}$; $p_{amb} = 101325 \text{ Pa}$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (bei $\vartheta = 5^\circ\text{C}$)

und eine maximale Drehzahl von 908,12 U/min wird erreicht. Dies stellt eine Erhöhung um 408,12 U/min bzw. auf 182% bezogen auf die Nenndrehzahl von 500 U/min dar.

Lastfall	Betrieb	Fallhöhe/ Förderhöhe	nmax ¹⁾ [U/min]	Turbinen ²⁾		Pumpen ²⁾		Wasserführung	
				hDmax [mWS]	hSmin [mWS]	hDmax [mWS]	hSmin [mWS]	hOWmin [mWS]	hUWmin [mWS]
1	Tu Anfahren	Hmin	500,00	347,99	30,11	359,93	42,02	9,35	7,98
2	Pu Anfahren	HOWmin, HUWmin	-500,00	389,56	21,03	401,90	31,63	11,97	5,83
3	Tu-Lastabwurf	Hmin	889,34	382,54	24,23	394,78	36,98	10,66	7,95
4	Pu-Lastabwurf	HOWmin, HUWmin	-57,94	431,22	16,11	446,55	26,90	3,16	5,79
5	Wechsel Tu in Pu	HOWmin, HUWmin	500,00	401,14	19,09	414,61	30,67	10,03	5,85
6	Wechsel Pu in Tu	HOWmin, HUWmin	500,00	354,65	26,09	364,01	36,54	6,11	5,78
9	Tu-zyklischer Betrieb	Hmin	500,00	366,01	27,37	377,58	39,67	9,02	7,97
10	Pu-LAbw. KS bleibt geöffnet	HOWmin, HUWmin	752,32	418,61	18,46	433,02	28,99	3,75	5,89
12	Tu-LAbw., LA/KS offen	Hmin	908,12	362,76	27,77	377,19	40,65	9,53	7,99
13	Tu-LAbw., M2 verzögert	Hmin	889,49	382,77	24,35	394,77	37,12	9,53	7,95
14	Tu-LAbw., 25% PN	Hmin	571,05	374,01	26,56	385,61	38,93	9,81	7,92
15	Tu-LAbw., 25% PN, M2 verzögert	Hmin	571,31	370,91	26,62	382,42	38,97	10,19	7,94
18	Tu1 25%PN + Pu2, LAbw. Tu1	HOWmin, HUWmin	565,83	357,88	26,01	366,94	36,09	11,67	5,70
19	Tu1 (25% PN) + Pu2, LAbw. Pu2	HOWmin, HUWmin	-54,82	385,78	22,55	403,94	32,62	4,67	5,70
22	Tu1 + Pu2, LAbw. Tu1	HOWmin, HUWmin	843,66	368,26	24,60	377,08	35,35	11,76	5,94
23	Tu1 + Pu2, LAbw. Pu2	HOWmin, HUWmin	-56,67	371,67	24,58	397,44	34,31	5,42	5,93
24	Tu1 + Pu1, LAbw.	HOWmin, HUWmin	533,15	400,97	20,14	415,46	31,27	4,83	5,90
1) Drehzahl: positiv=Drehrichtung Tu-Betrieb, negativ=Drehrichtung Pu-Betrieb									
2) Angaben in Grau: Maschinen sind nicht in Betrieb									
hD Druckhöhe an Druckseite Pumpe/Turbine									
hS Druckhöhe an Saugseite Pumpe/Turbine									
hUW Druckhöhe an Ende UW-Stollen (oberster Punkt des Lotschachts)									
alle Druckhöhen in [mWS] über Bezugskote z (zD,Tu=261,9mNN; zS,Tu=259,9mNN; zD,Pu=250,0mNN; zS,Pu=248,0mNN; zOW=598,03mNN; zUW=282,0mNN)									

Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse (Stand August 2011)

Minimale und maximale Druckhöhe an den Maschinen

Die maximale Druckhöhe an den Maschinendruckseiten beträgt 446,55 mWS und tritt im Lastfall 4 an den Pumpen auf. Bezogen auf die anliegende Druckhöhe im Stillstand ($h_{Pu,D,0} = 360$ mWS) bedeutet dies eine Erhöhung um 86,55 mWS bzw. auf 124%.

Die größte Druckhöhe an den Turbinen beträgt 431,22 mWS im selben Lastfall, bei dem die Turbinen allerdings nicht in Betrieb sind. Die Druckhöhe ist gegenüber der Druckhöhe im Stillstand ($h_{Tu,D,0} = 348,1$ mWS) um 83,12 mWS, ebenfalls auf 124%, erhöht.

Die geringste Druckhöhe an den Maschinensaugseiten beträgt 19,09 mWS in Lastfall 5 an den Turbinen ($h_{Tu,S,0} = 28,1$ mWS). An den Saugseiten der Pumpen sinkt die Druckhöhe in Lastfall 4 nur bis auf 26,90 mWS ab. Bezogen auf die anliegende Druckhöhe im Stillstand ($h_{Pu,S,0} = 40,0$ mWS) tritt eine Absenkung um 13, 1 mWS auf. In allen Lastfällen ist die Druckhöhe an den Saugseiten jedoch noch immer bei einem Wert größer +1 mWS.

Tieferer Einbau der Maschinen:

Nach Abschluss der Untersuchungen wurde dem IHS mitgeteilt, dass die Maschinen um 10 m tiefer eingebaut werden sollen. Die Turbinenebene liegt dann bei 251,9 mNN und die Pumpenebene bei 240 mNN. Da bereits eine ausreichende Reserve besteht, die durch eine weitere Absenkung noch vergrößert wird, erfolgt keine erneute Berechnung der Lastfälle. Die Druckhöhe an den Maschinen wird näherungsweise um 10 mWS ansteigen. Dementsprechend muss die Panzerung auf der Druckseite auf einen Druck von 441,22 mWS (Turbinen-DS) bzw. 456,55 mWS (Pumpen-DS) bemessen werden. Die Werte entsprechen jeweils einer Erhöhung auf 127% bezo-

gen auf den Druck im Stillstand. Die geringste Druckhöhe an der Saugseite der Maschinen steigt durch die Tieferlegung auf 29,09 mWS an (Lastfall 5).

Minimale Druckhöhe in der Wasserführung

Die geringste Druckhöhe in der Oberwasserführung tritt am Ende des Einlaufs auf. An dieser Stelle verbleiben in einigen Lastfällen weniger als +5 mWS (gegen Umgebungsdruck) als Reserve. Der geringste Wert wird in Lastfall 4 mit 3,16 mWS erreicht.

Die geringste Druckhöhe im Unterwasserstollen am Fuß des Lotschachts beträgt 5,70 mWS und tritt in den Lastfällen 18 und 19 auf, bei einem Turbinenlastabwurf im Mischbetrieb (Tu1 und Pu2 in Betrieb). Im Stillstand beträgt die Druckhöhe in diesem Punkt $h_{1,0} = 6,0$ mWS. Es ergibt sich also eine Absenkung um 0,3 mWS bzw. auf 95% der Druckhöhe im Stillstand.

6 Schlussfolgerungen

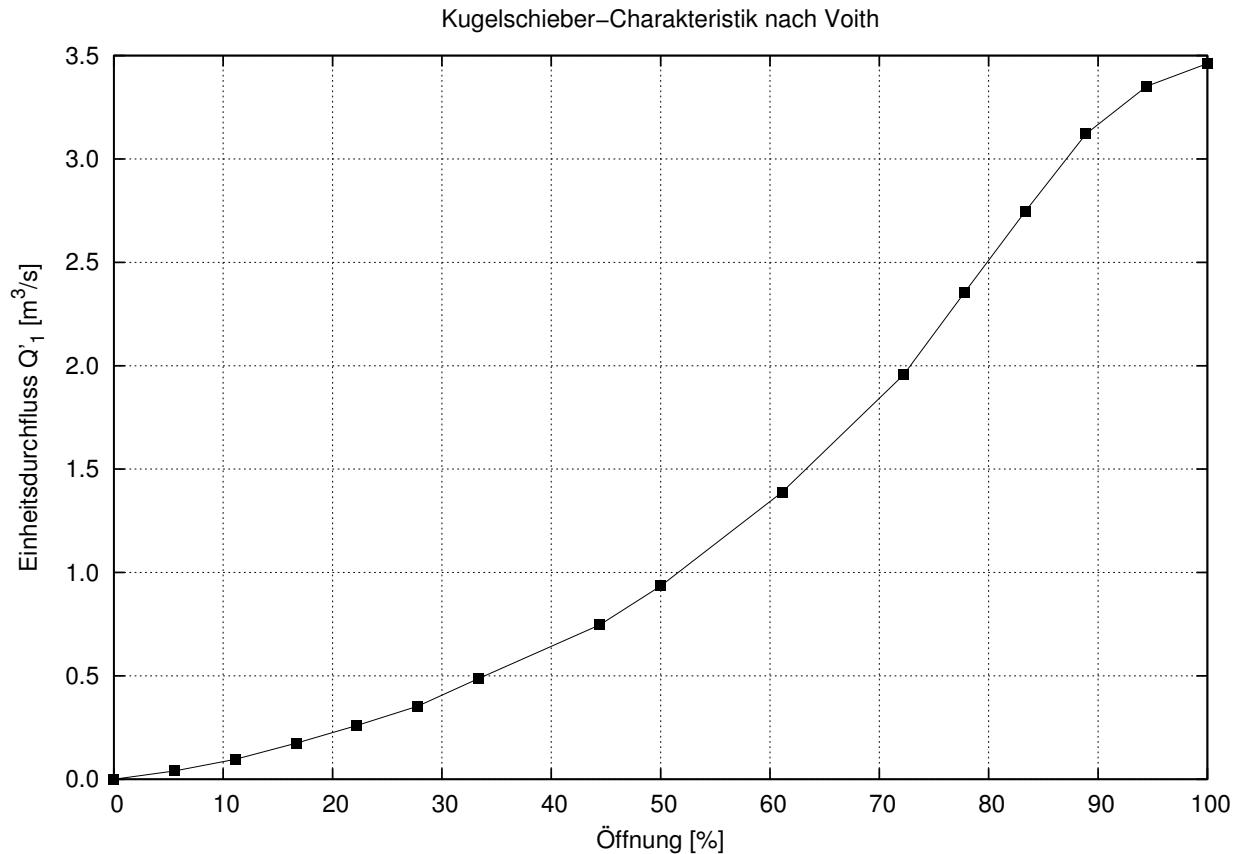
Durch die erneute Änderung der Unterwasserführung sowie die Absenkung der Maschinen besteht nicht mehr die Gefahr, dass der Umgebungsdruck an irgendeiner Stelle im Unterwasserstollen erreicht wird. Die Druckabsenkung im Unterwasserstollen ist für die untersuchten Lastfälle im Turbinenbetrieb, Pumpbetrieb sowie im Mischbetrieb unkritisch.

Die Panzerung bzw. Stahlrohrleitungen druckseitig der Maschinen muss auf eine Druckerhöhung auf mindestens 124% des Drucks im Stillstand gemessen werden. Bei einer weiteren Absenkung der Maschinen um 10 m muss der Bemessungsdruck mit 127% geringfügig größer angesetzt werden.

Die erreichte Überdrehzahl im Durchgang erreicht mit 182% der Nenndrehzahl einen relativ hohen Wert. Dies ist bei der Dimensionierung des Generators zu berücksichtigen.

A Kugelschieber-Charakteristik nach Voith

Für die Kugelschieber wird eine Kennlinie nach Voith verwendet, die gemessen wurde. Der Einheitsdurchfluss wird als Funktion der Öffnung angegeben:



Dabei ist der Einheitsdurchfluss wie folgt definiert:

$$Q' = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{h_D - h_S + v^2/2g}}$$

Darin sind

- Q Durchfluss durch Kugelschieber
- h_D druckseitige Energiehöhe
- h_S saugseitige Energiehöhe
- v Fließgeschwindigkeit im Nennquerschnitt
- g Erdbeschleunigung

Die Verwendung des Einheitsdurchflusses bei einer Armatur erfolgt analog zur Verwendung des Einheitsdurchflusses einer hydraulischen Maschine. Dies hat bei der numerischen Behandlung den Vorteil, dass der (Einheits-)Durchfluss eines vollkommen geöffneten, verlustfreien Kugelschiebers auf den Wert $Q'_{1,\max} = \pi/4 \cdot \sqrt{2g} = 3,478879$ begrenzt ist (siehe Diagramm, Öffnung 100%).

Die Stützstellen für Öffnung und Einheitsdurchfluss sind auf der folgenden Seite angegeben.

Datei: kennlar.ksVoith

Kennlinie des Hauptabsperrorgans (Kugelschieber)
Einheitsdurchfluß Q1'A
Voith-Definition mit $\Delta H_A = (h_D - h_S + v^2 / (2 \cdot g))$

Stützstellen

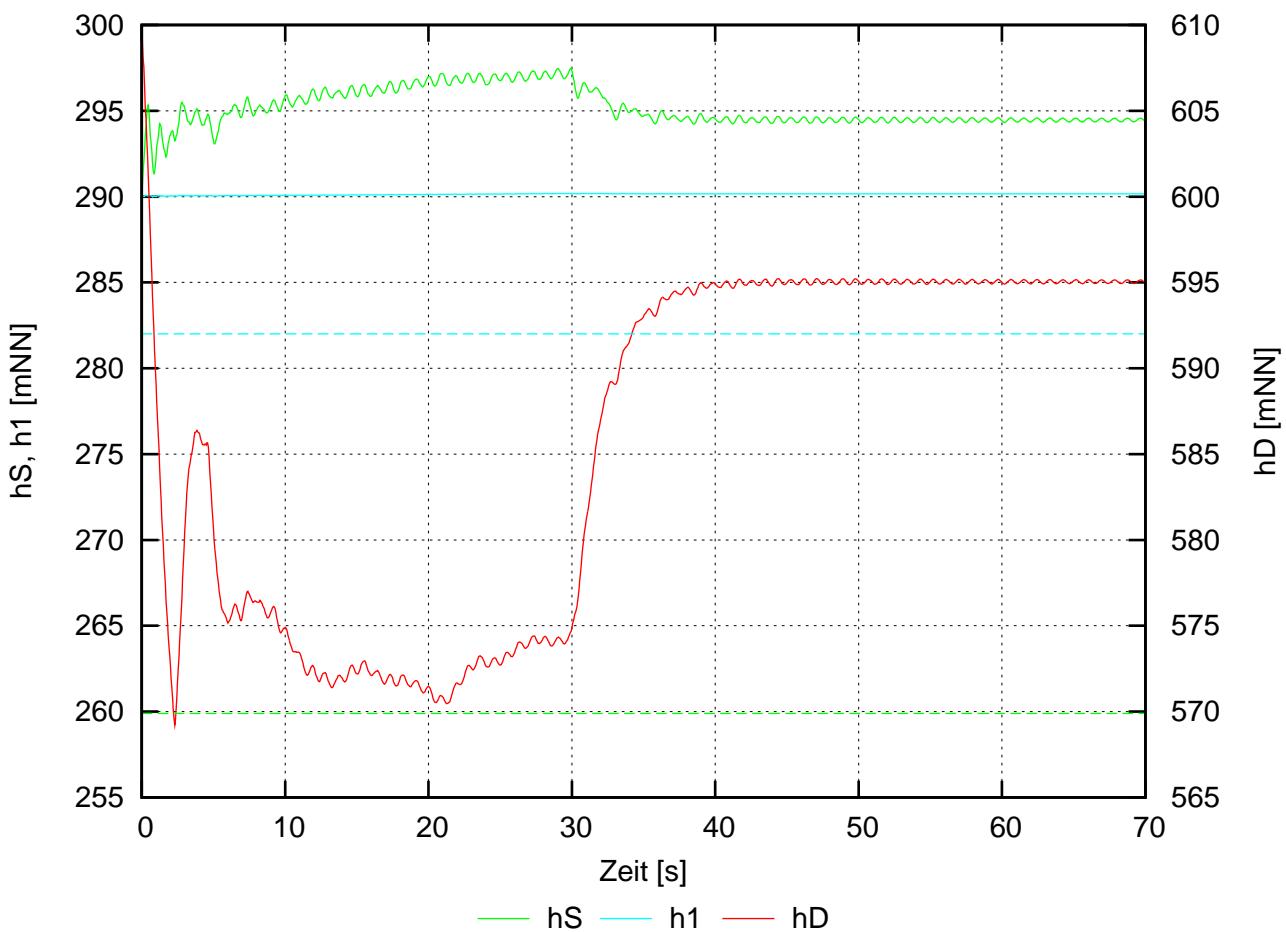
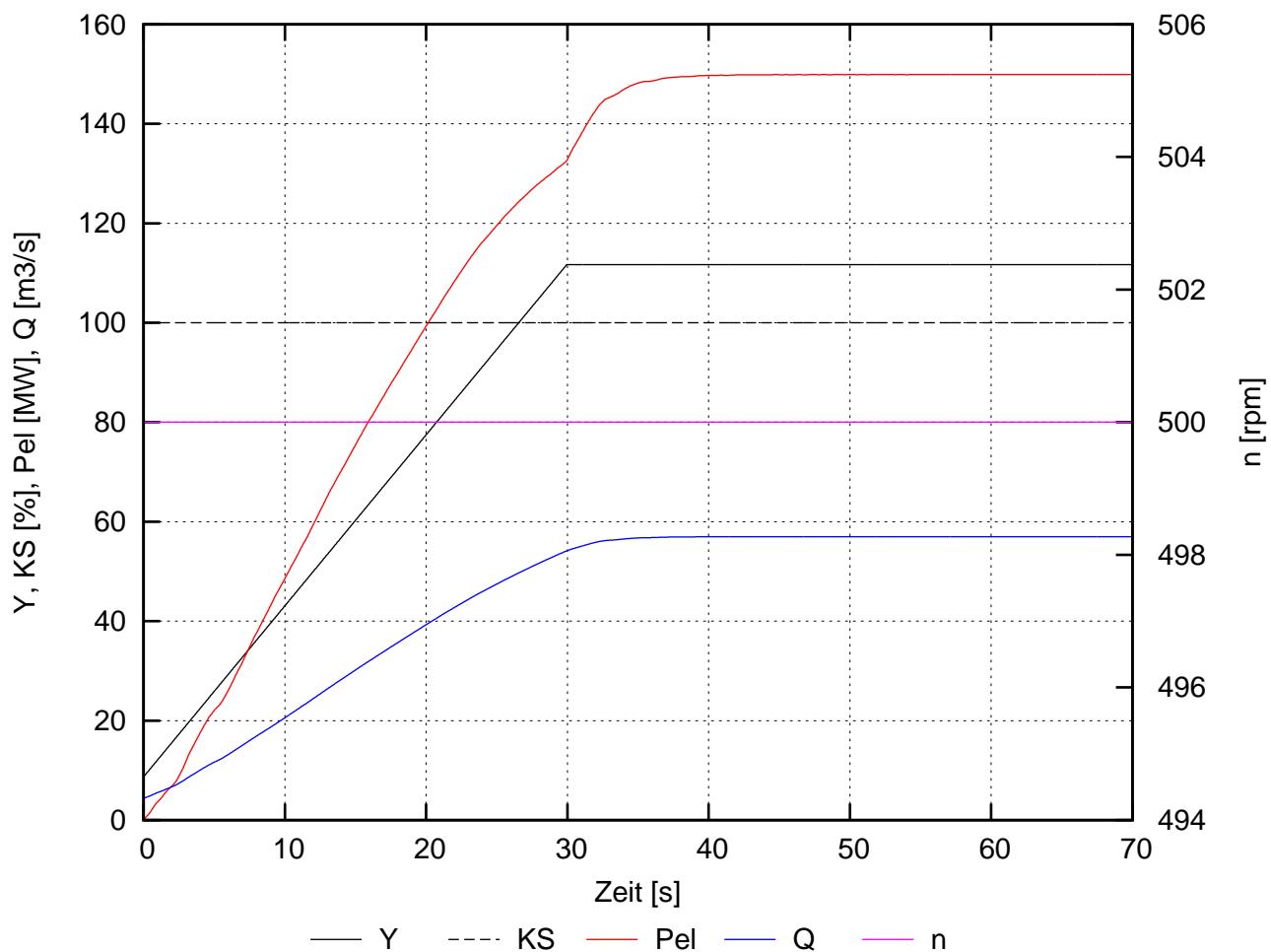
Öffnung alpha (%) Einheitsdurchfluß (m³/s)

0.000	0.00000
5.556	0.04041
11.111	0.09667
16.667	0.17445
22.222	0.25984
27.778	0.35299
33.333	0.48633
44.444	0.74659
50.000	0.93511
61.111	1.38878
72.222	1.95571
77.778	2.35312
83.333	2.74464
88.889	3.12034
94.444	3.35121
100.000	3.46146

B Ergebnis-Diagramme

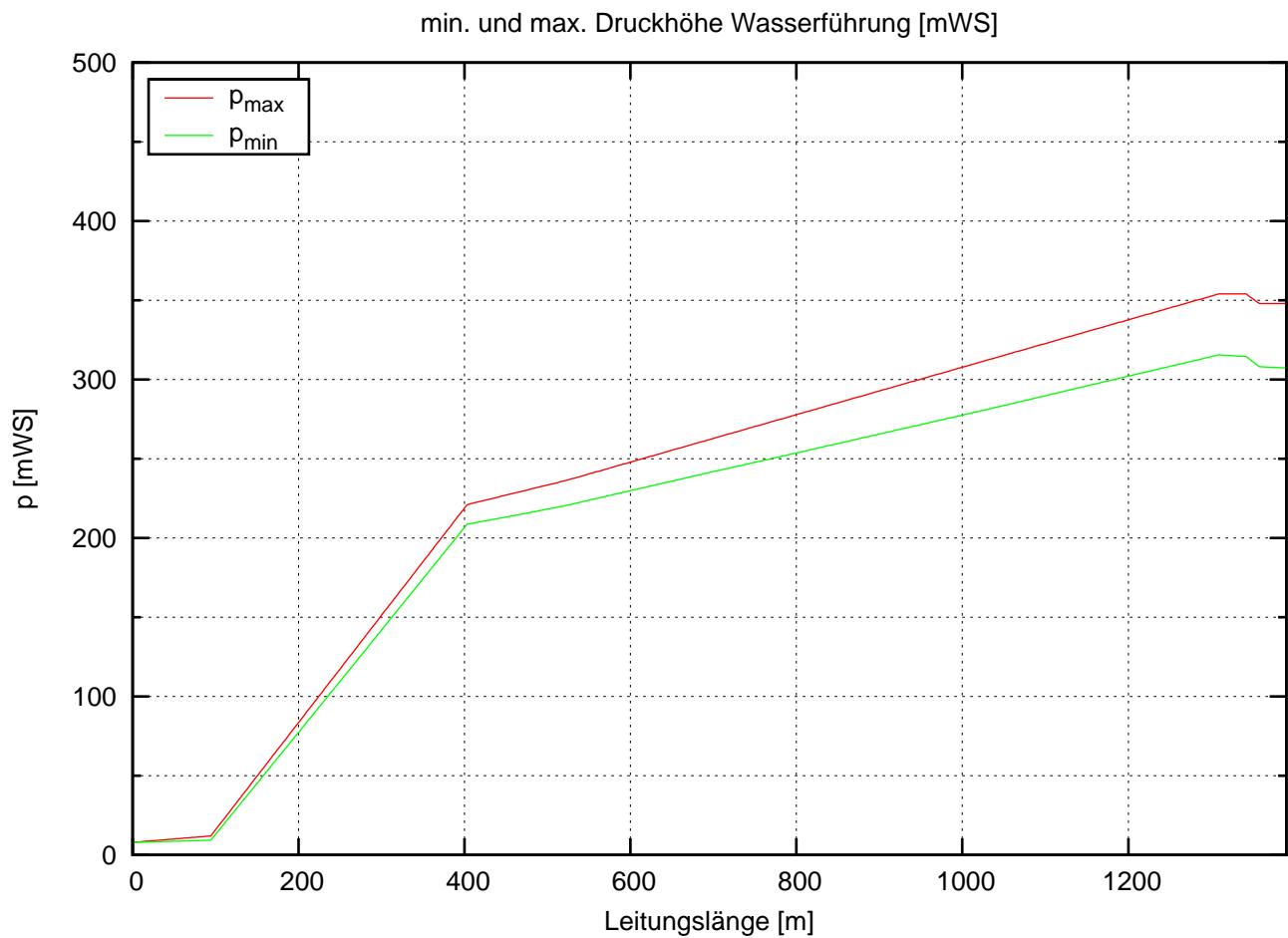
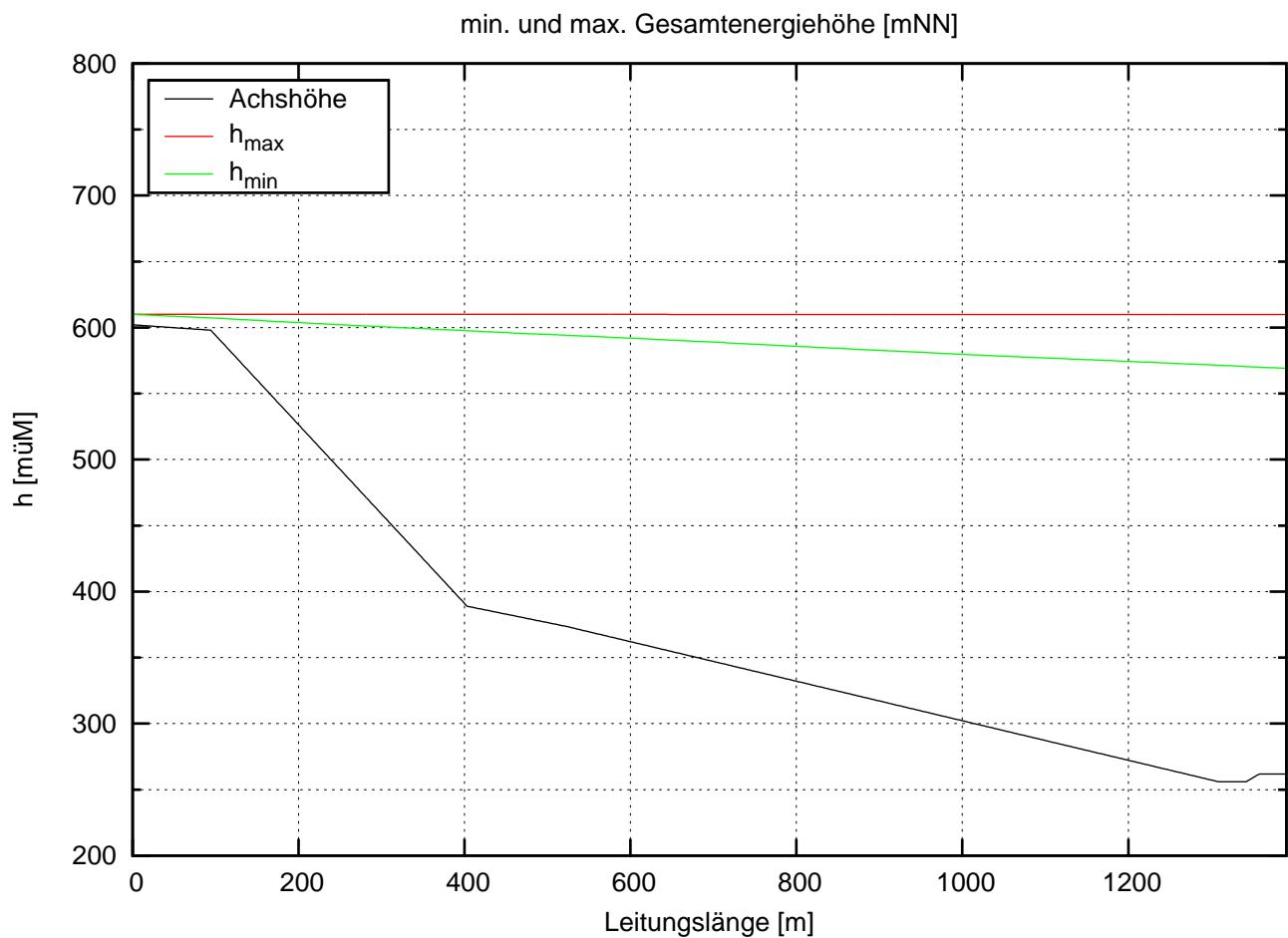
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Start in Tu-Betrieb



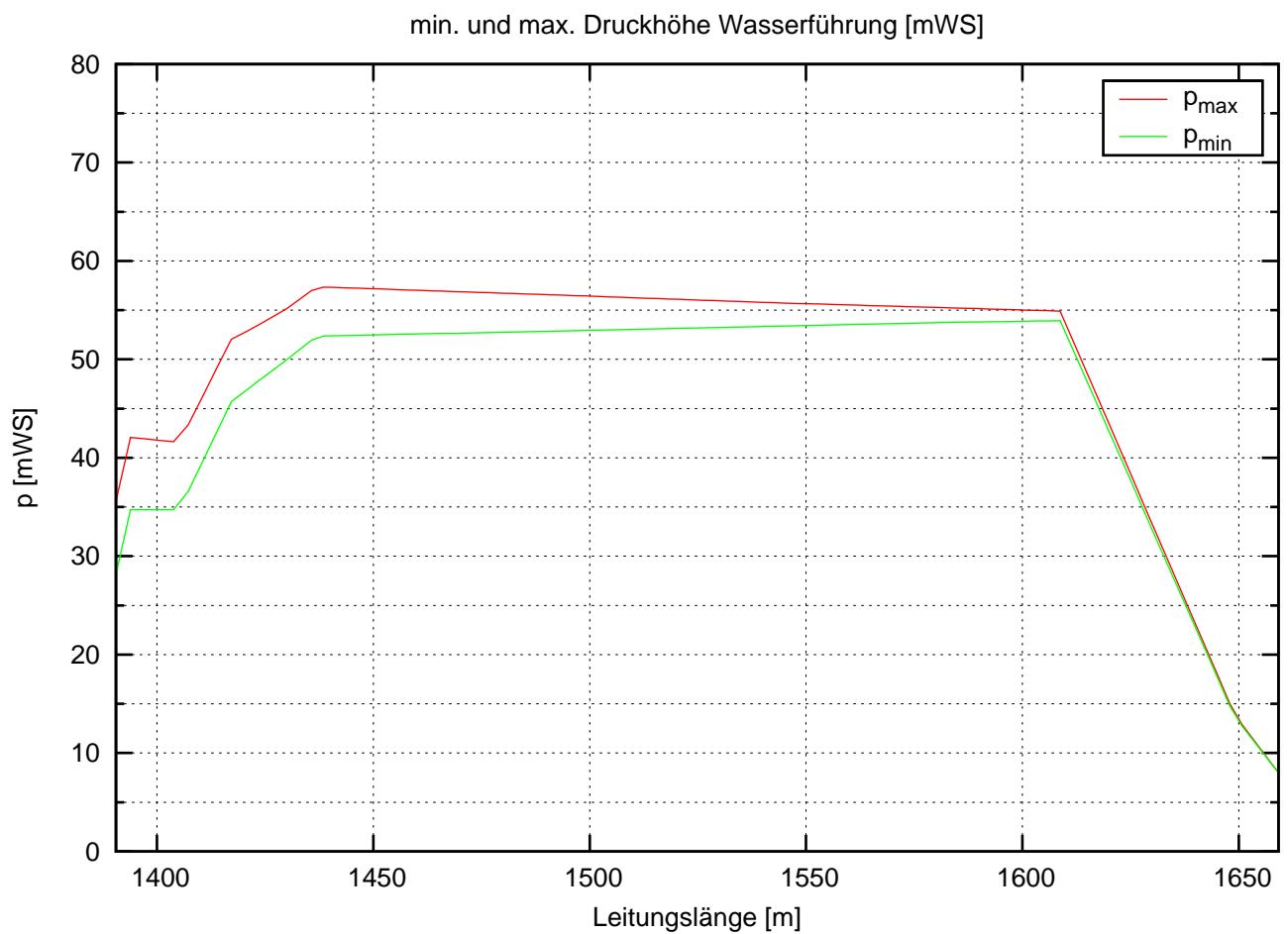
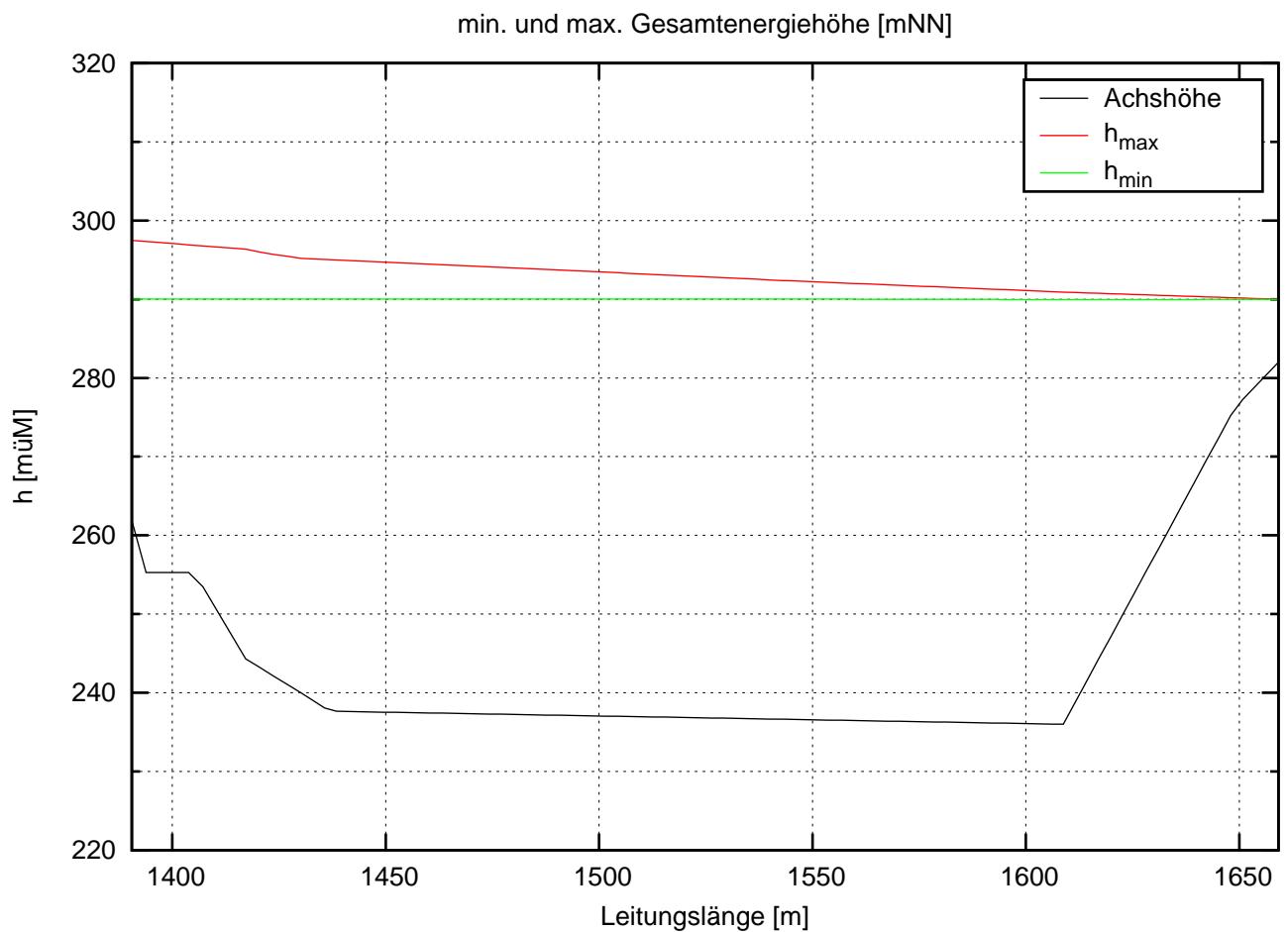
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Start in Tu-Betrieb



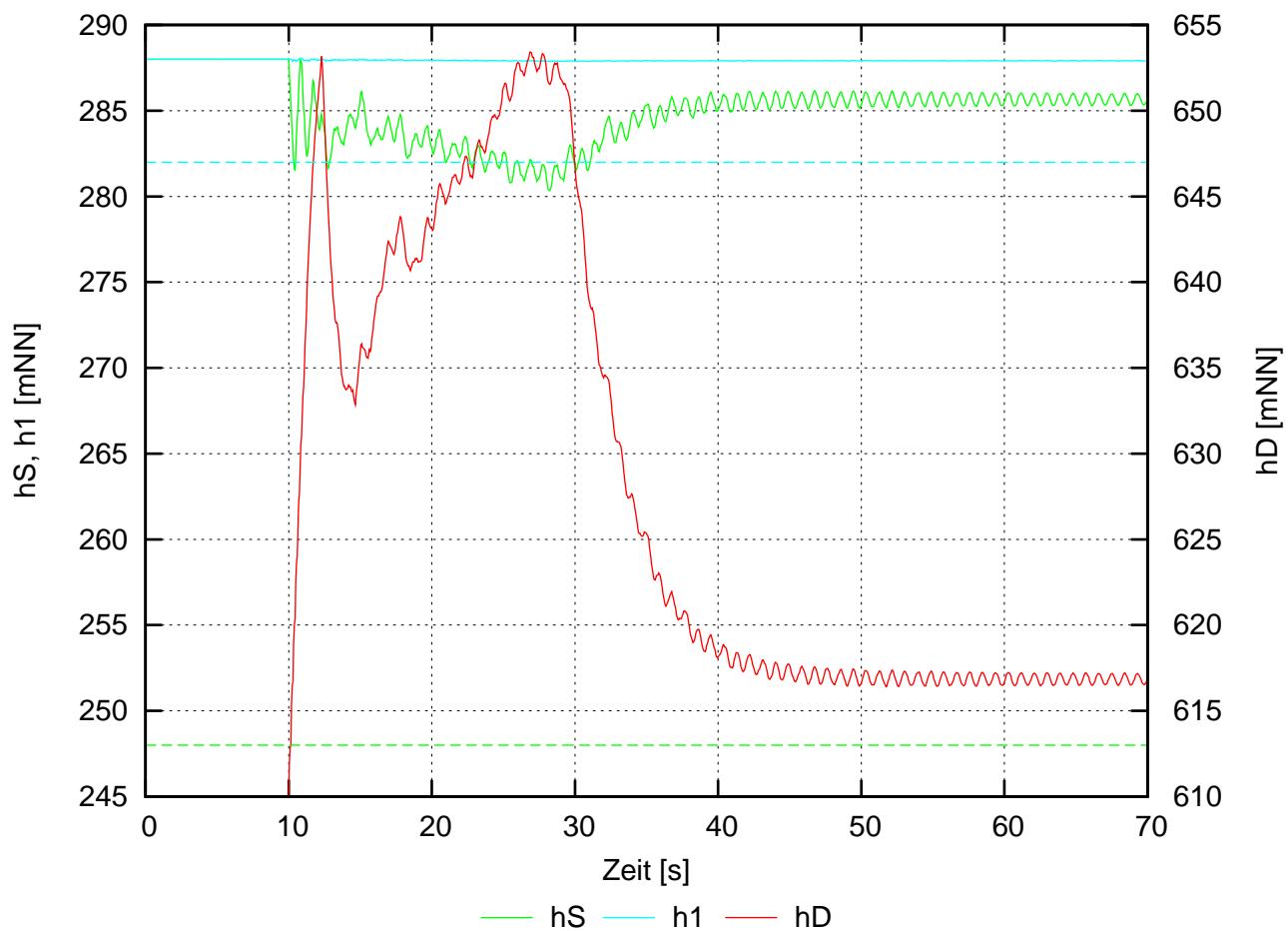
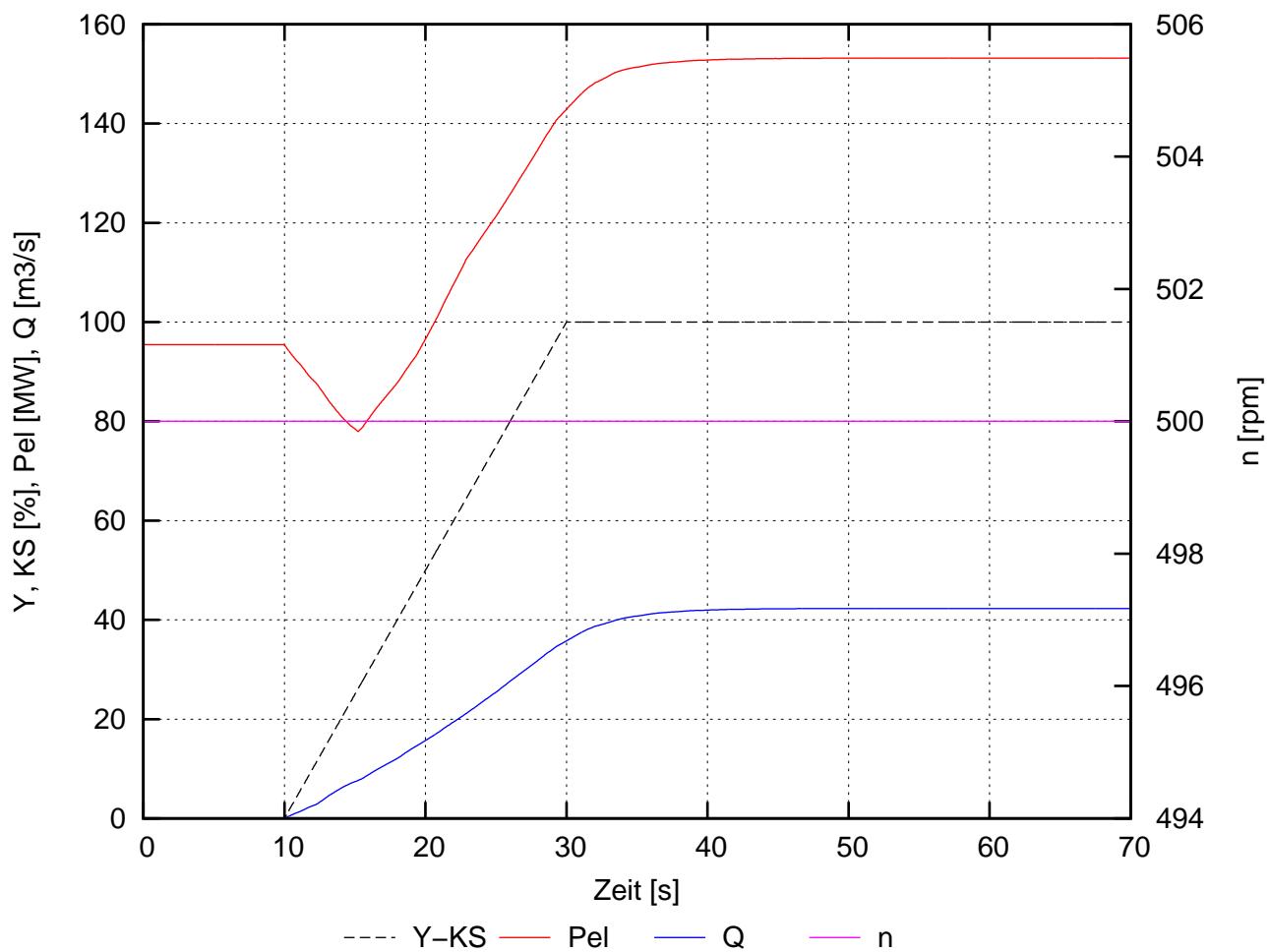
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{\text{OW}} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{\text{UW}} = 290.0 \text{ mNN}$

Start in Tu-Betrieb



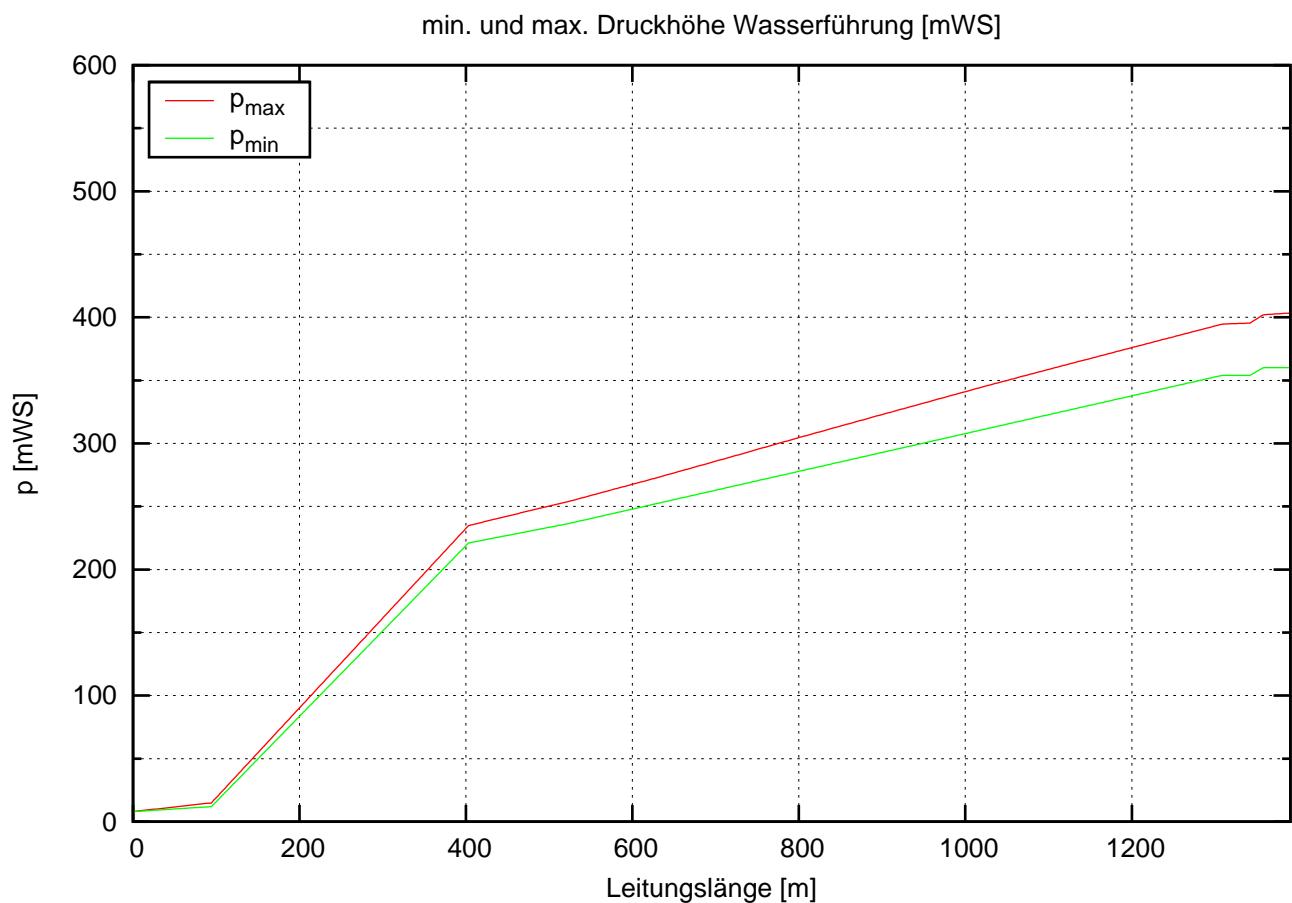
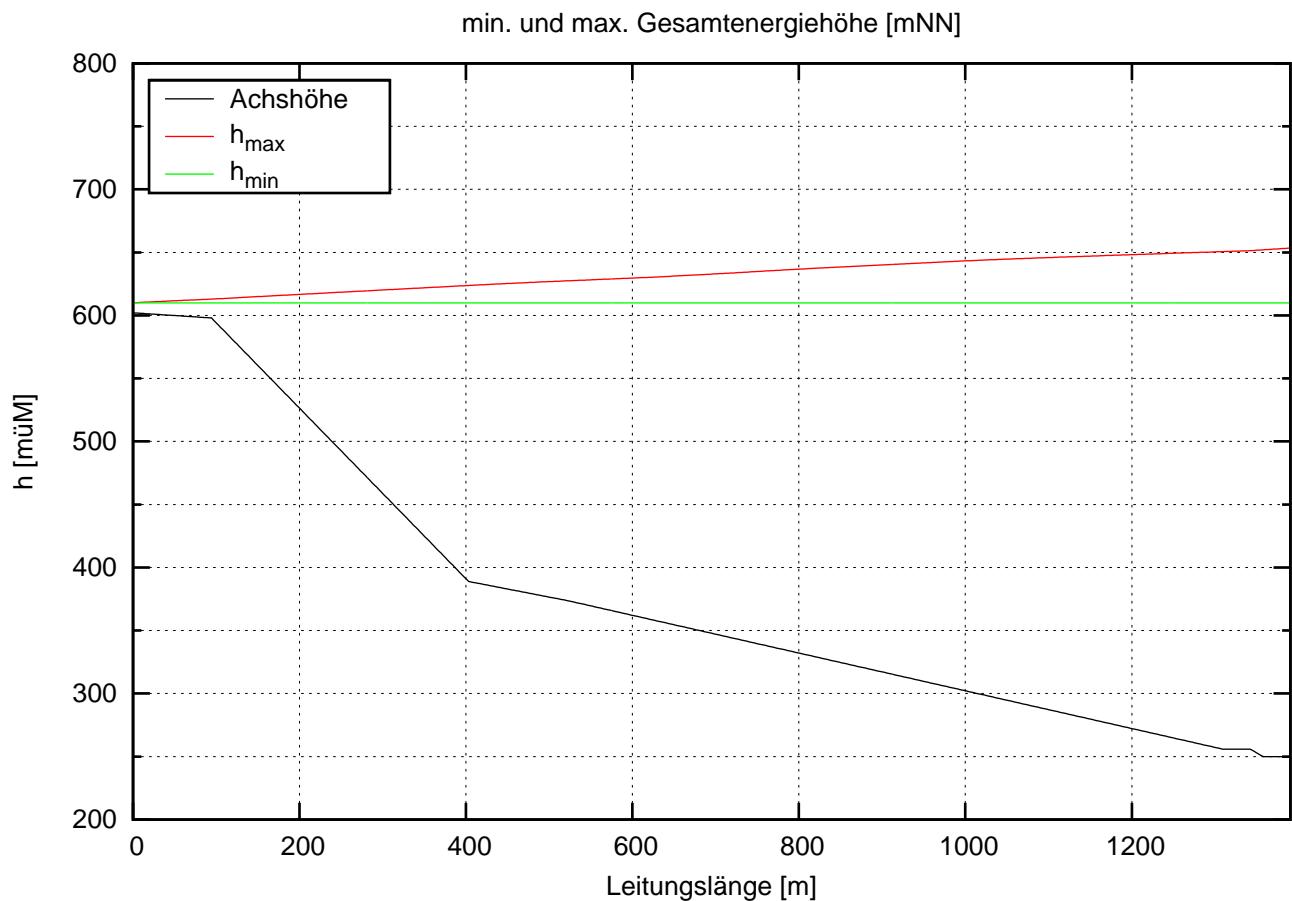
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Start in Pu-Betrieb



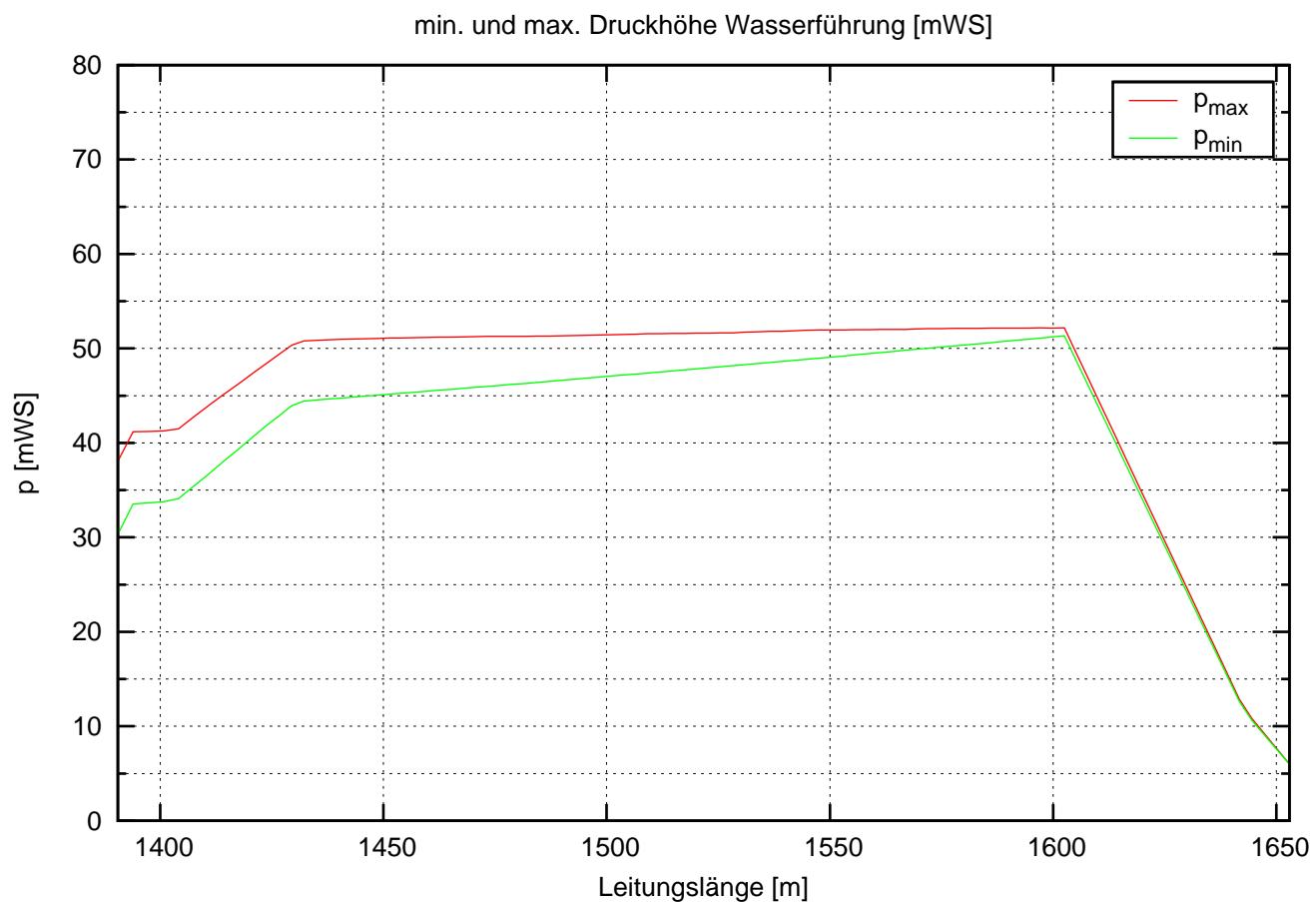
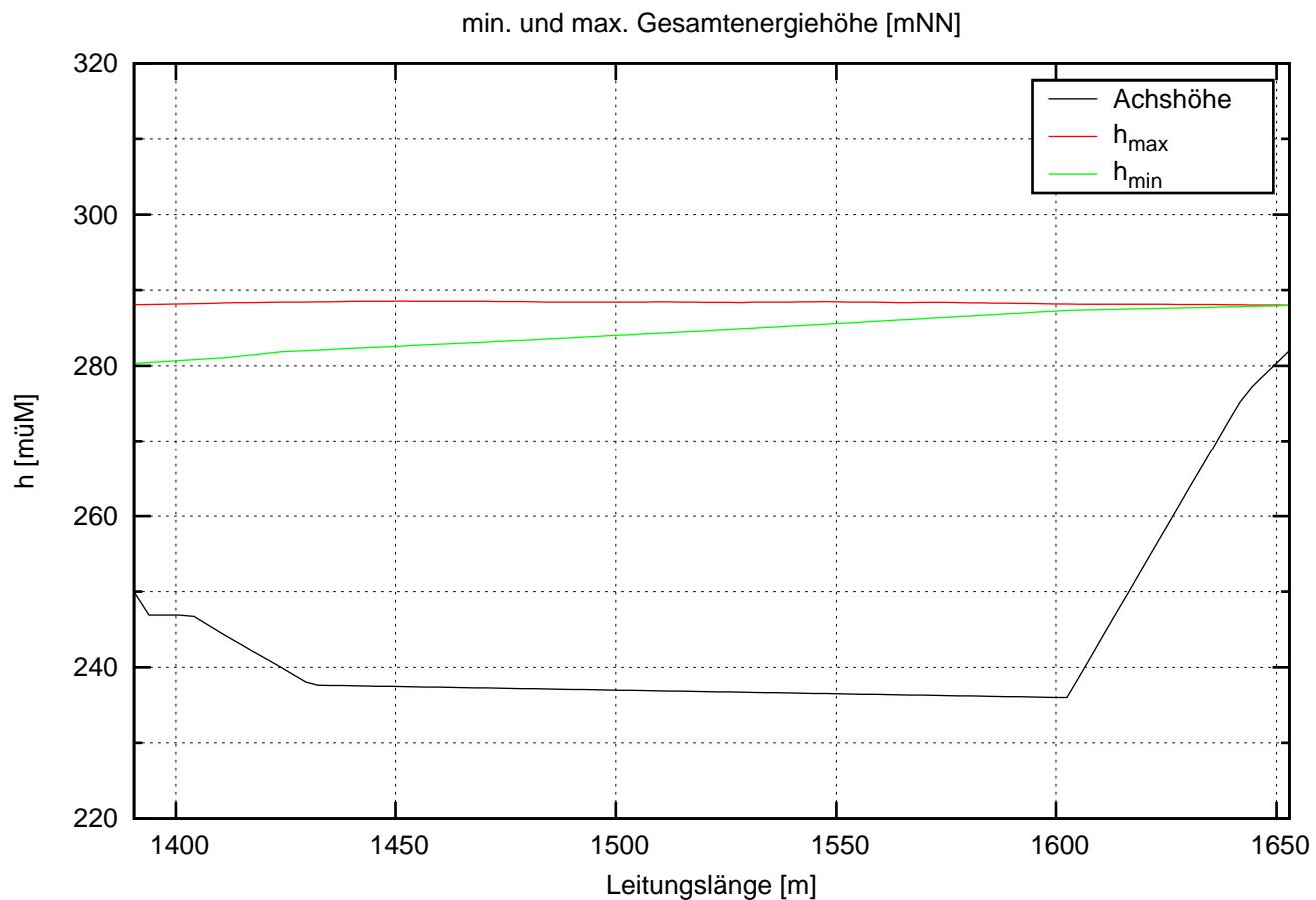
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Start in Pu-Betrieb



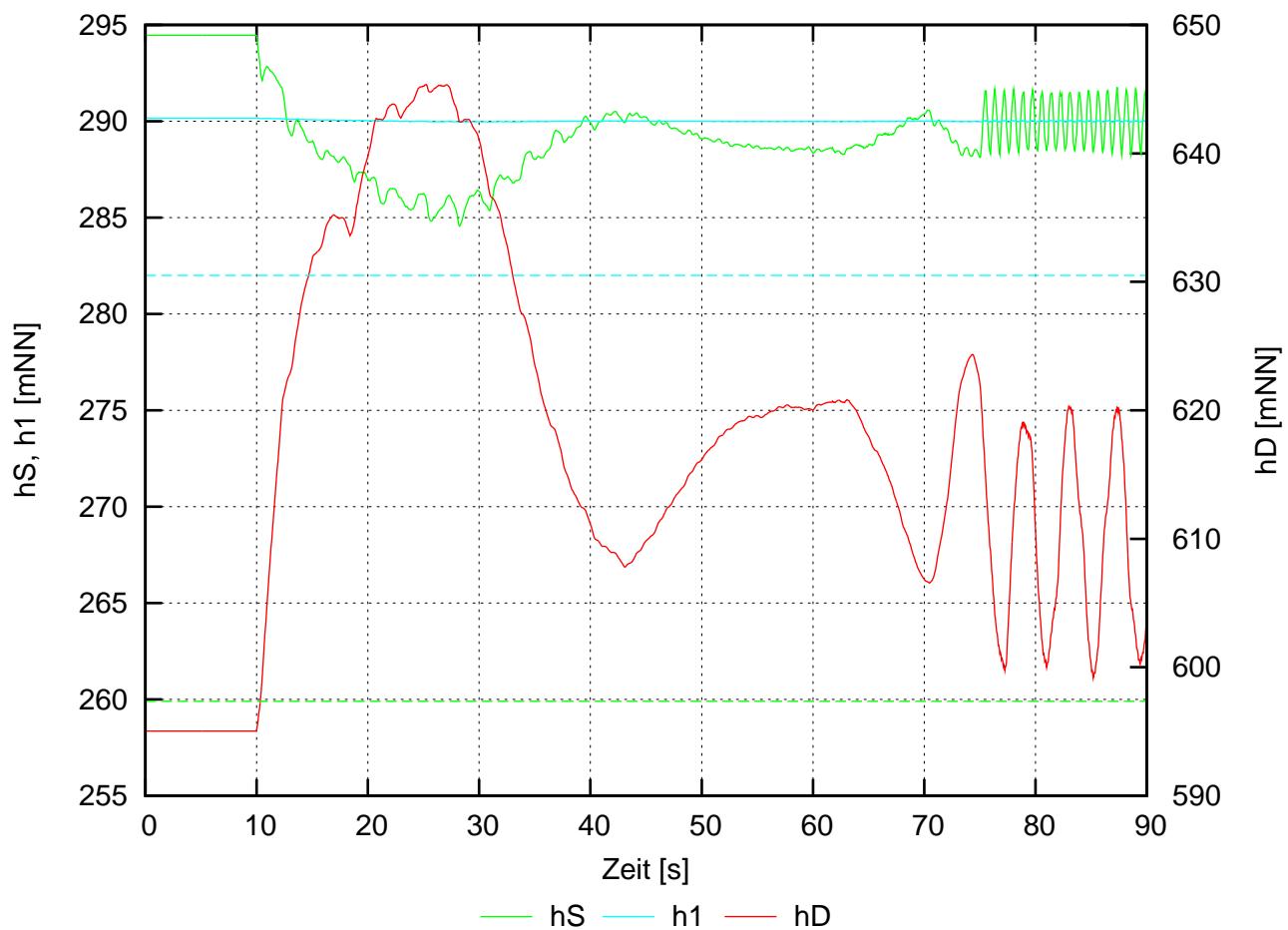
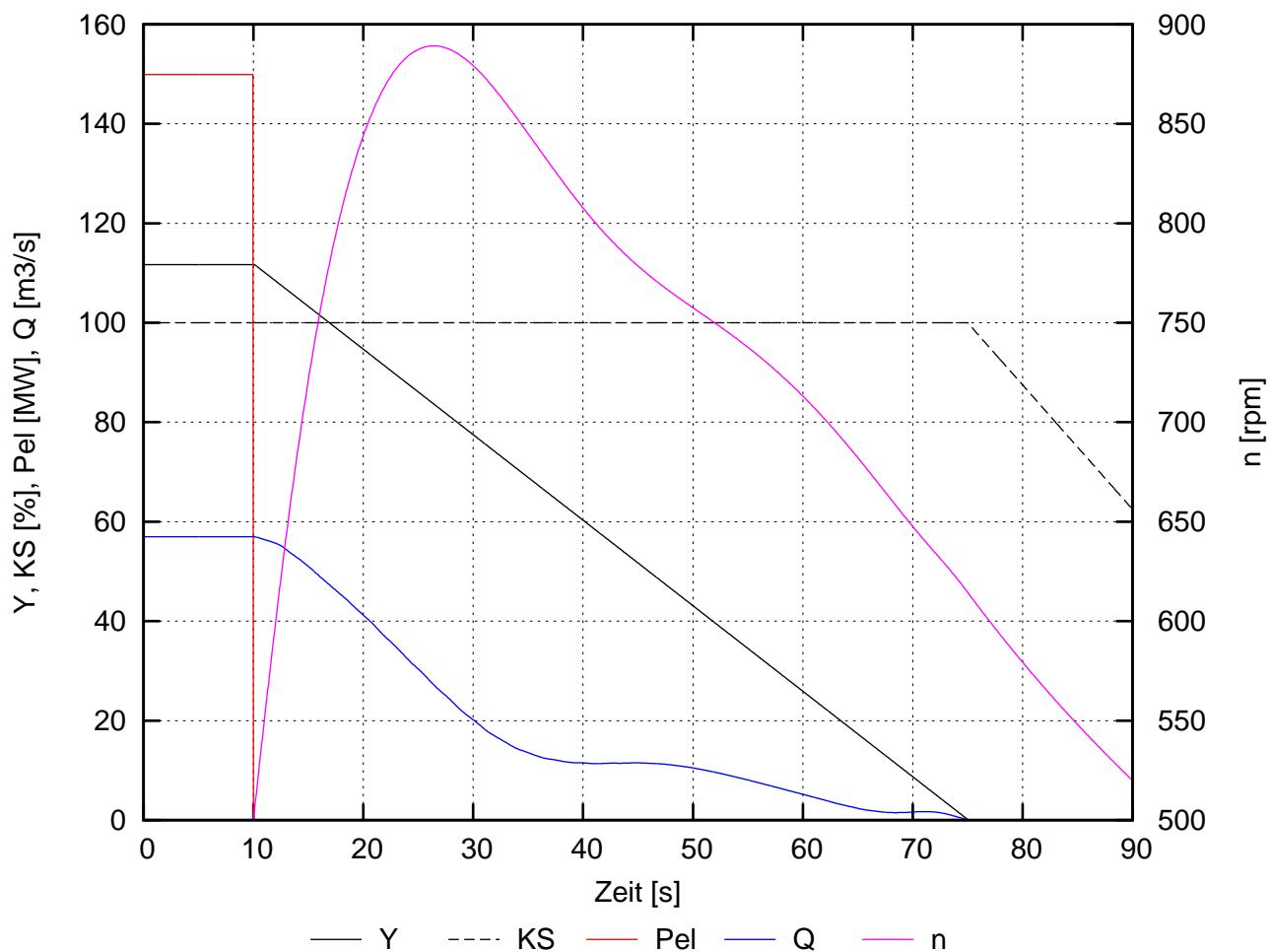
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Start in Pu-Betrieb



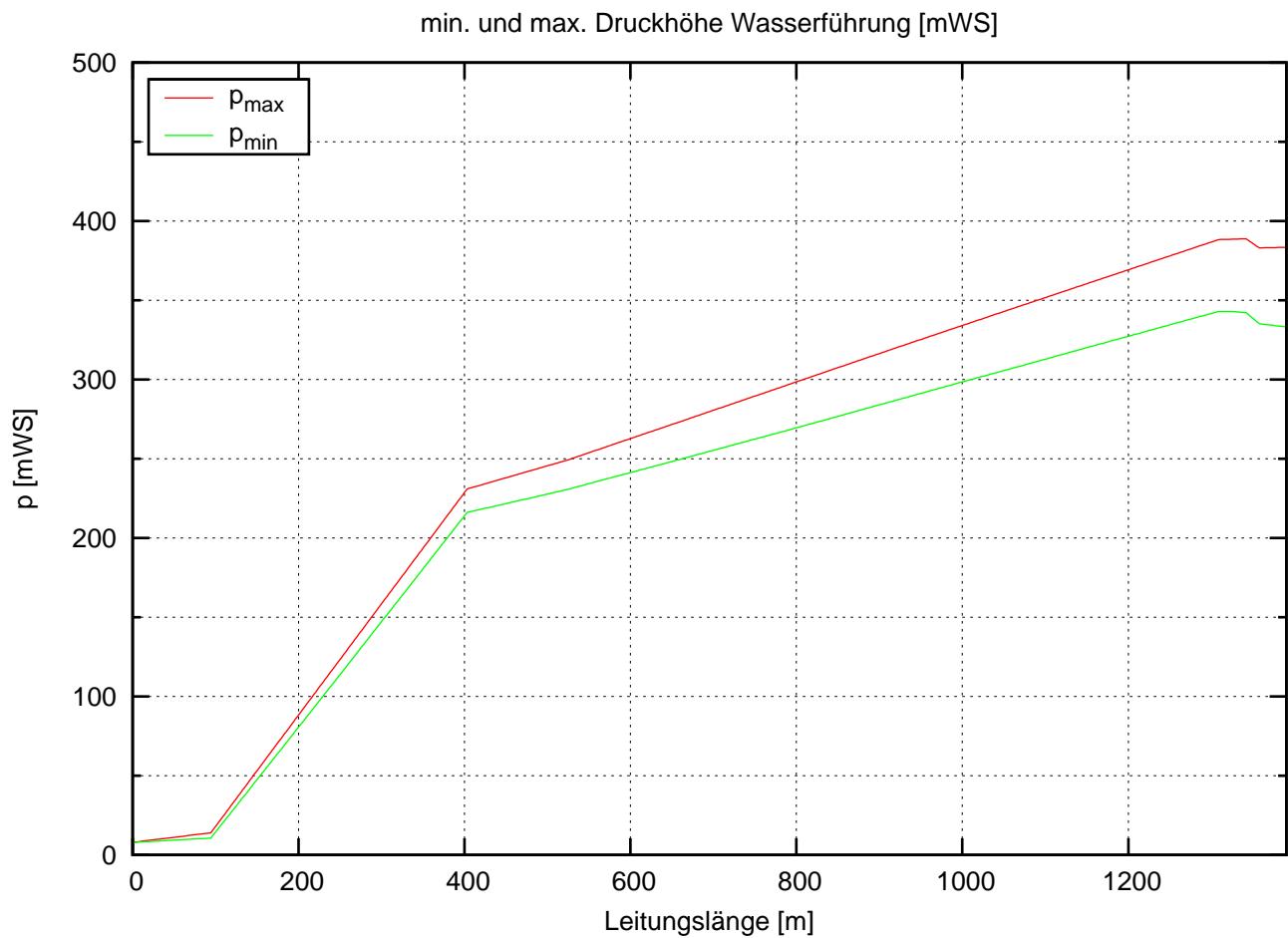
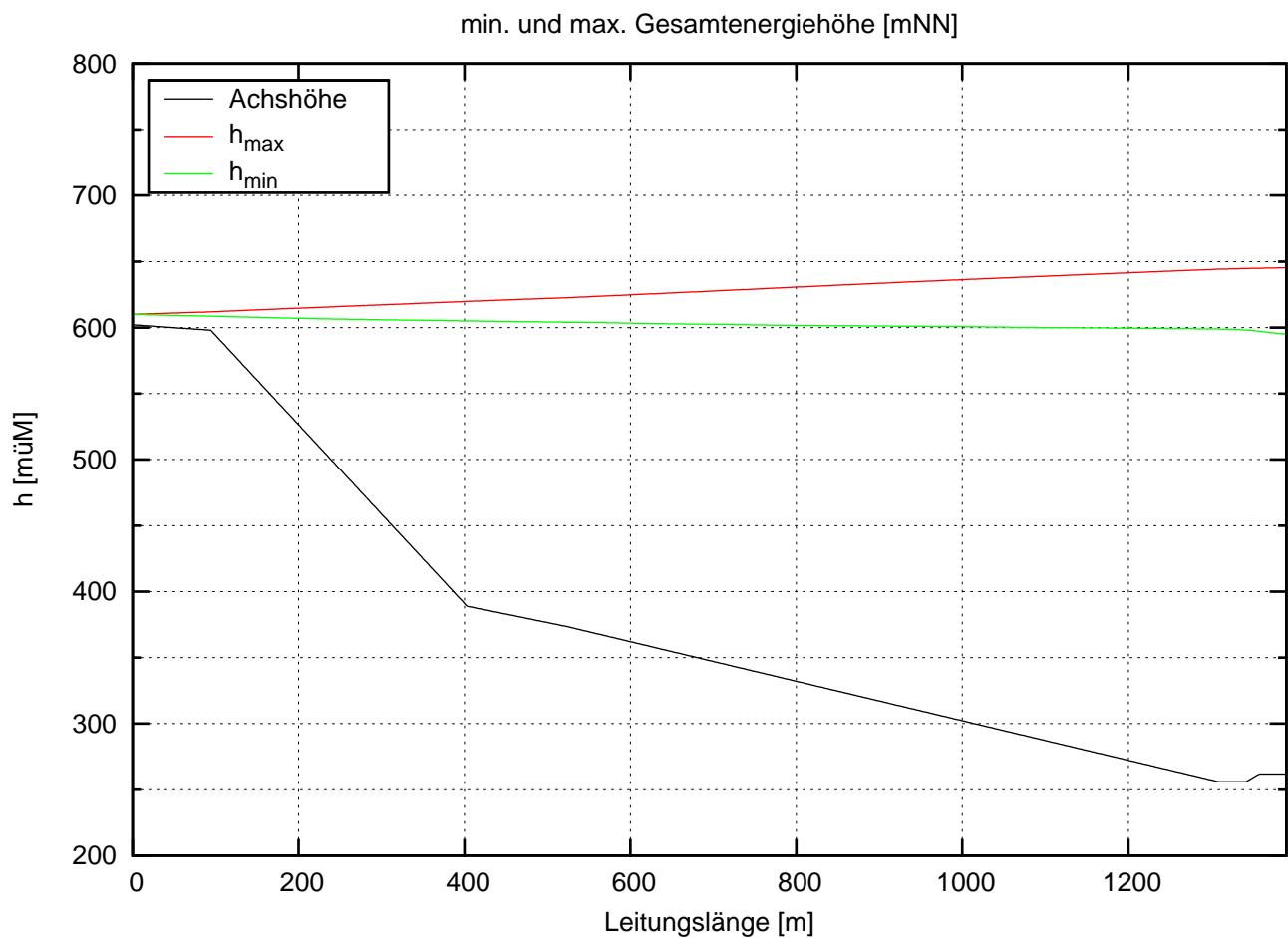
H_{min} = 320 mWS: H_{OW} = 610.0 mNN, H_{UW} = 290.0 mNN

LAb aus Tu-Betrieb, LE schliesst, KS schiesst bei geschl. LE



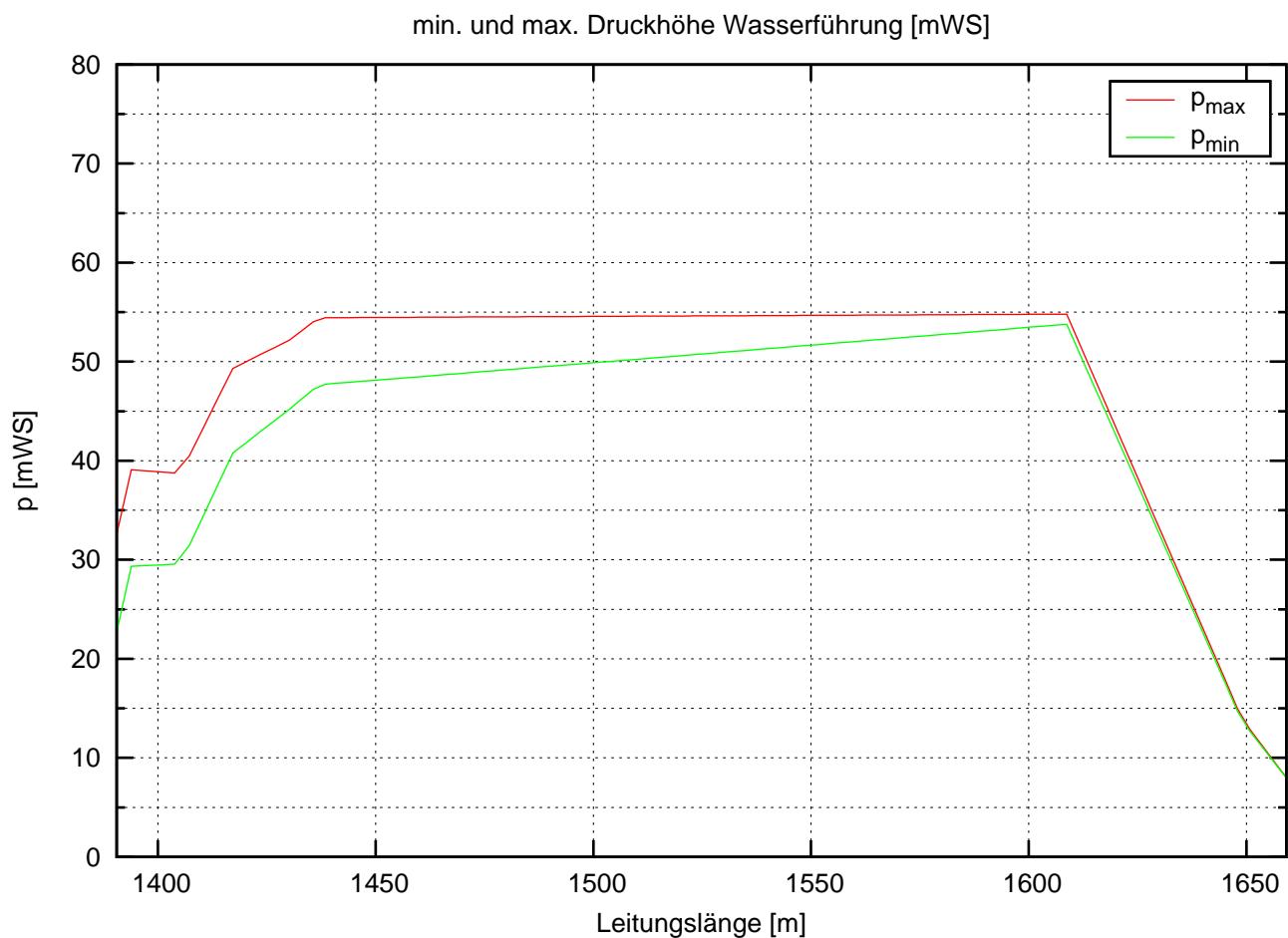
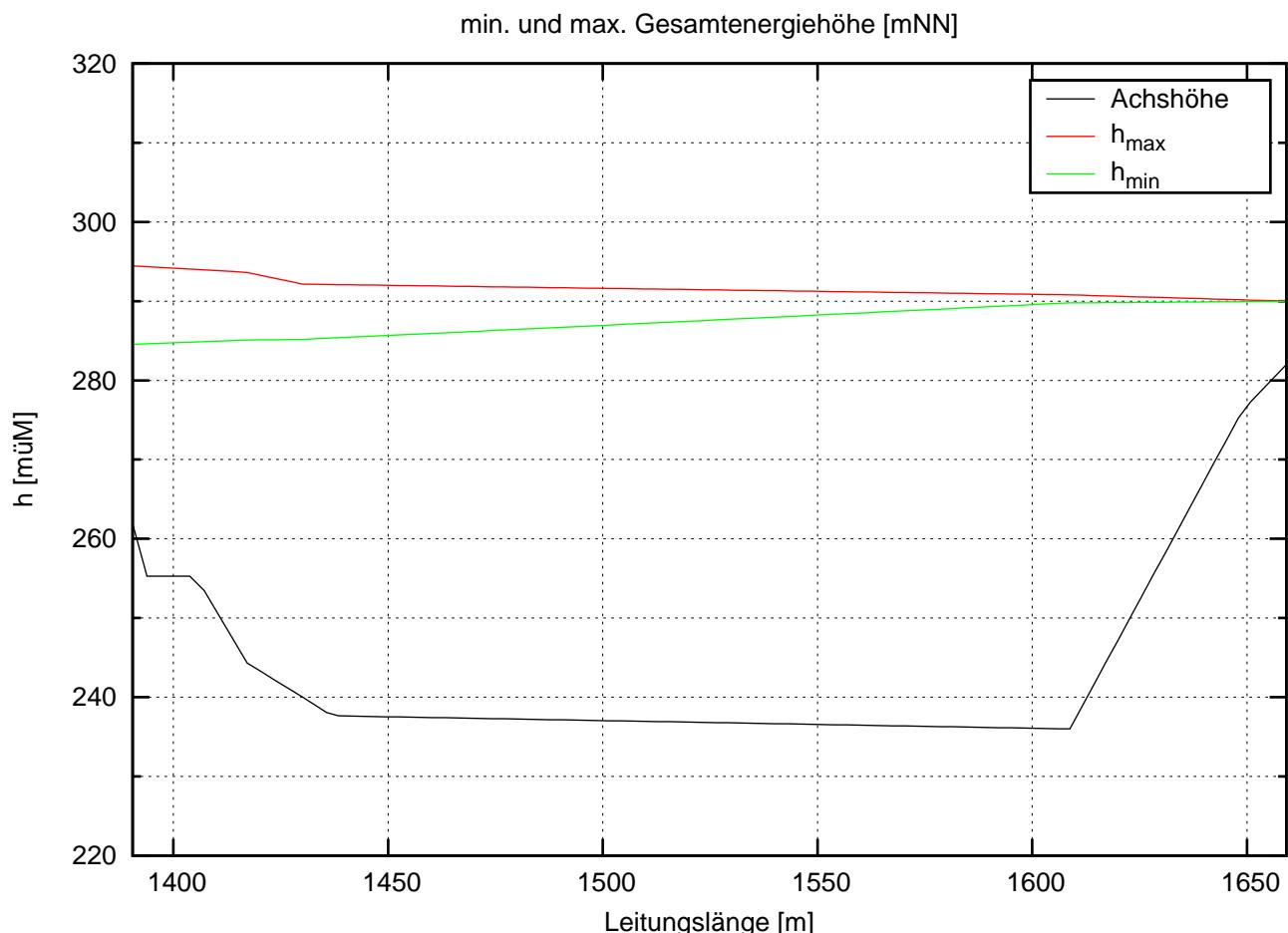
$H_{\min} = 320 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

LB aus Tu-Betrieb, LE schliesst, KS schiesst bei geschl. LE



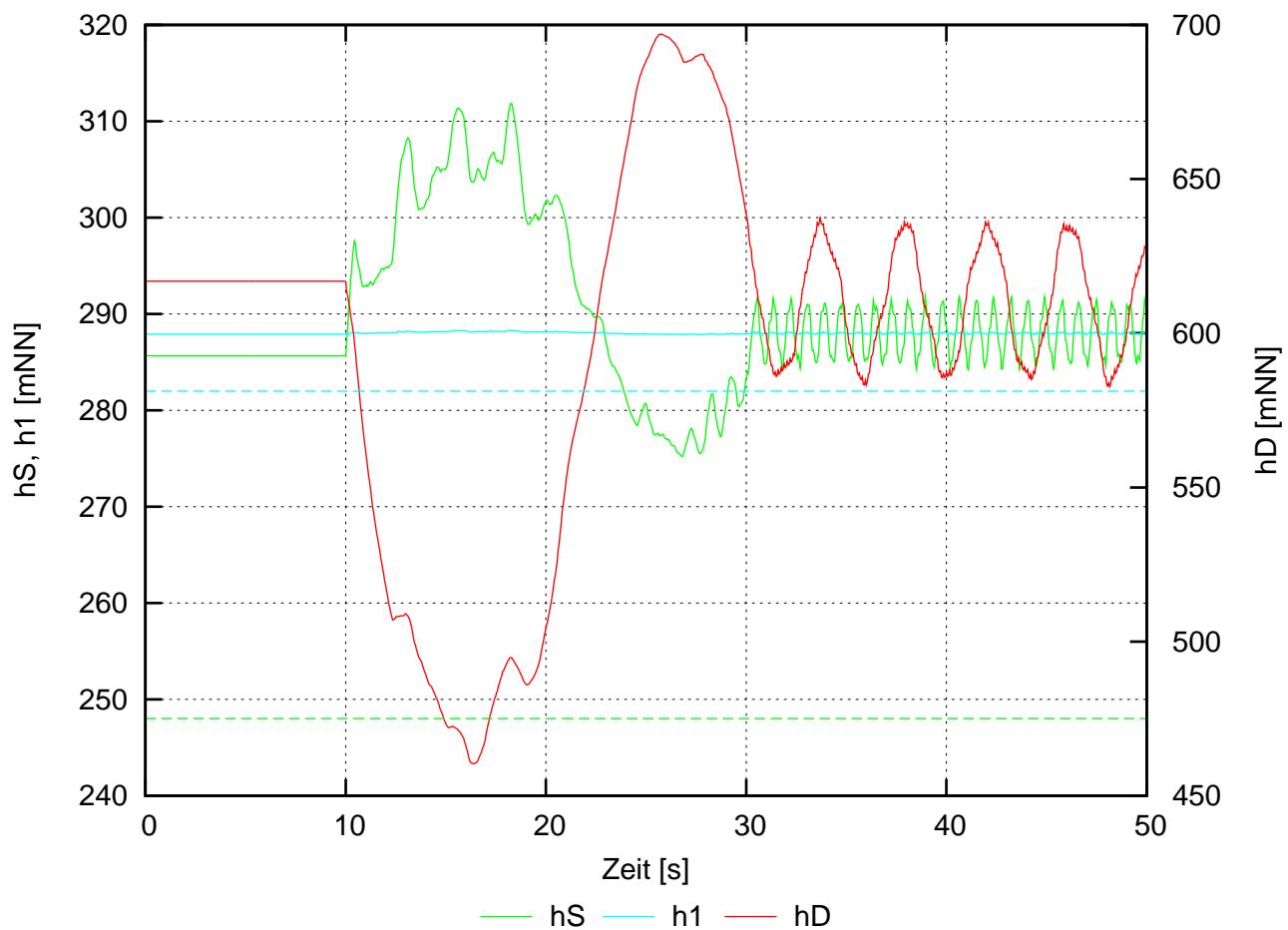
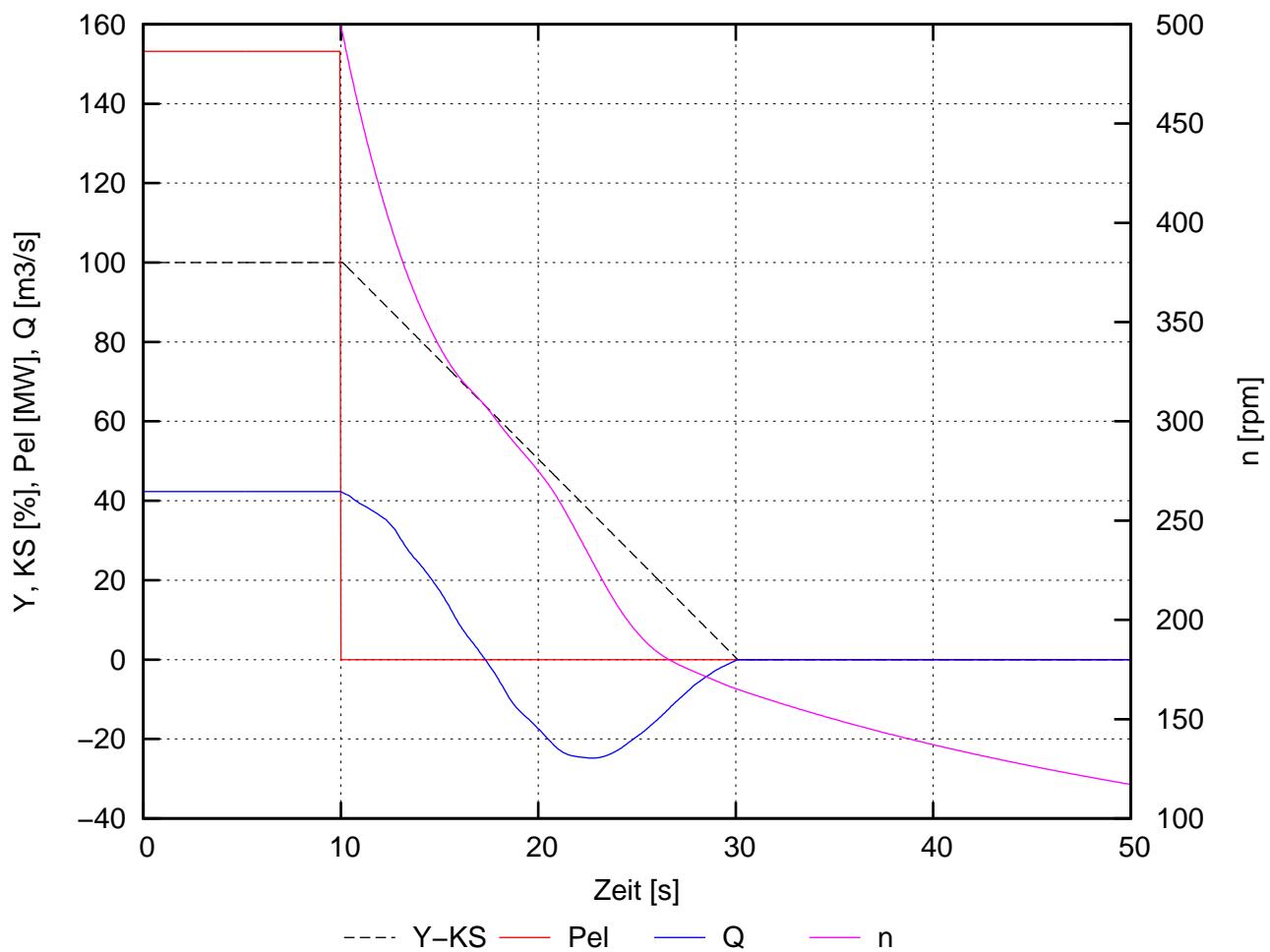
$H_{\min} = 320 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

LB aus Tu-Betrieb, LE schliesst, KS schiesst bei geschl. LE



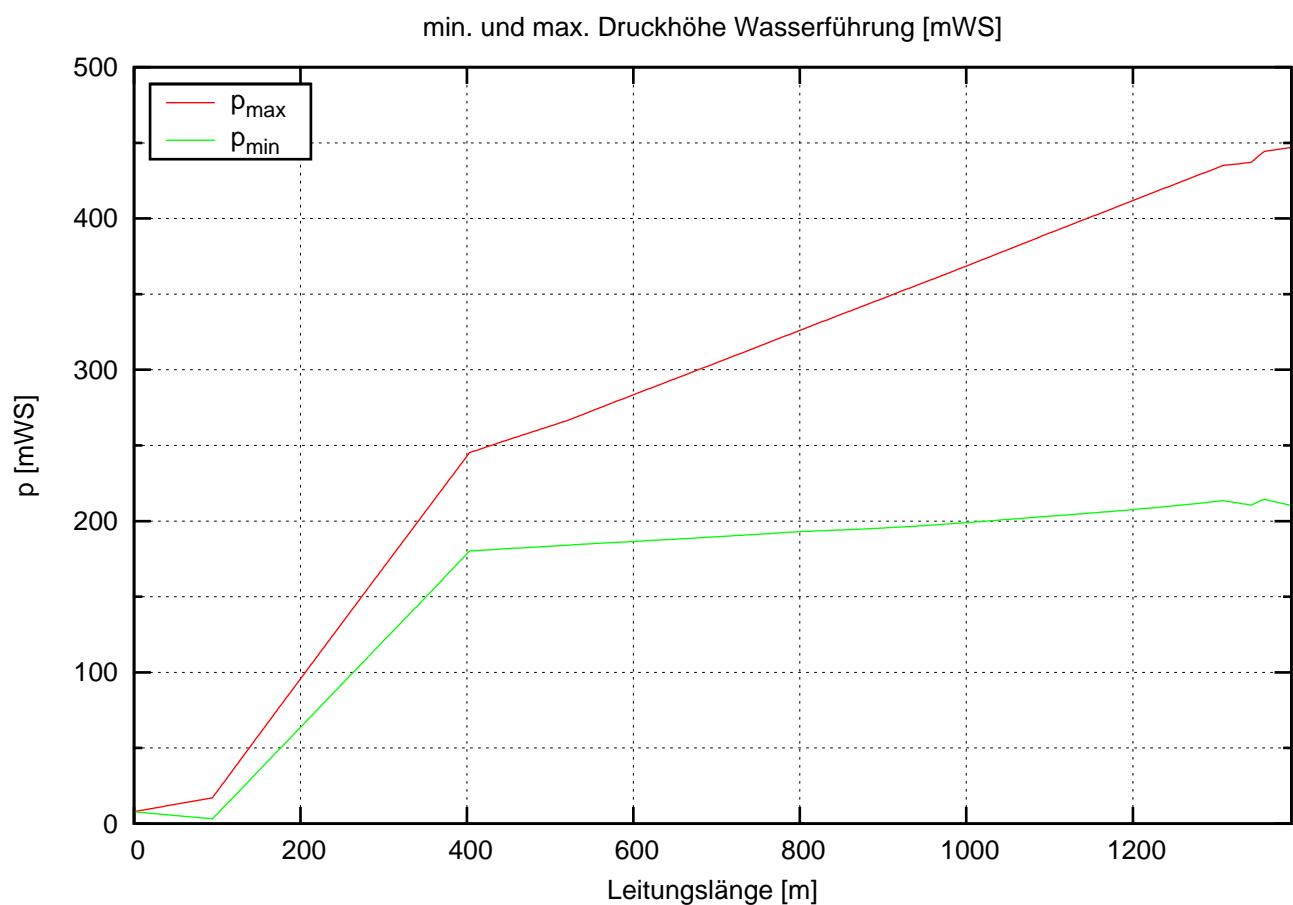
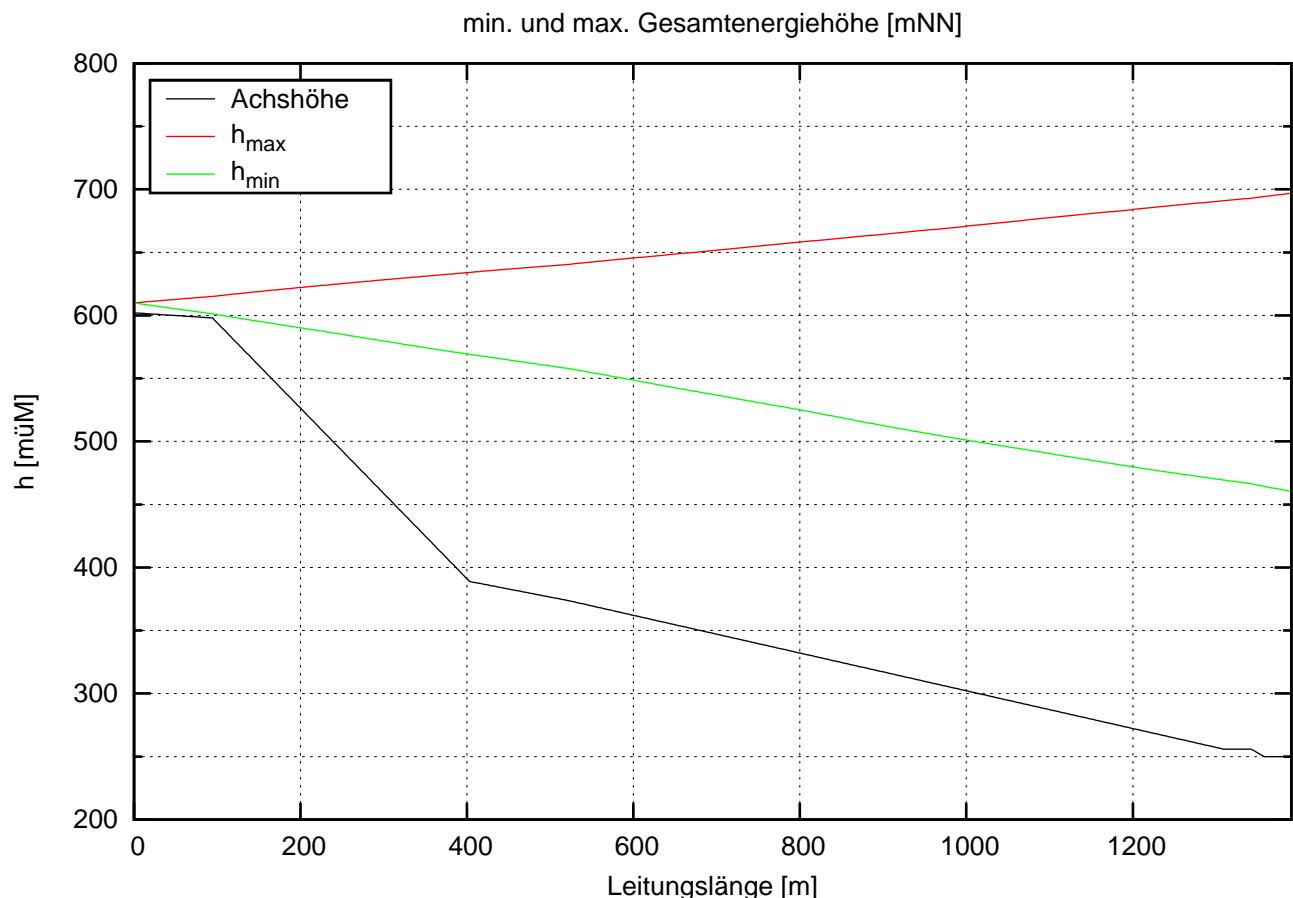
H = 322.0 mWS: H_{OWmin} = 610.0 mNN, H_{UWmin} = 288.0 mNN

Lastabwurf aus Pu-Betrieb, KS schließt in 20sec



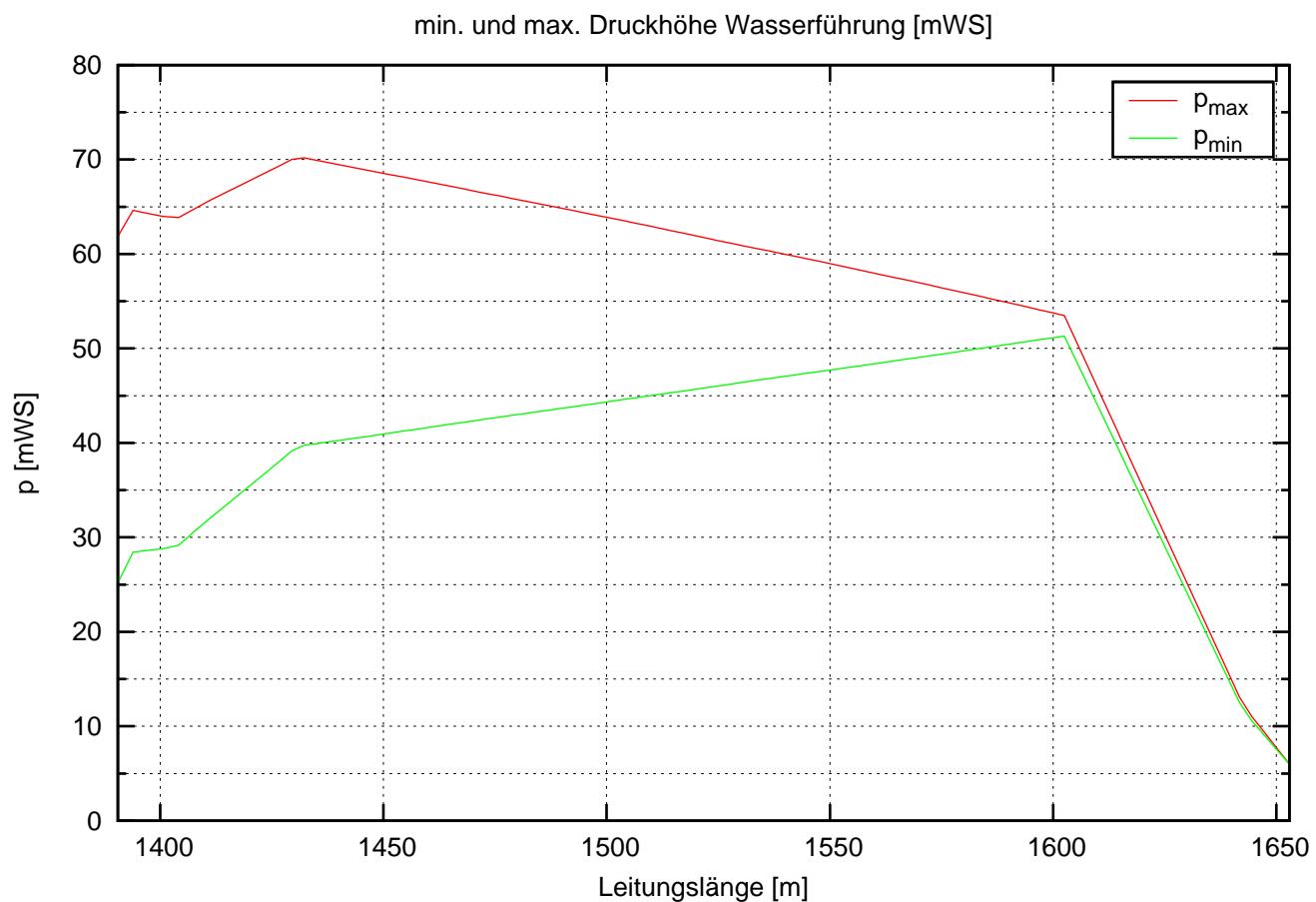
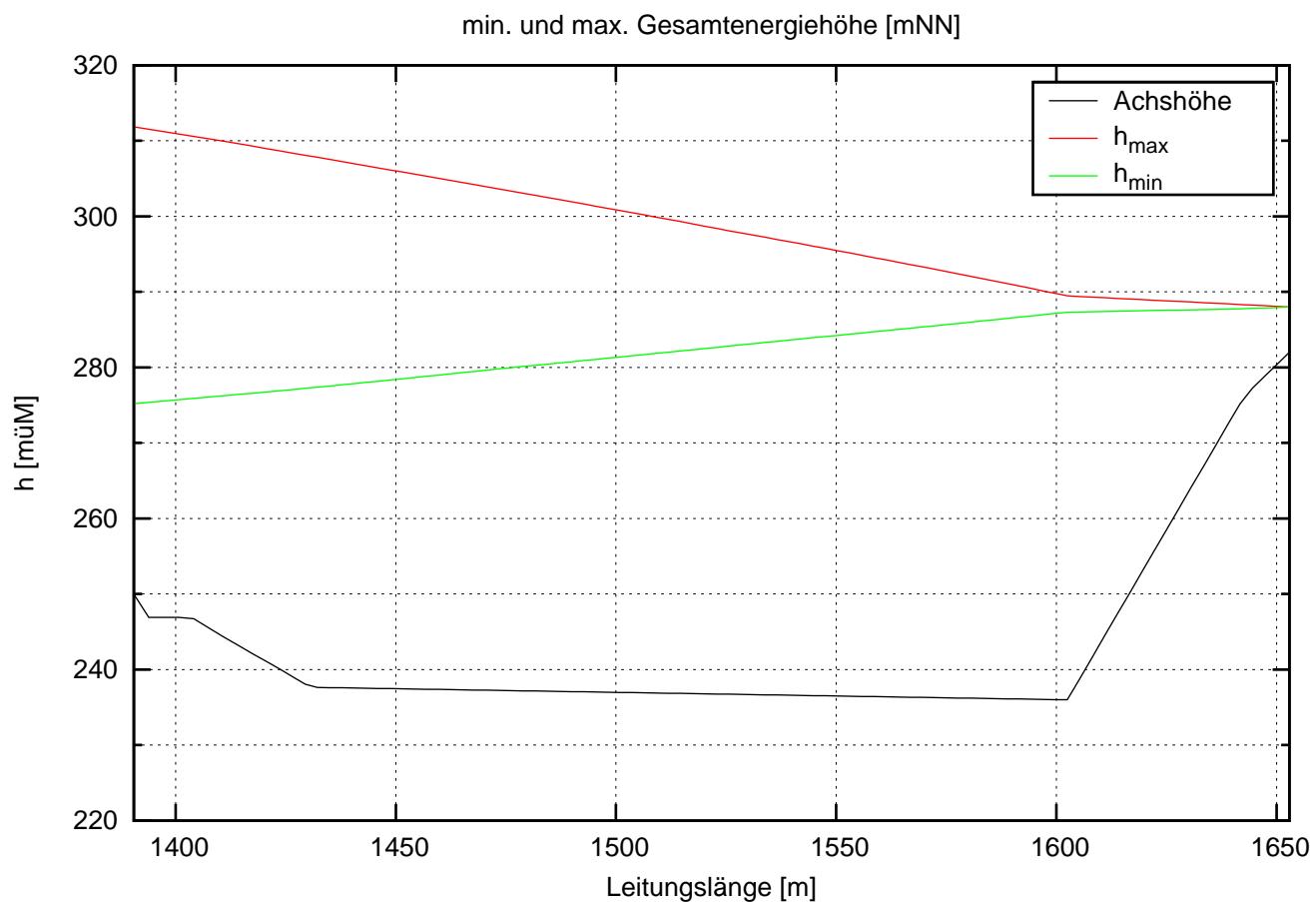
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf aus Pu-Betrieb, KS schließt in 20sec



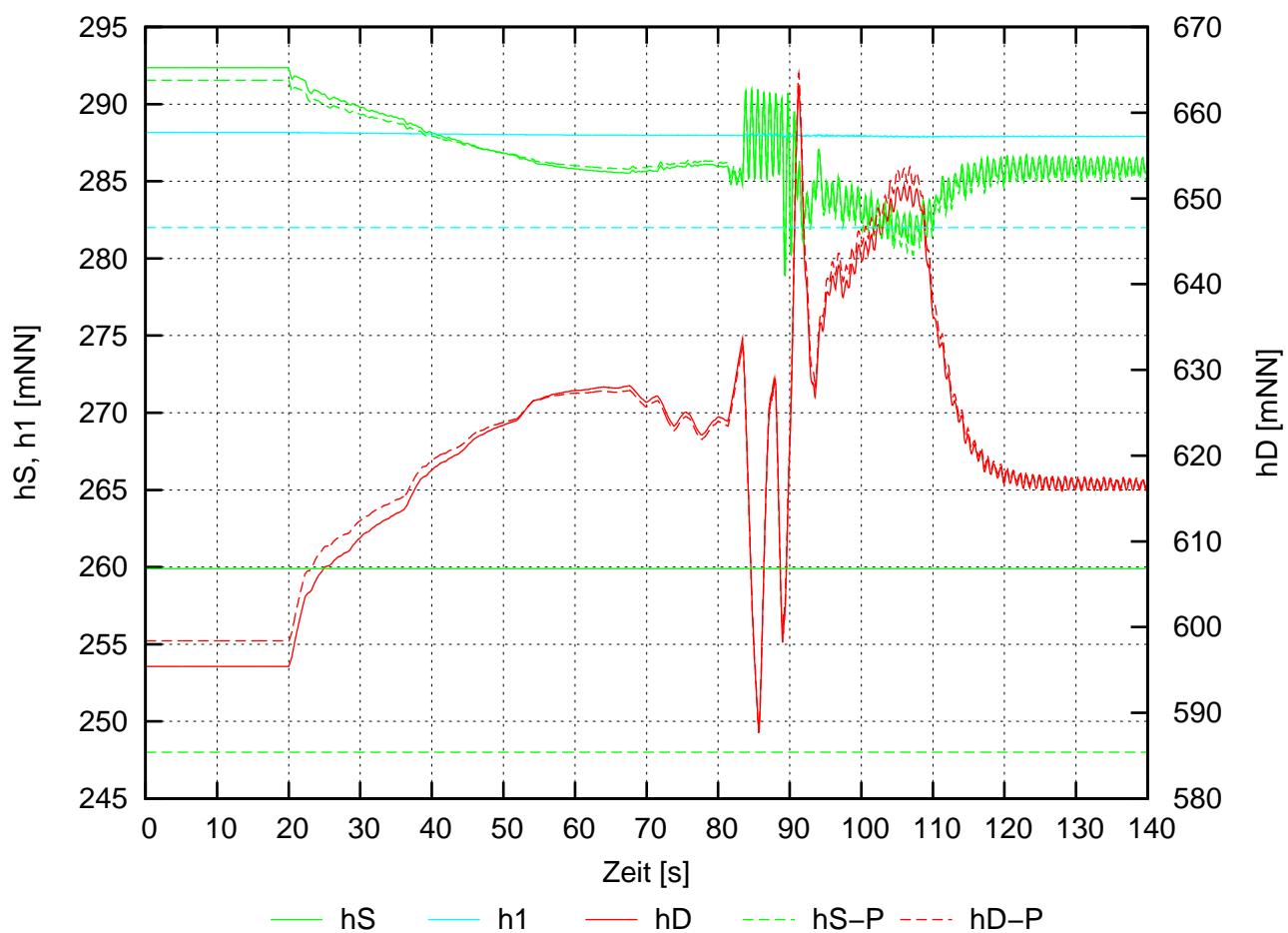
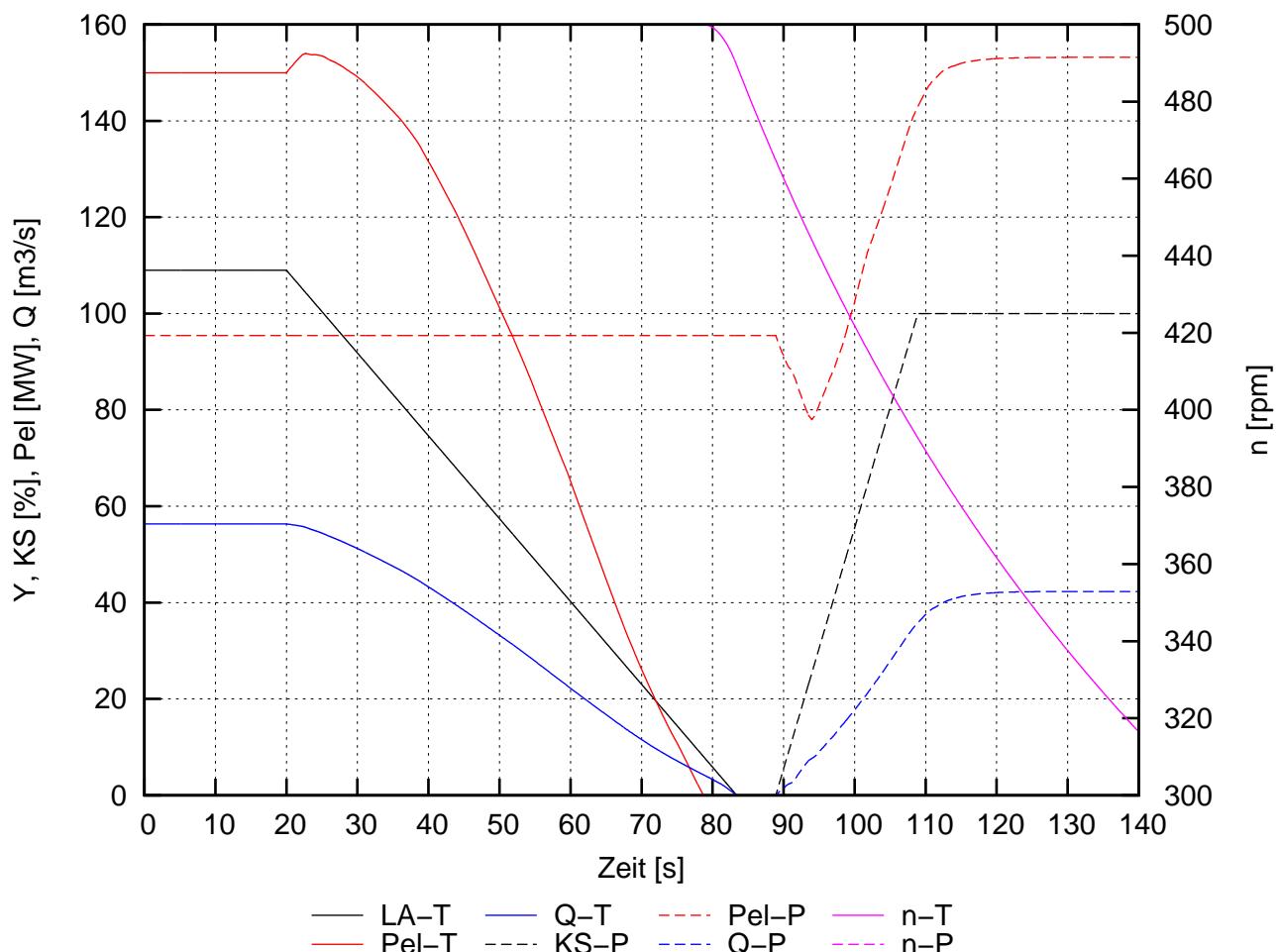
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf aus Pu-Betrieb, KS schließt in 20sec



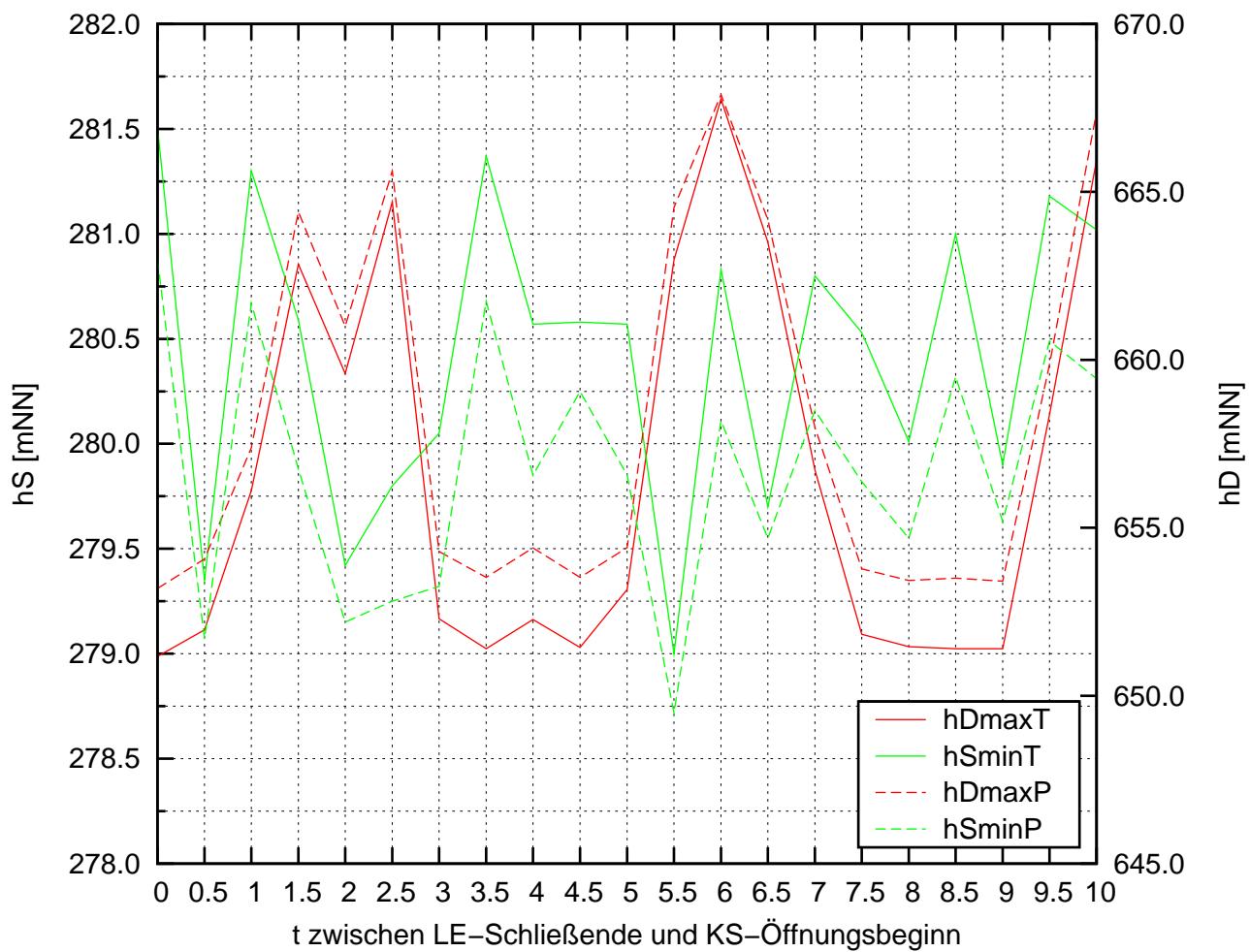
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Wechsel von Turbinen- in Pumpbetrieb (dt = 5.5s)



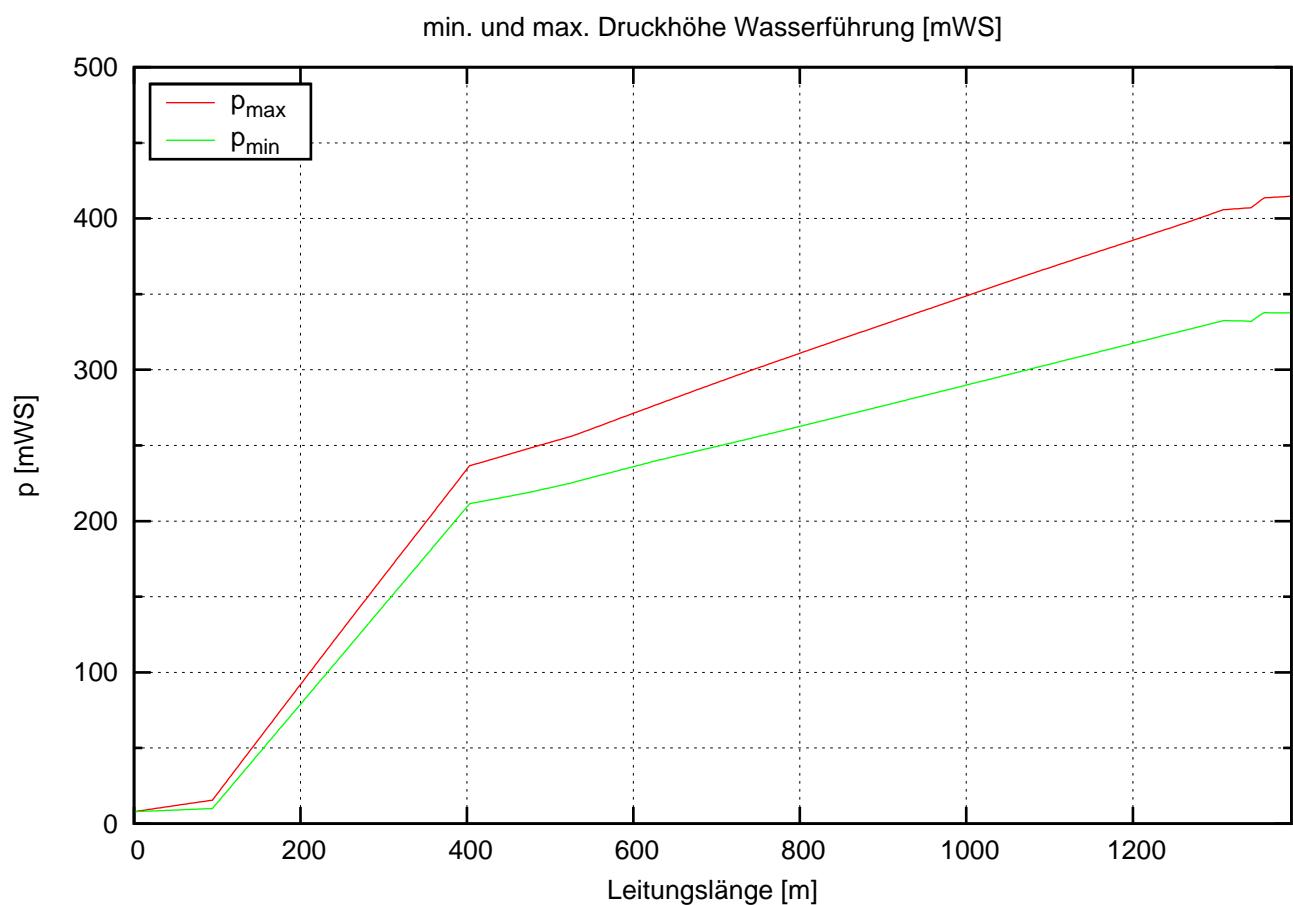
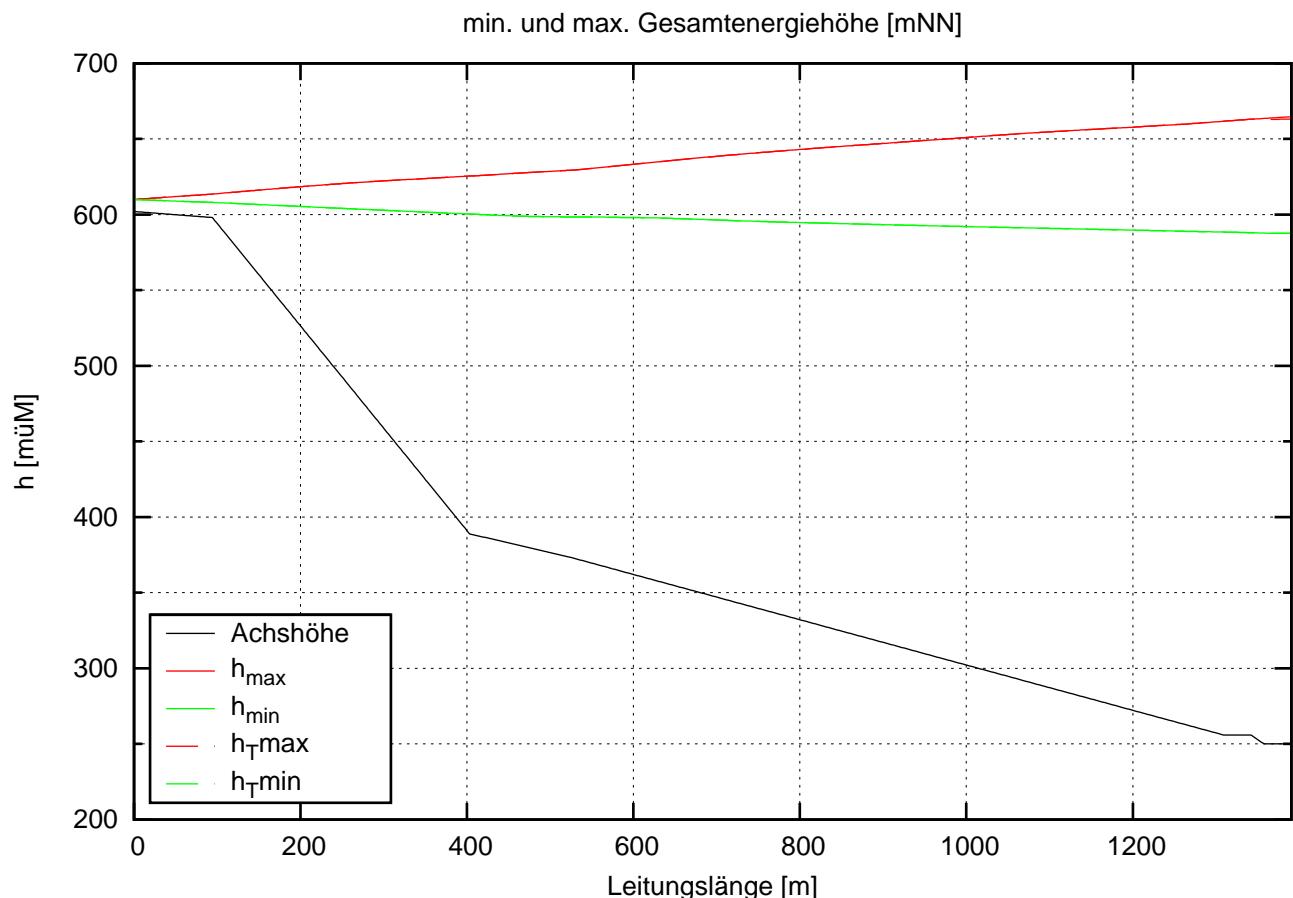
$H = 322.0 \text{ mWS}$: $H_{OWmin} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UWmin} = 288.0 \text{ mNN}$

Wechsel Tu–Betrieb \rightarrow Pu–Betrieb



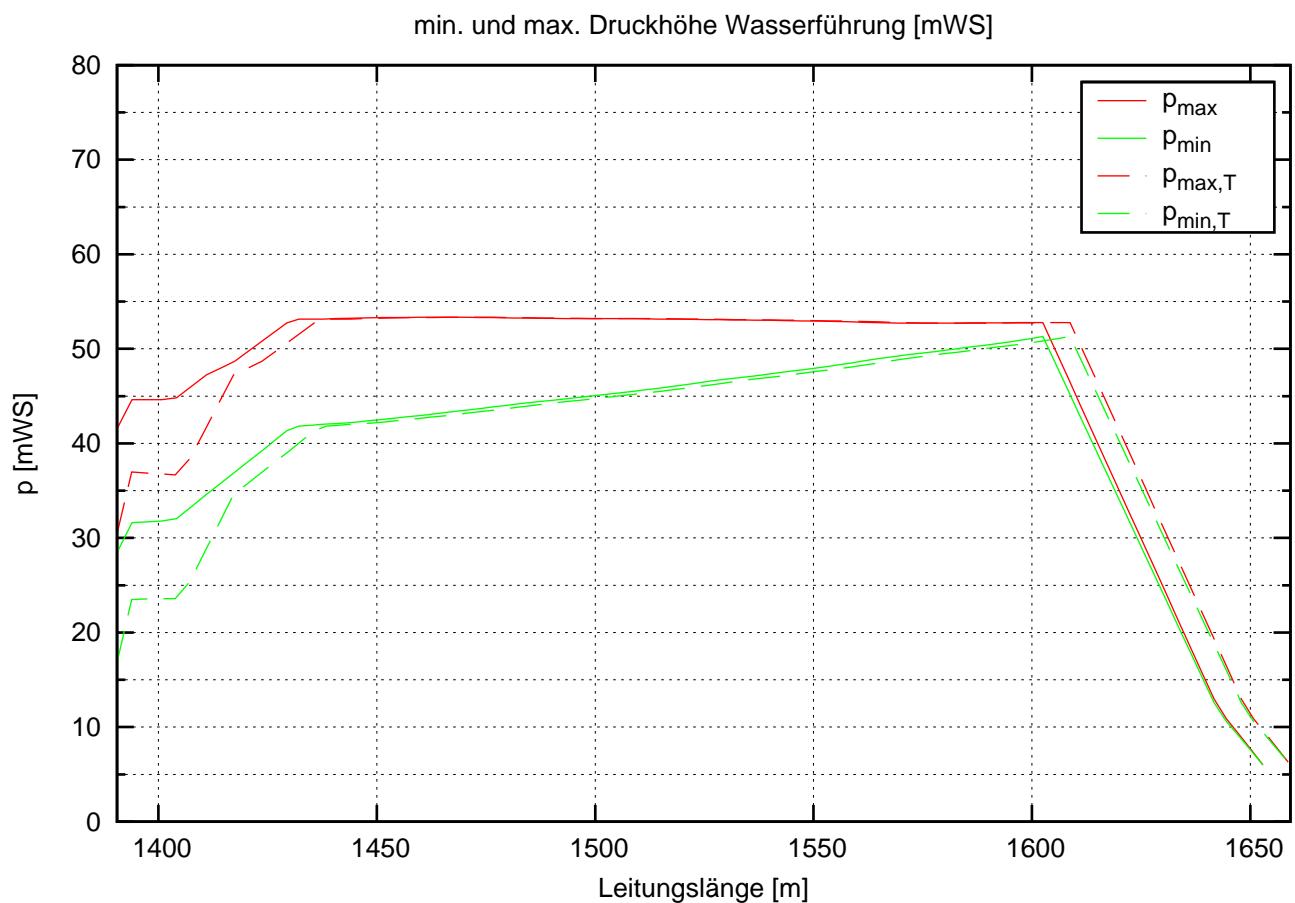
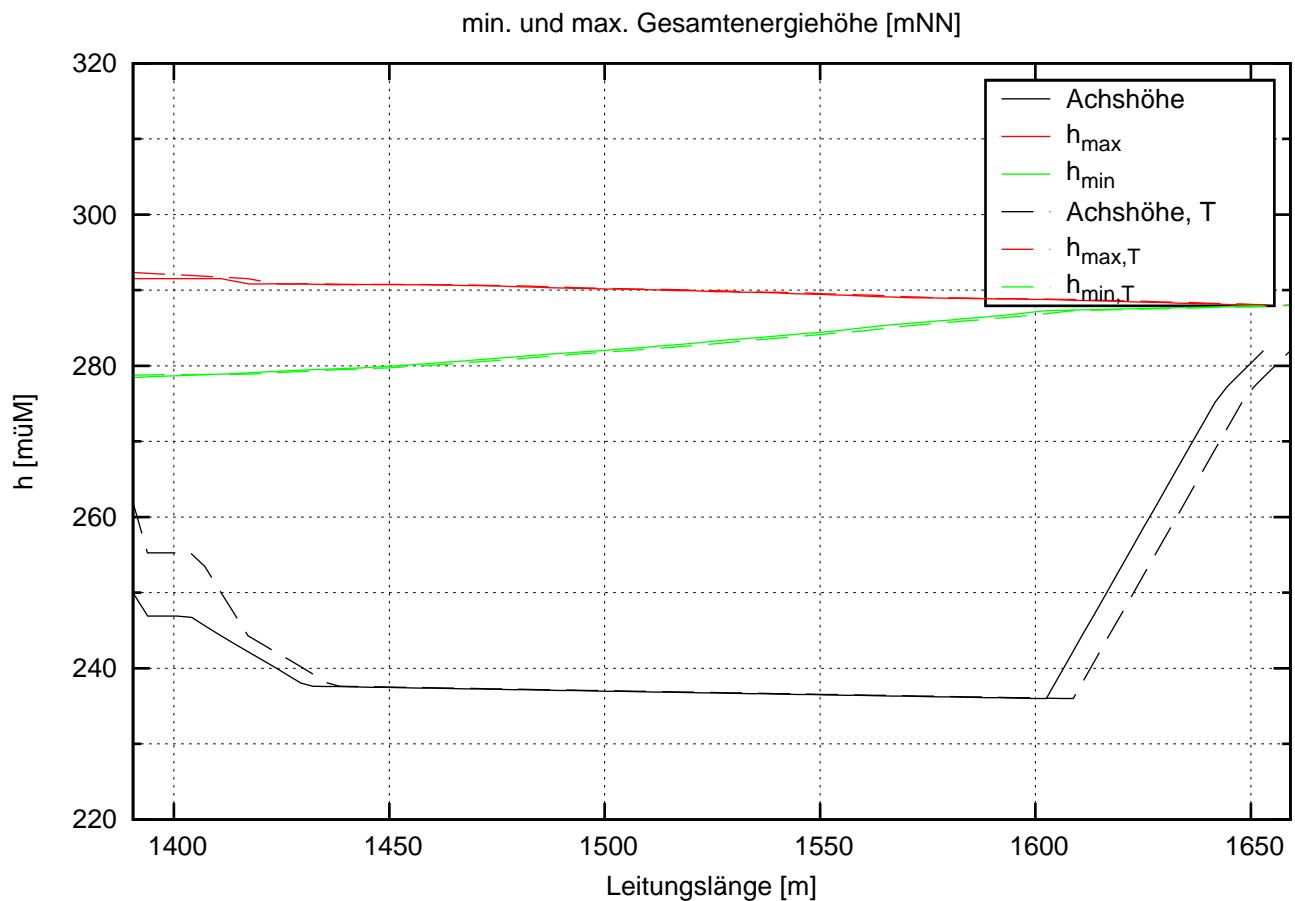
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

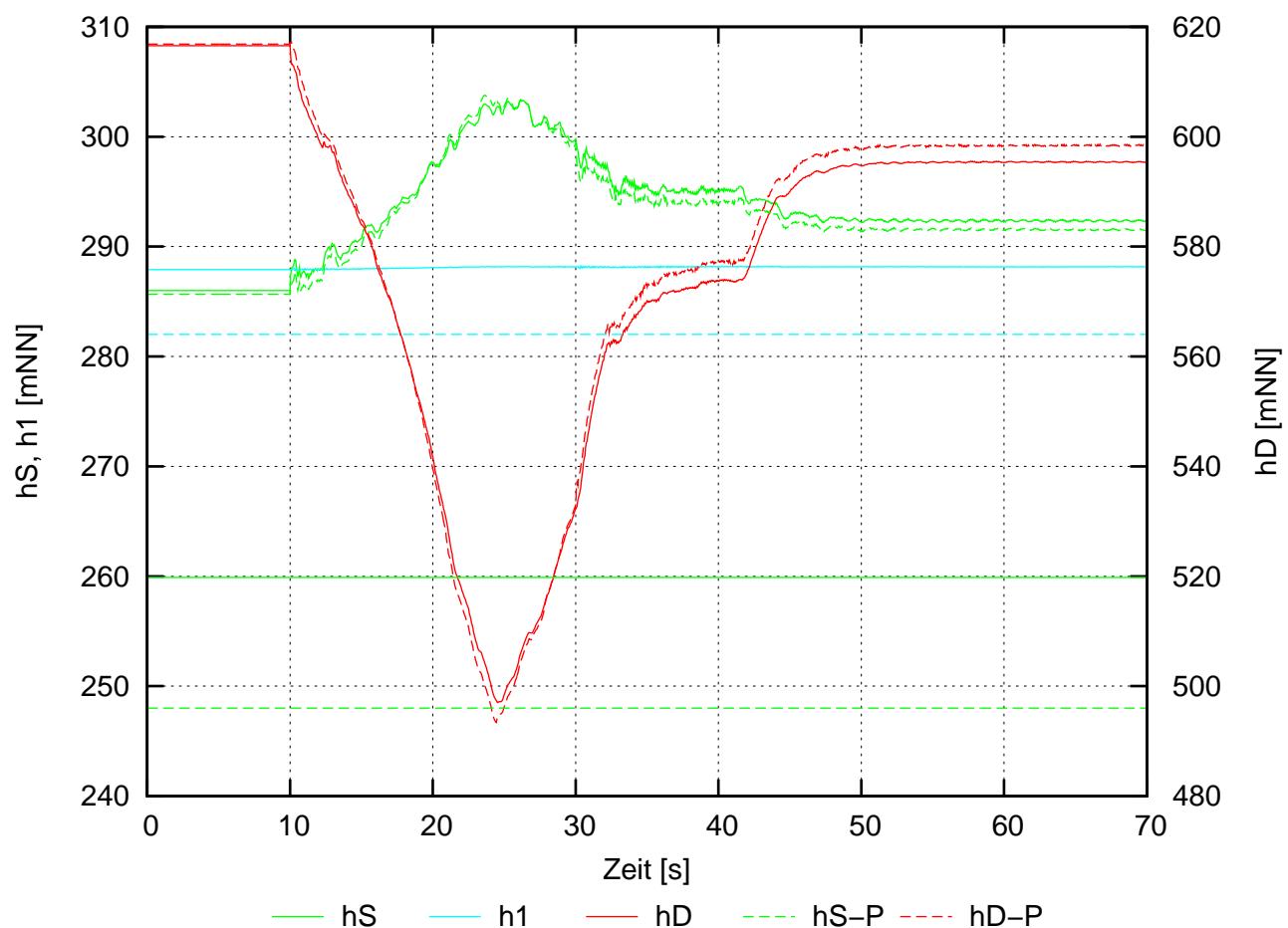
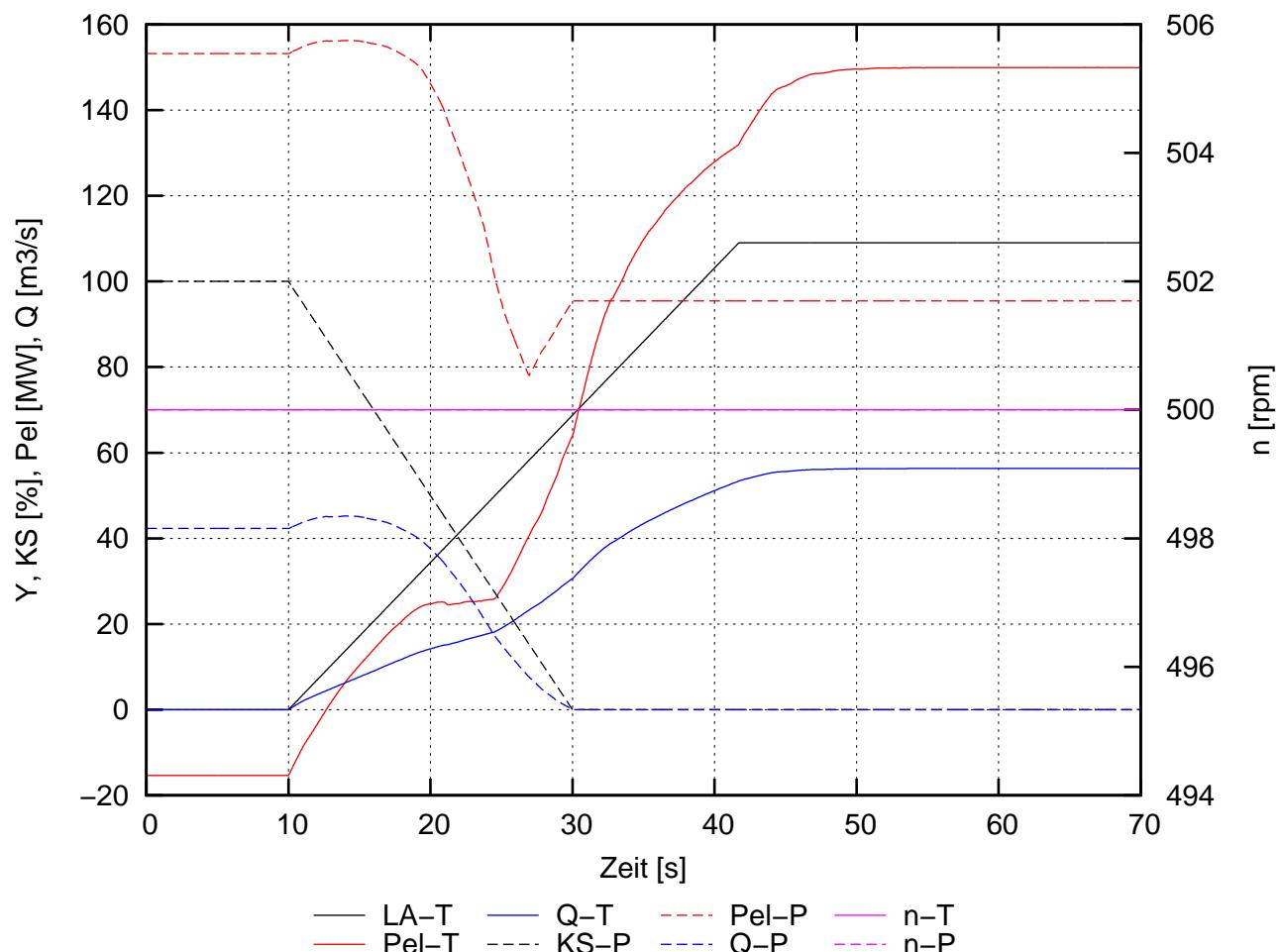
Wechsel von Turbinen- in Pumpbetrieb (dt = 5.5s)



H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

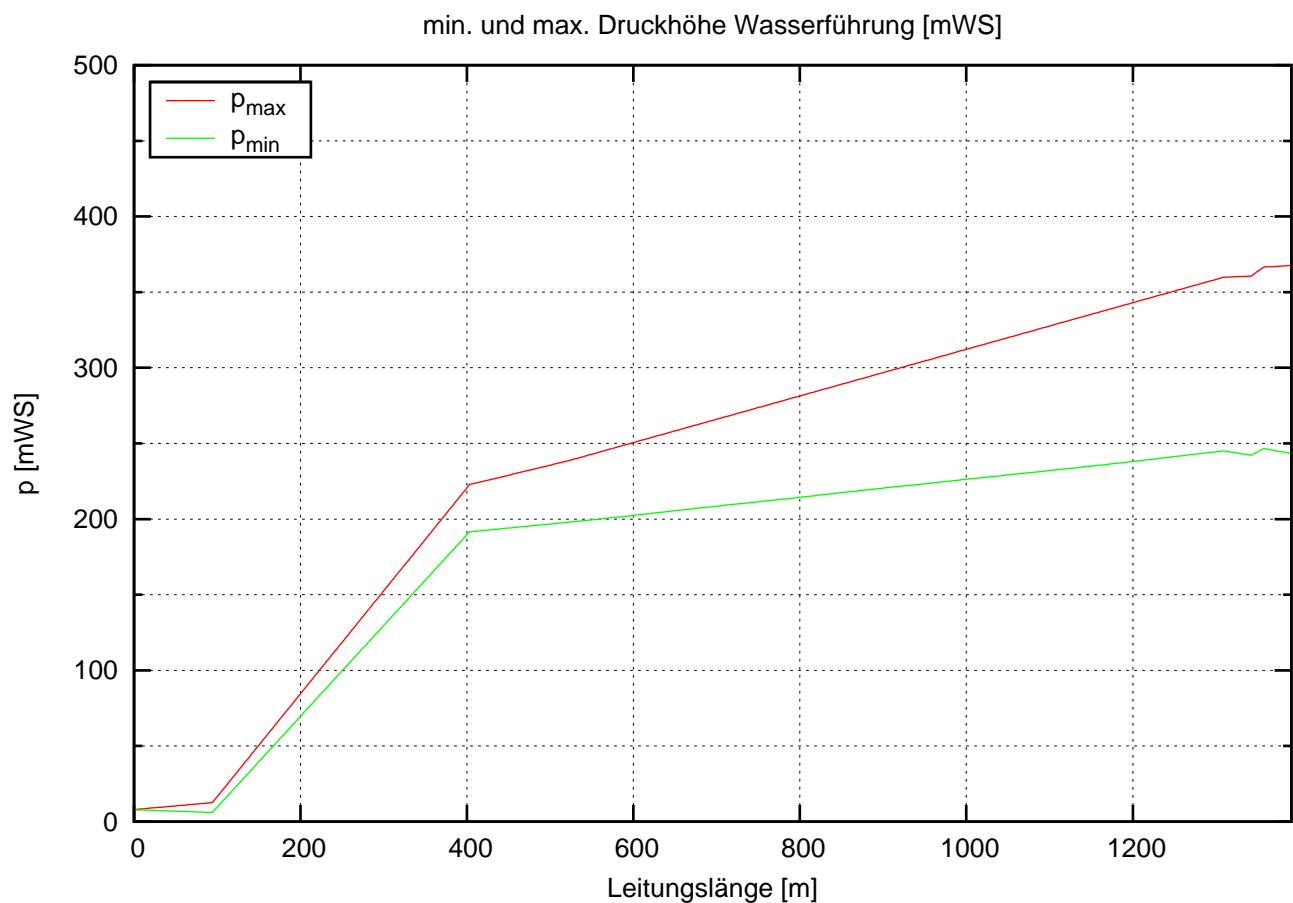
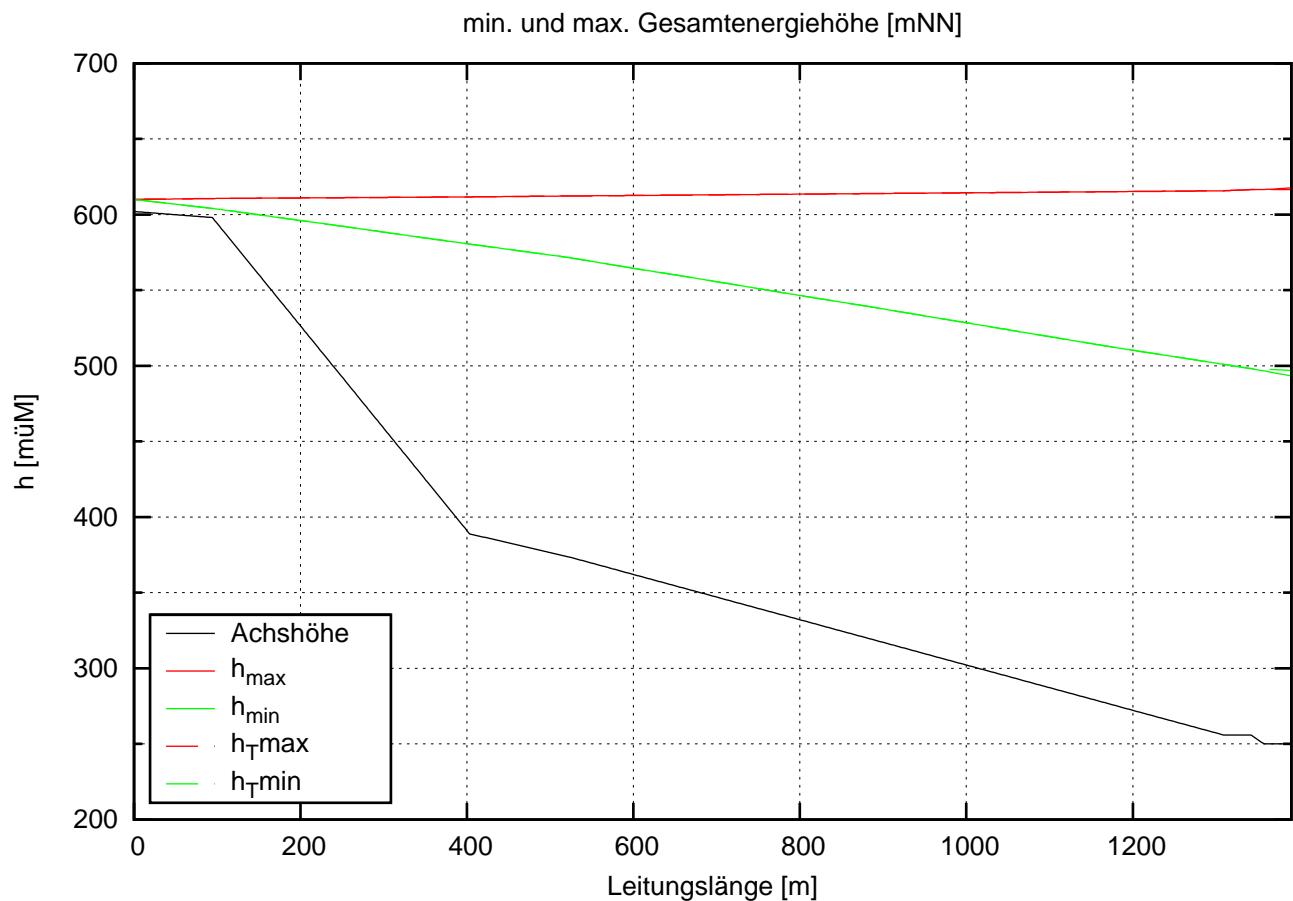
Wechsel von Turbinen- in Pumpbetrieb (dt = 5.5s)



H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNNWechsel Pu-Betrieb \rightarrow Tu-Betrieb

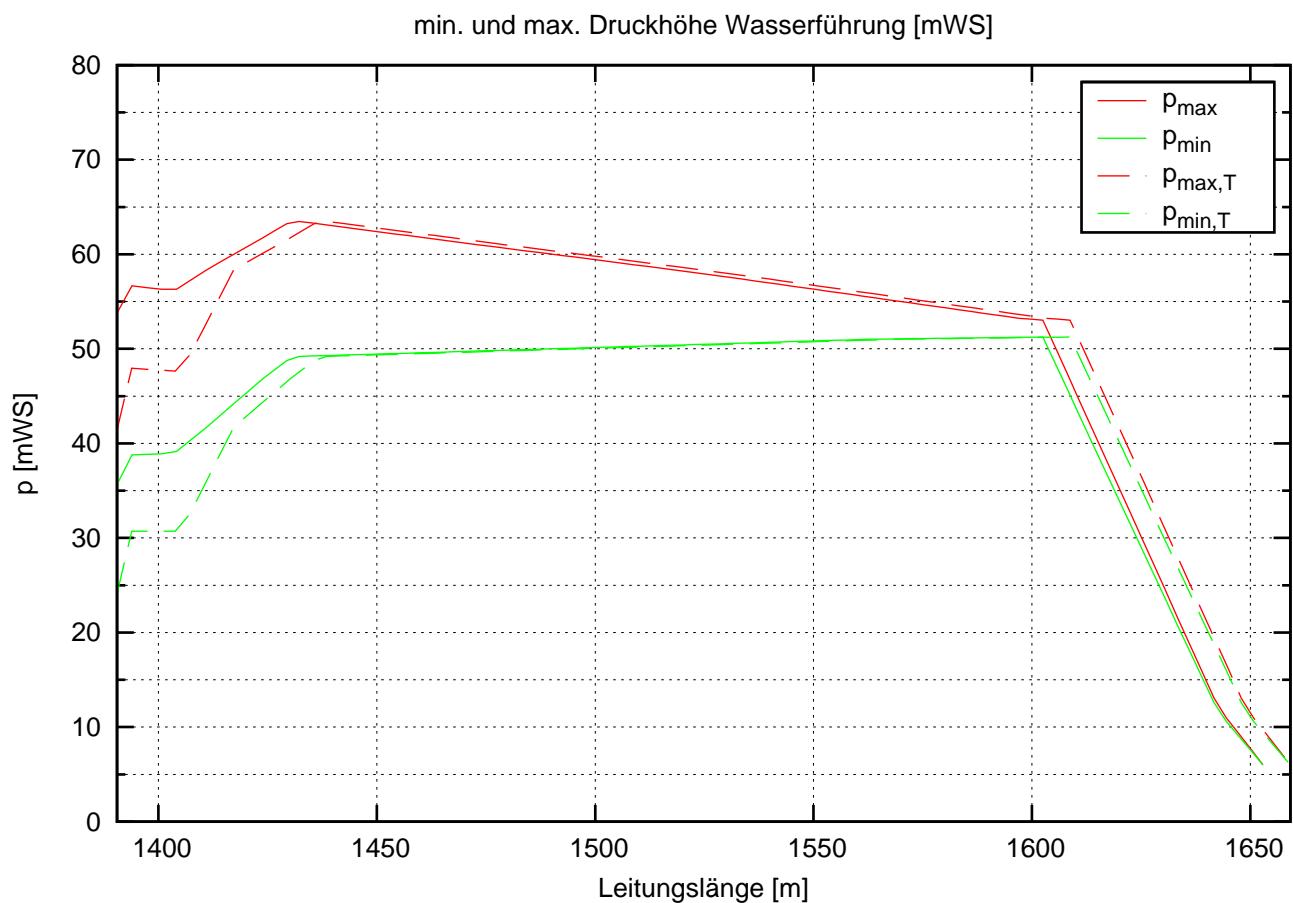
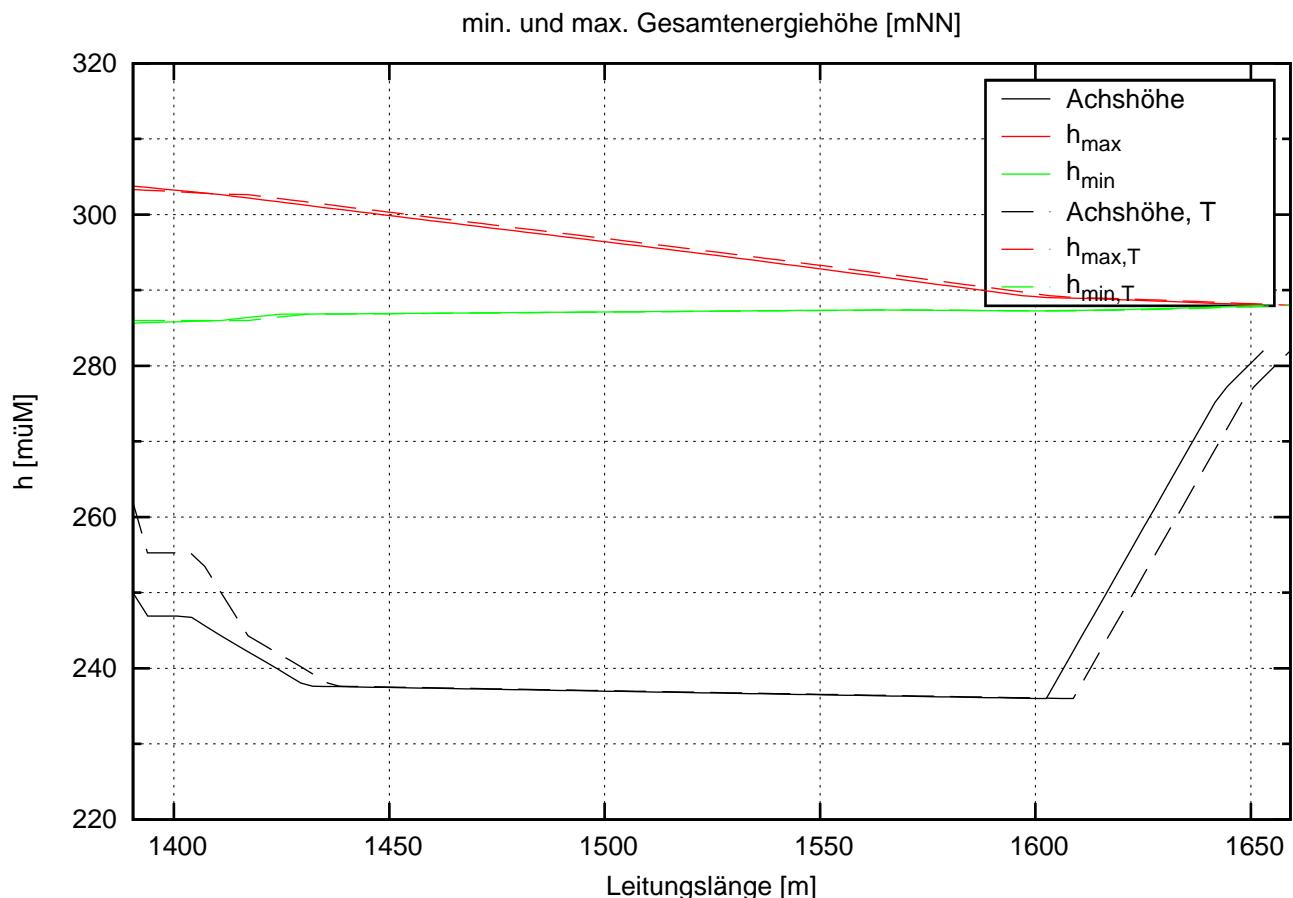
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Wechsel Pu-Betrieb -> Tu-Betrieb



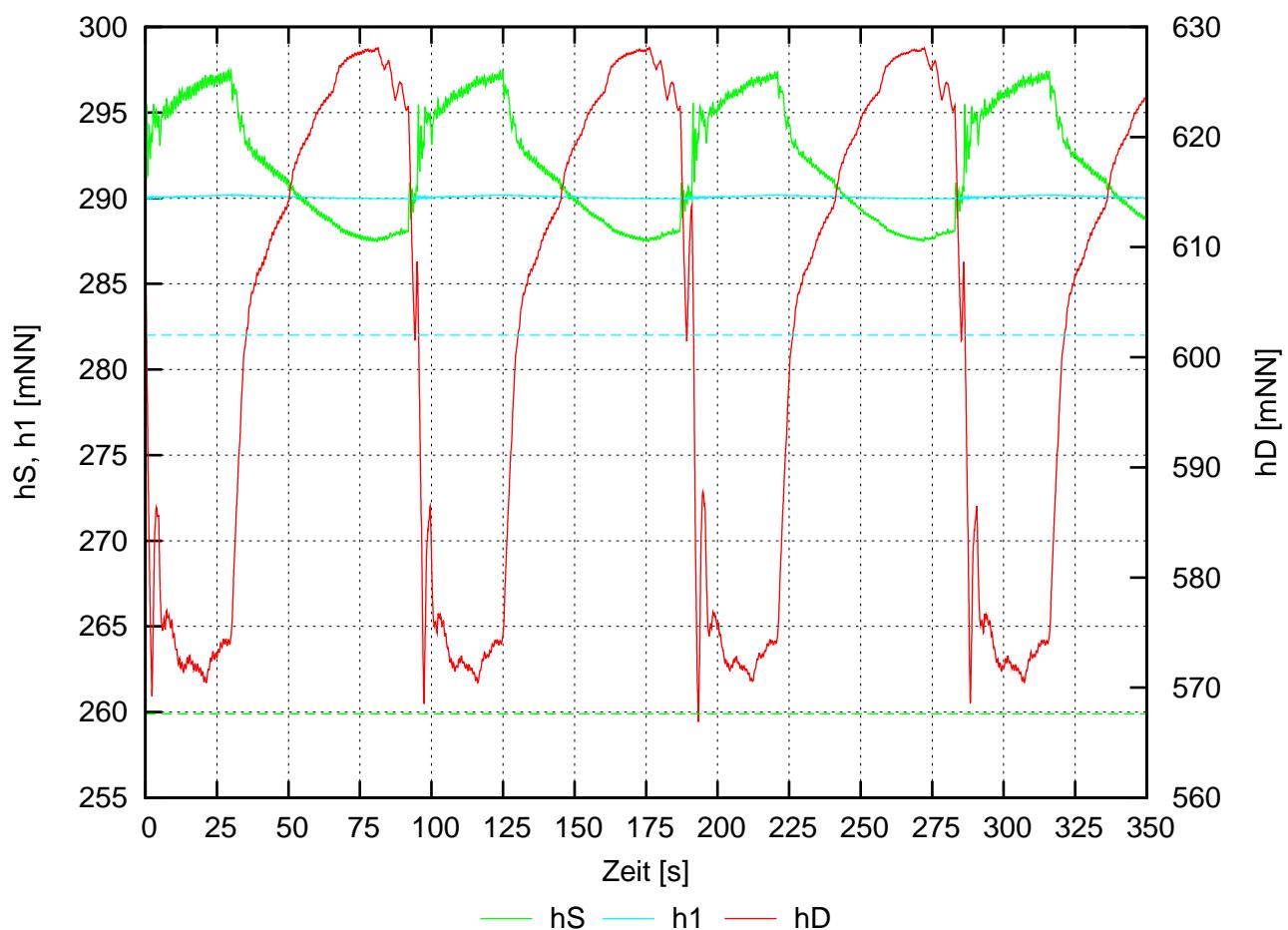
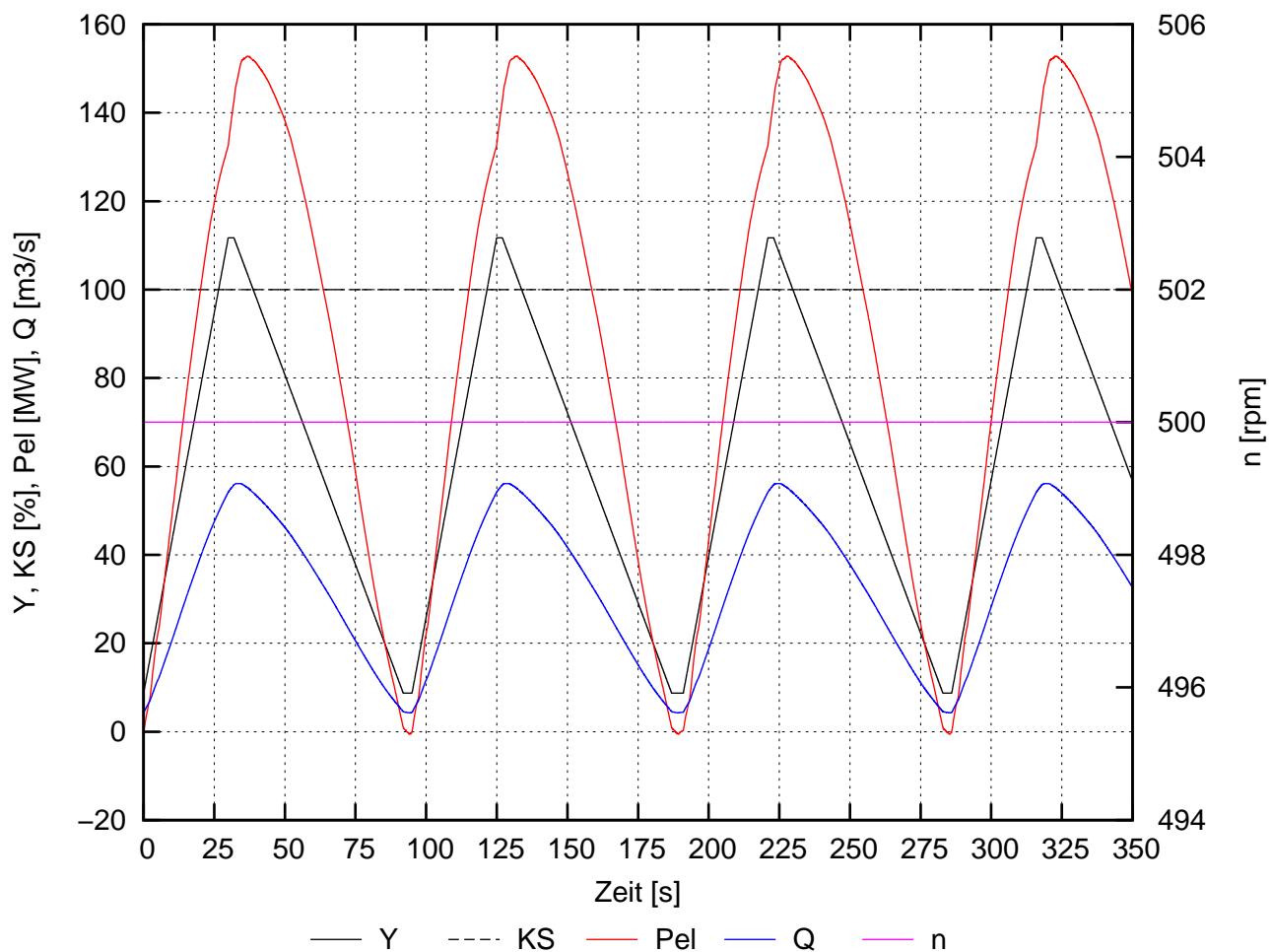
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Wechsel Pu-Betrieb -> Tu-Betrieb



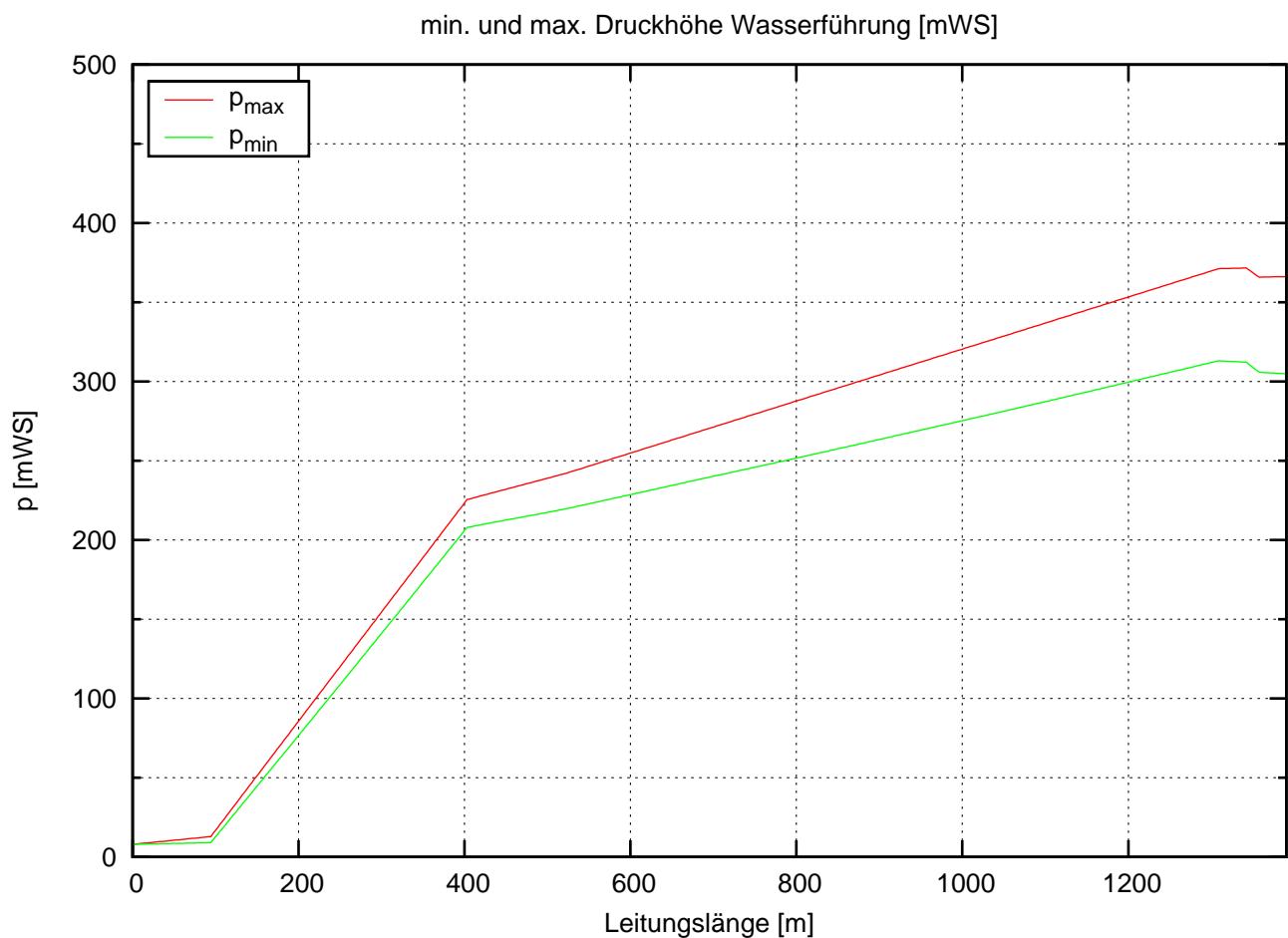
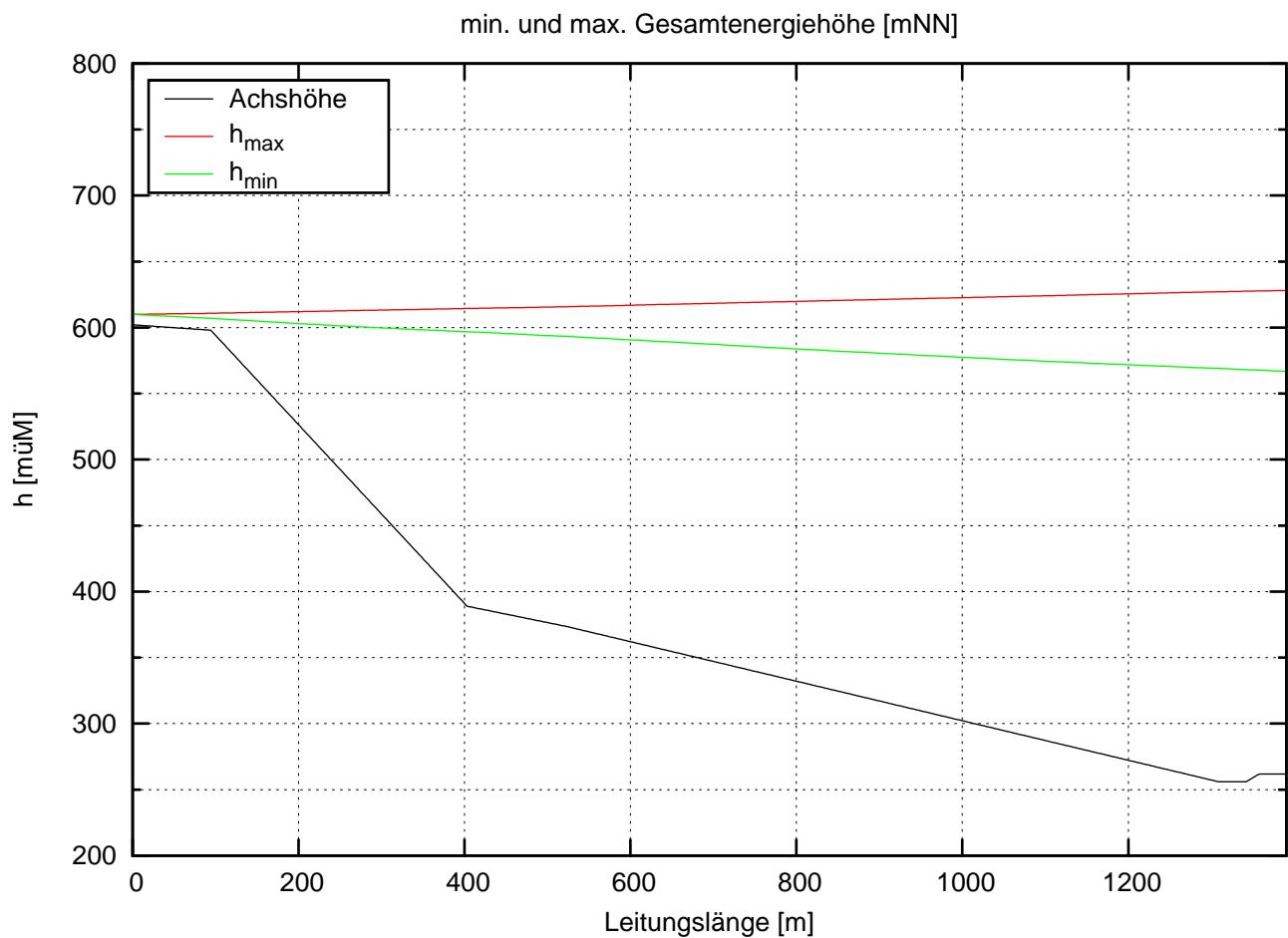
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Zyklischer Tu-Betrieb



$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

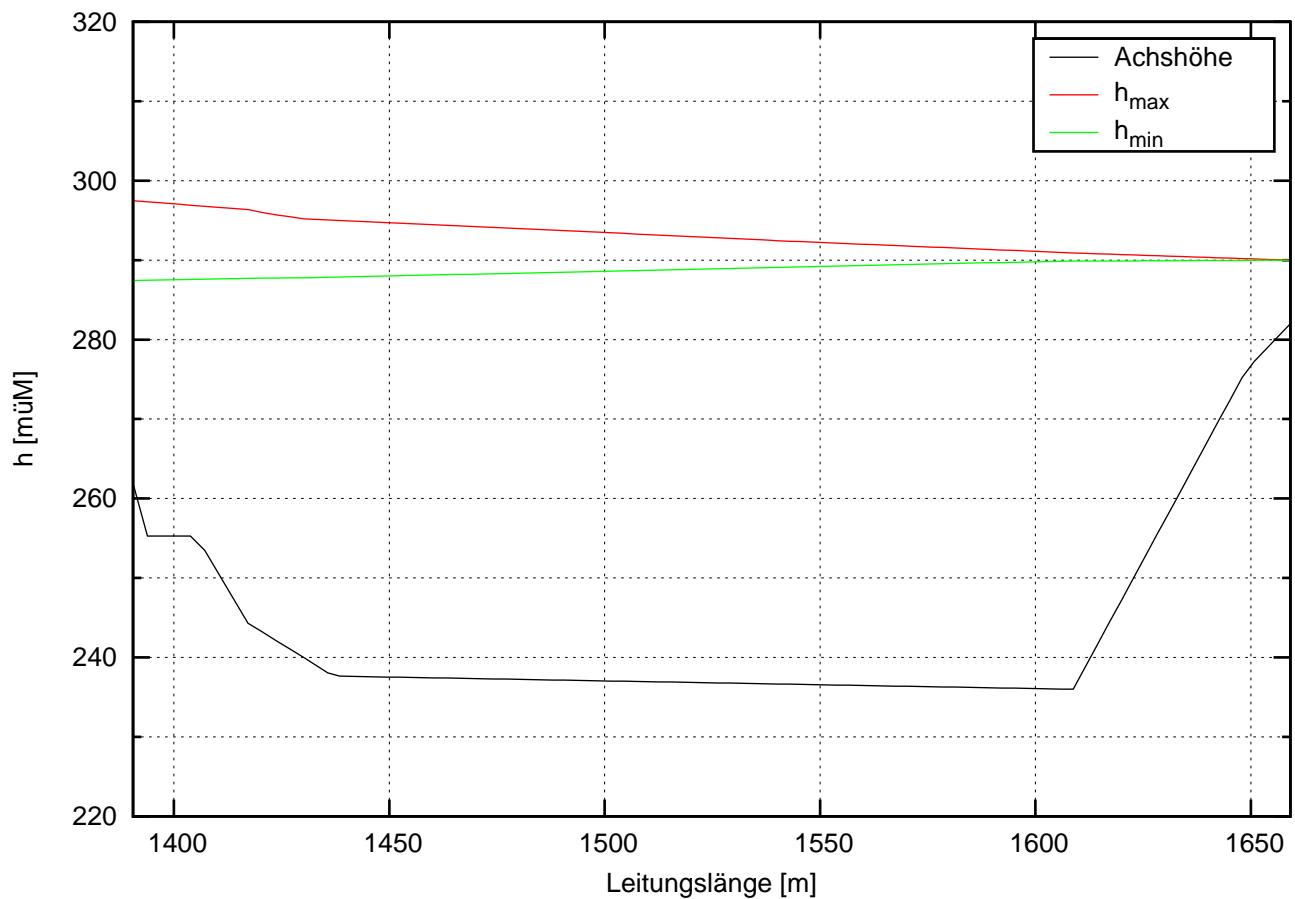
Zyklischer Tu-Betrieb



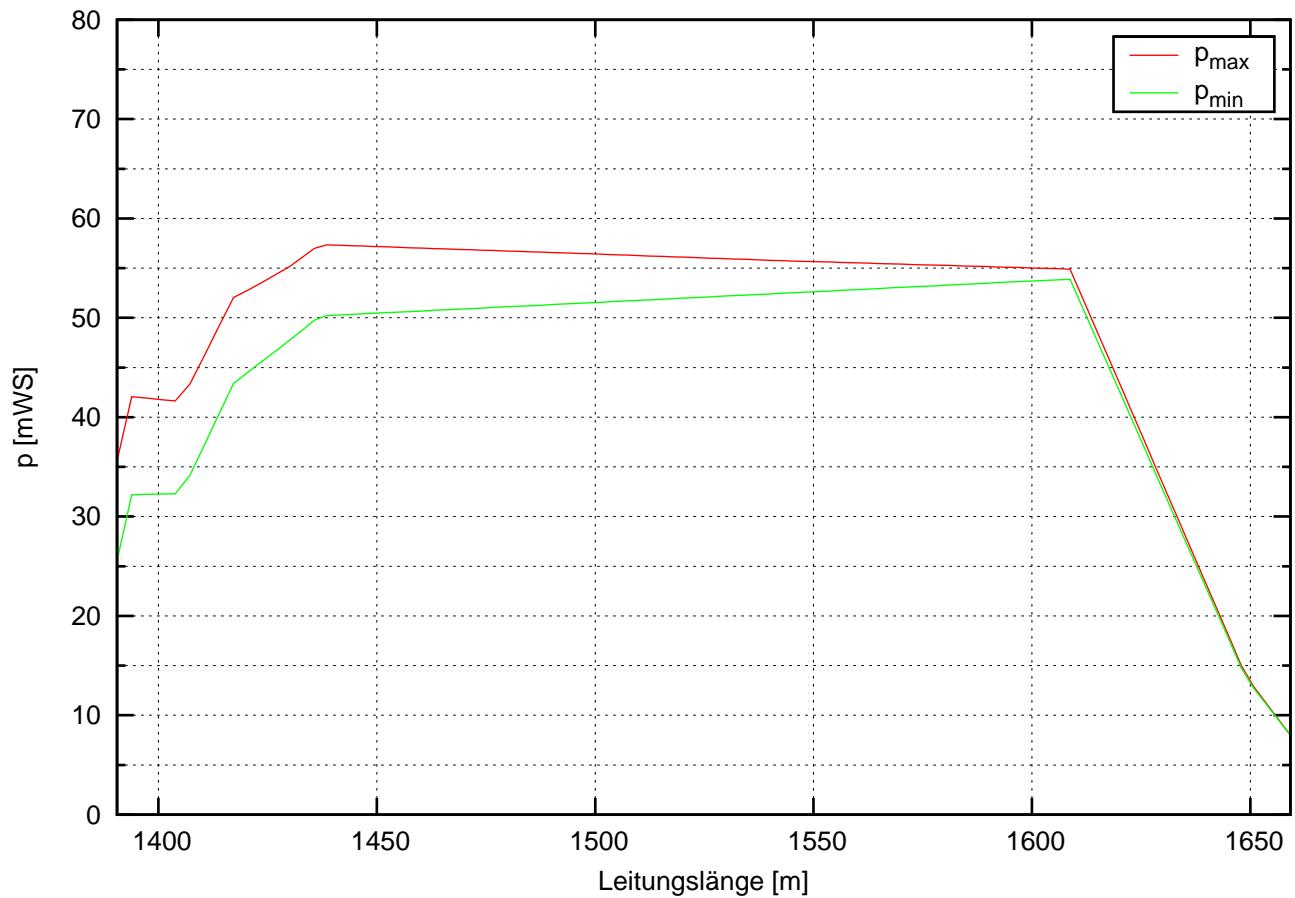
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{\text{OW}} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{\text{UW}} = 290.0 \text{ mNN}$

Zyklischer Tu-Betrieb

min. und max. Gesamtenergiehöhe [mNN]

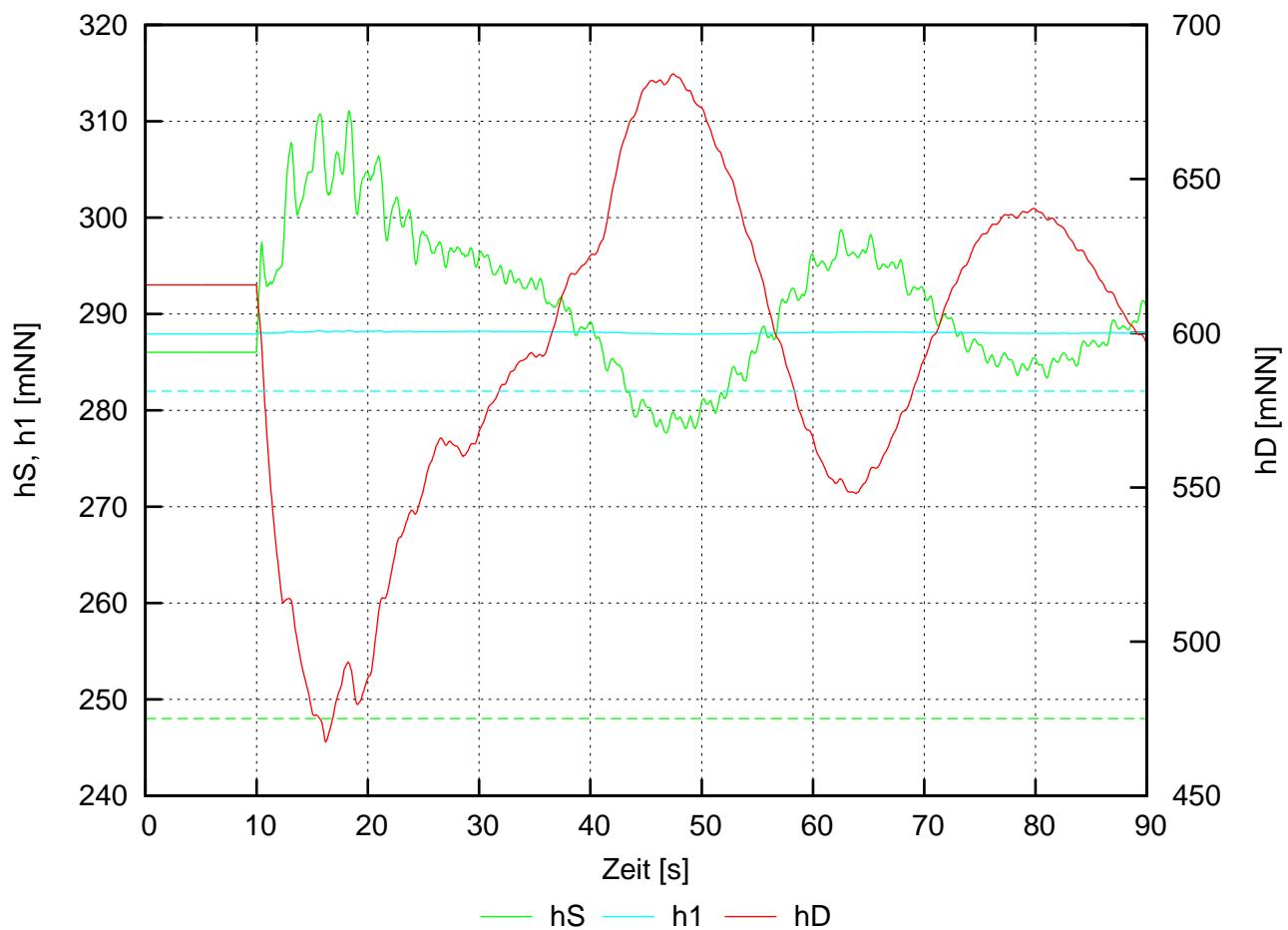
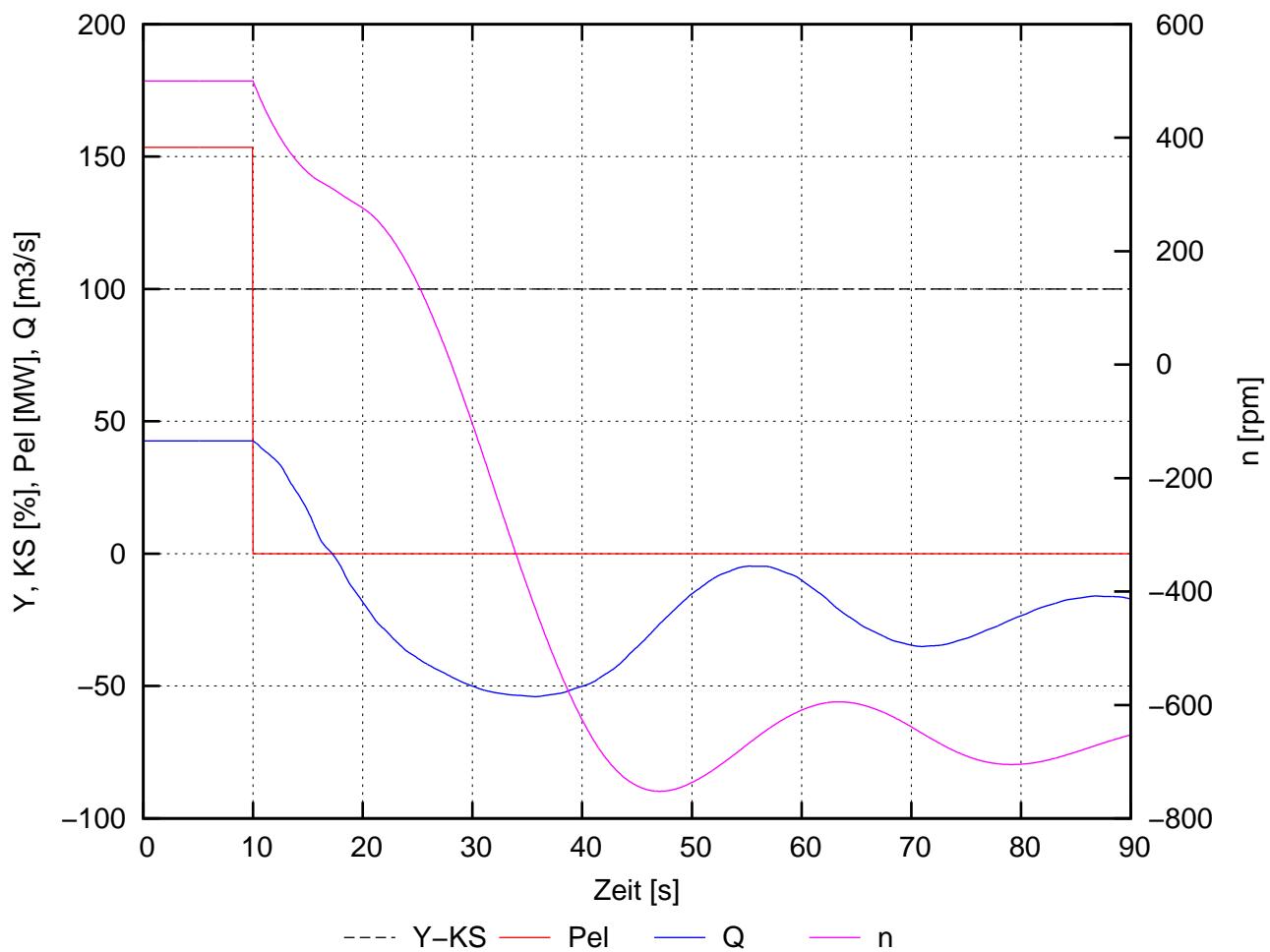


min. und max. Druckhöhe Wasserleitung [mWS]



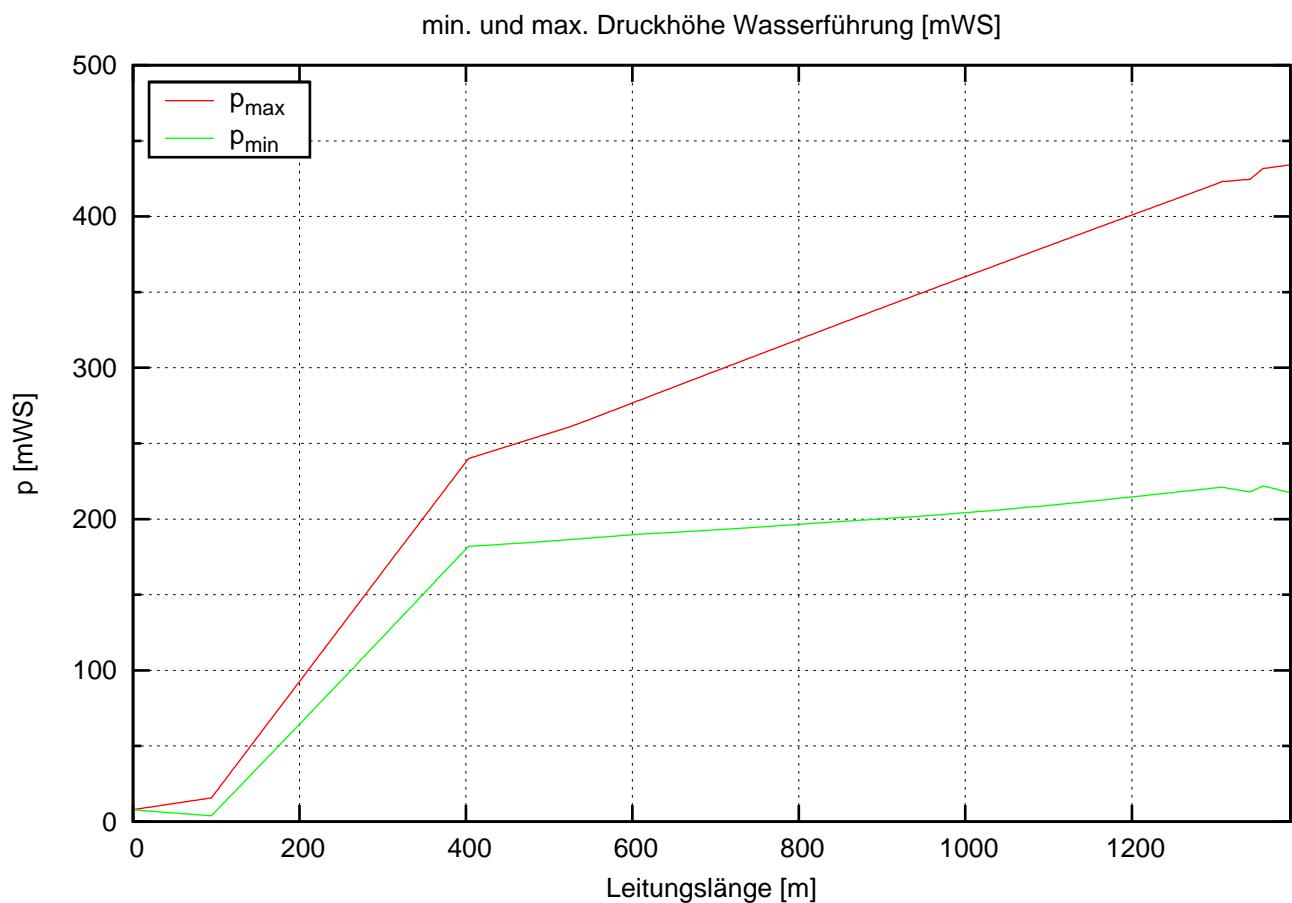
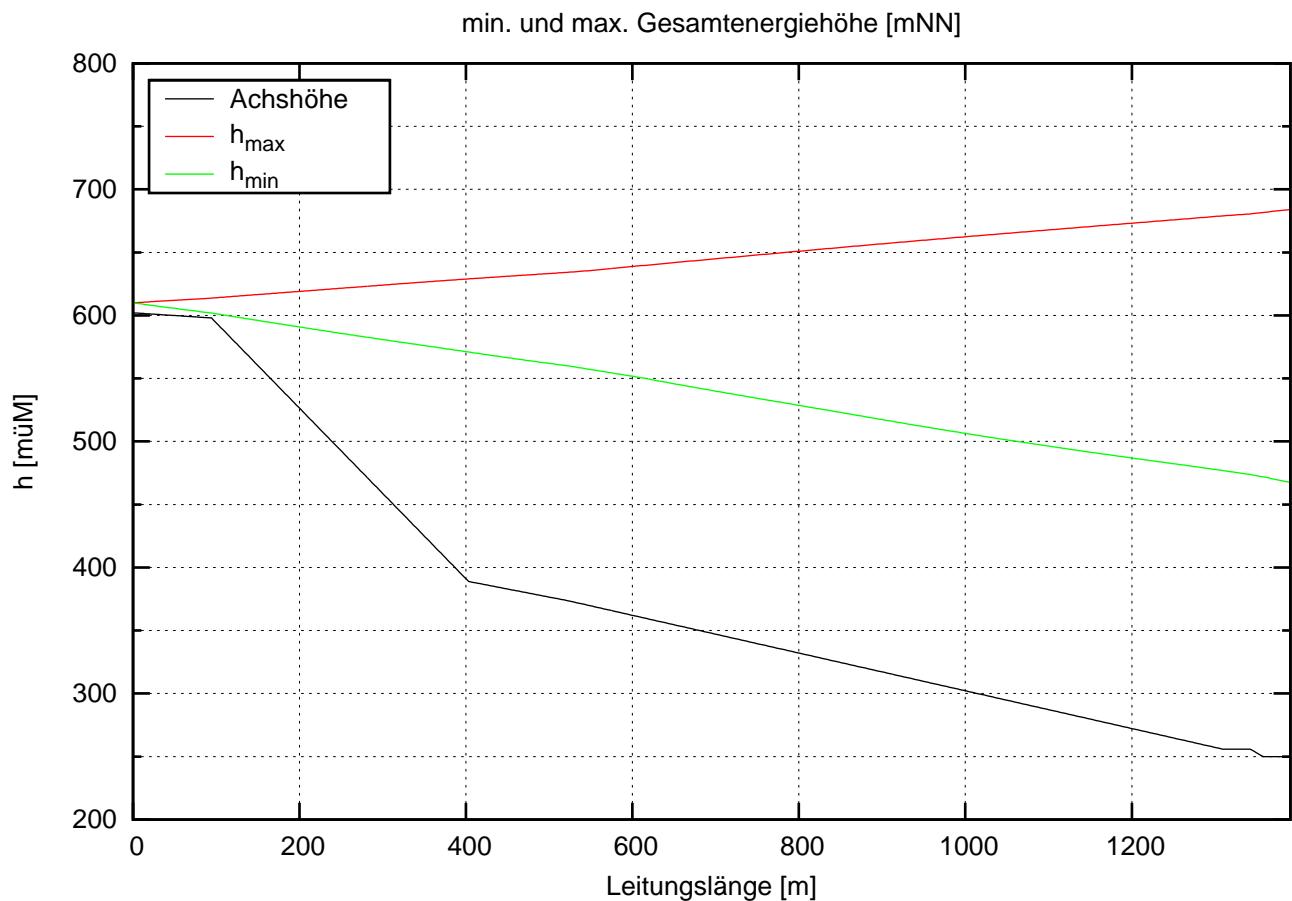
$H = 322.0 \text{ mWS}$: $H_{OWmin} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UWmin} = 288.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf aus Pu-Betrieb, KS bleibt geöffnet



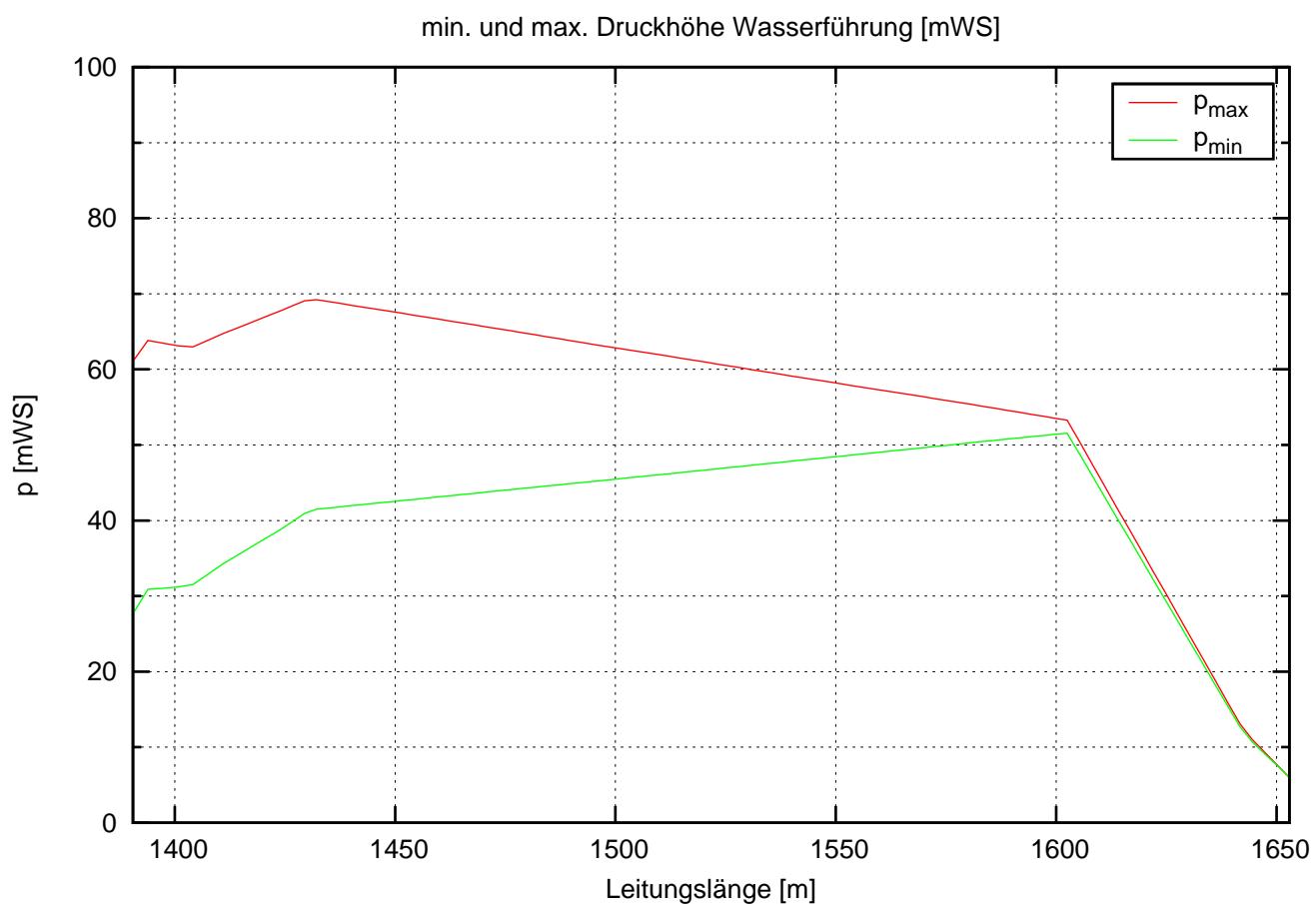
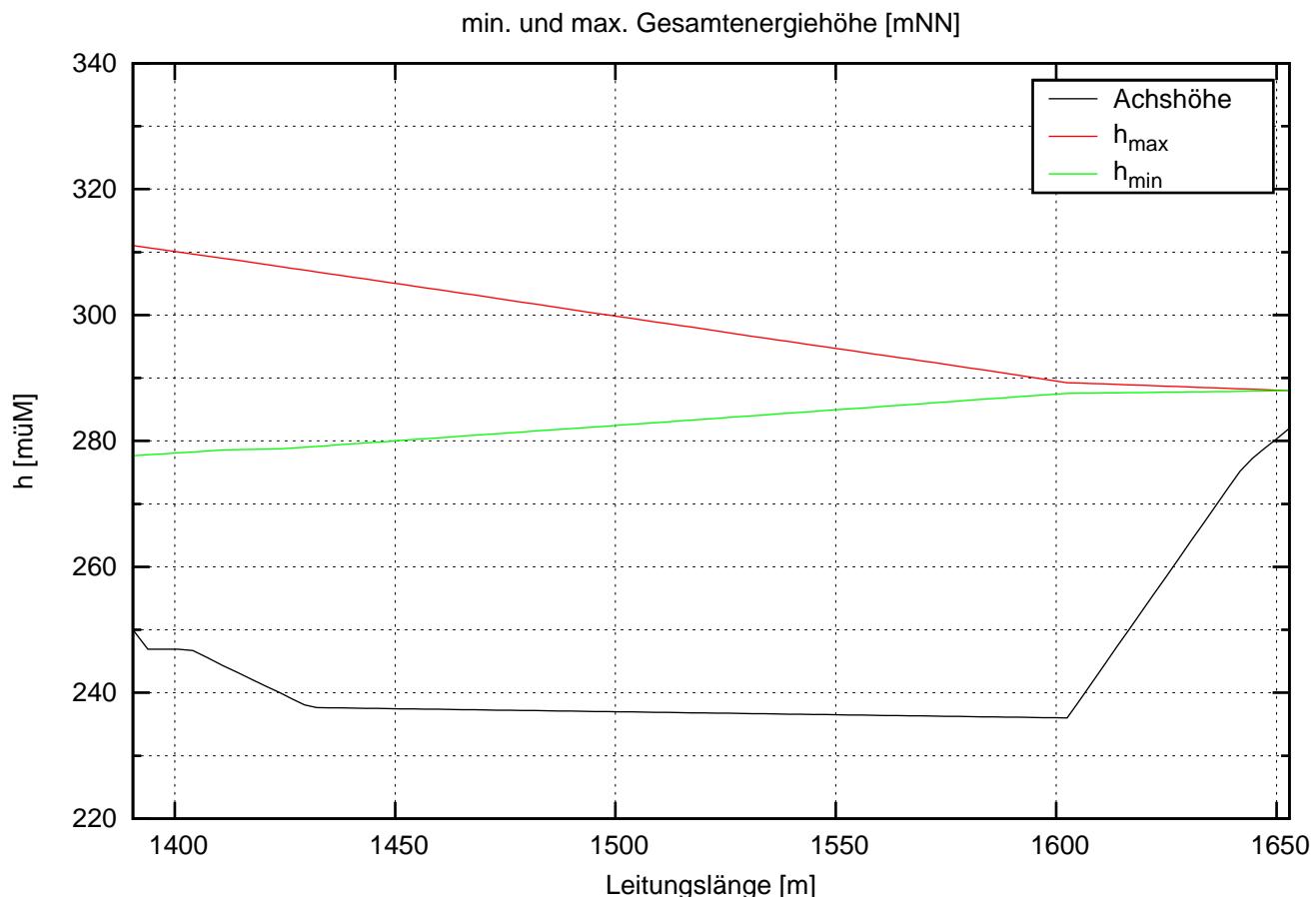
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf aus Pu-Betrieb, KS bleibt geöffnet



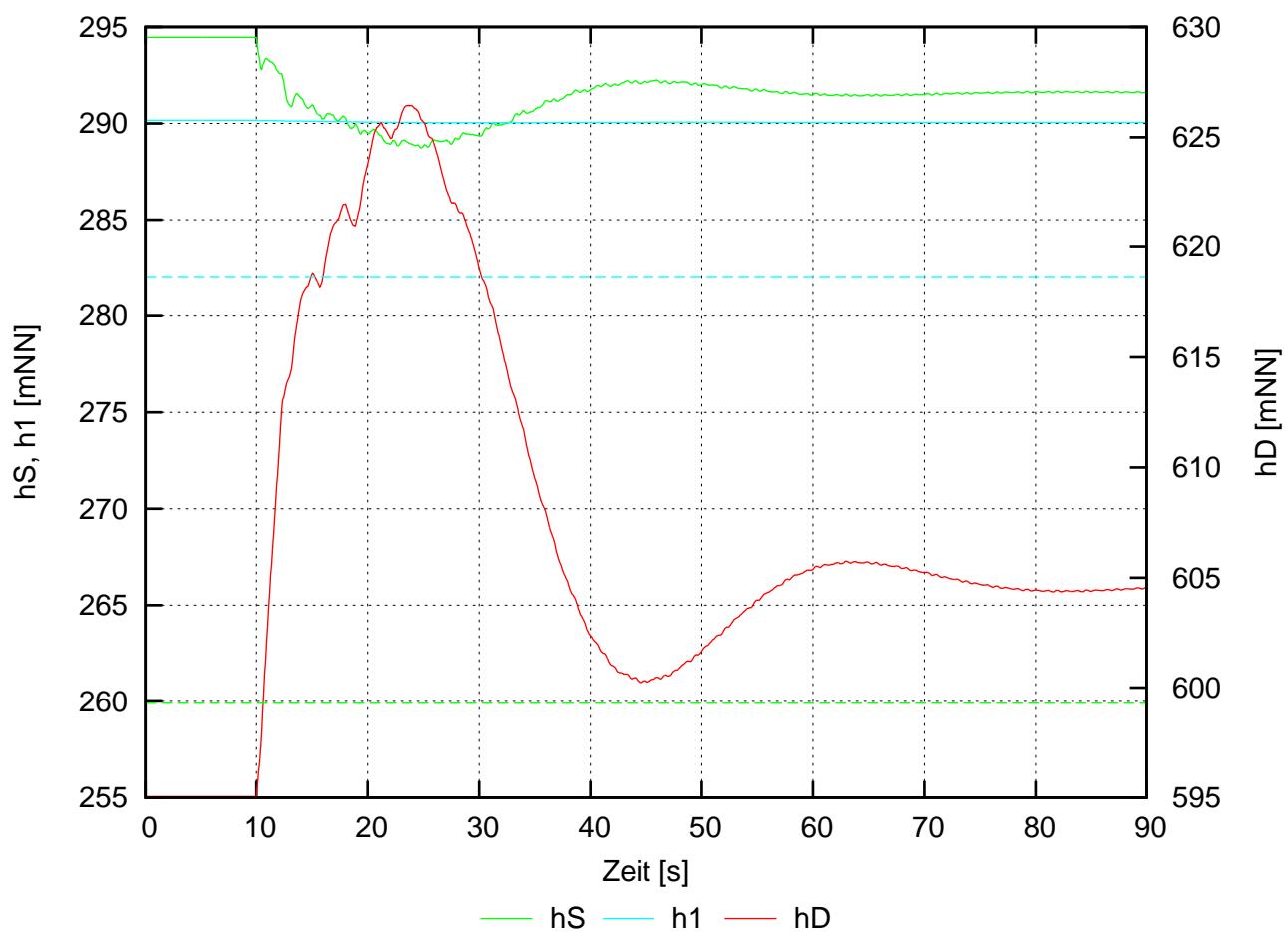
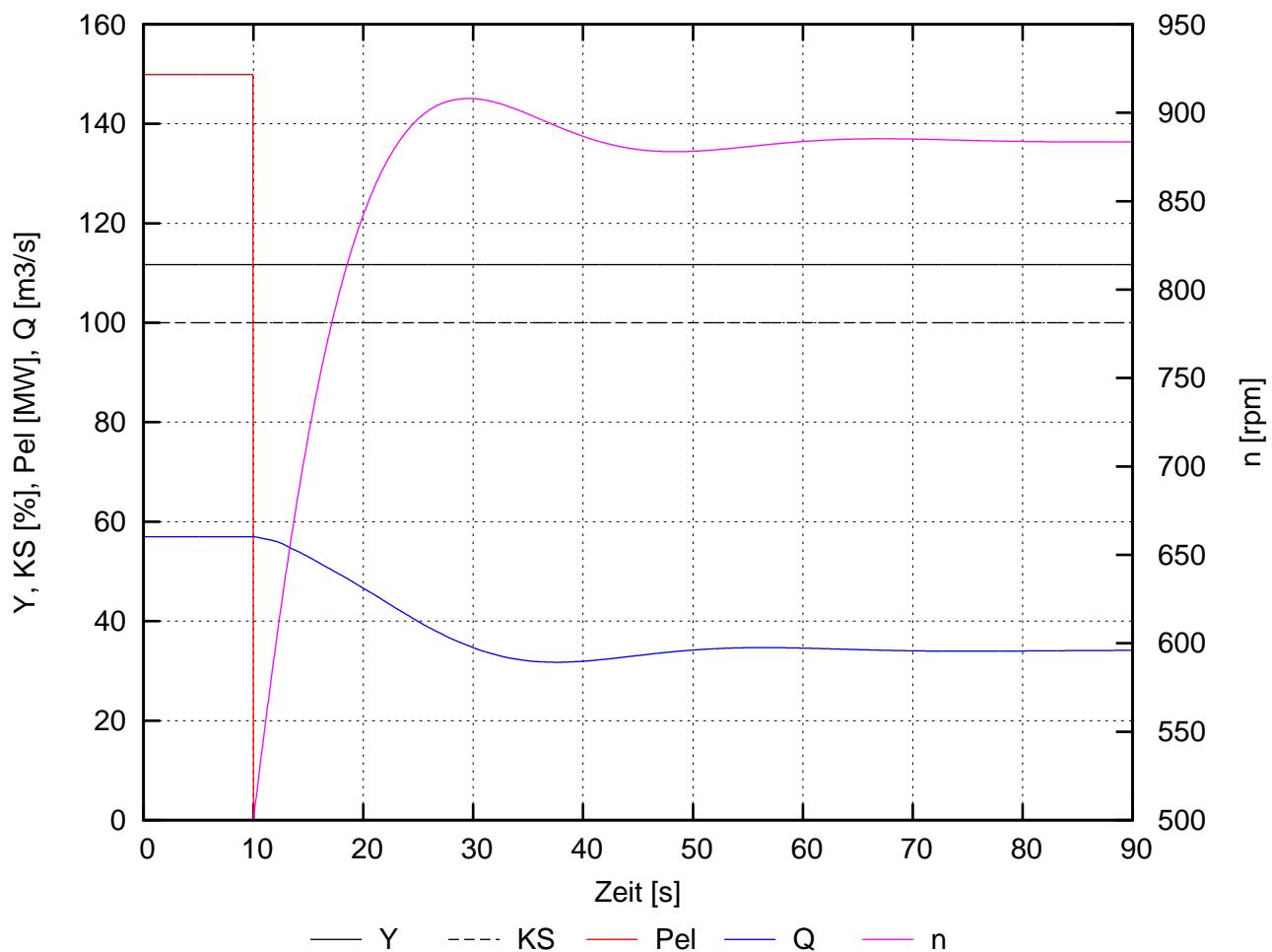
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf aus Pu-Betrieb, KS bleibt geöffnet



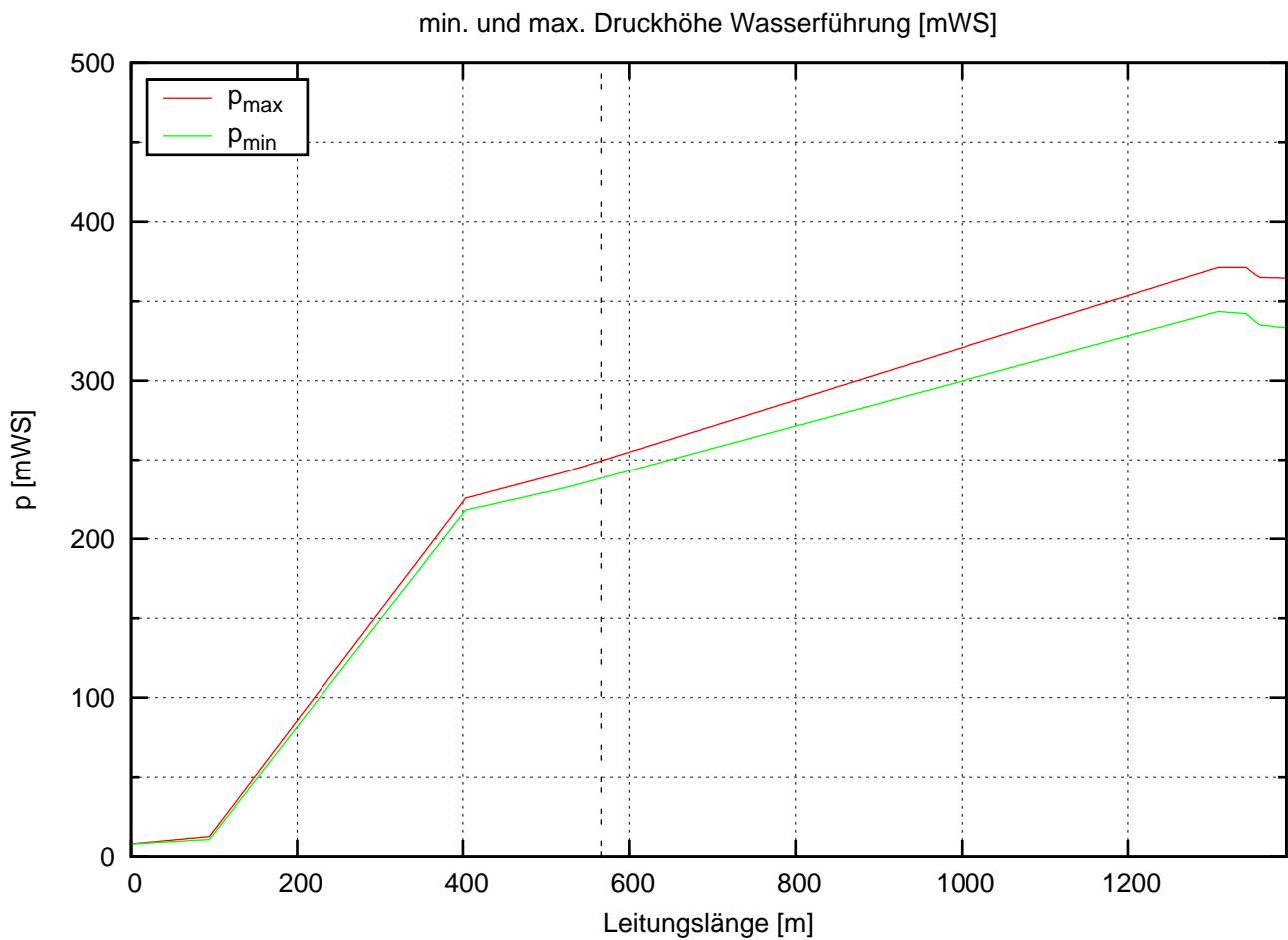
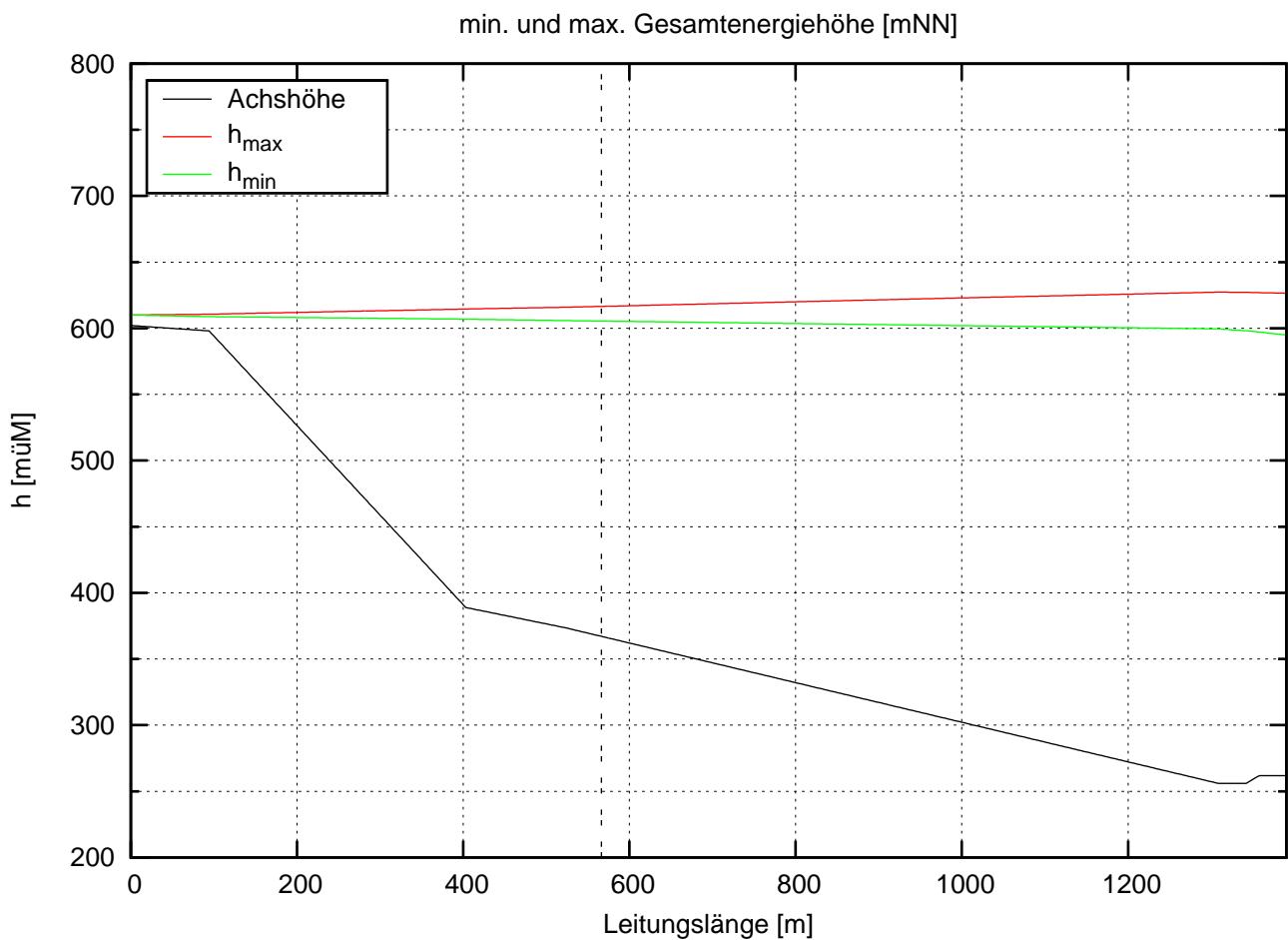
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf aus Tu-Betrieb, LE und KS bleiben geöffnet



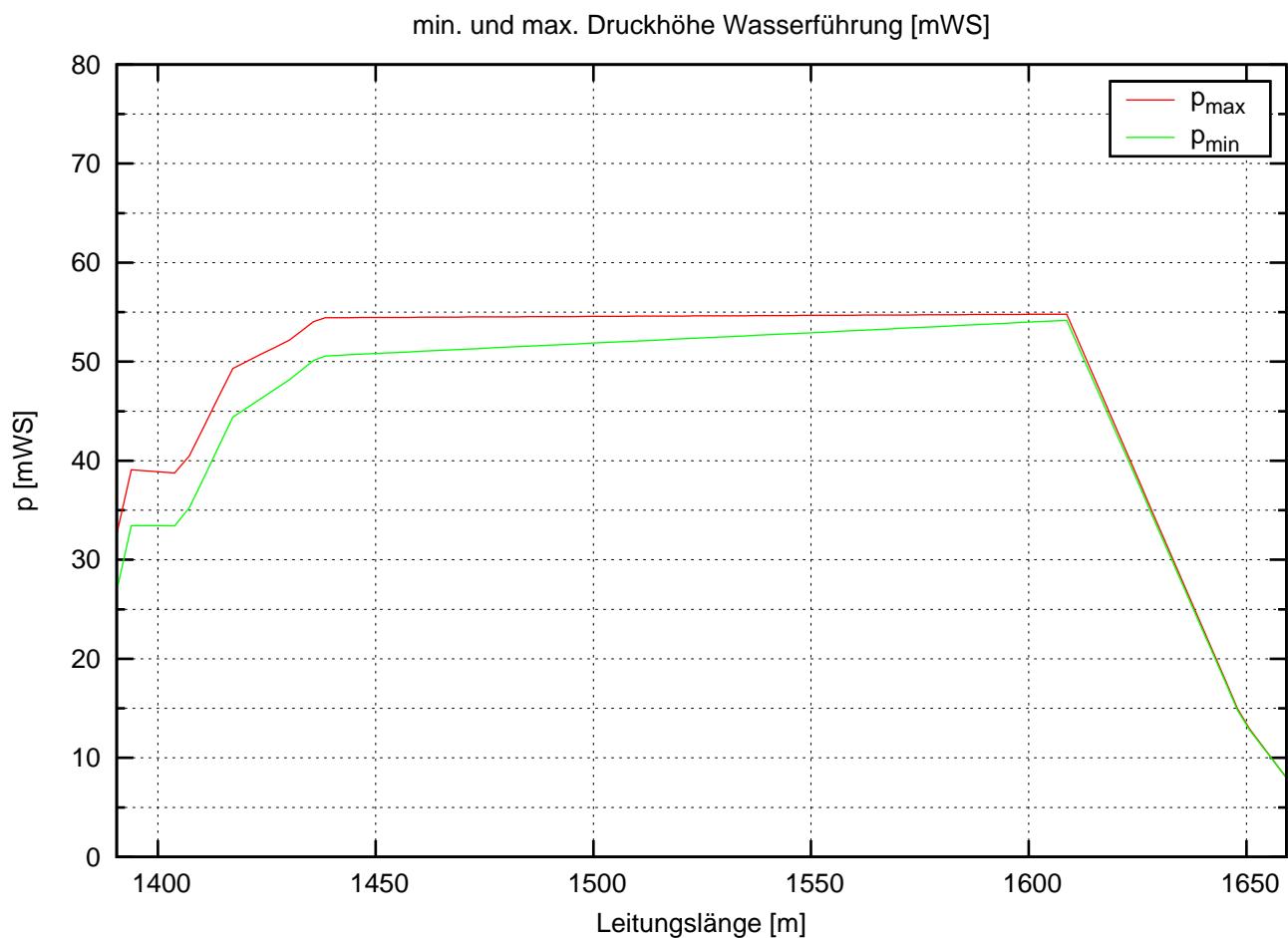
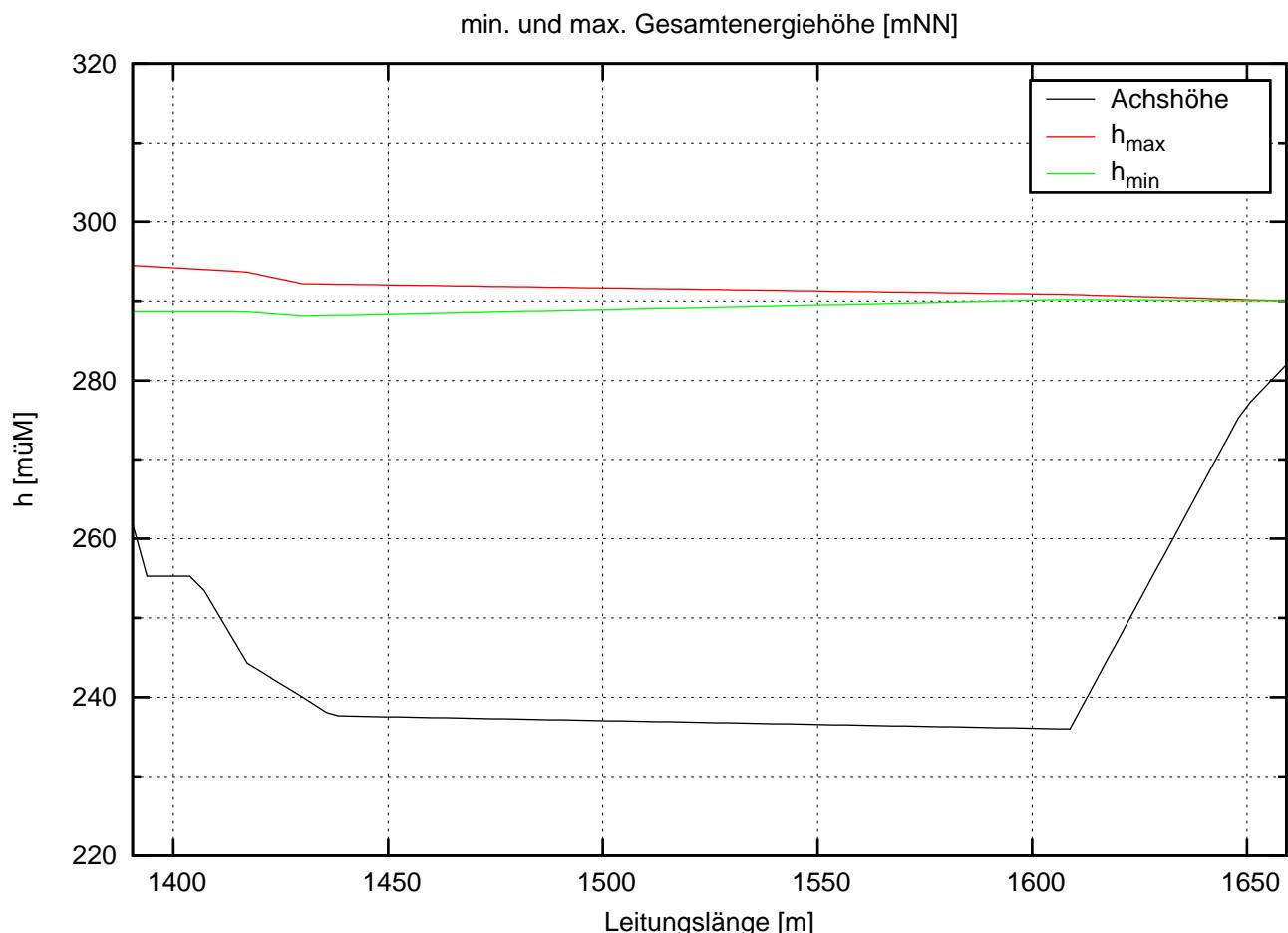
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf aus Tu-Betrieb, LE und KS bleiben geöffnet



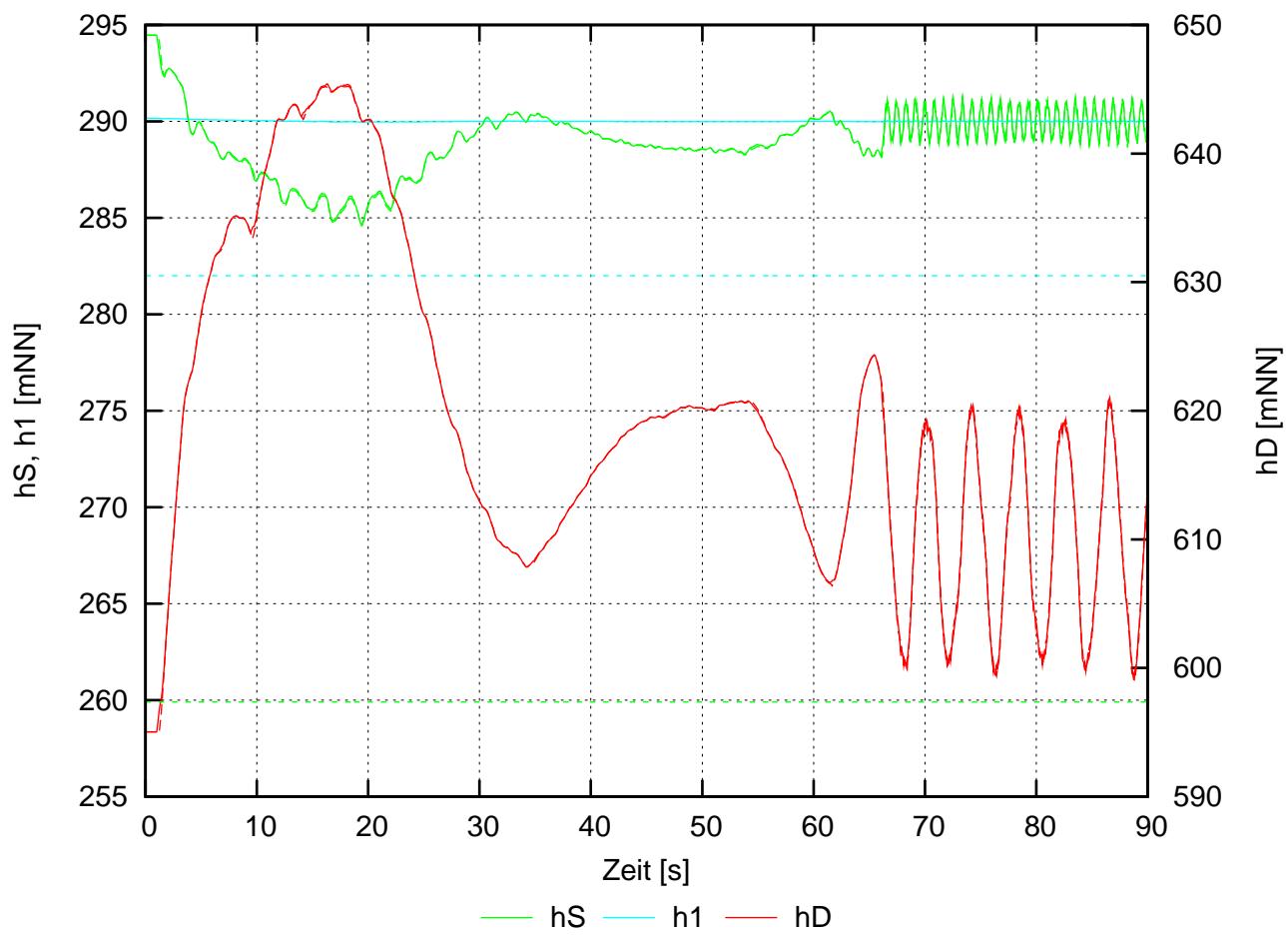
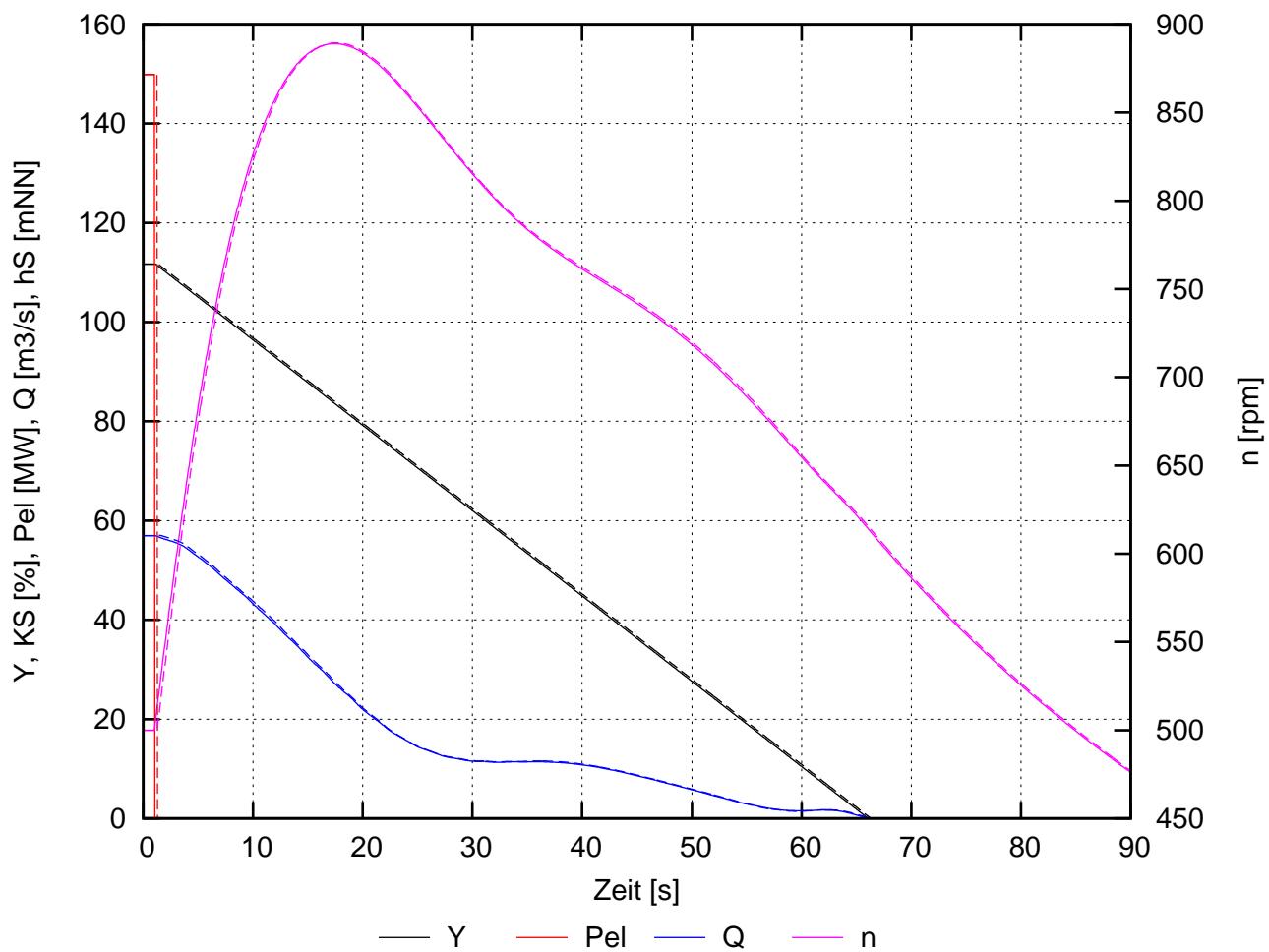
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{\text{OW}} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{\text{UW}} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf aus Tu-Betrieb, LE und KS bleiben geöffnet



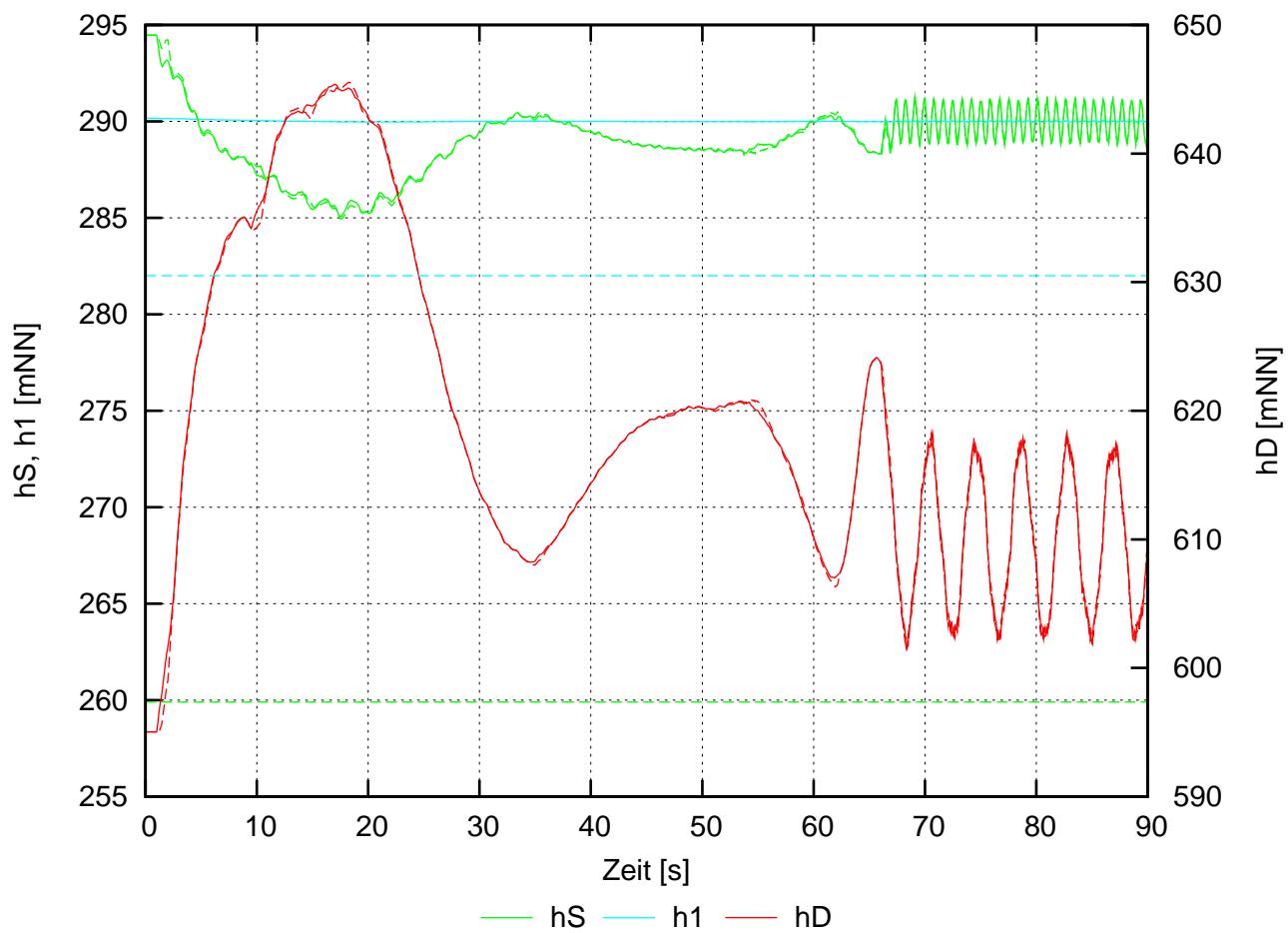
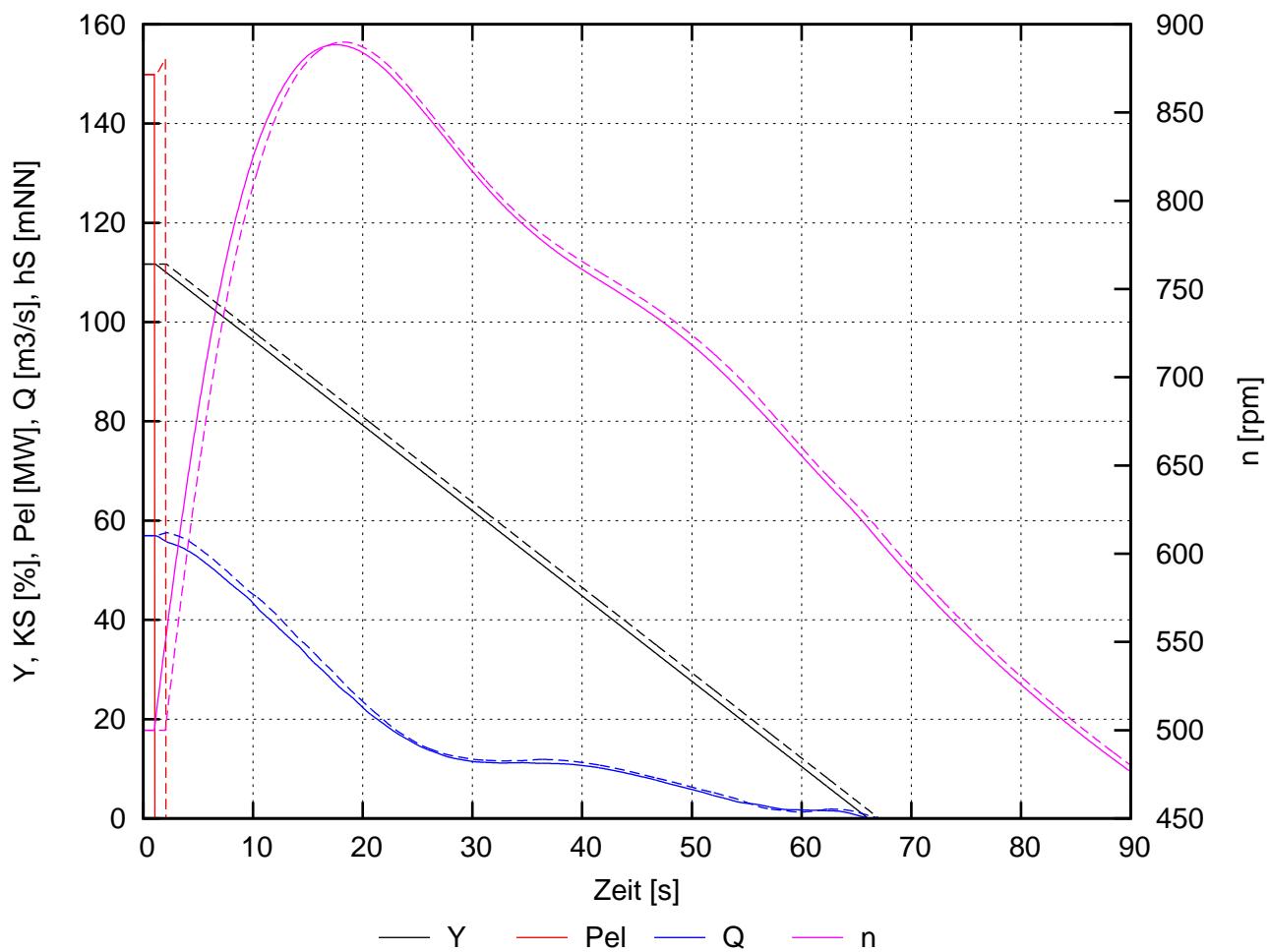
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit 0.25s Verzögerung (hSmin)



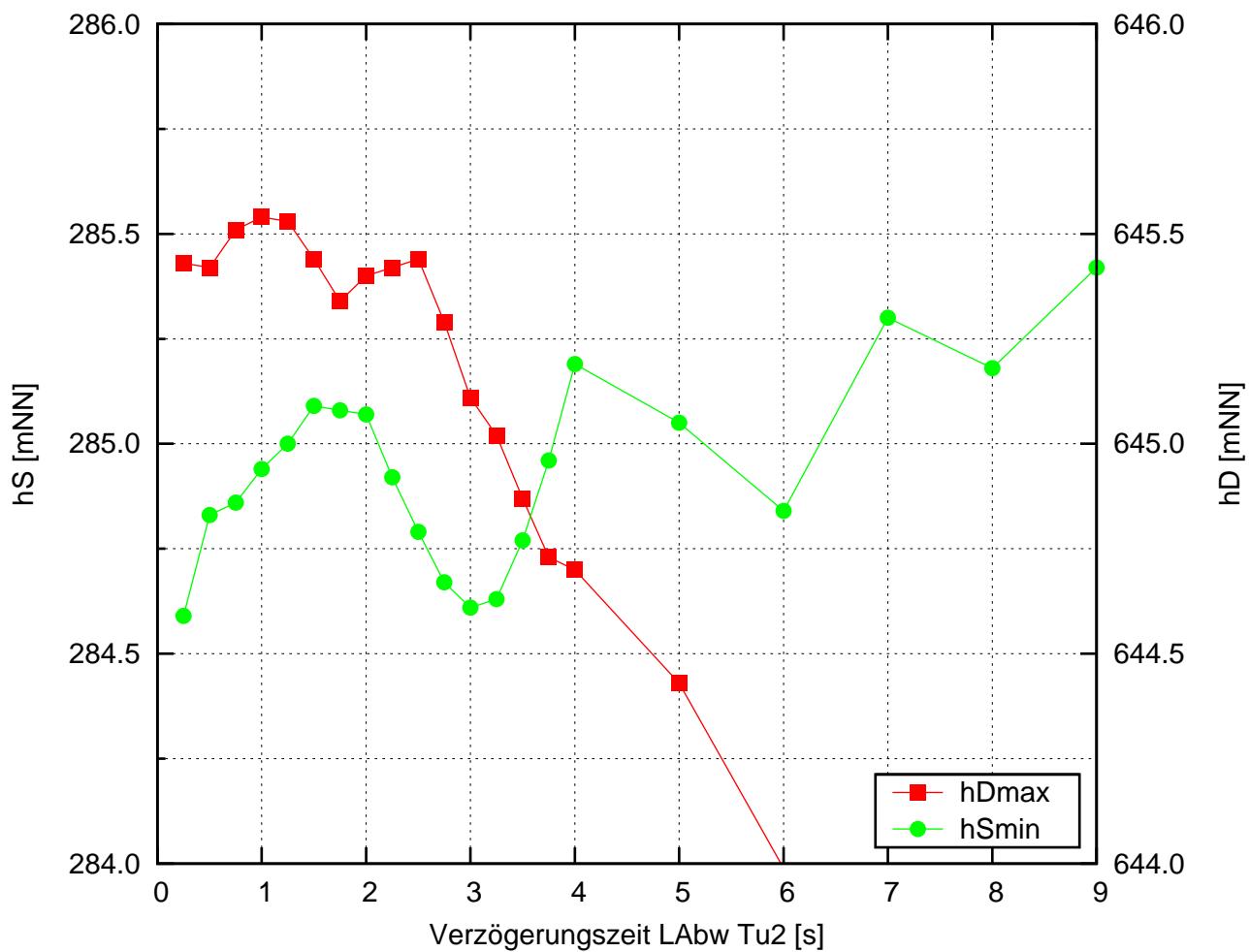
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit 1.0 s Verzögerung (hDmax)



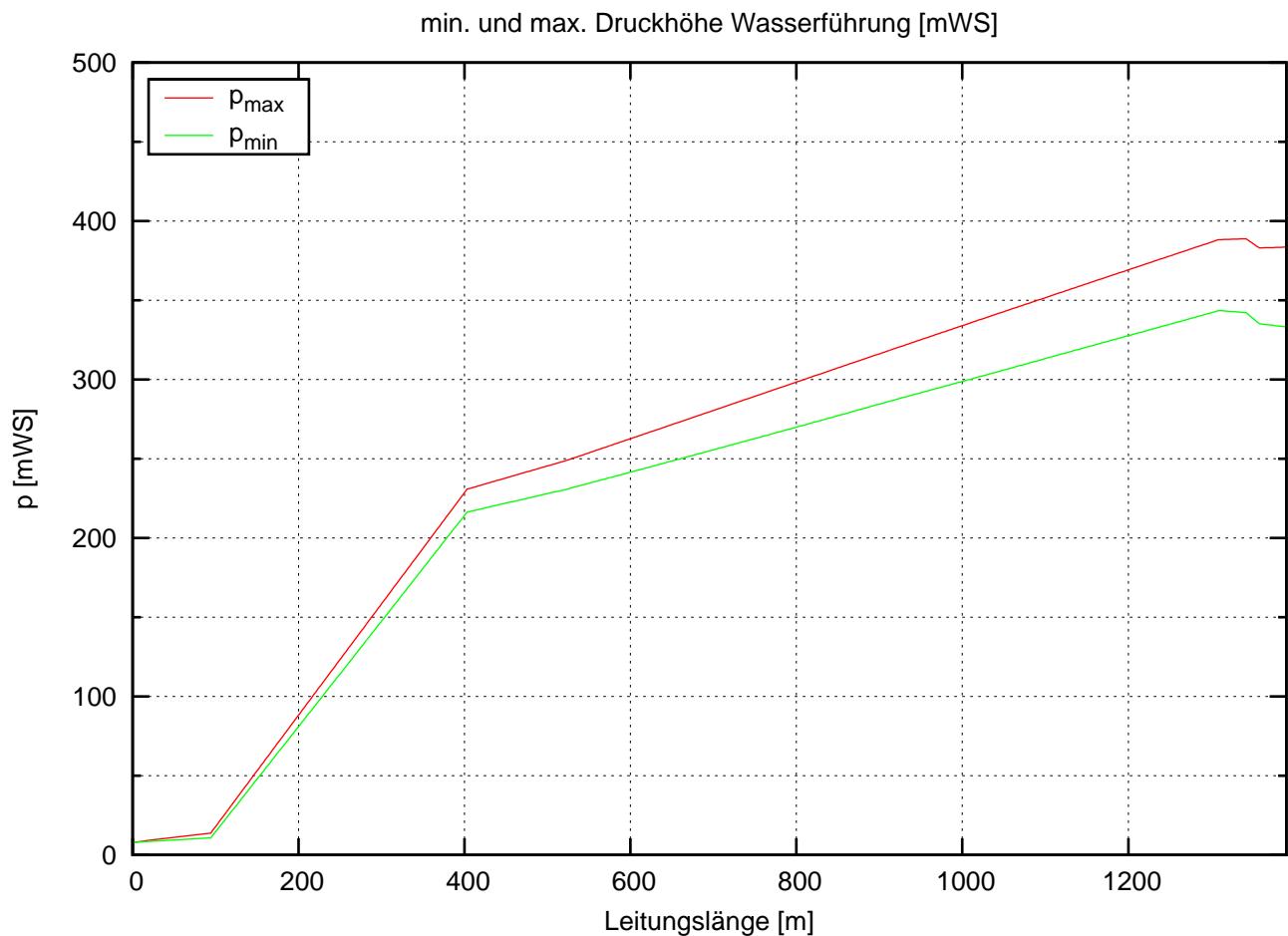
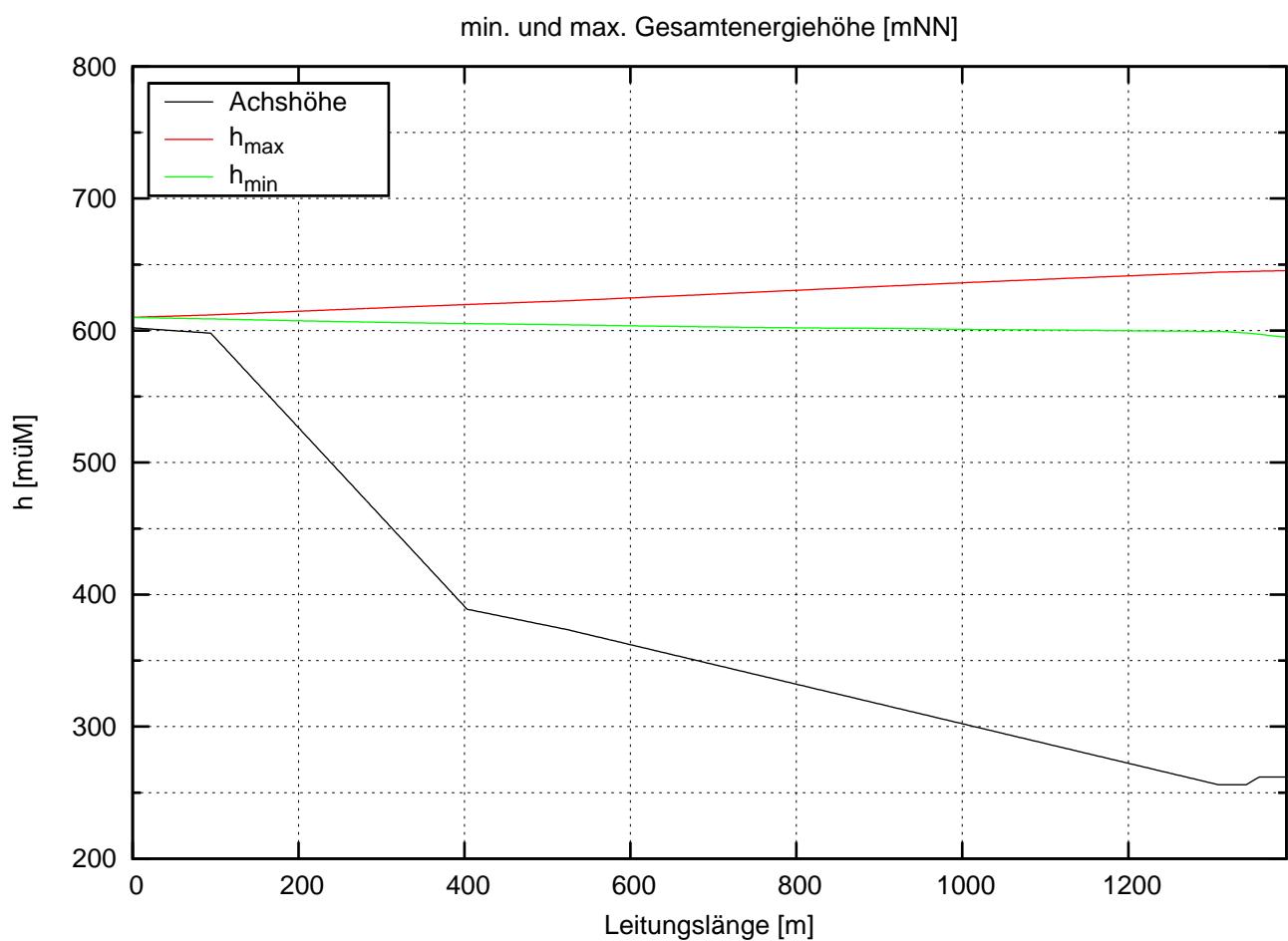
$H_{min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit Verzögerung



$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

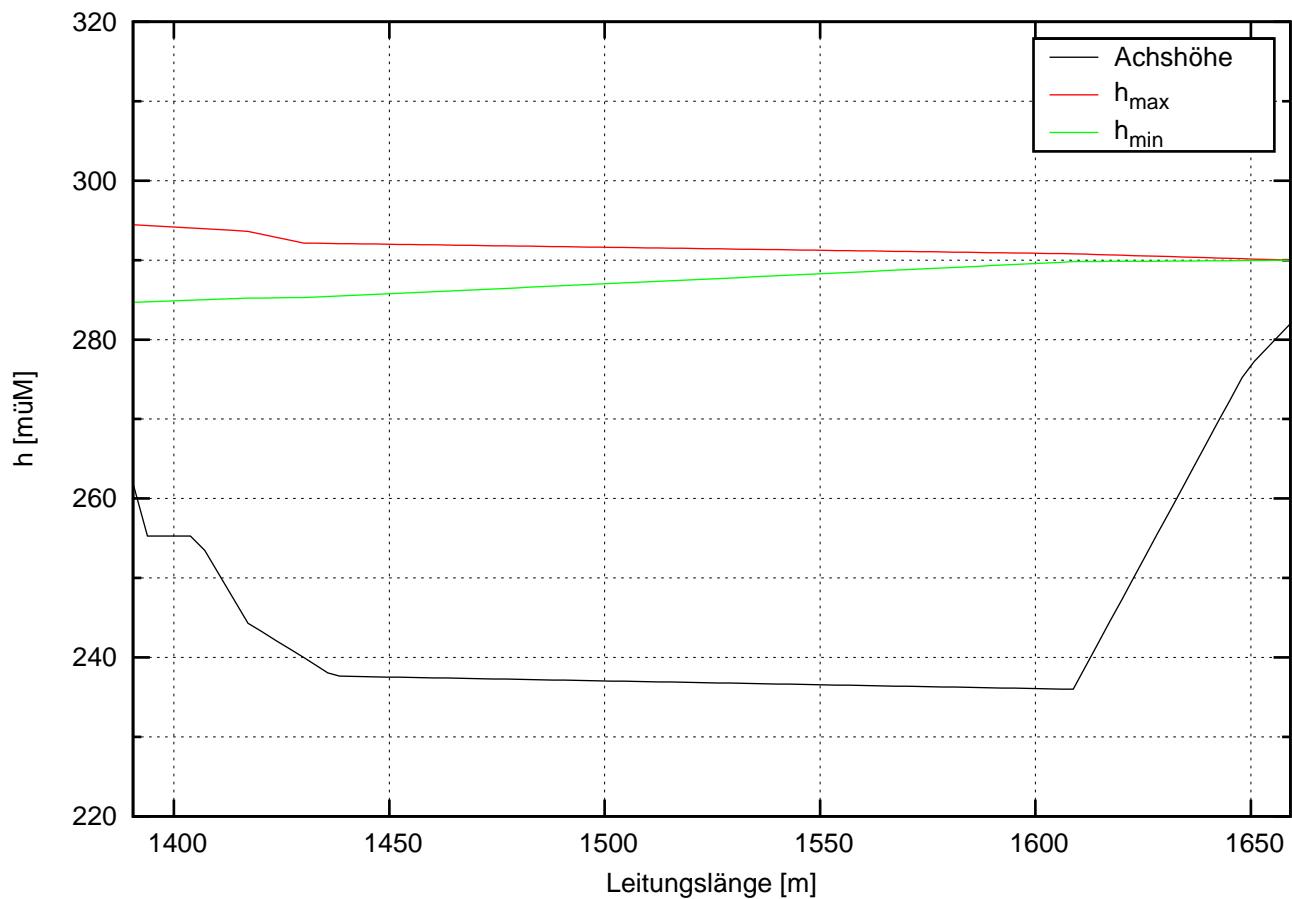
Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit 0.25s Verzögerung (hSmin)



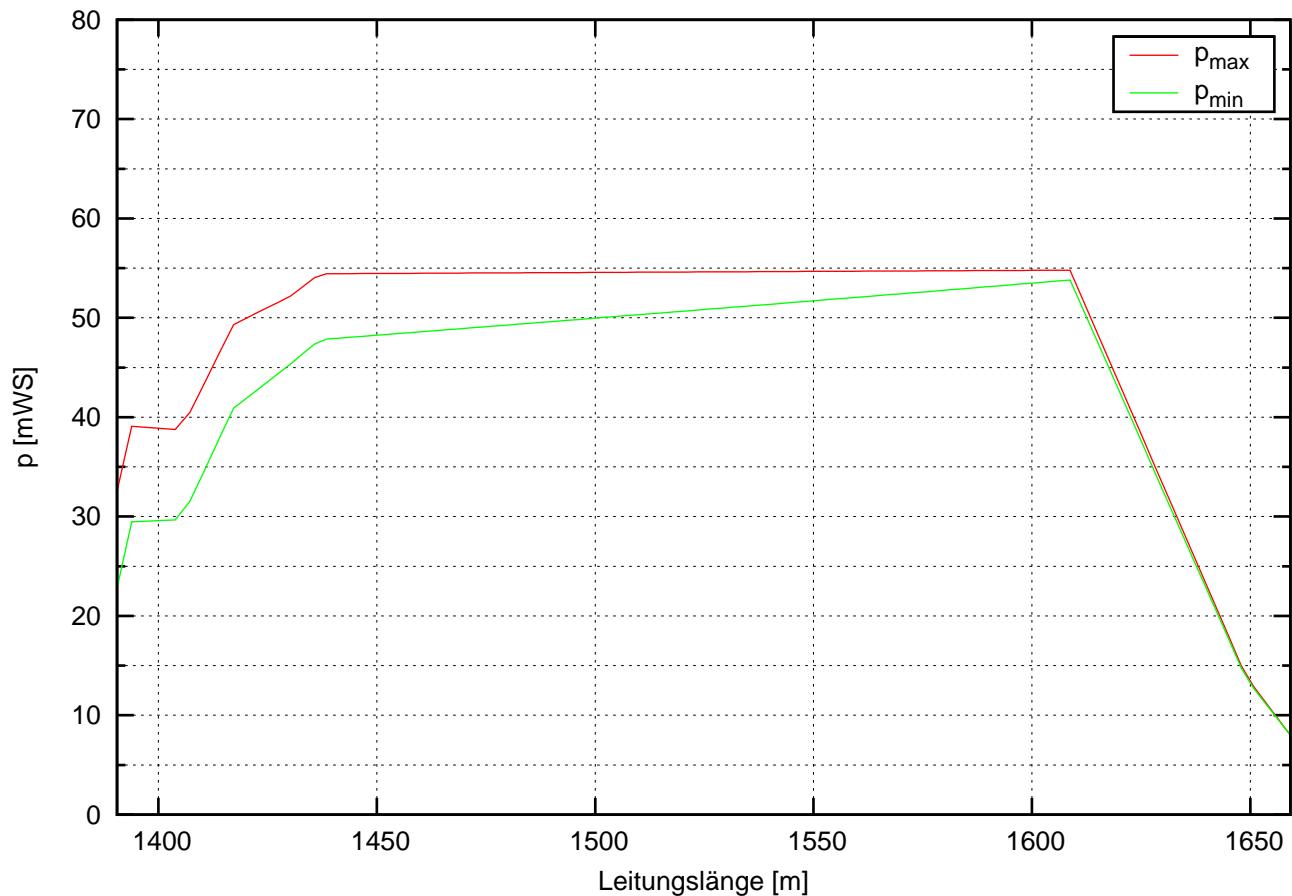
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit 0.25s Verzögerung (hSmin)

min. und max. Gesamtenergiehöhe [mNN]

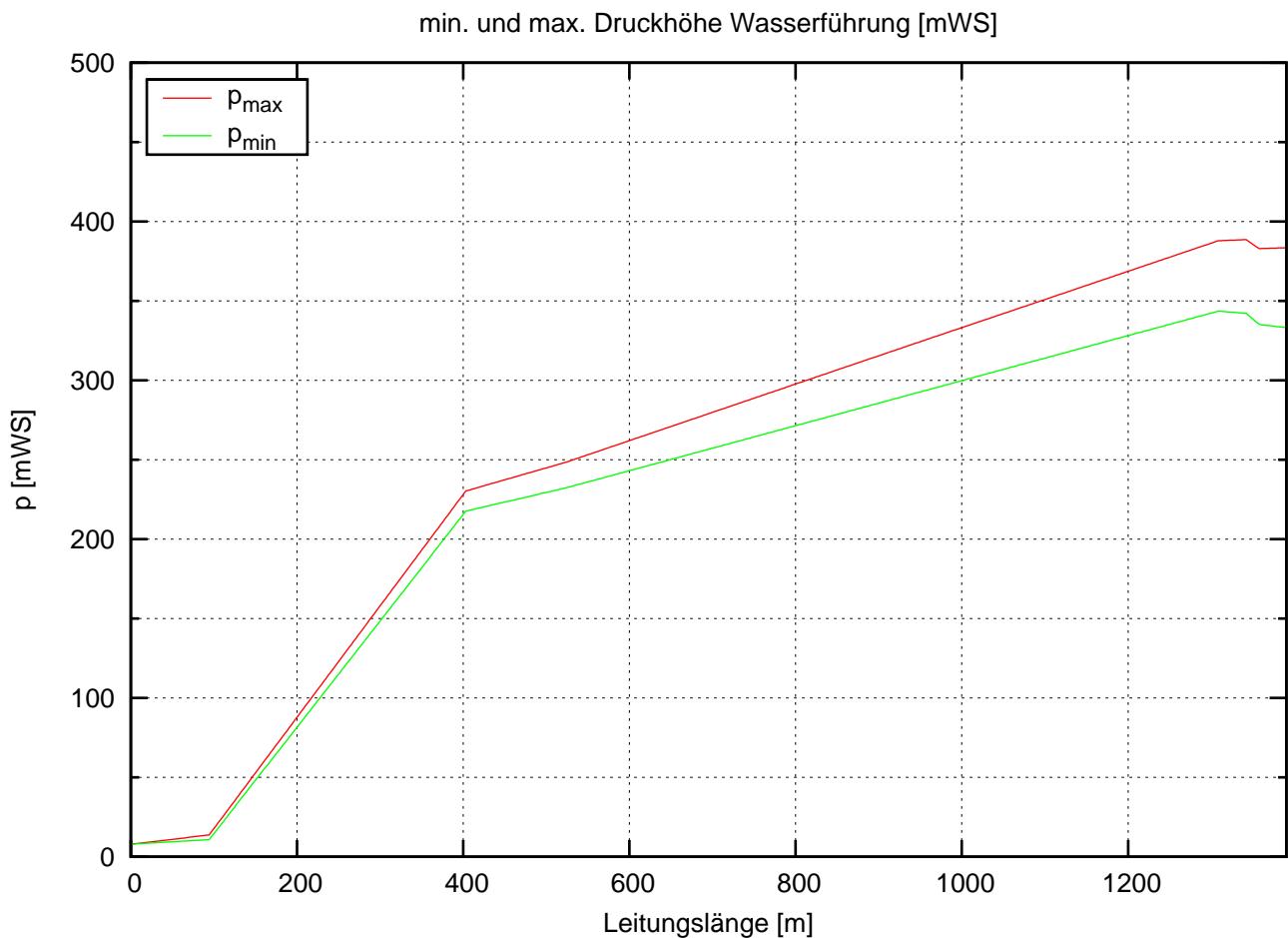
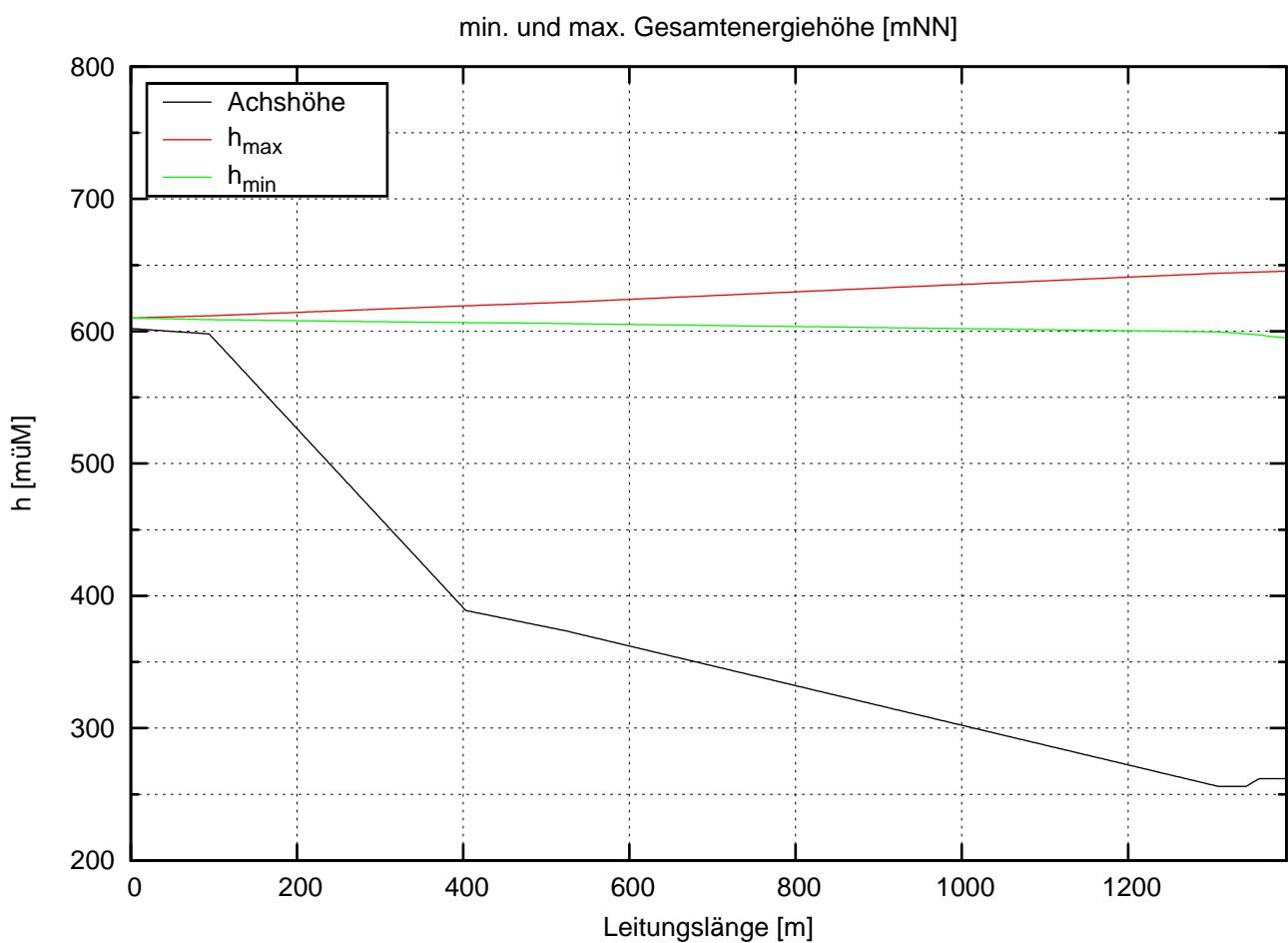


min. und max. Druckhöhe Wasserleitung [mWS]



$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

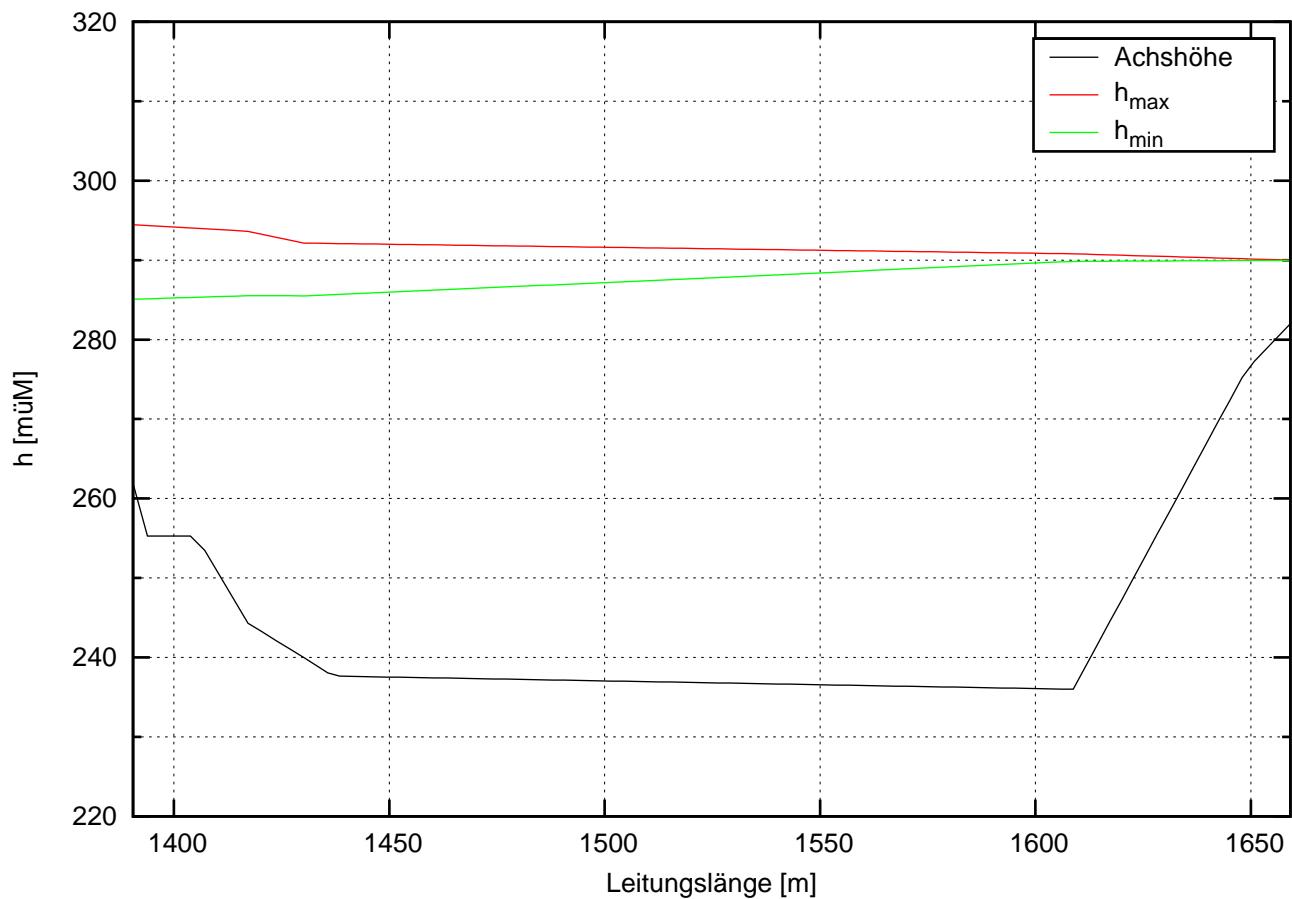
Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit 1.0s Verzögerung (hDmax)



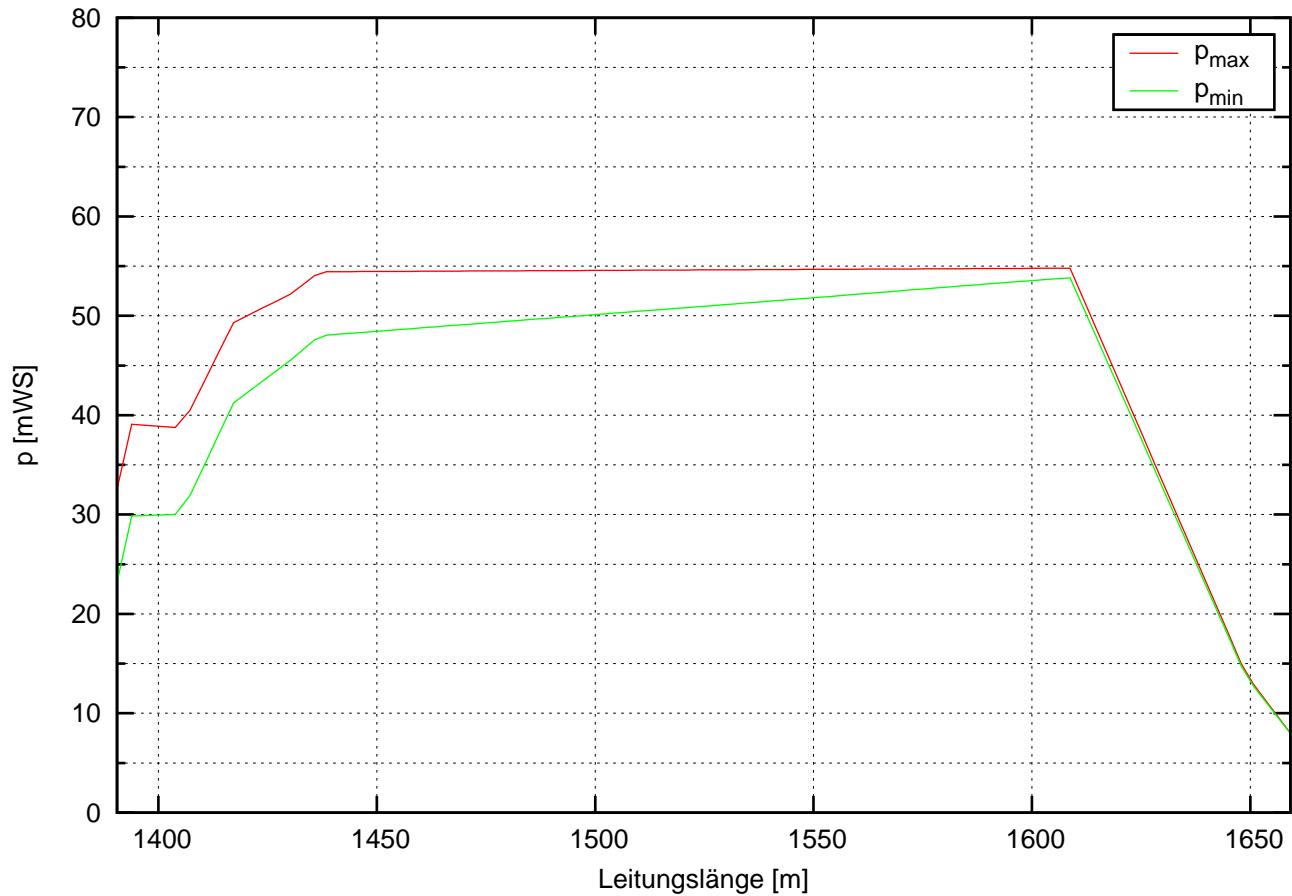
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit 1.0s Verzögerung (hDmax)

min. und max. Gesamtenergiehöhe [mNN]

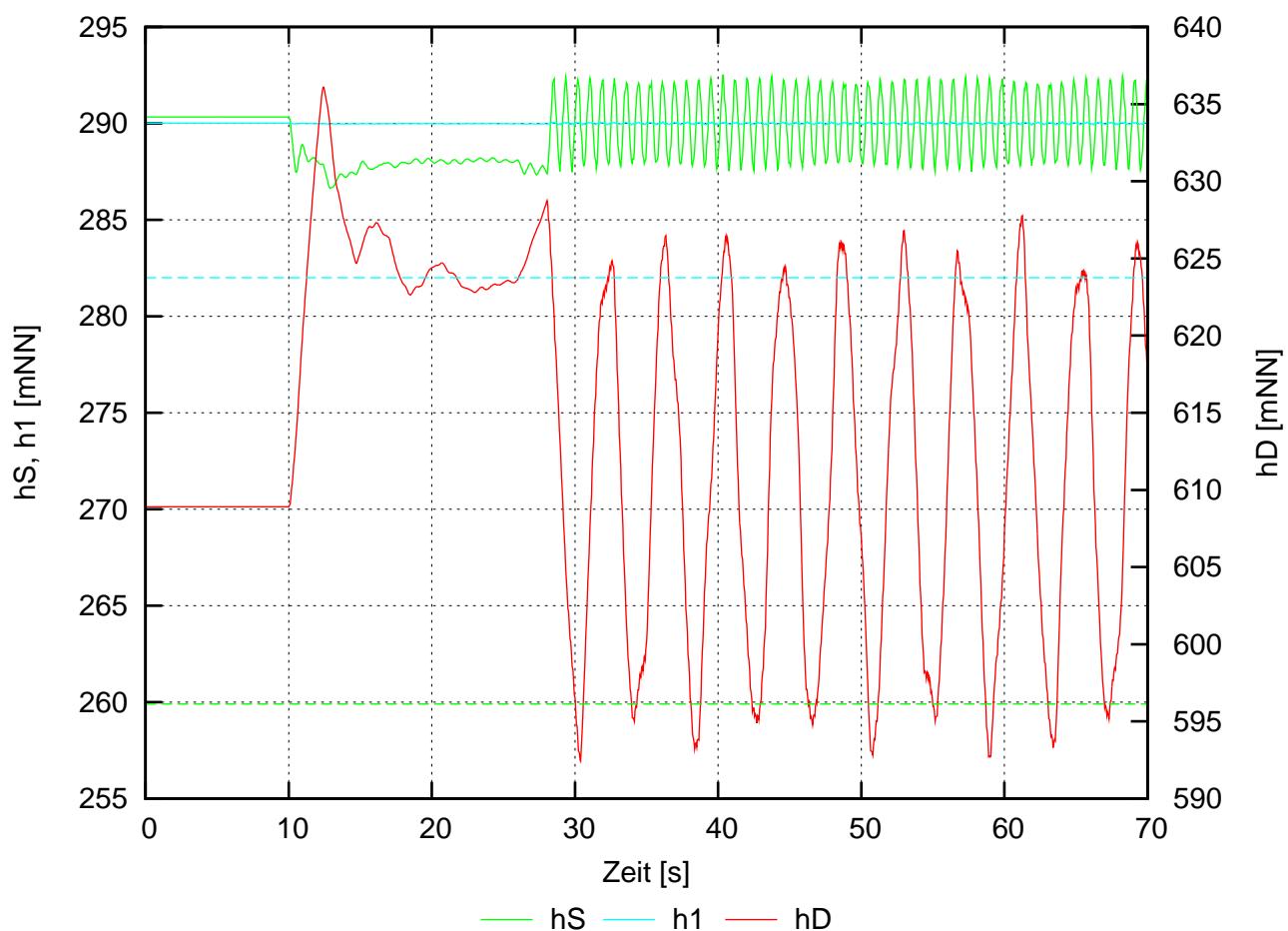
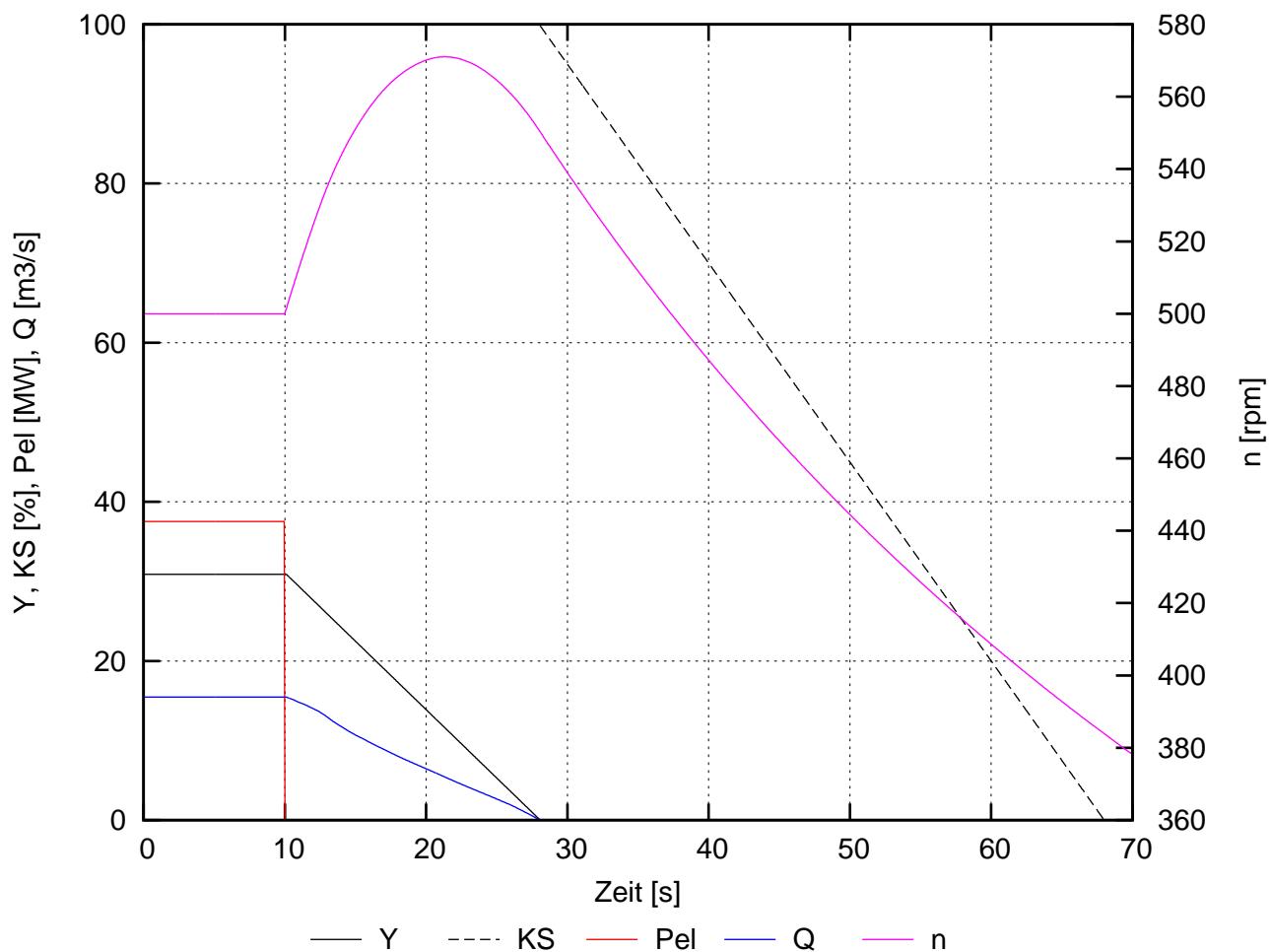


min. und max. Druckhöhe Wasserleitung [mWS]



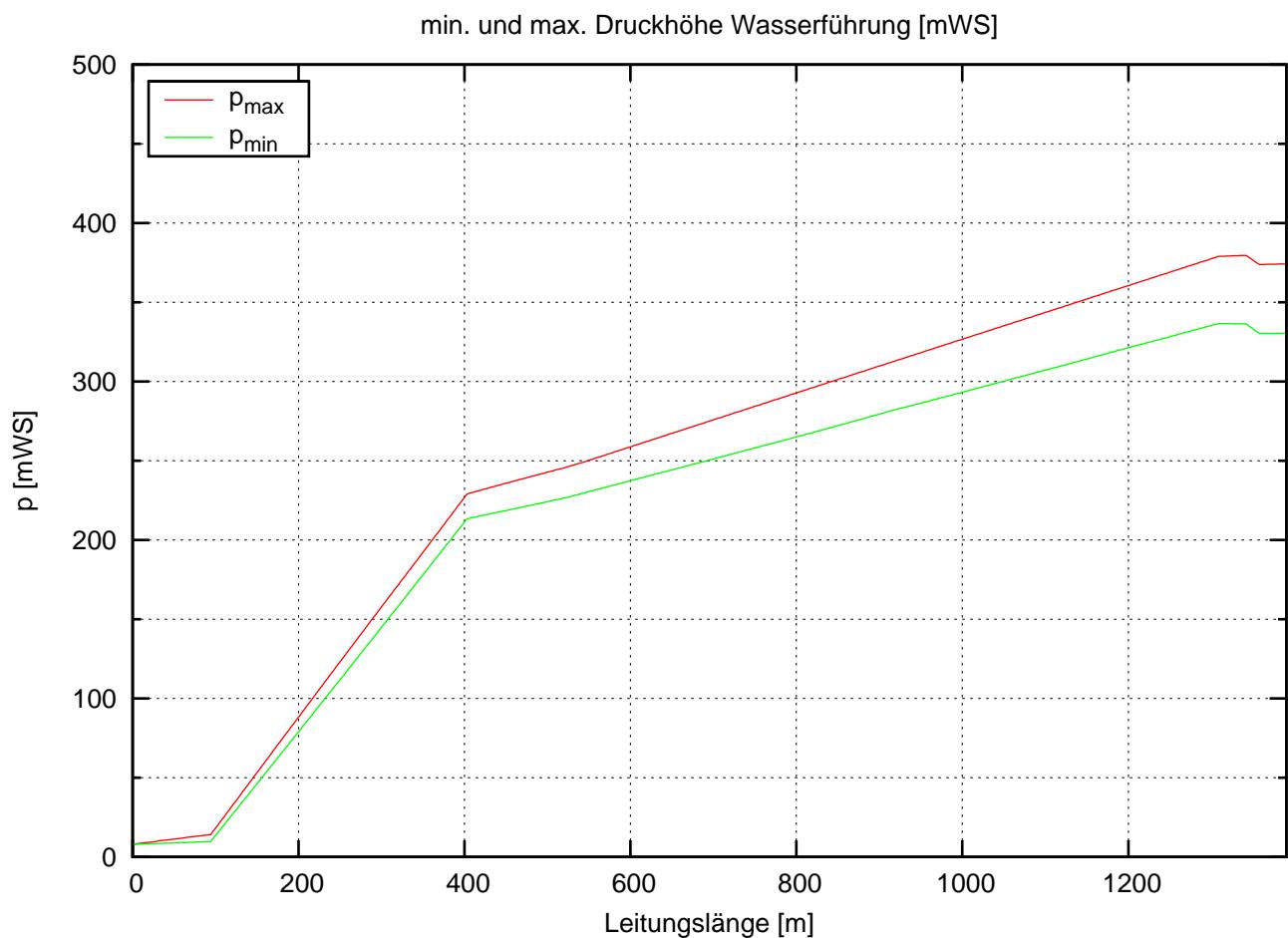
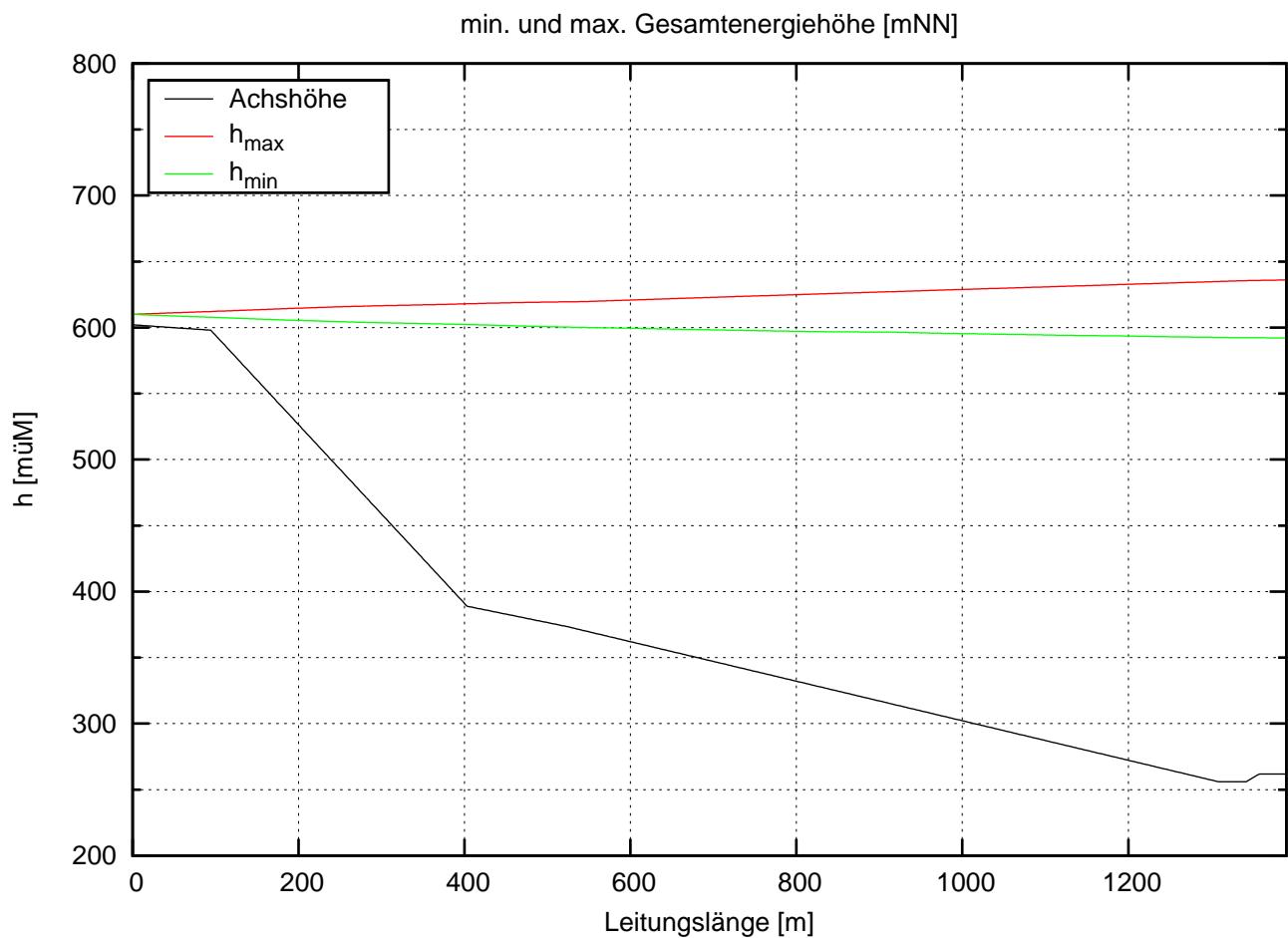
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf aus Tu-Betrieb (Teillast 25%P)



$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

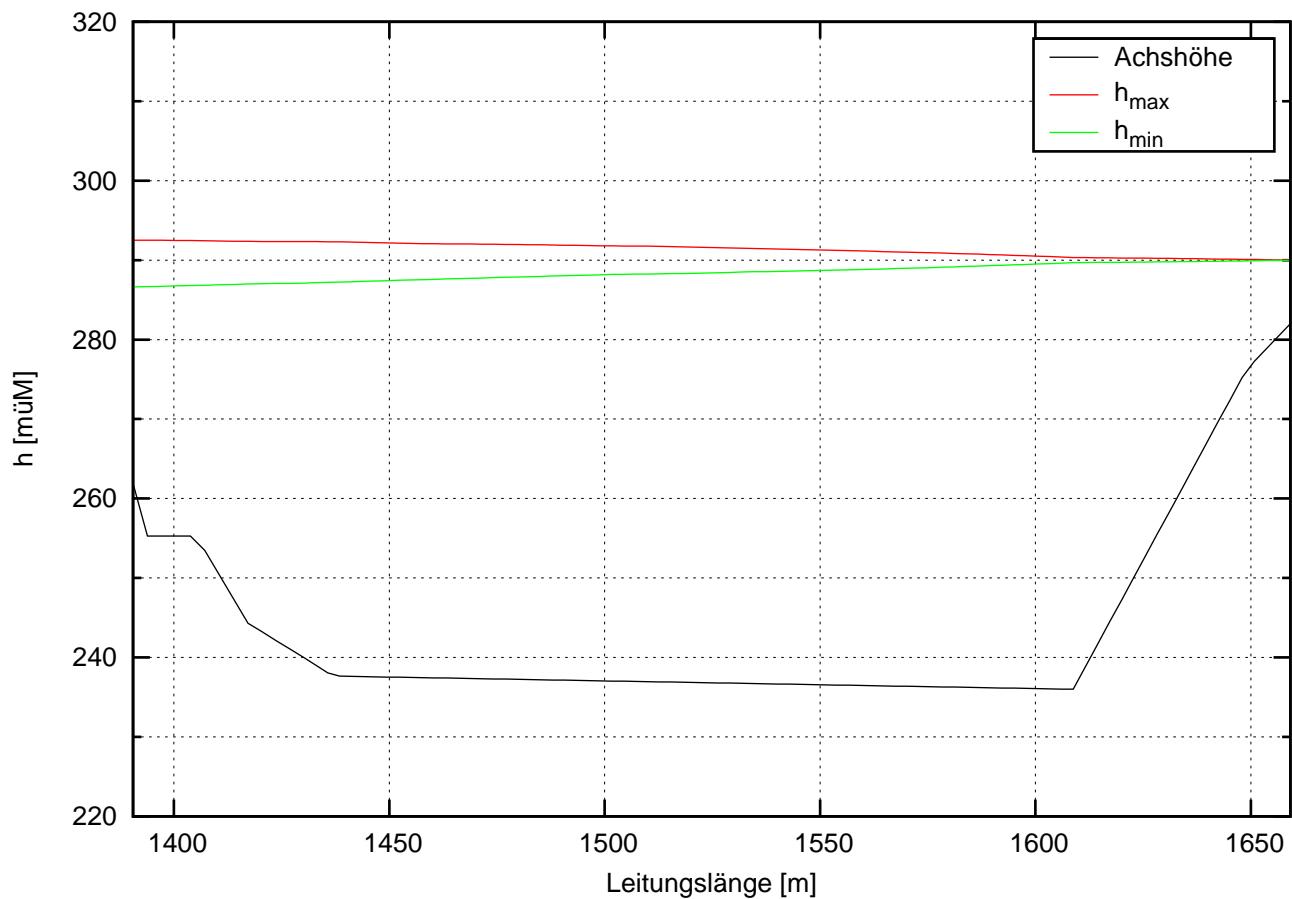
Lastabwurf aus Tu-Betrieb (Teillast 25%P)



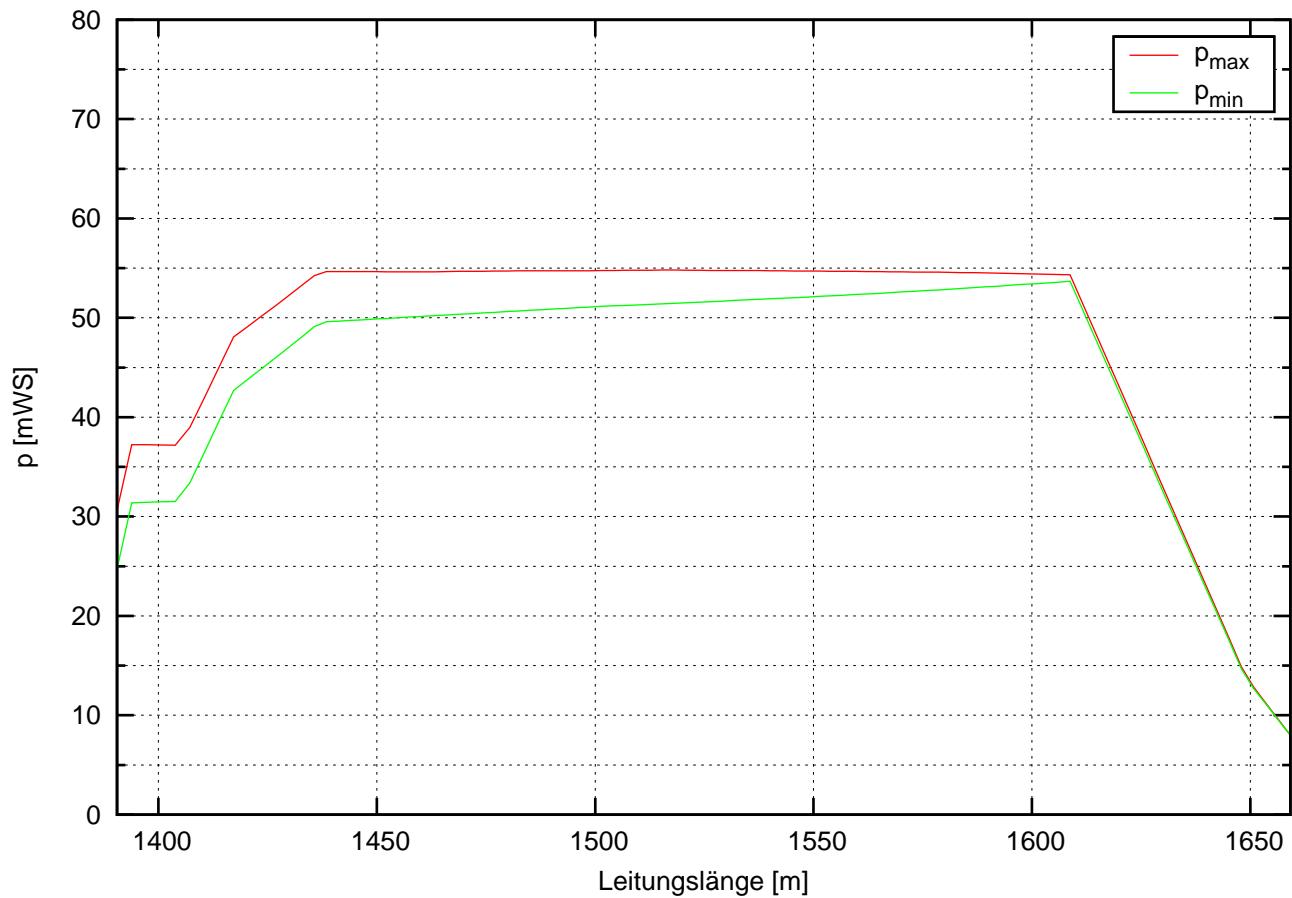
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{\text{OW}} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{\text{UW}} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf aus Tu-Betrieb (Teillast 25%P)

min. und max. Gesamtenergiehöhe [mNN]

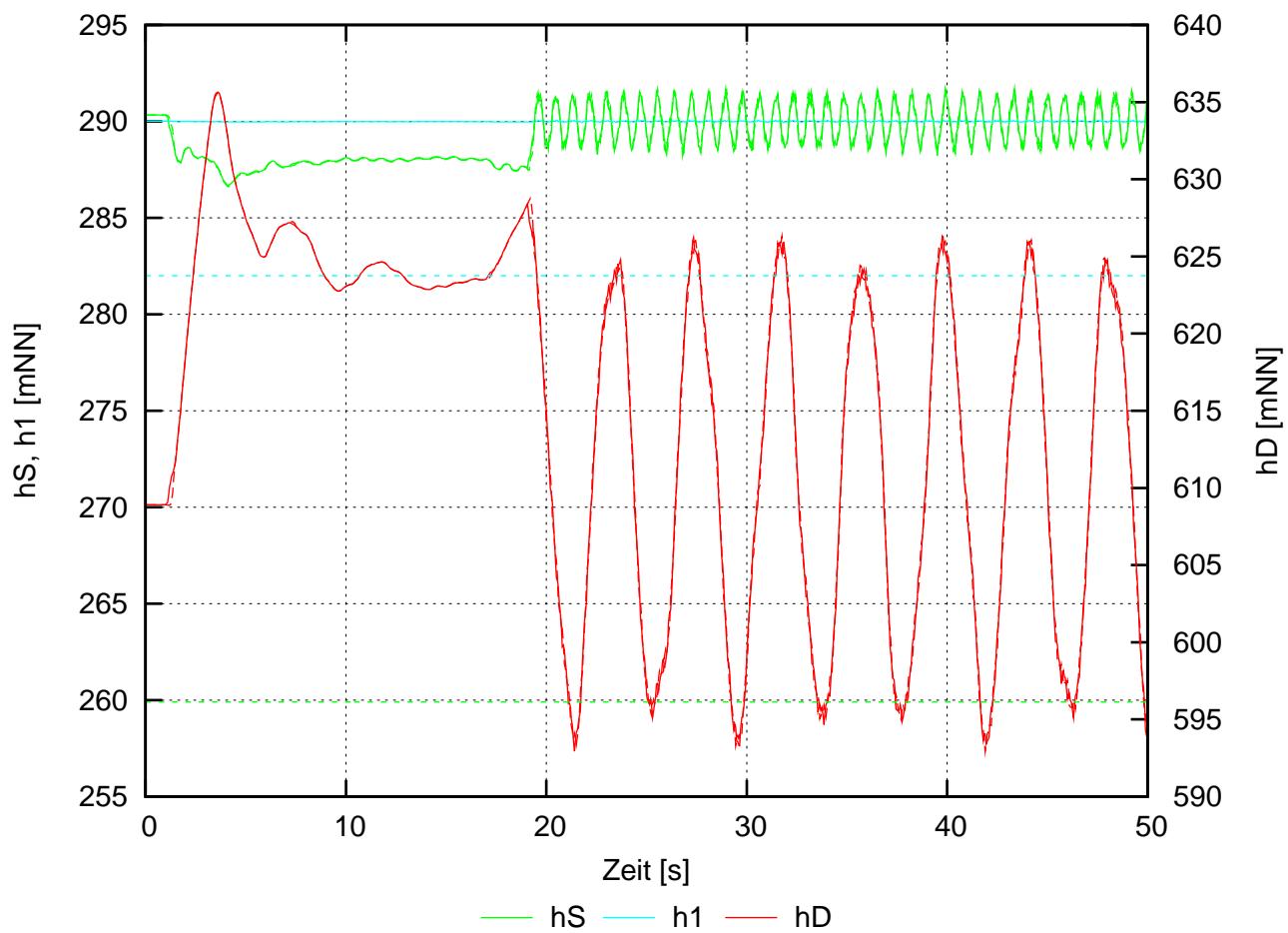
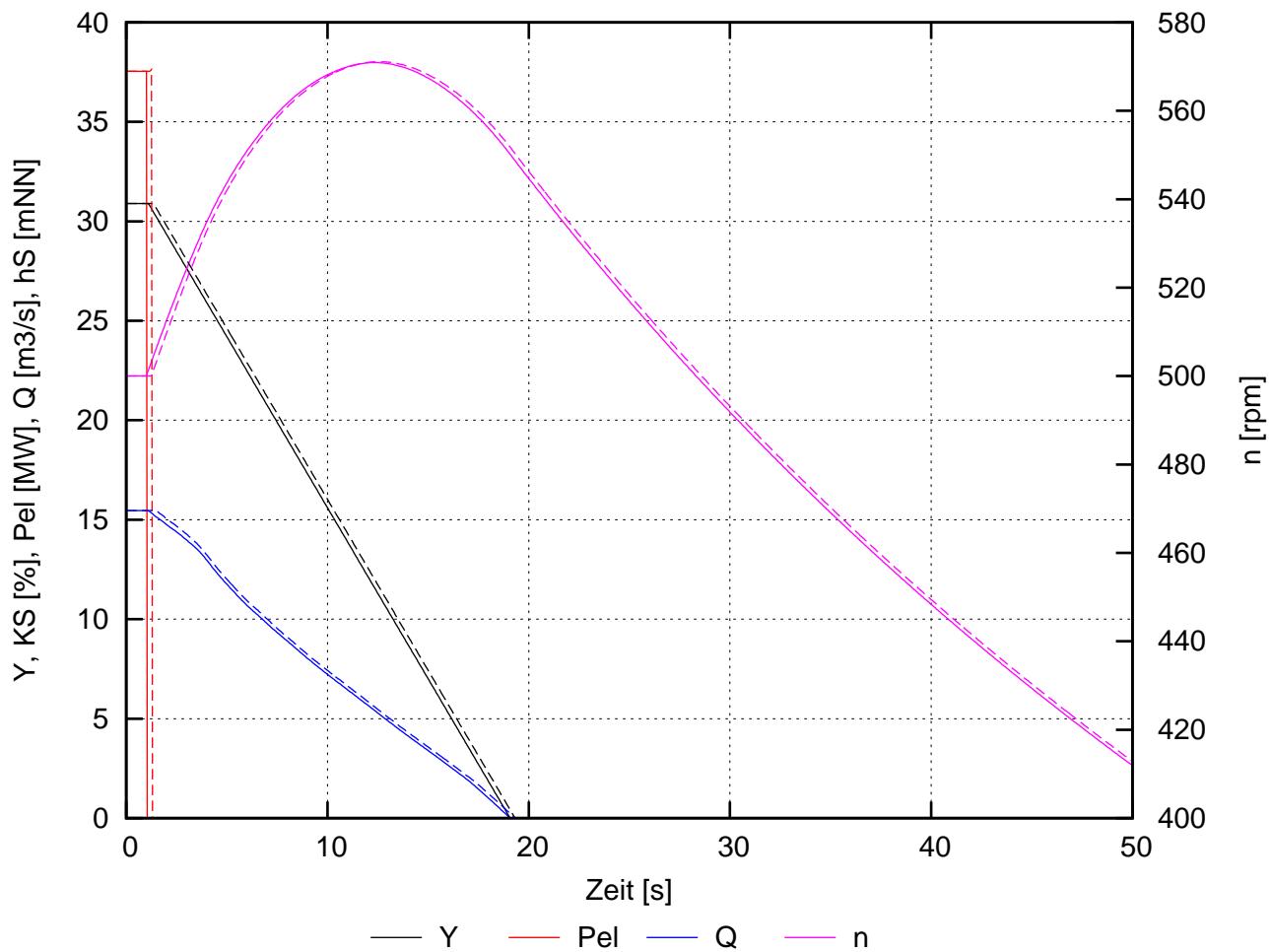


min. und max. Druckhöhe Wasserleitung [mWS]



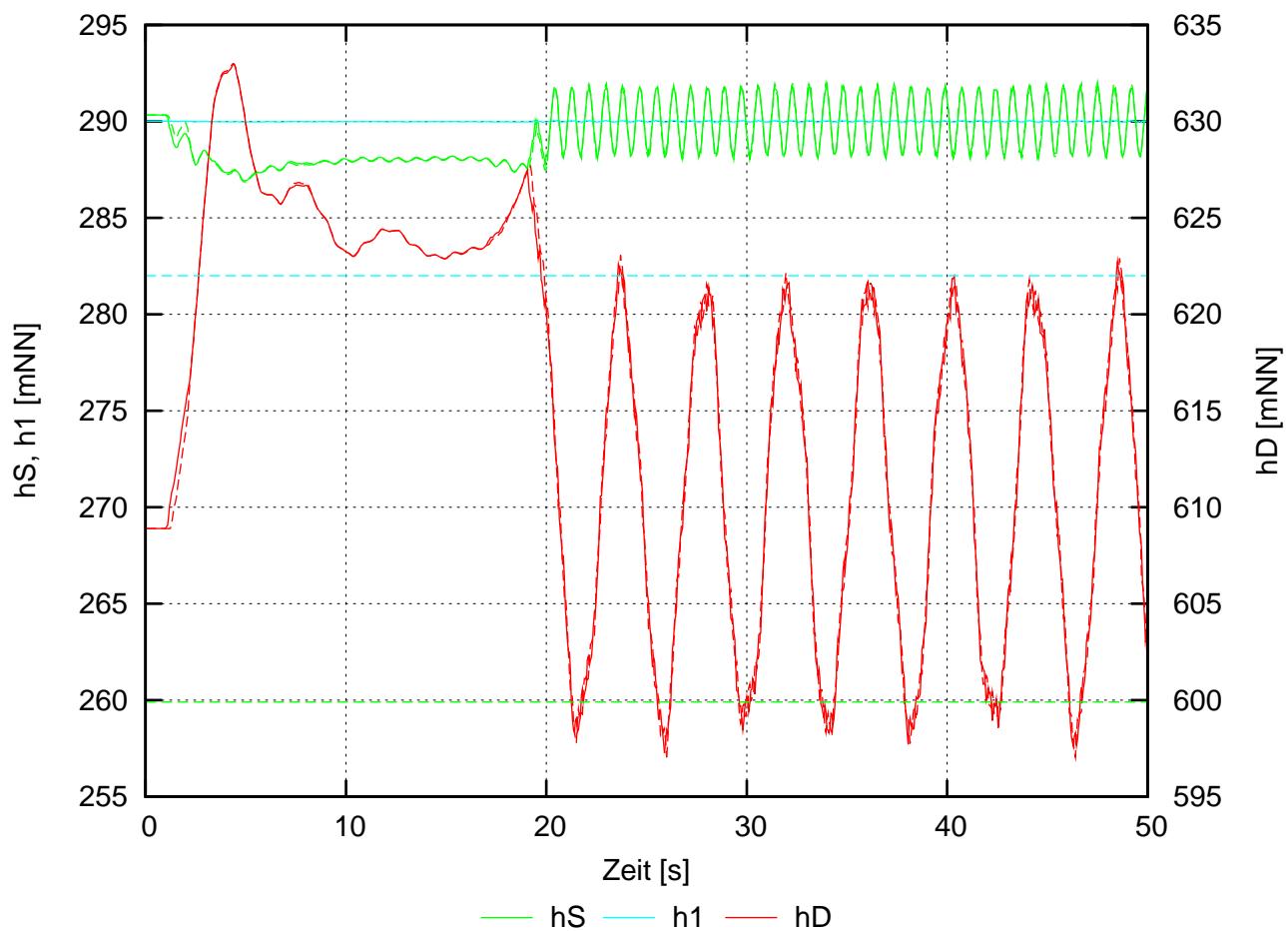
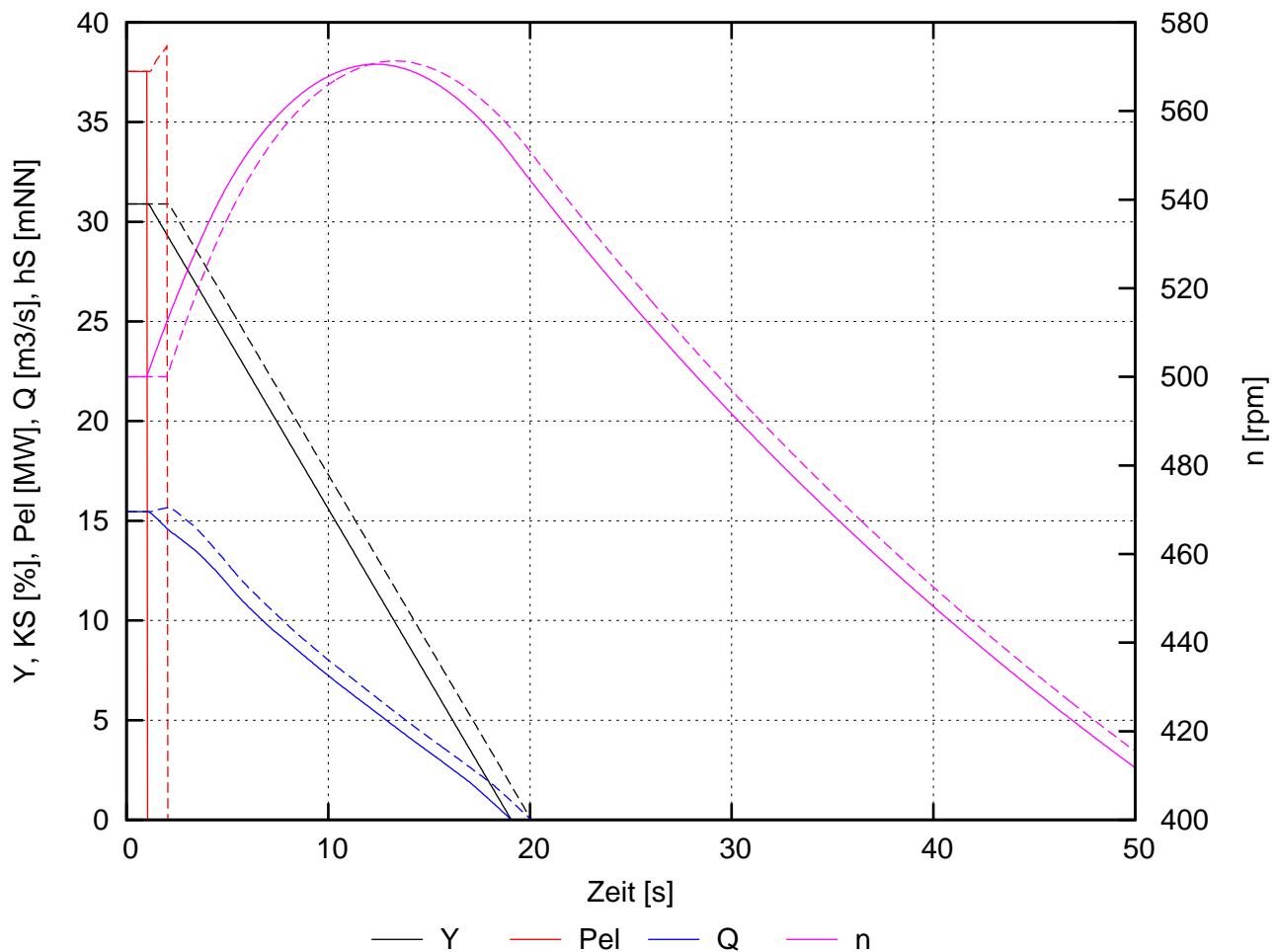
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Teillast (25%P), Tu2 mit 0.25s Verzögerung (hSmin)



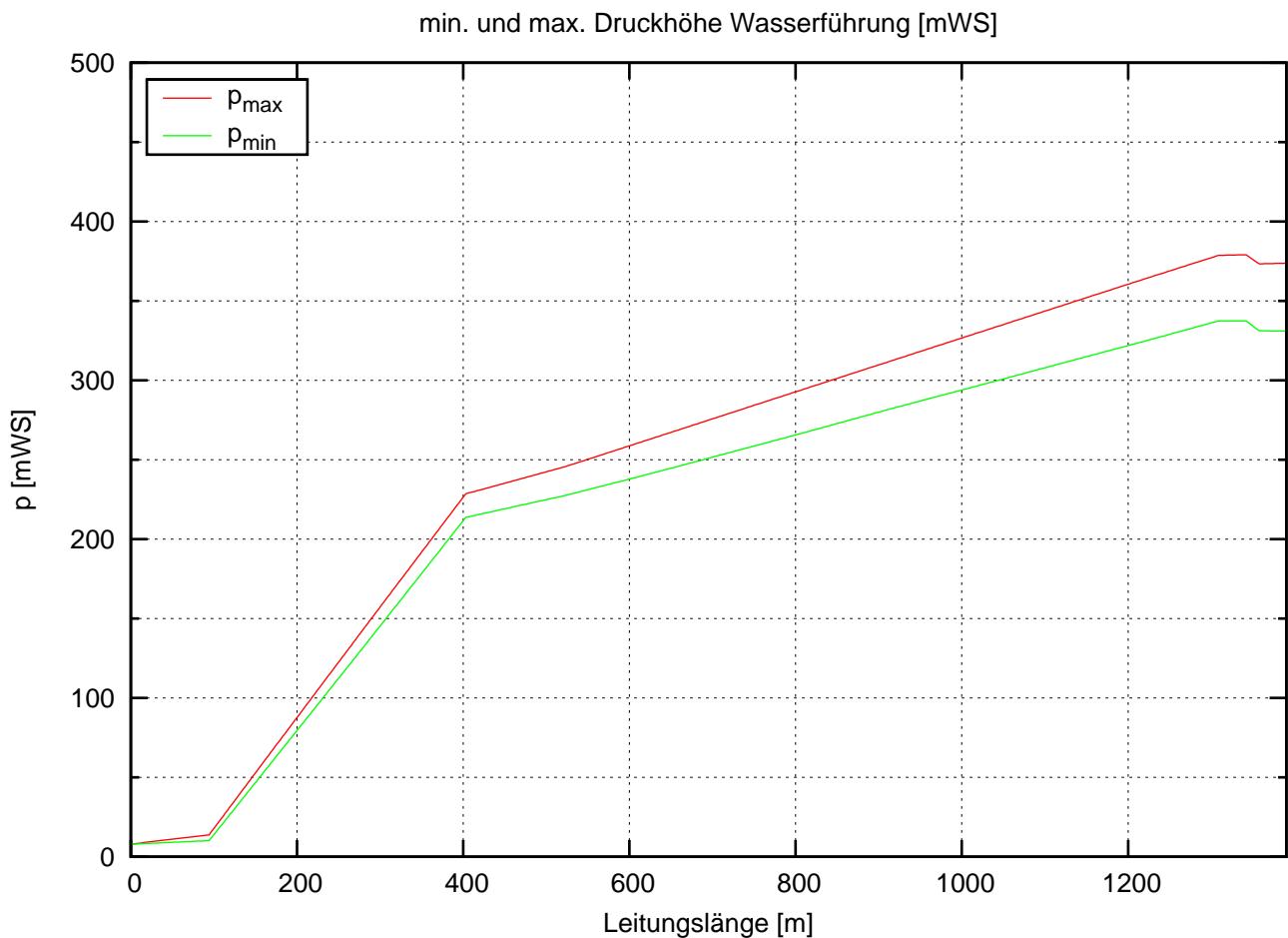
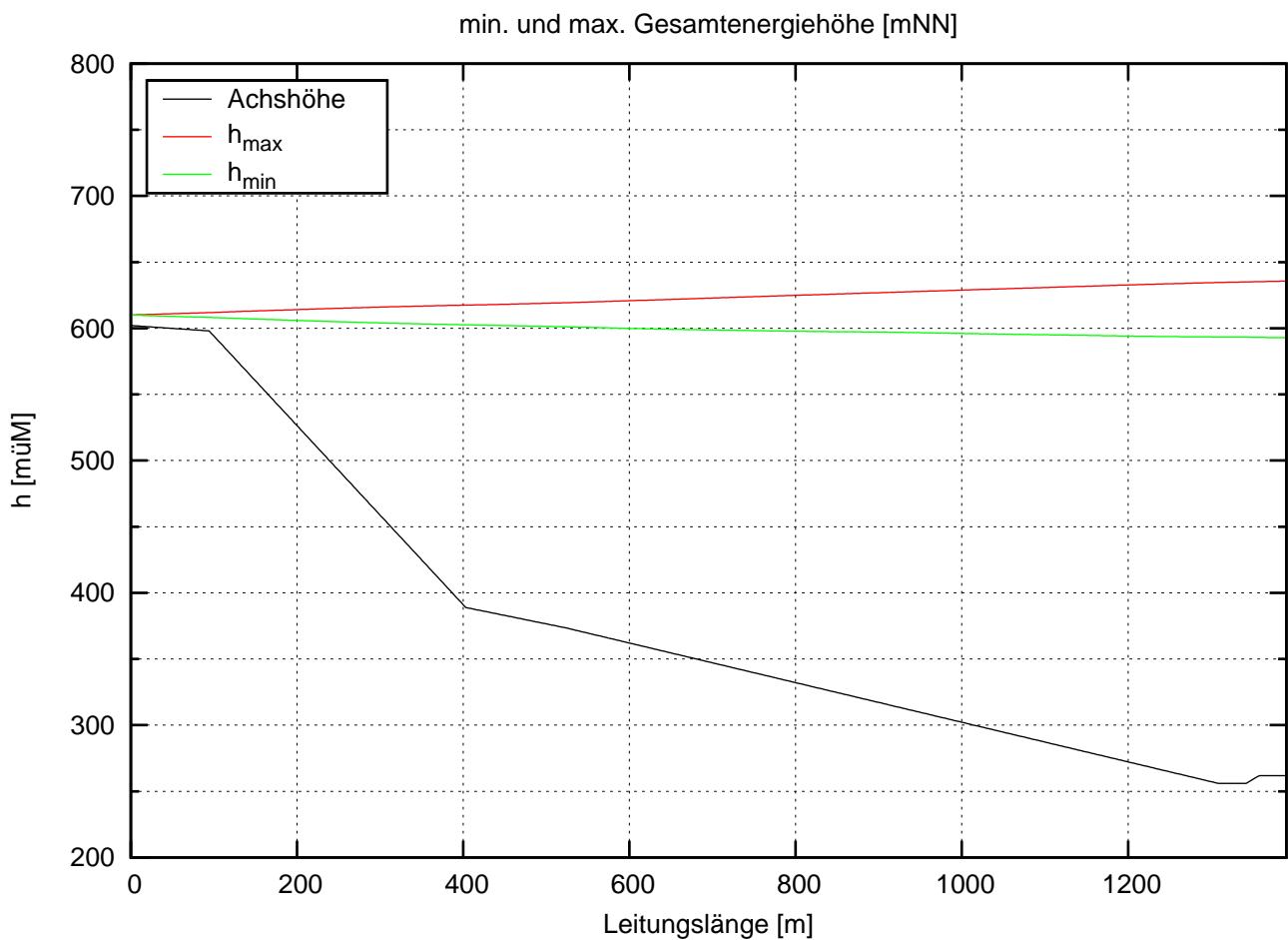
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit 1.0 s Verzögerung (hDmax)



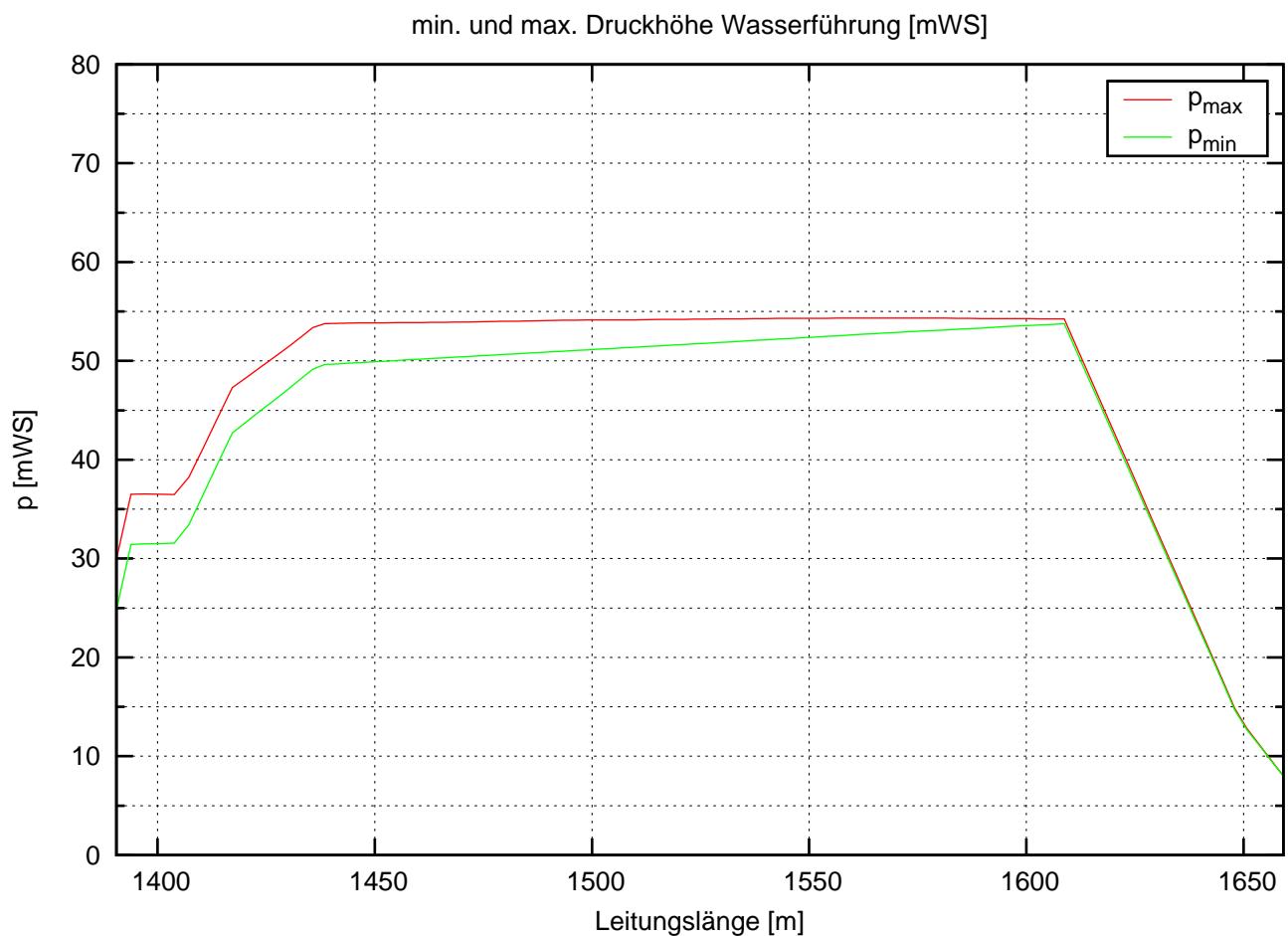
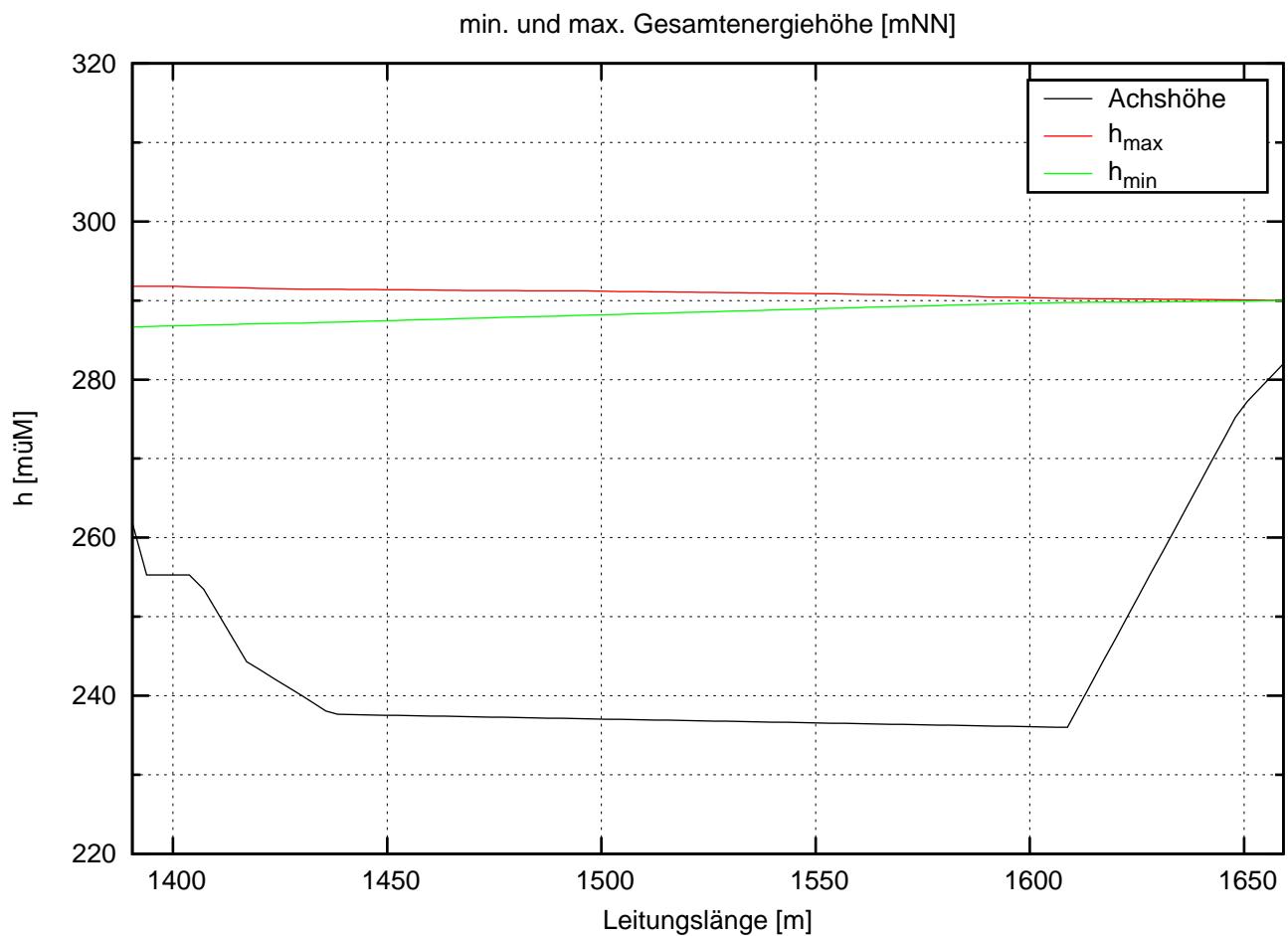
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Teillast (25%P), Tu2 mit 0.25s Verzögerung (hSmin)



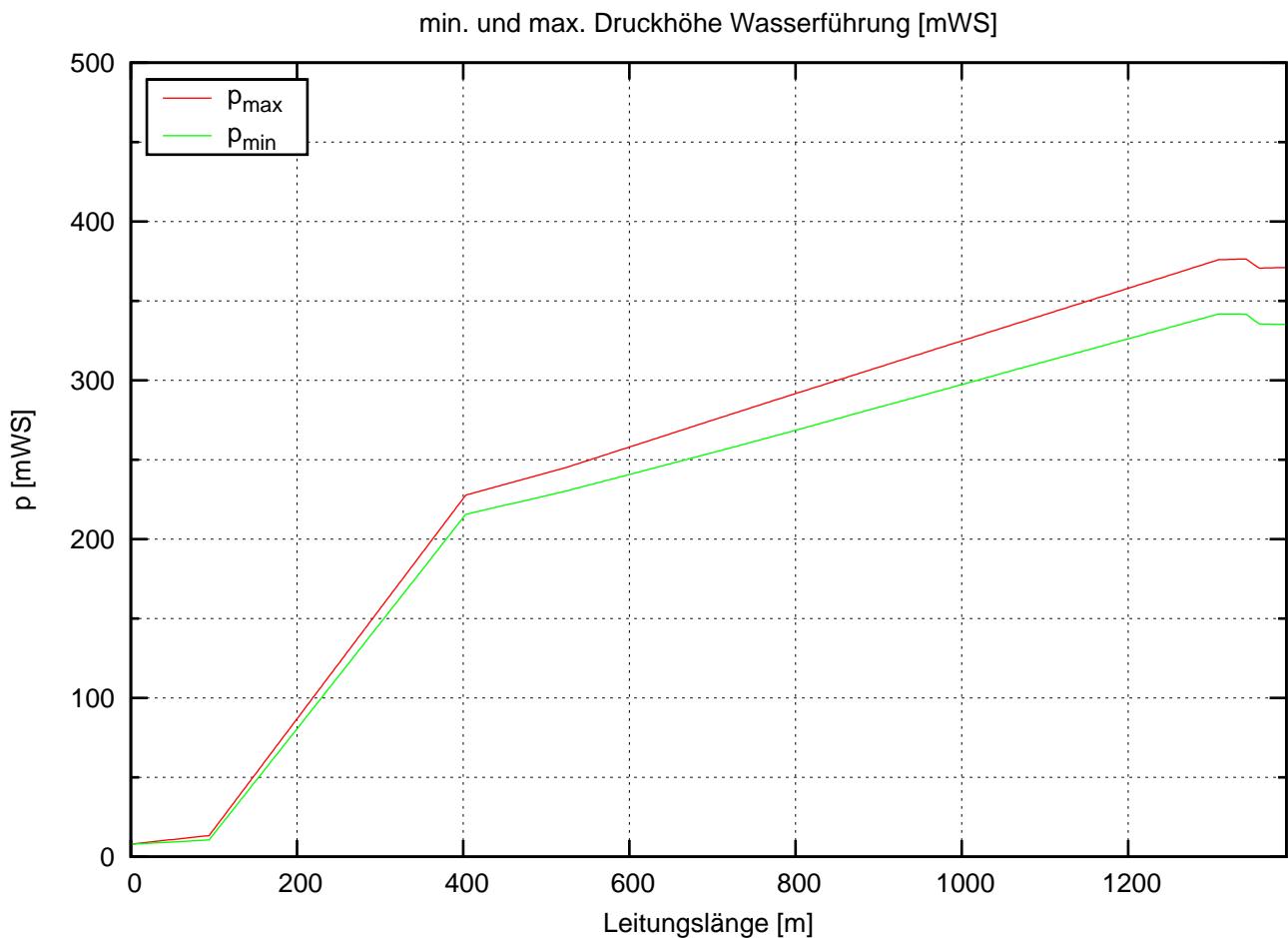
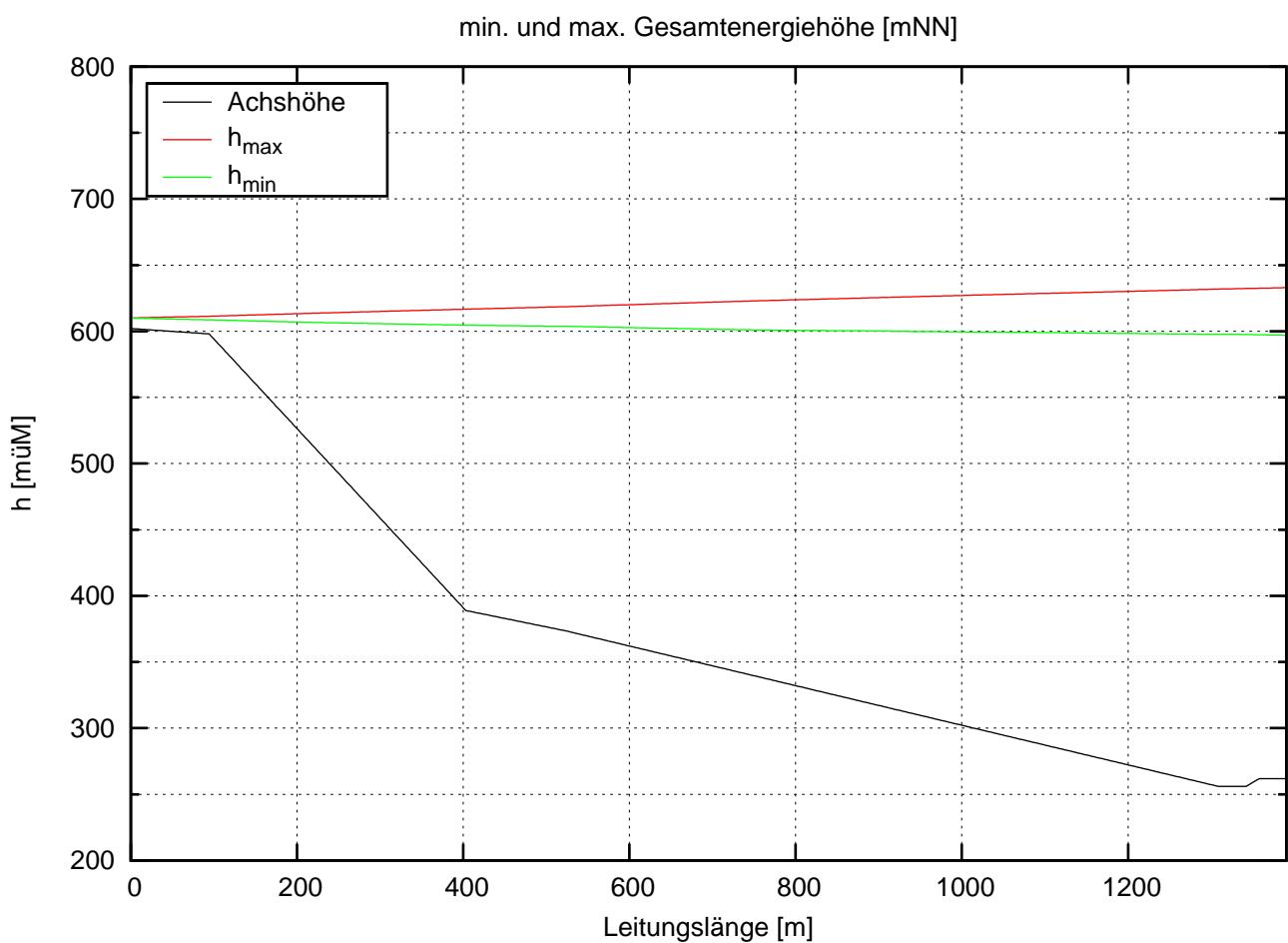
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Teillast (25%P), Tu2 mit 0.25s Verzögerung (hSmin)



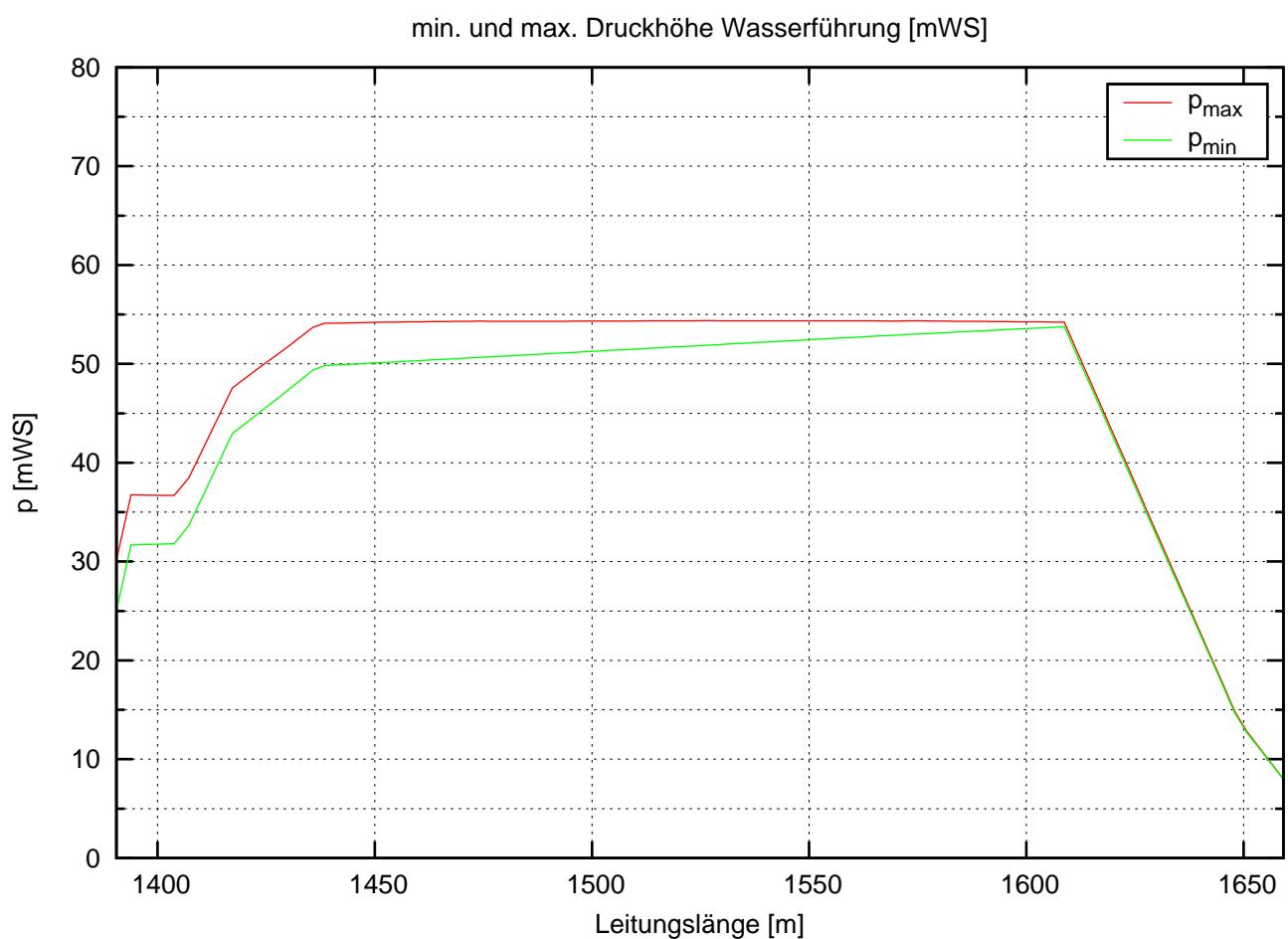
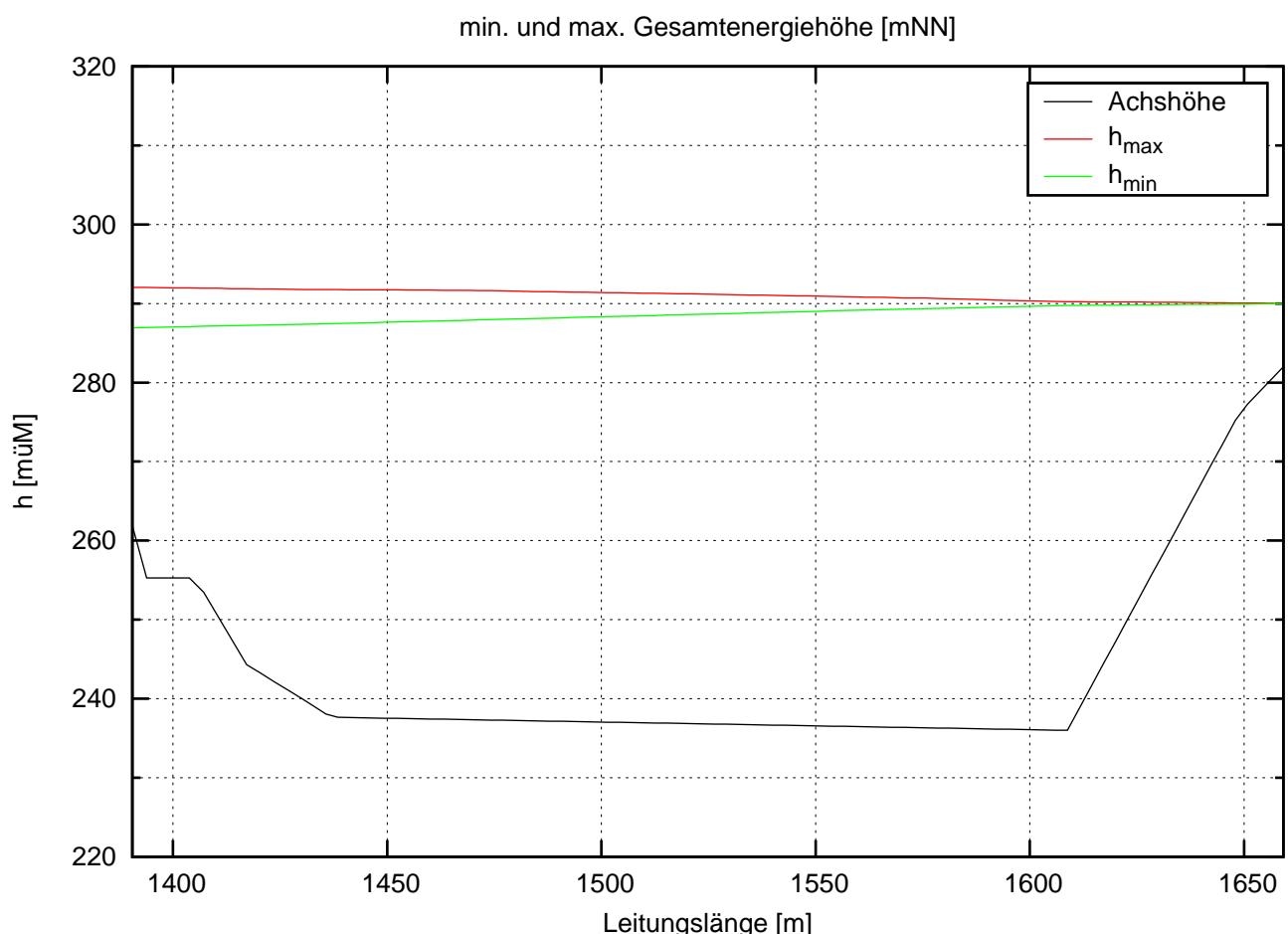
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit 1.0s Verzögerung (hDmax)



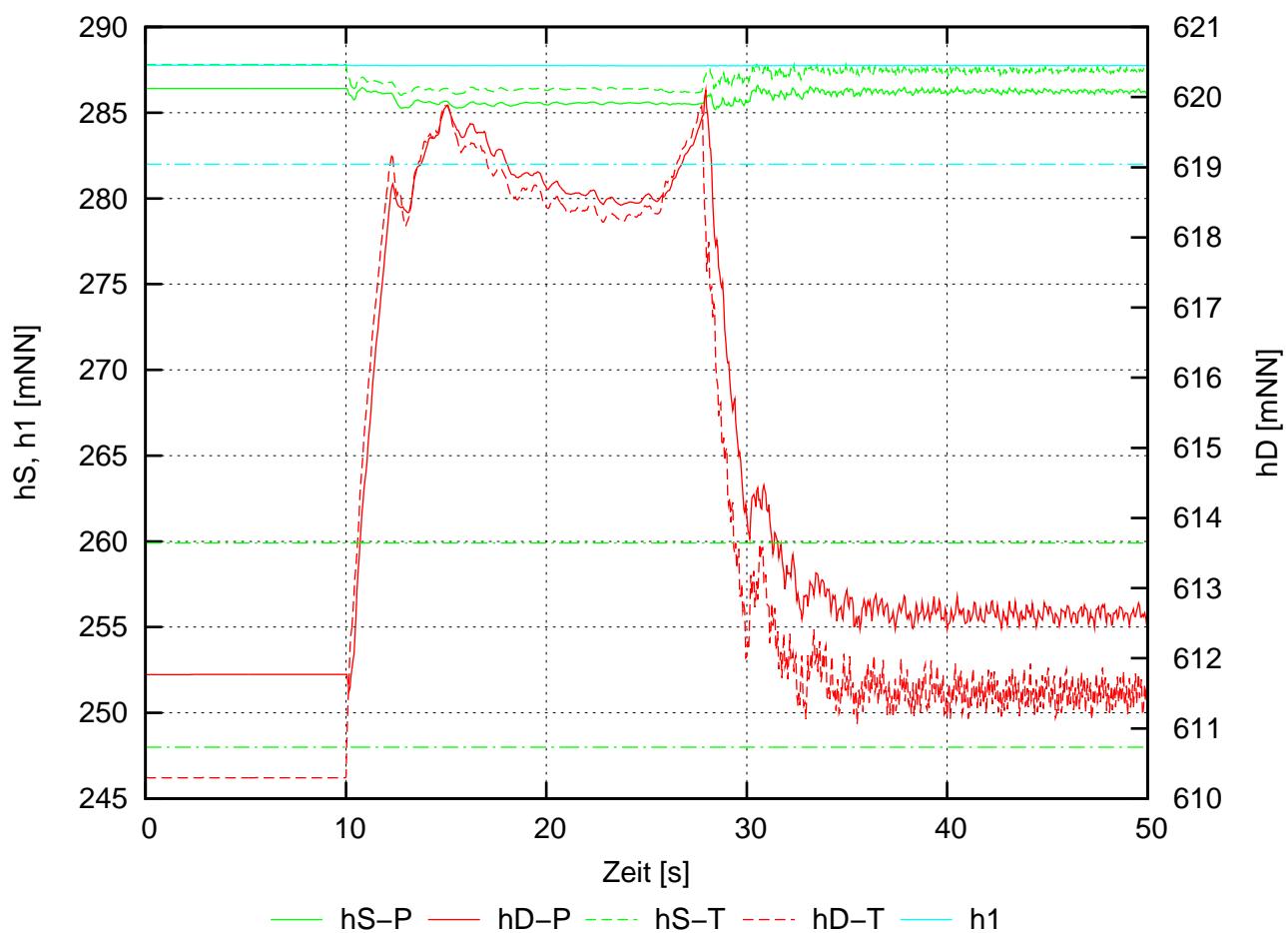
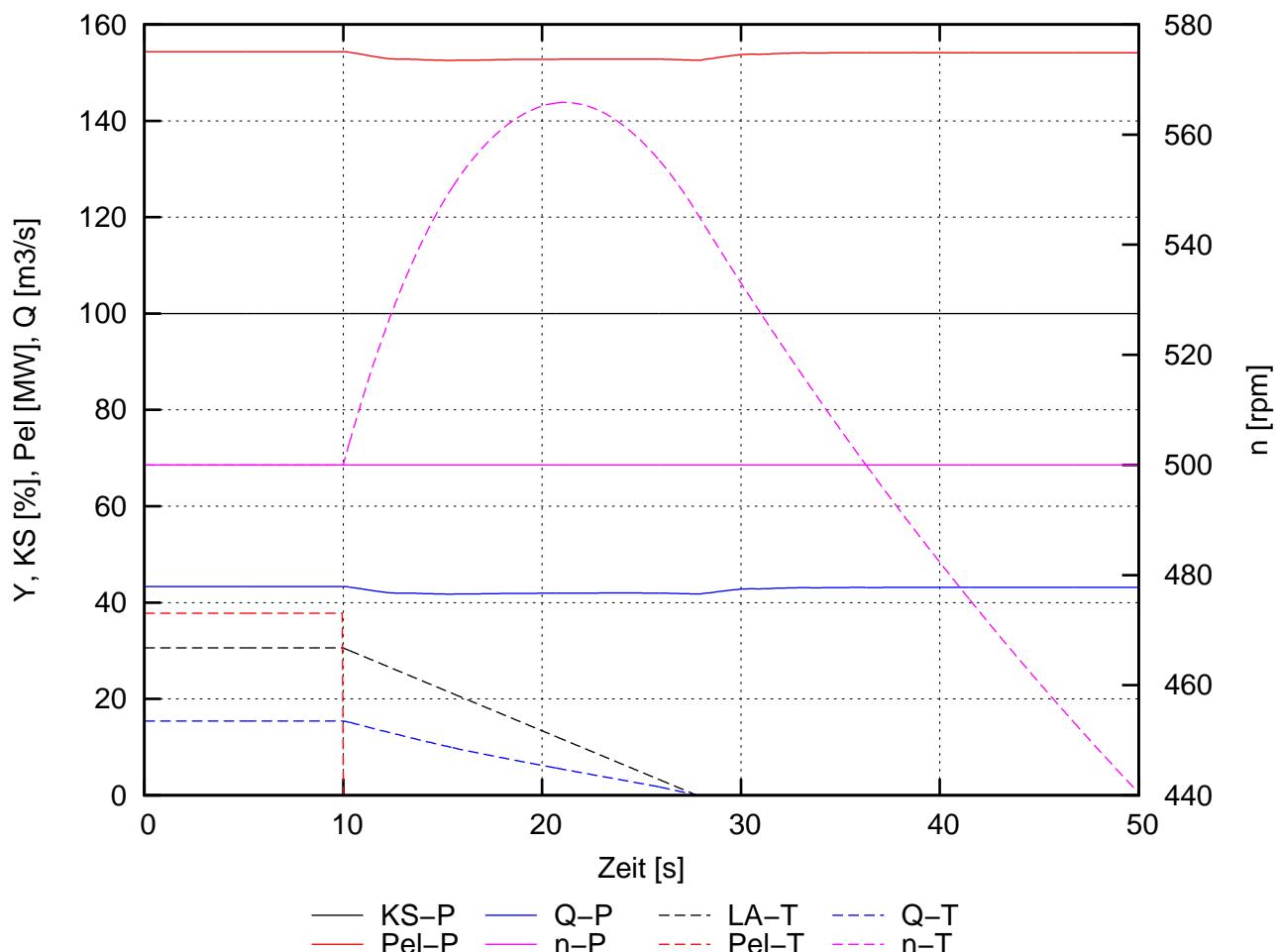
$H_{\min} = 320.0 \text{ mWS}$: $H_{OW} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UW} = 290.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf Tu1+2 aus Vollast, Tu2 mit 1.0s Verzögerung (hDmax)



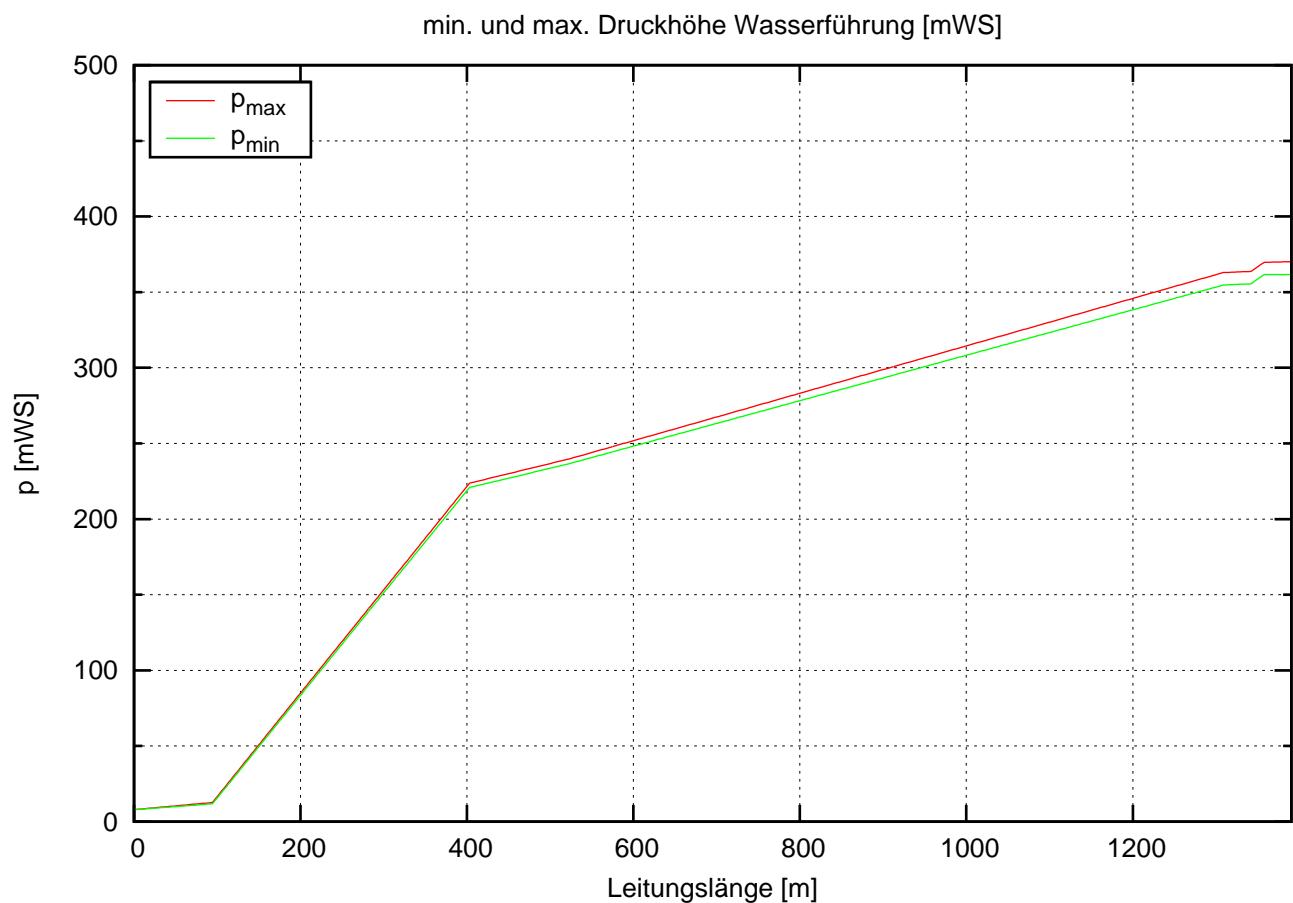
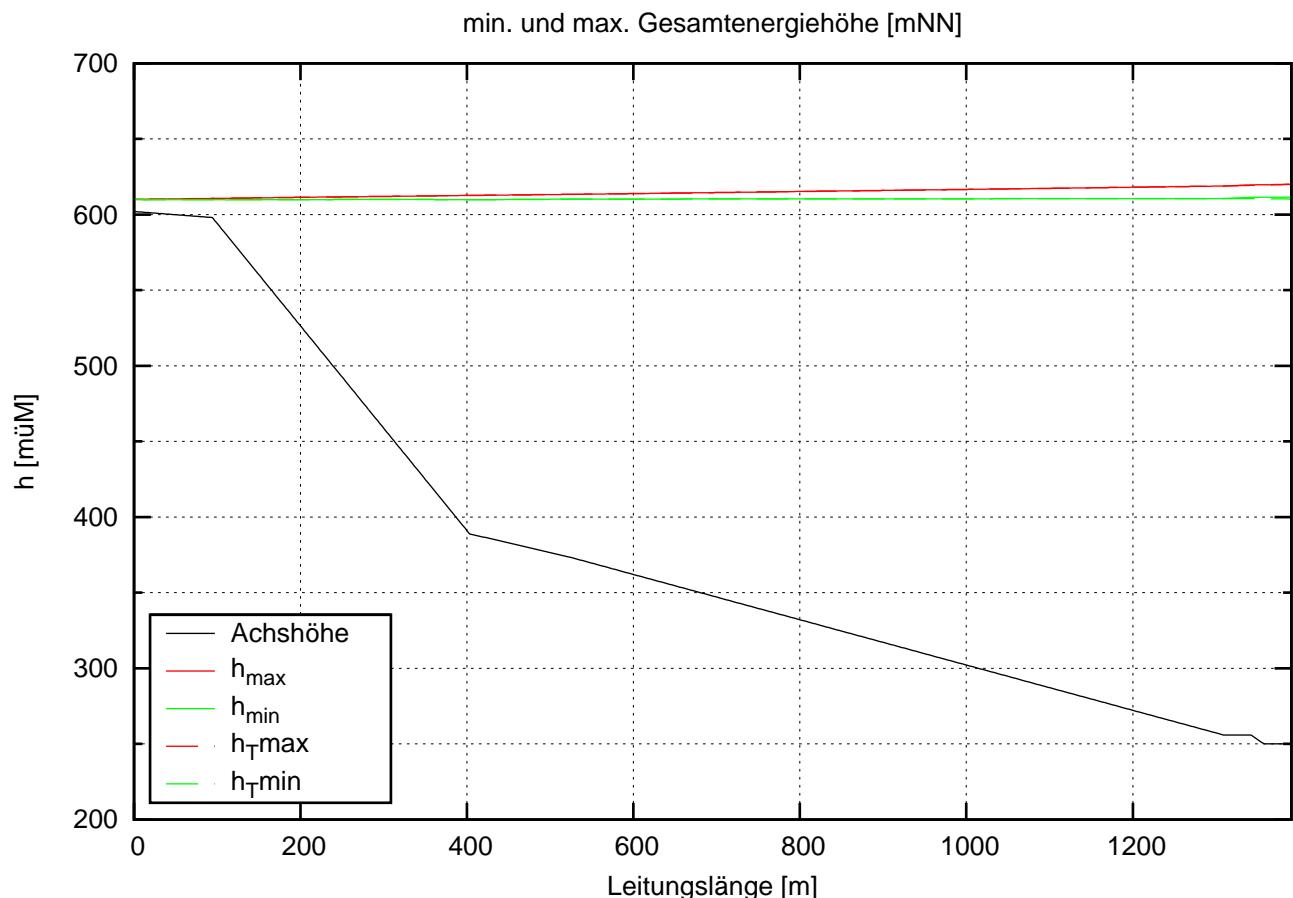
H = 322.0 mWS: H_{OWmin} = 610.0 mNN, H_{UWmin} = 288.0 mNN

Lastabwurf Tu1 aus Mischbetrieb Tu1 (Teillast 25%P) und Pu2



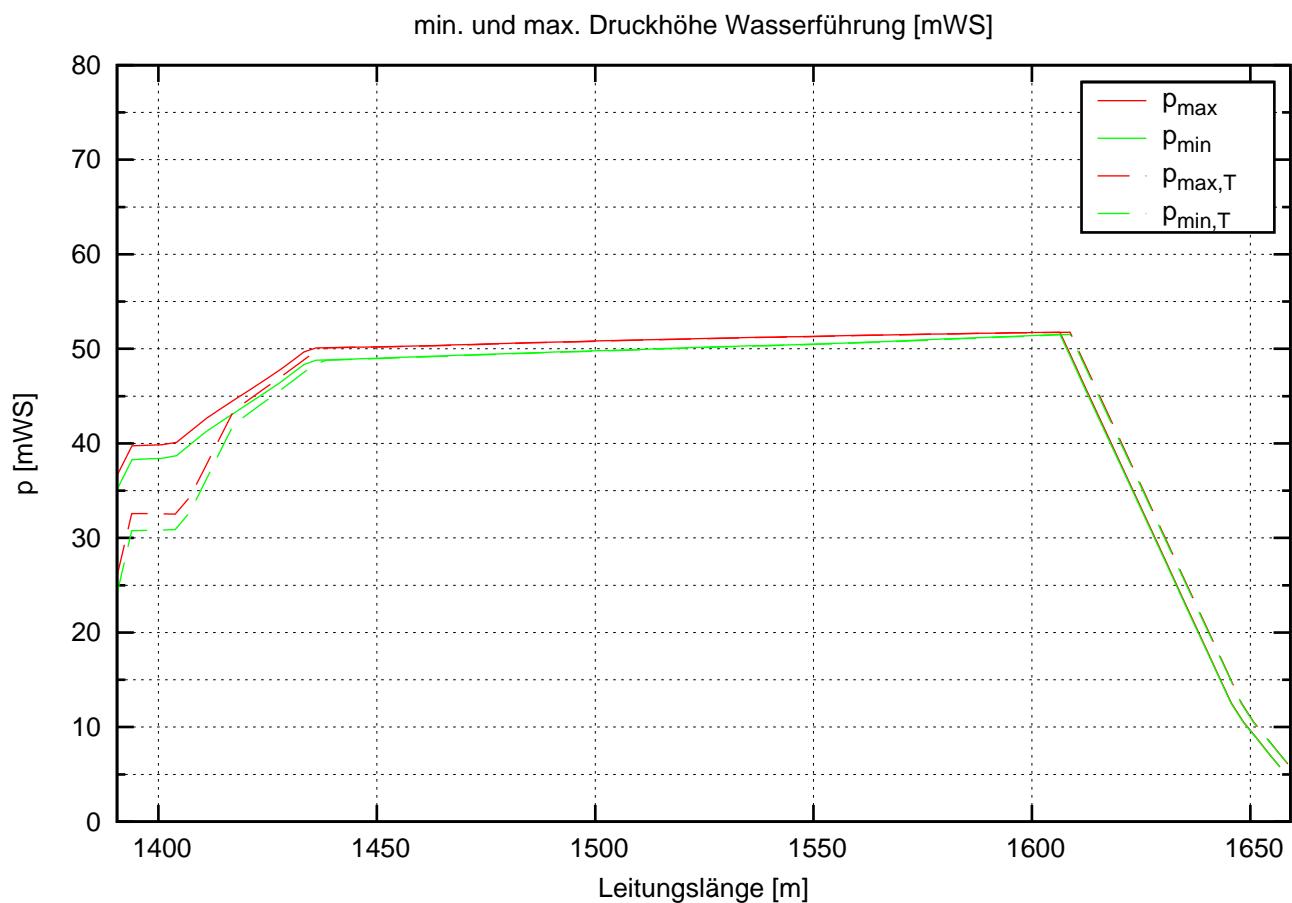
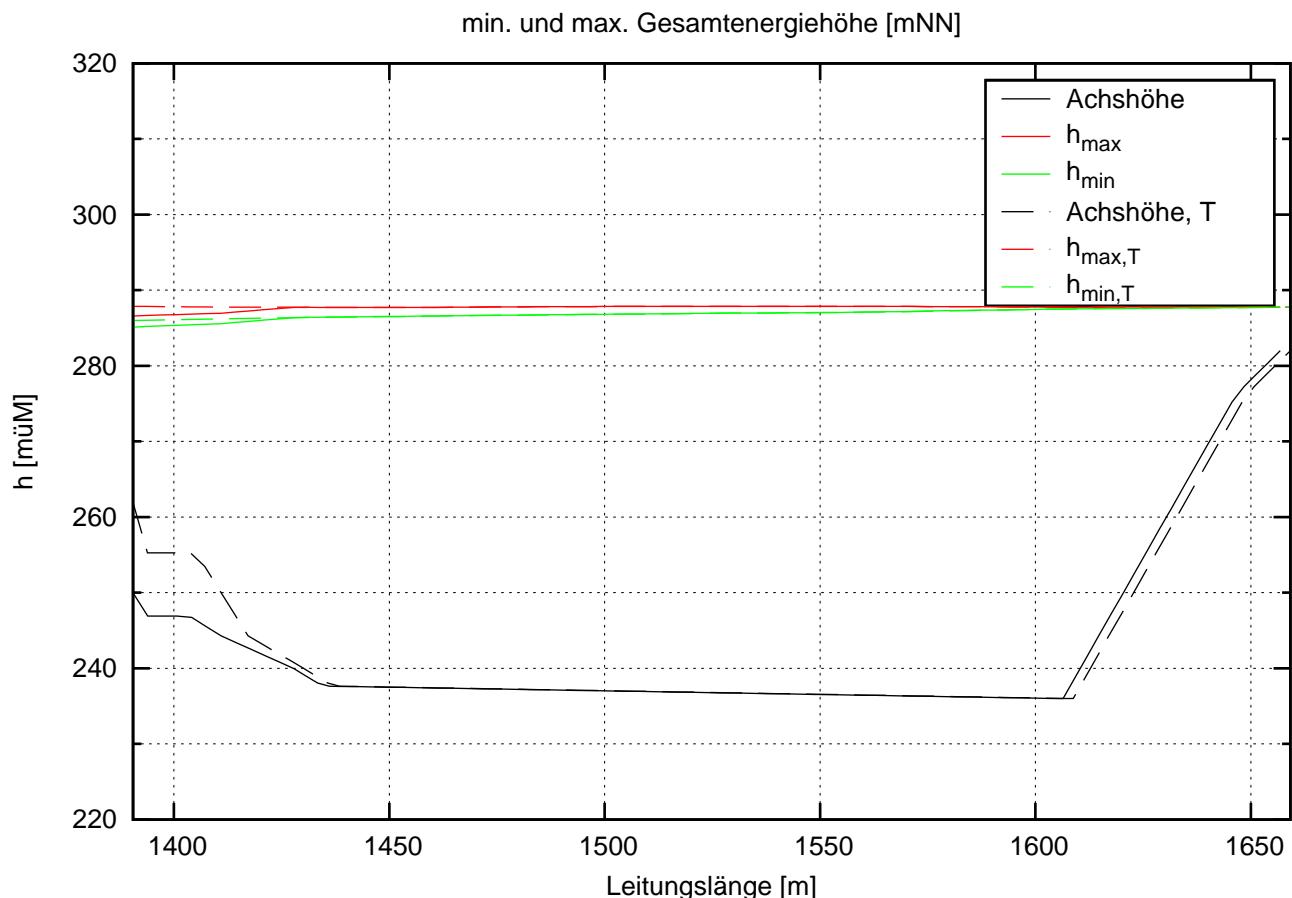
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Tu1 aus Mischbetrieb Tu1 (Teillast 25%P) und Pu2



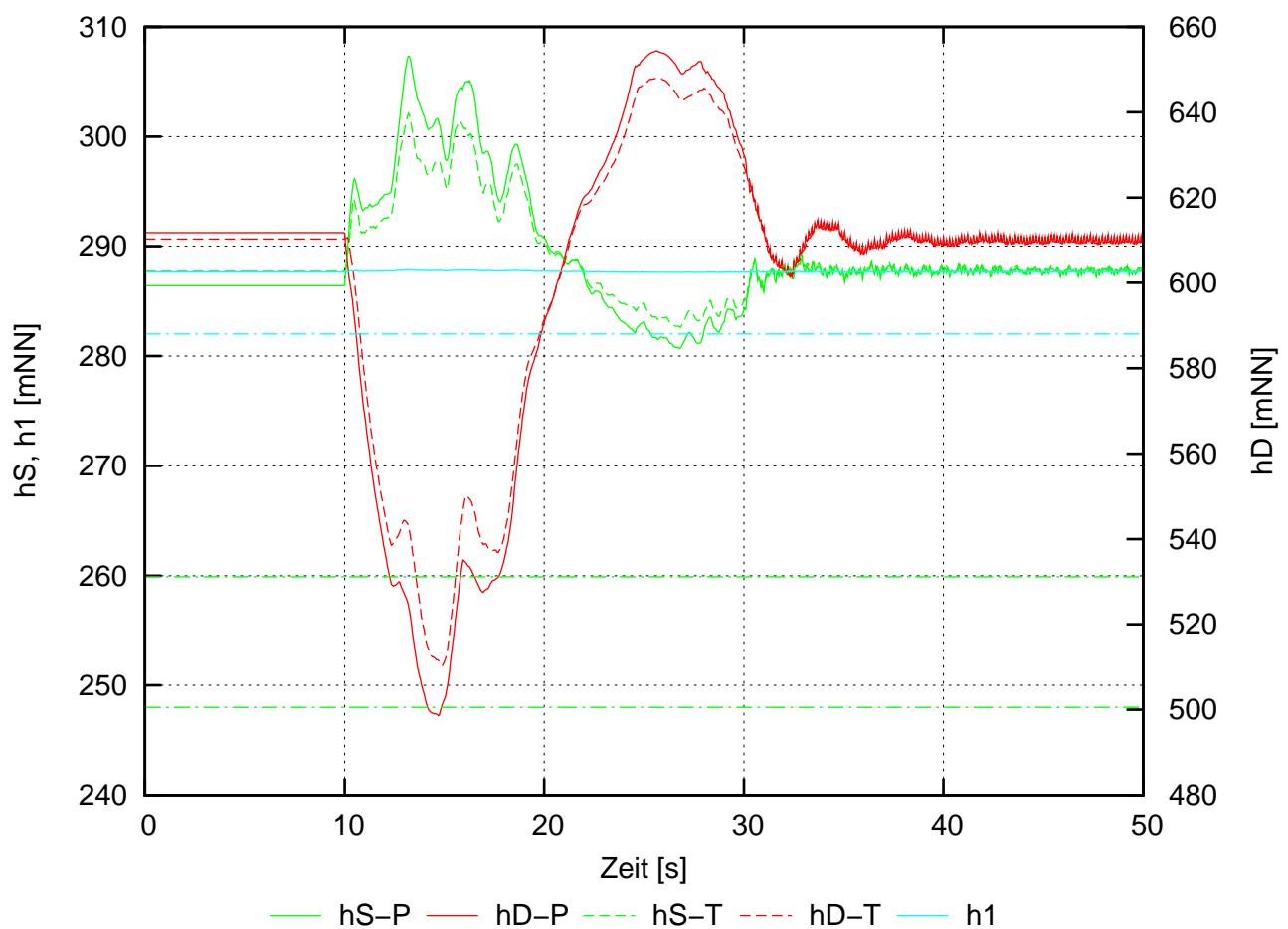
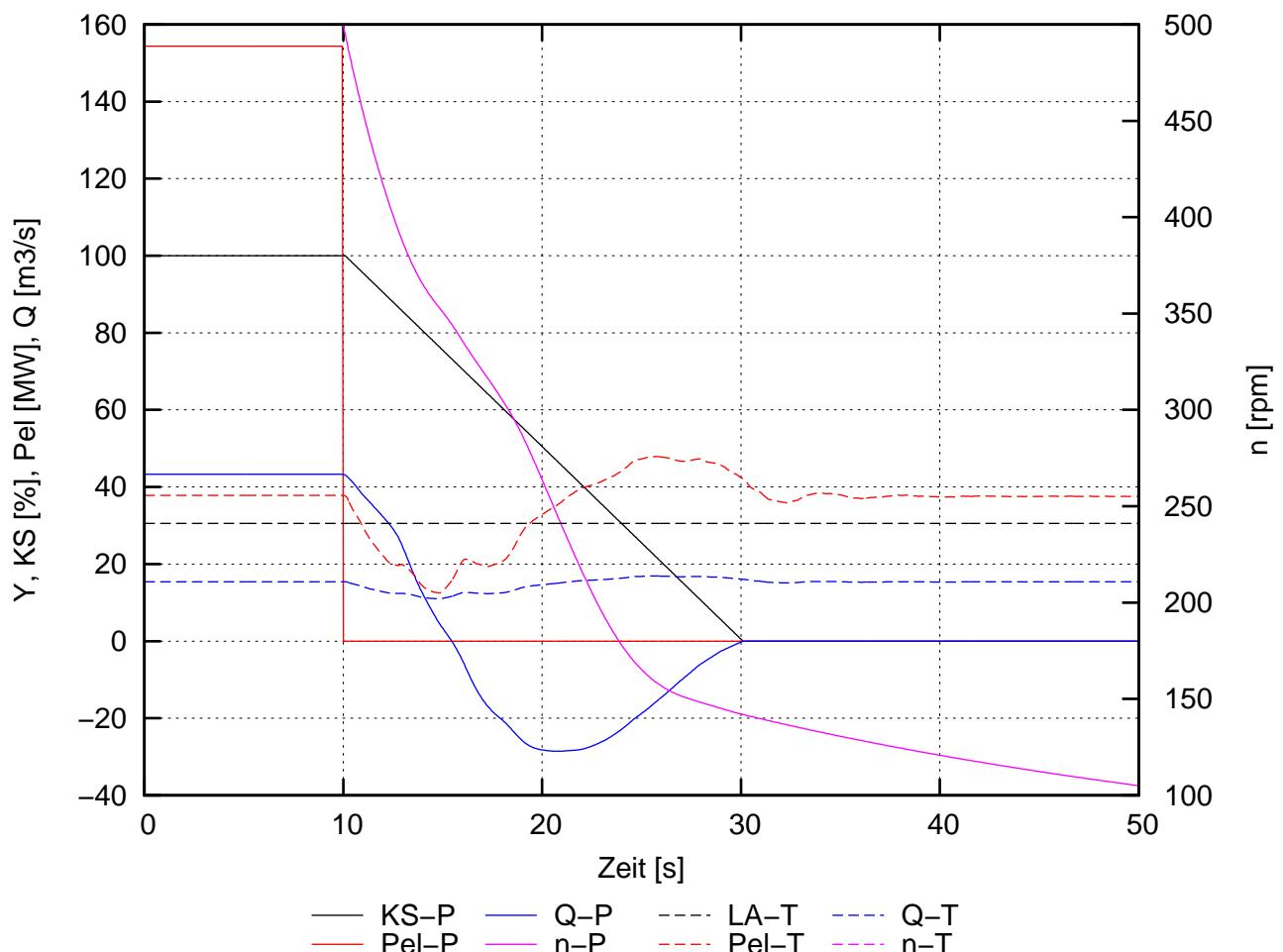
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Tu1 aus Mischbetrieb Tu1 (Teillast 25%P) und Pu2



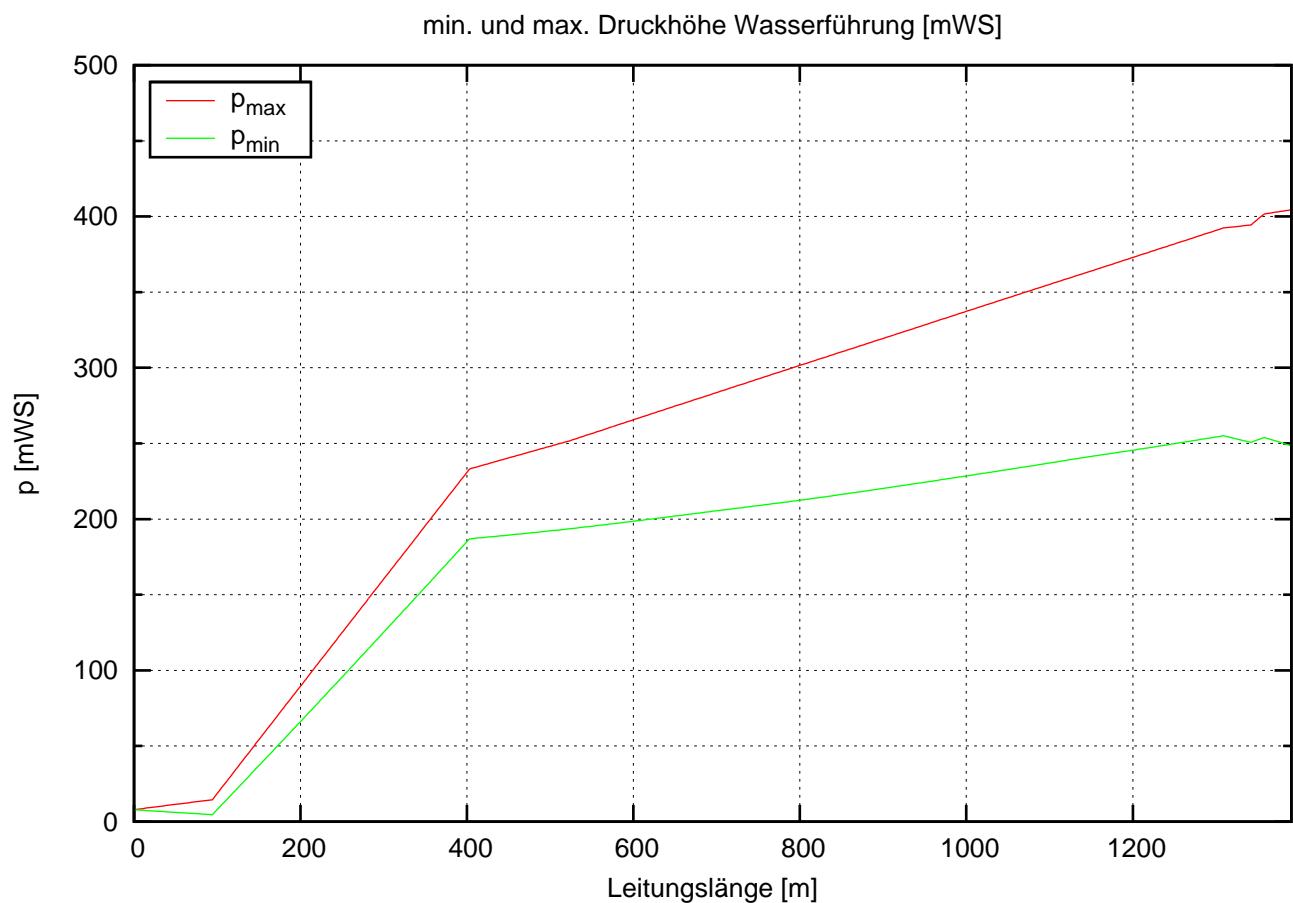
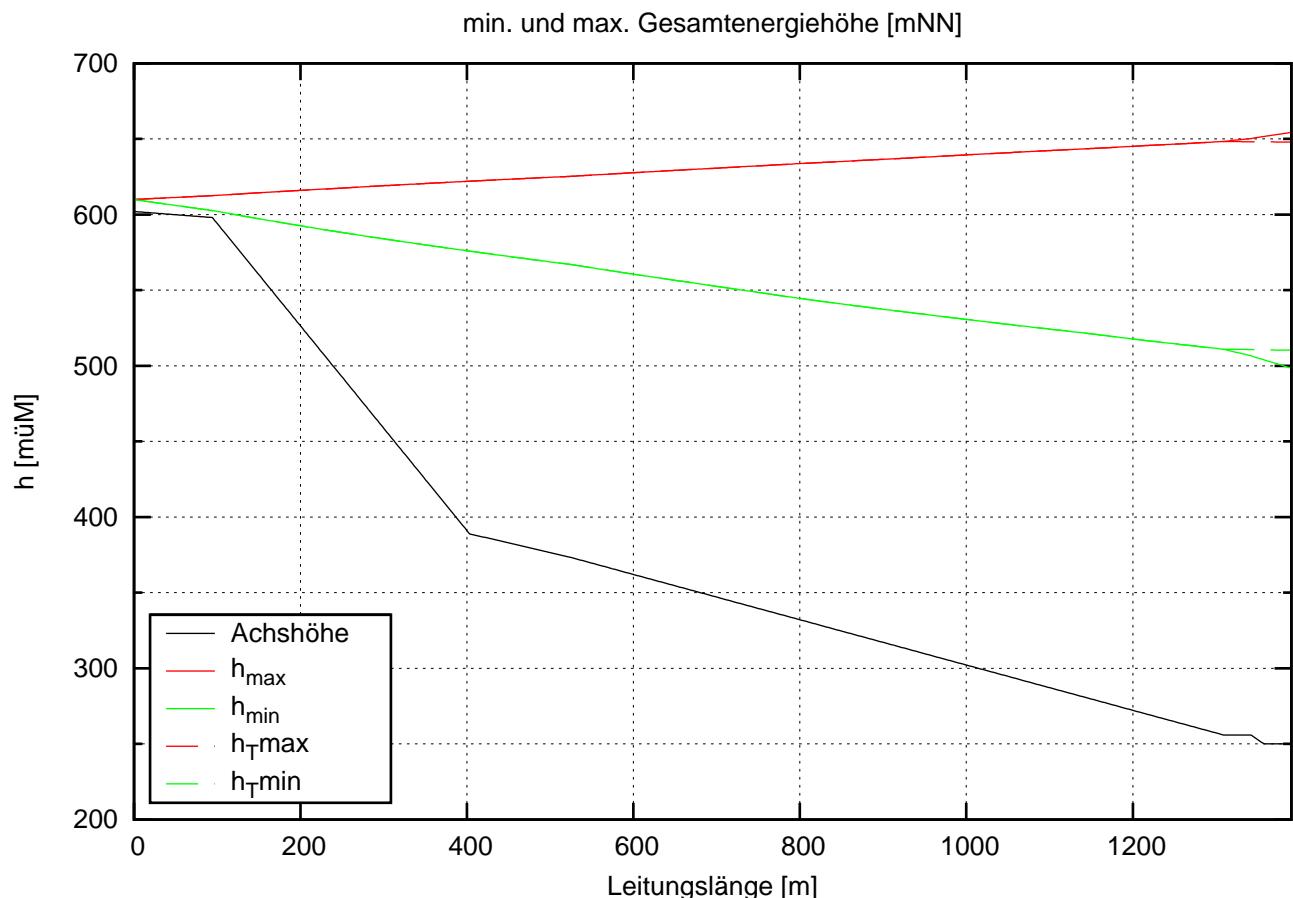
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Pu2 aus Mischbetrieb Tu1 (Teillast 25%P) und Pu2



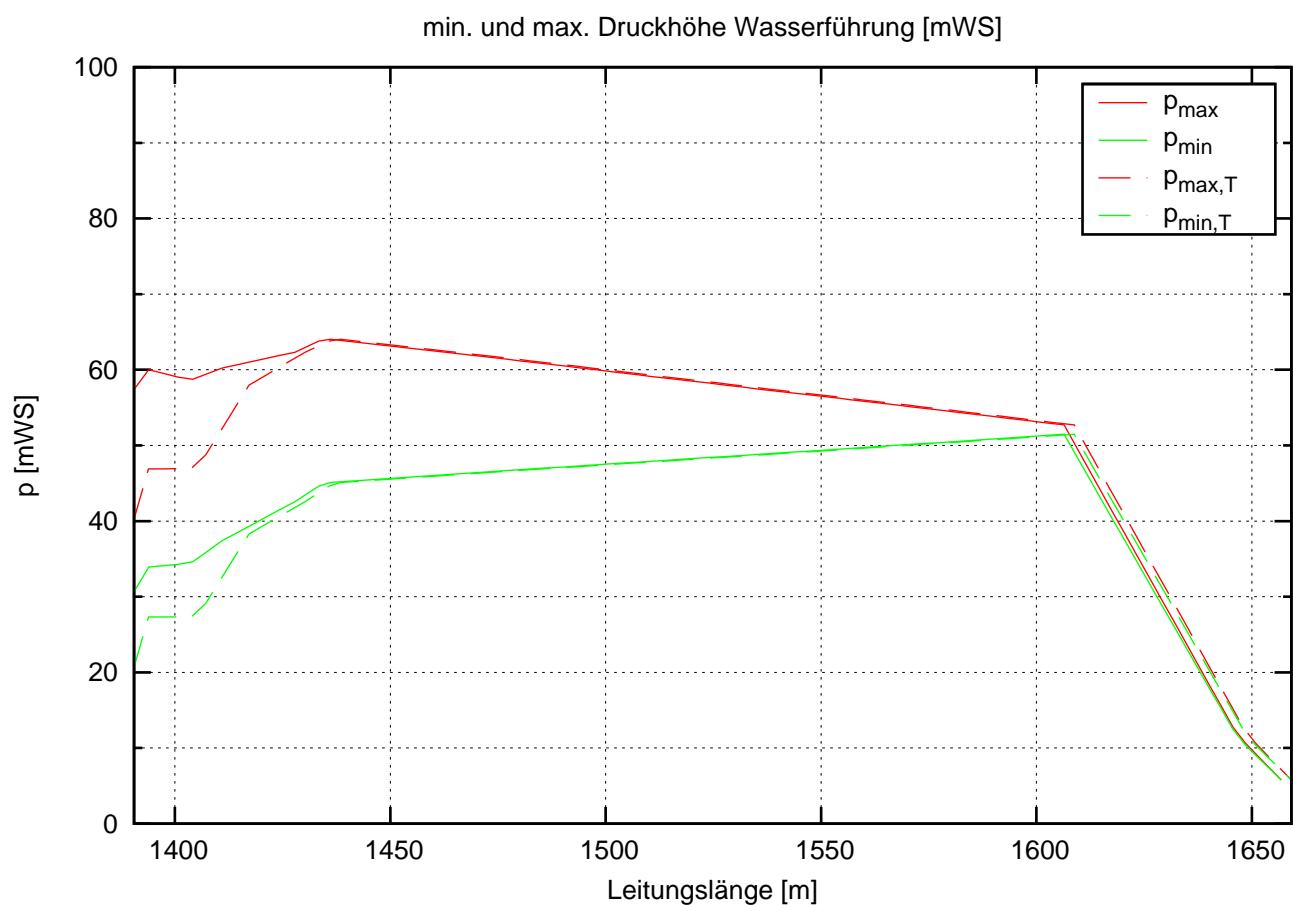
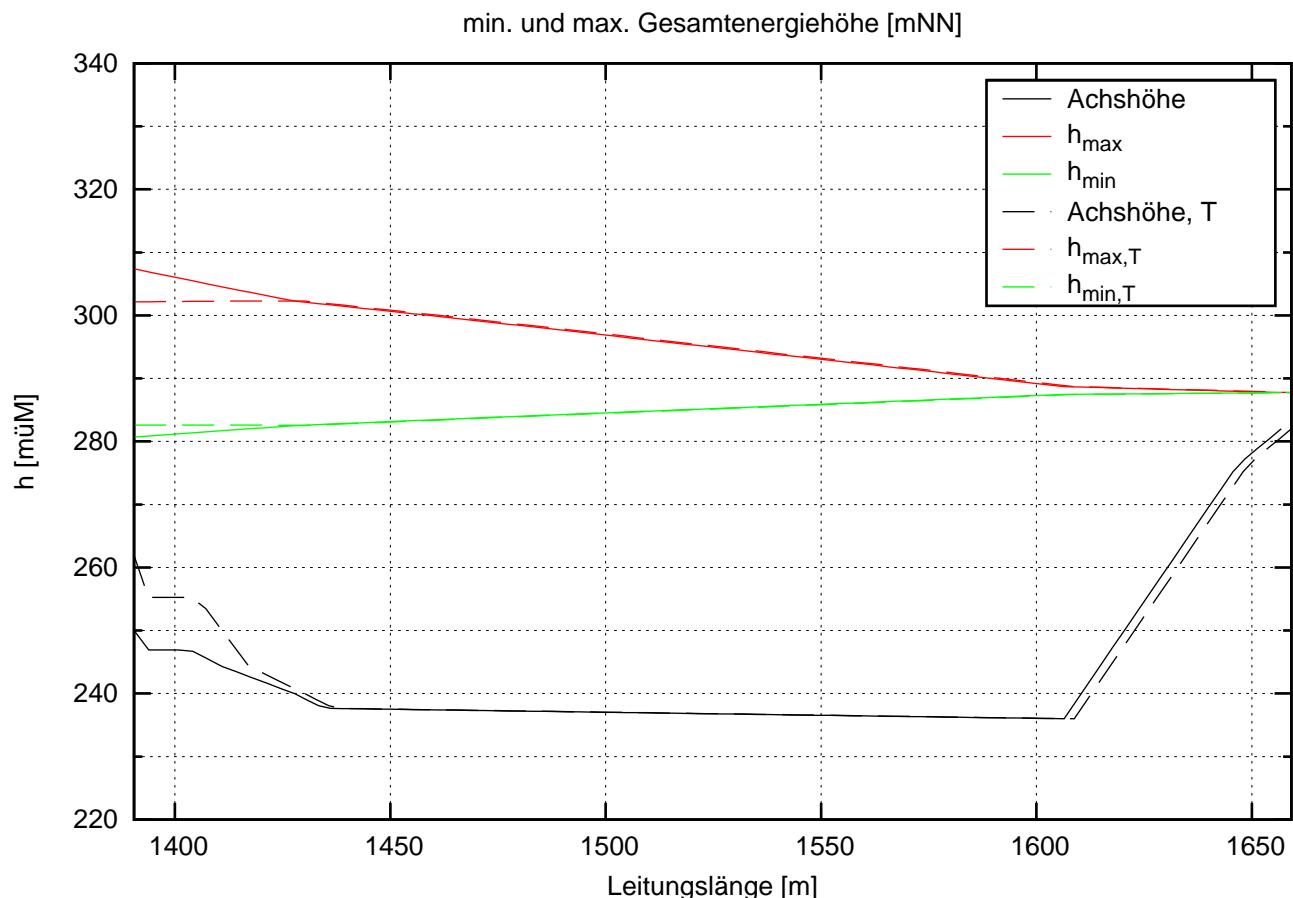
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Pu2 aus Mischbetrieb Tu1 (Teillast 25%P) und Pu2



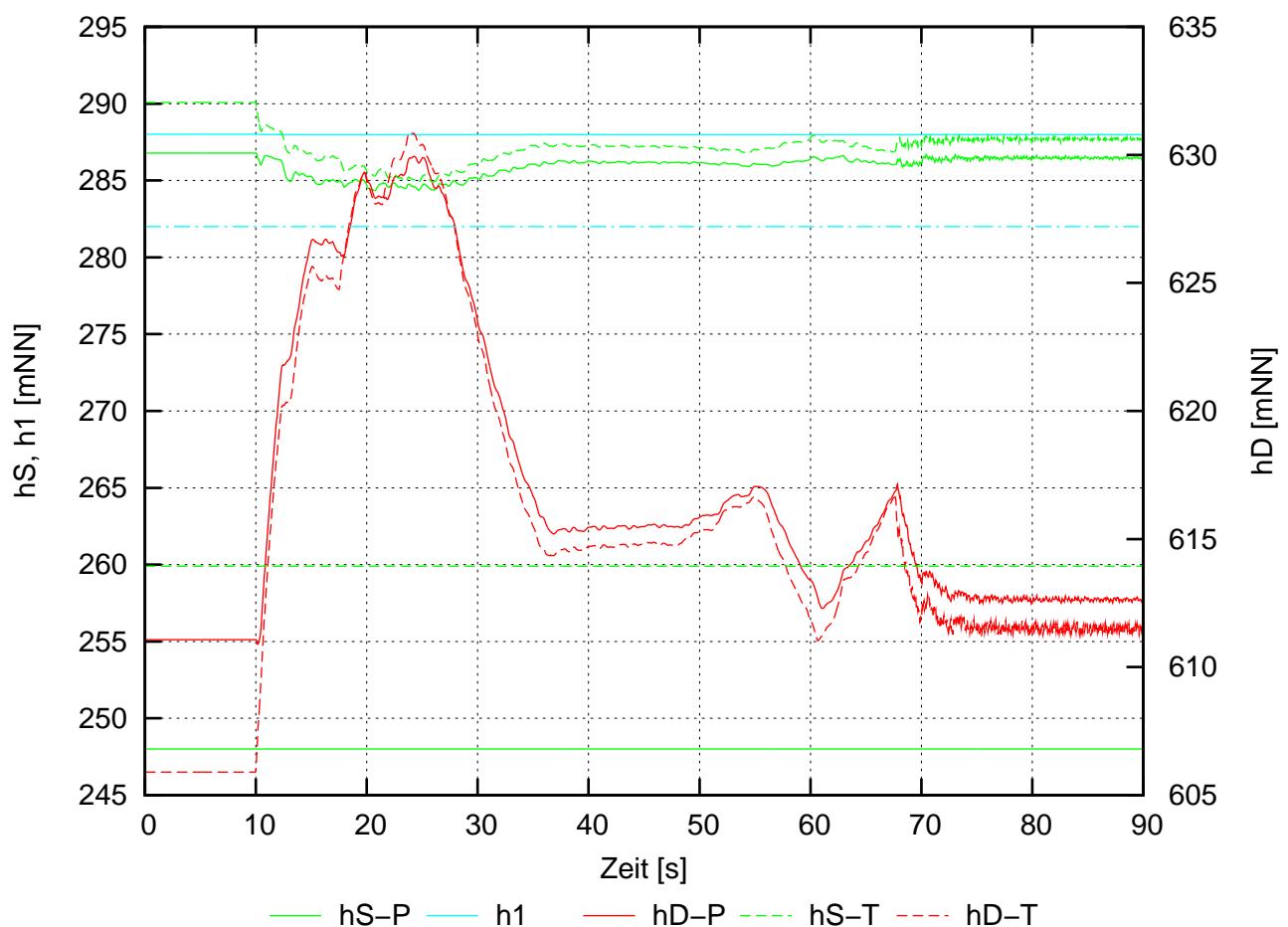
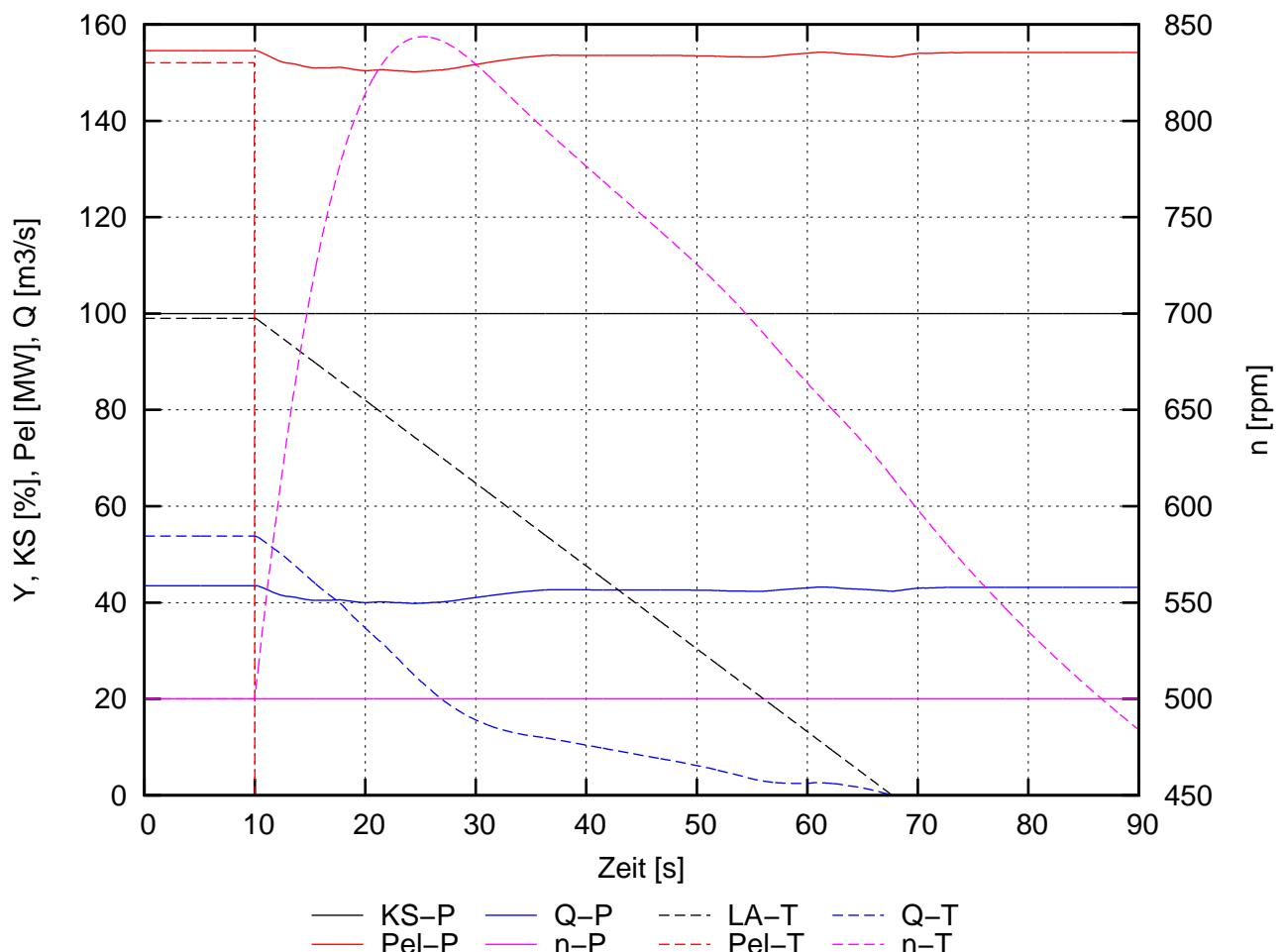
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Pu2 aus Mischbetrieb Tu1 (Teillast 25%P) und Pu2



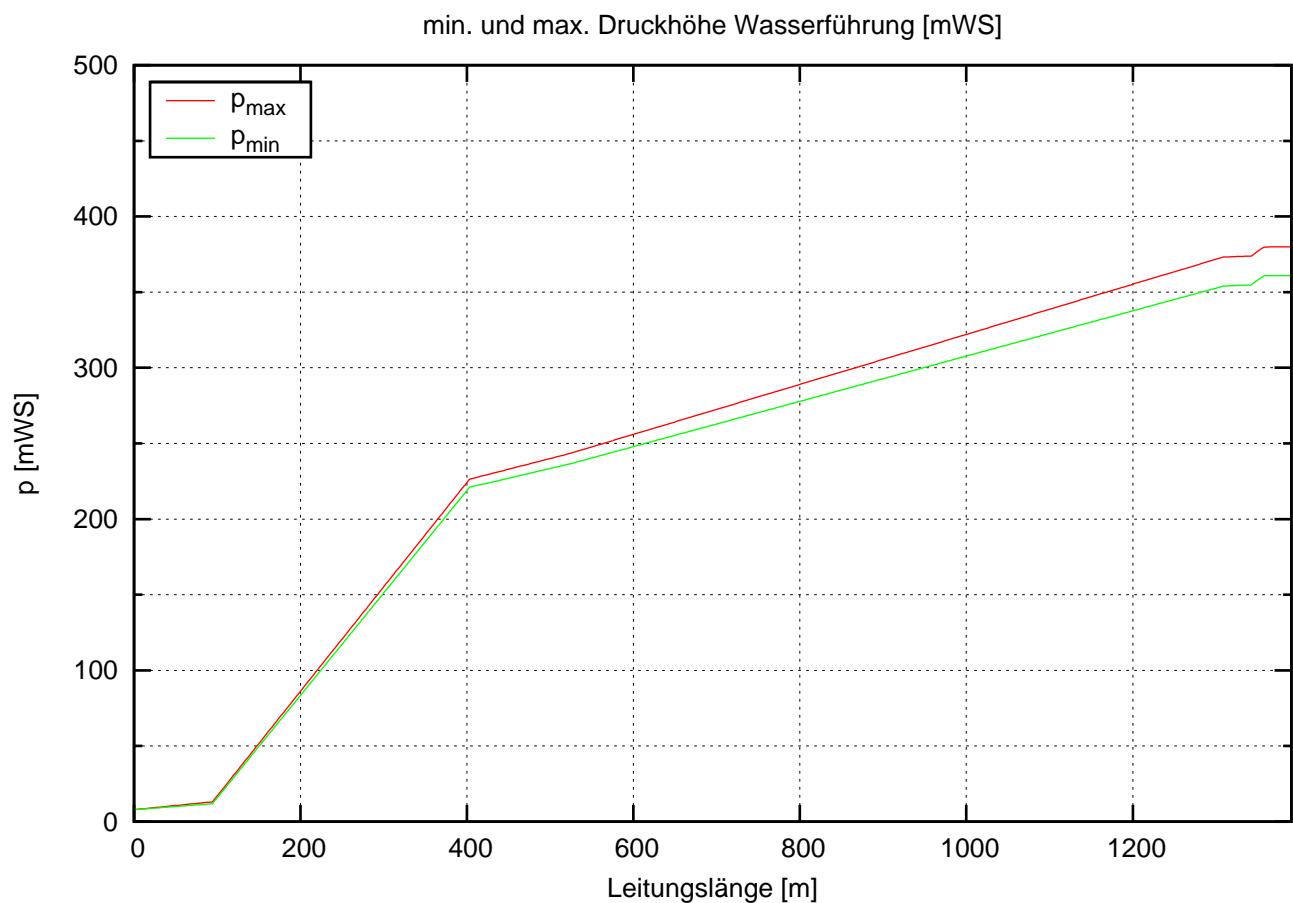
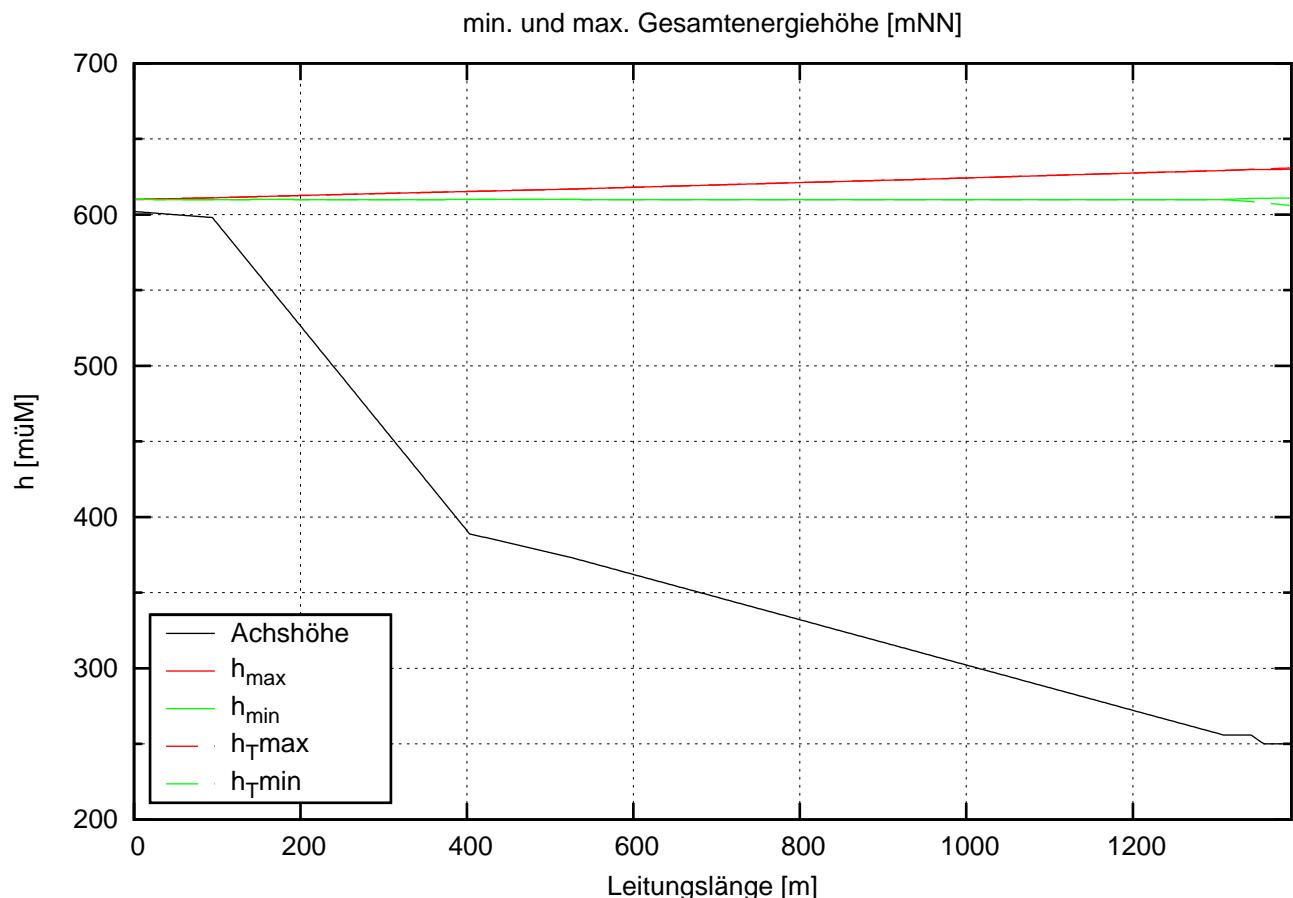
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Tu1 aus Mischbetrieb Vollast Tu1 und Pu2



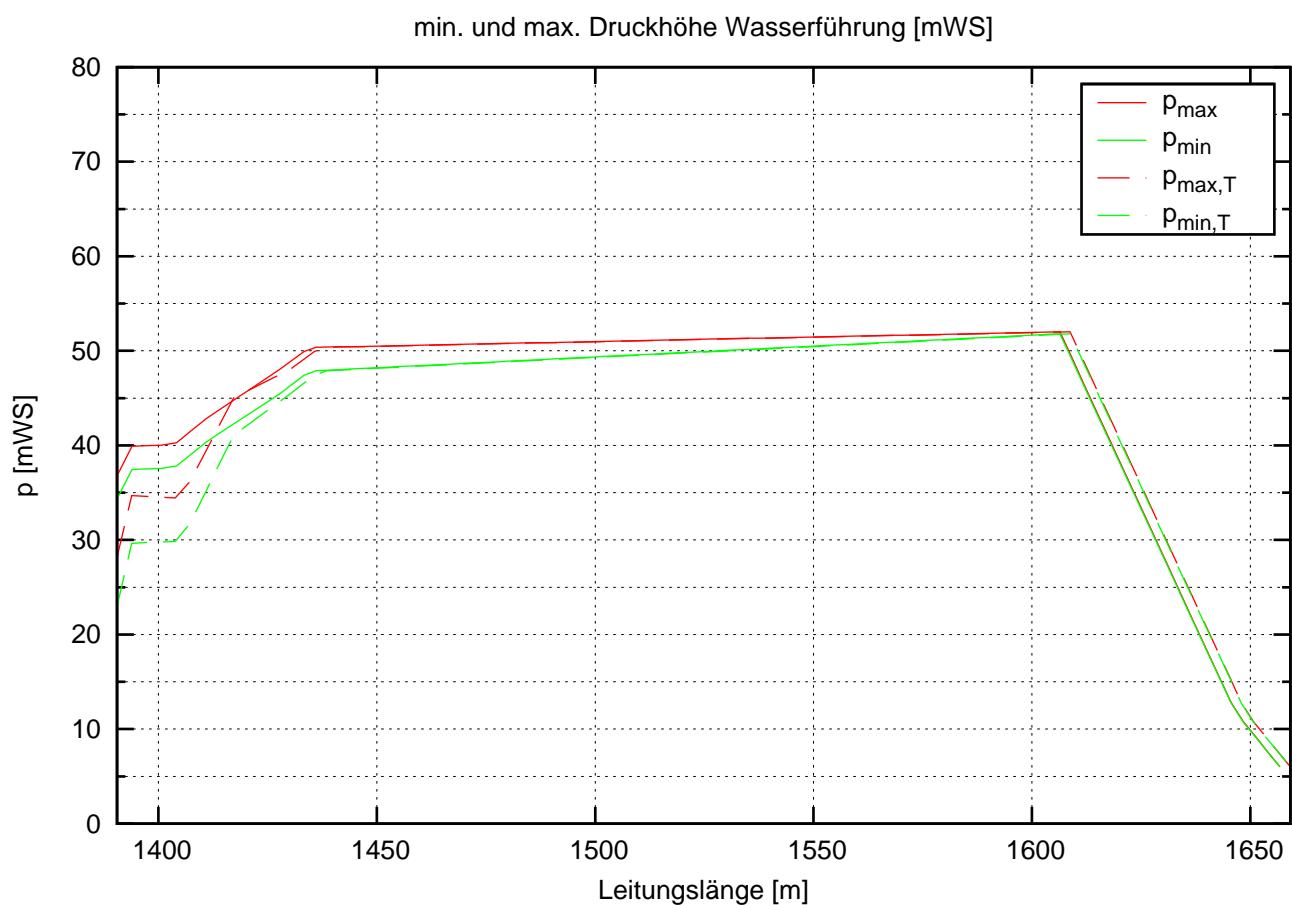
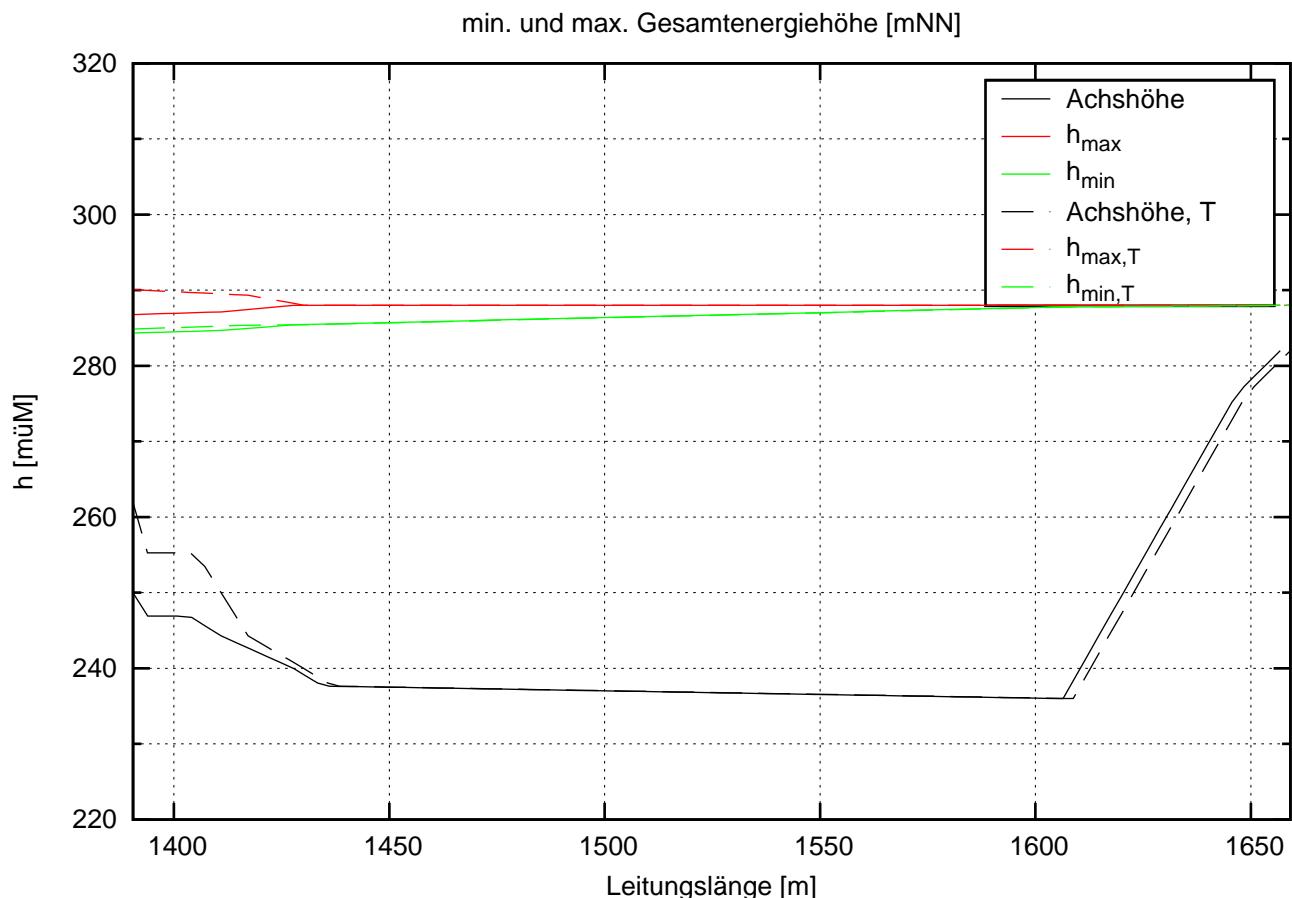
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Tu1 aus Mischbetrieb Vollast Tu1 und Pu2



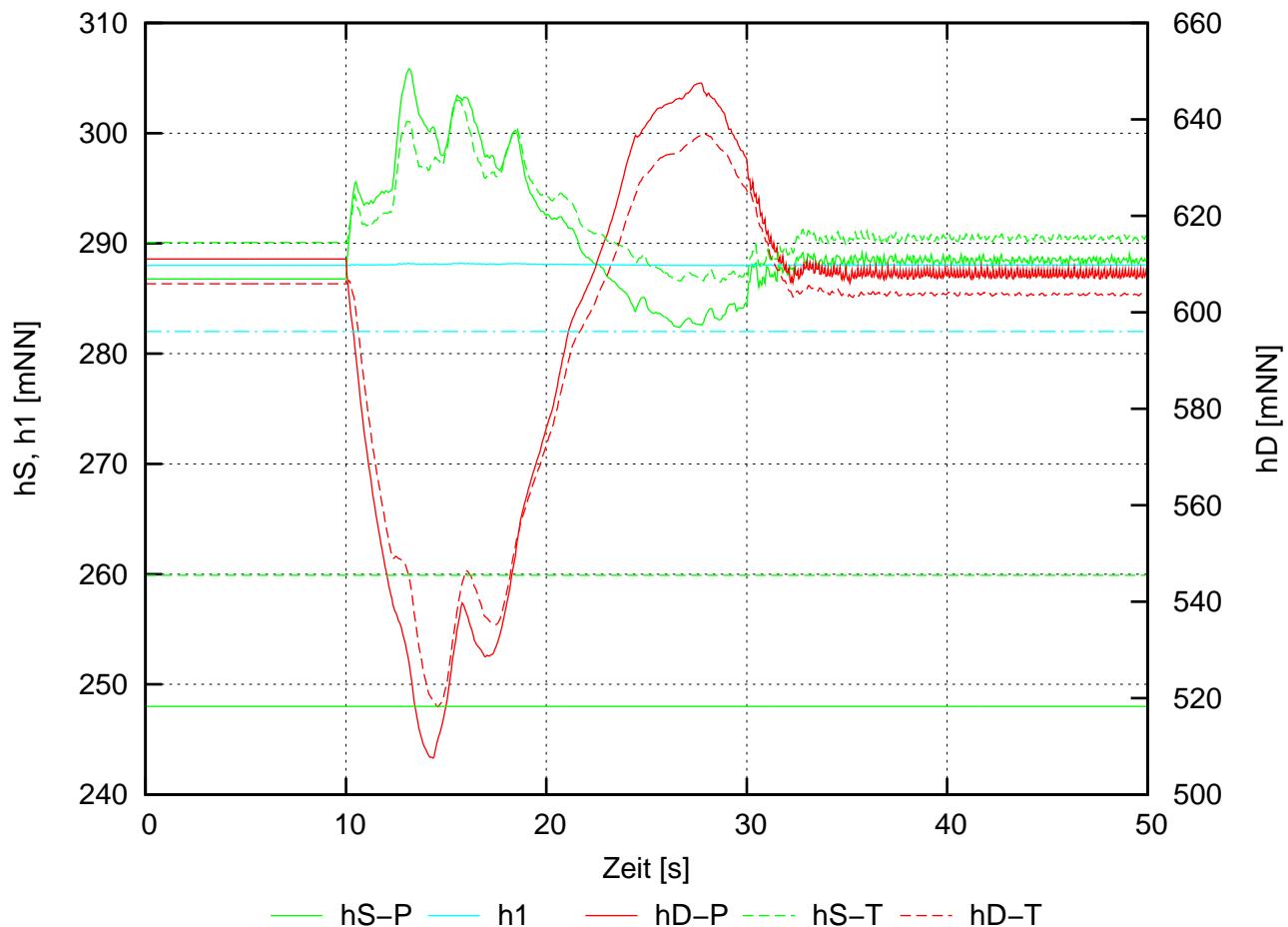
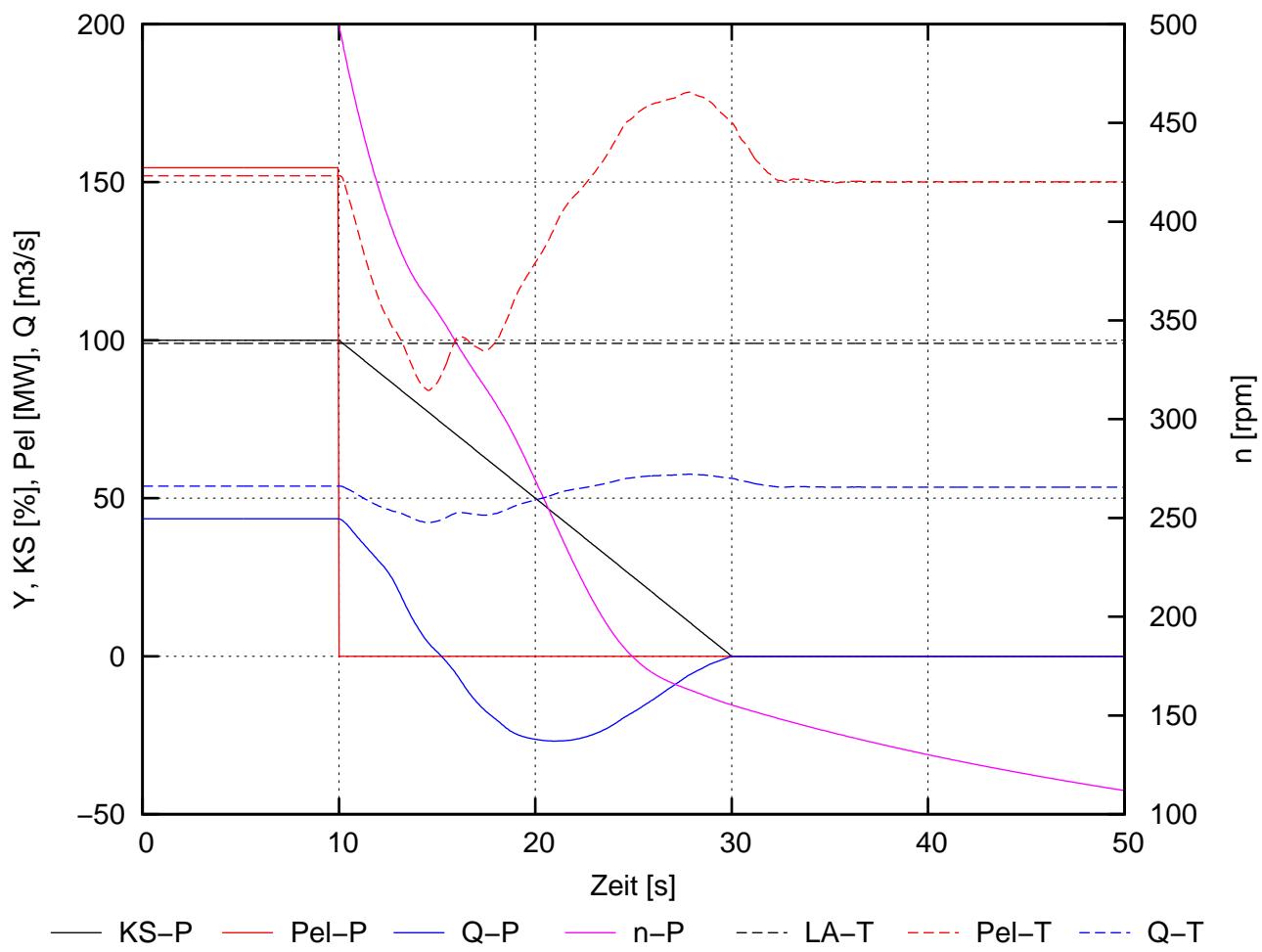
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Tu1 aus Mischbetrieb Vollast Tu1 und Pu2



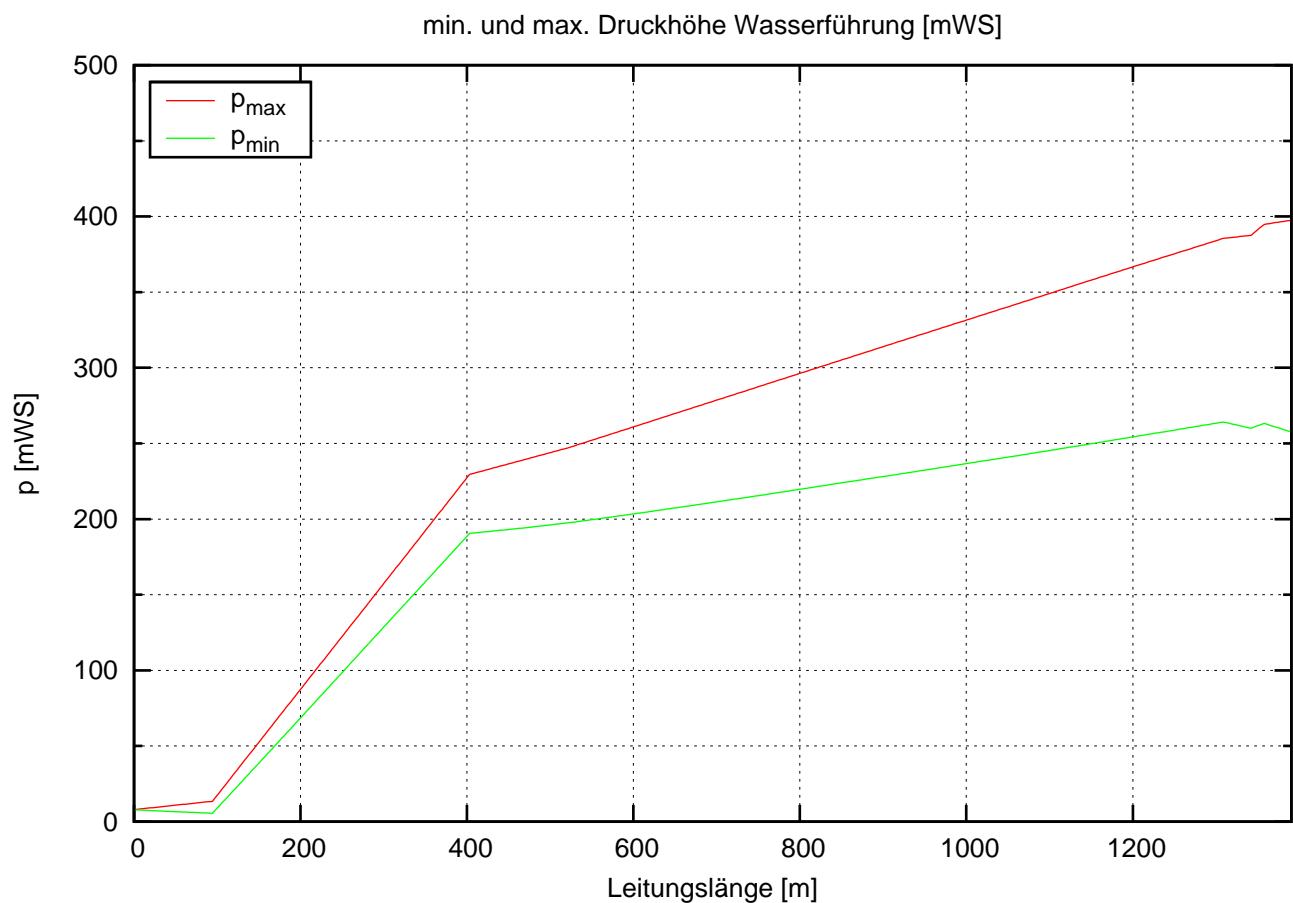
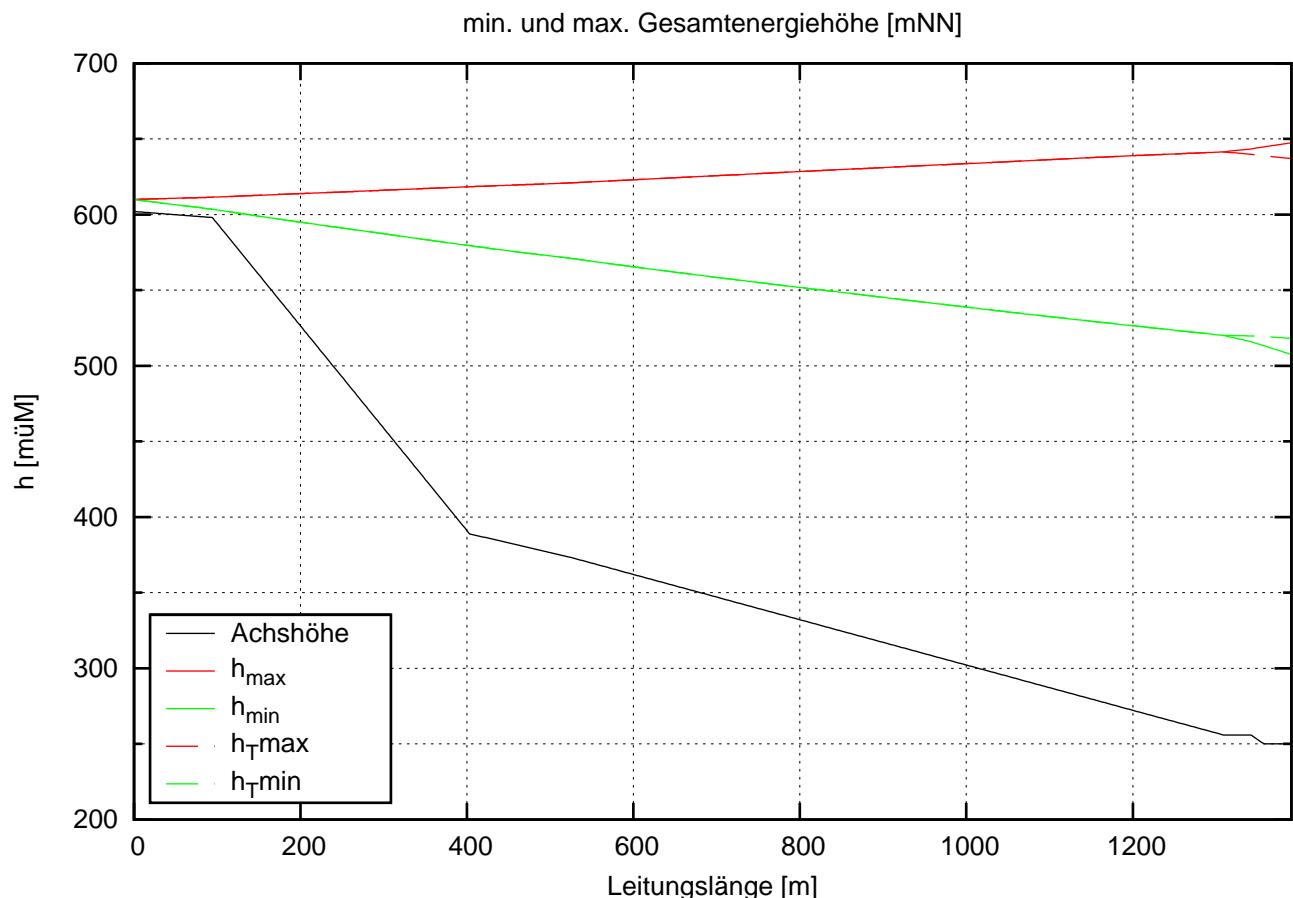
H = 322.0 mWS: H_{OWmin} = 610.0 mNN, H_{UWmin} = 288.0 mNN

Lastabwurf Pu2 aus Mischbetrieb Vollast Tu1 und Pu2



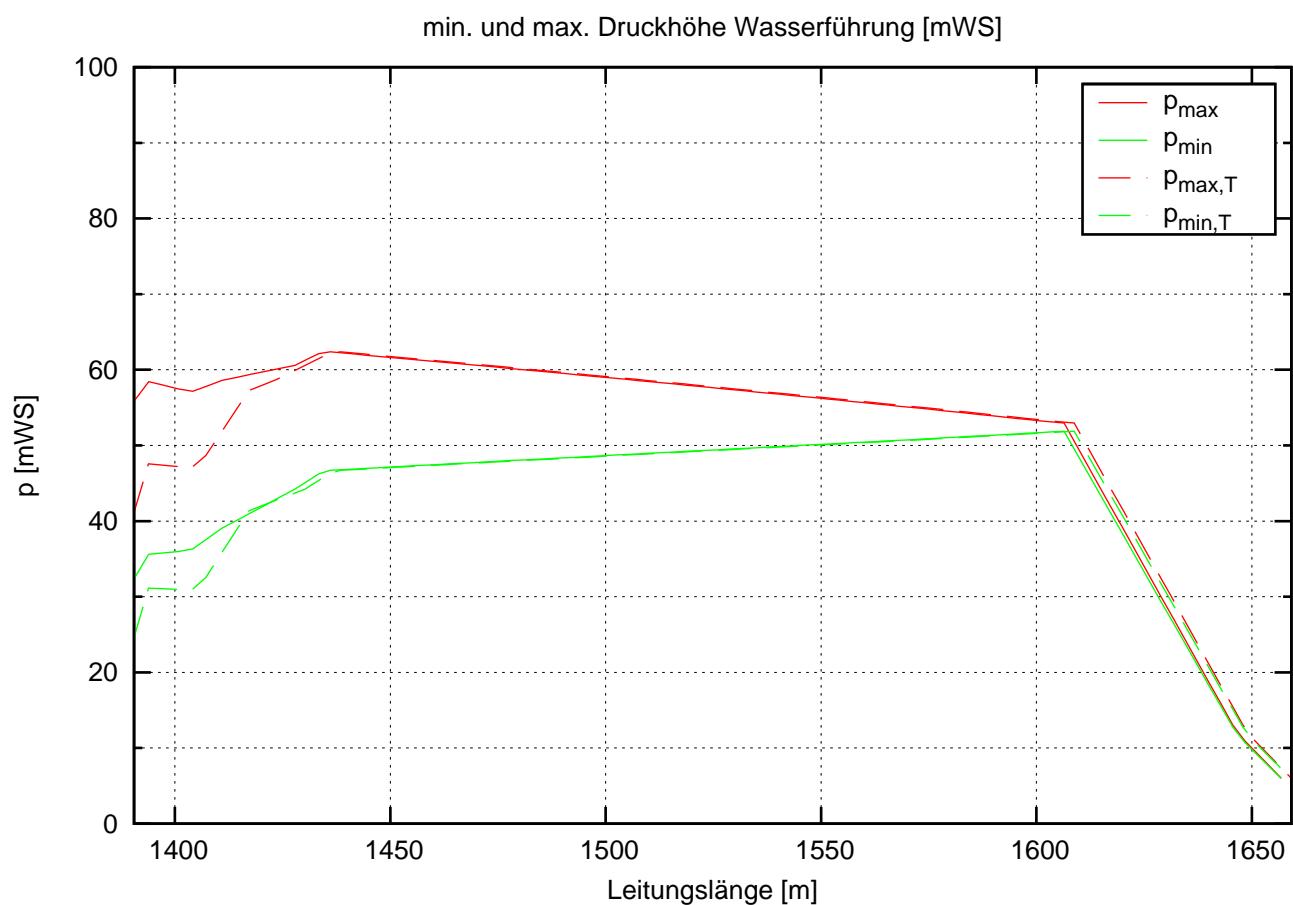
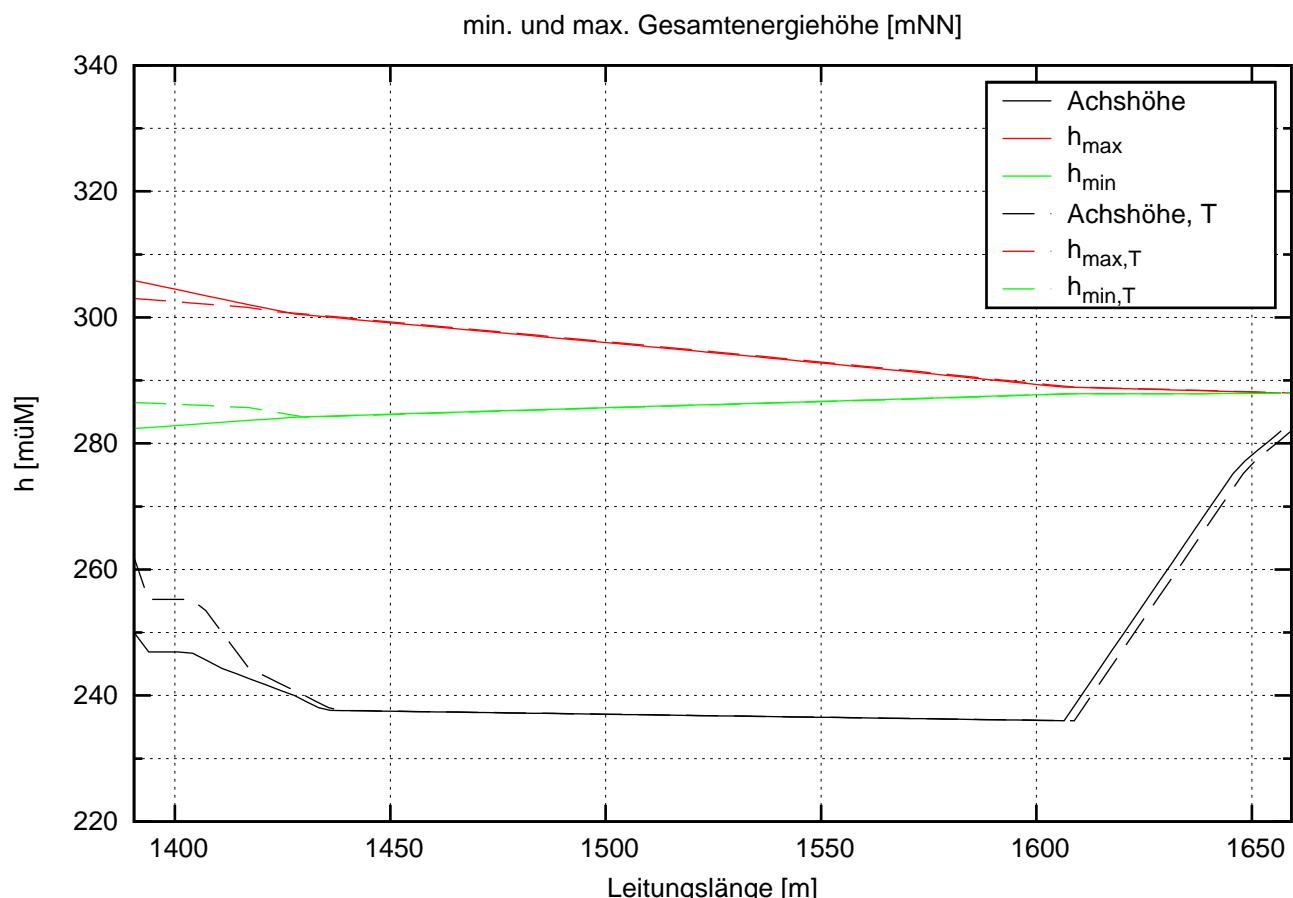
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Pu2 aus Mischbetrieb Vollast Tu1 und Pu2



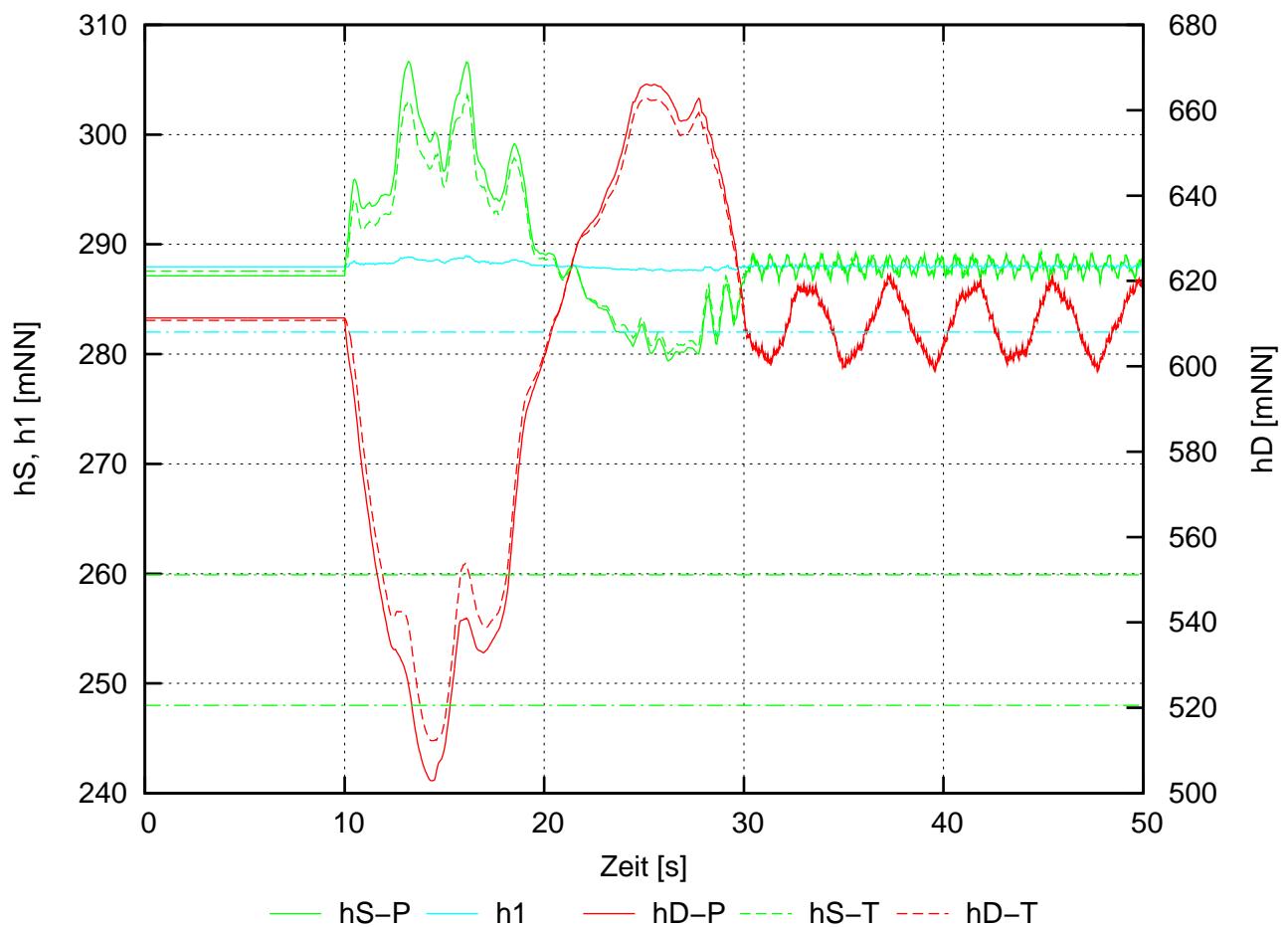
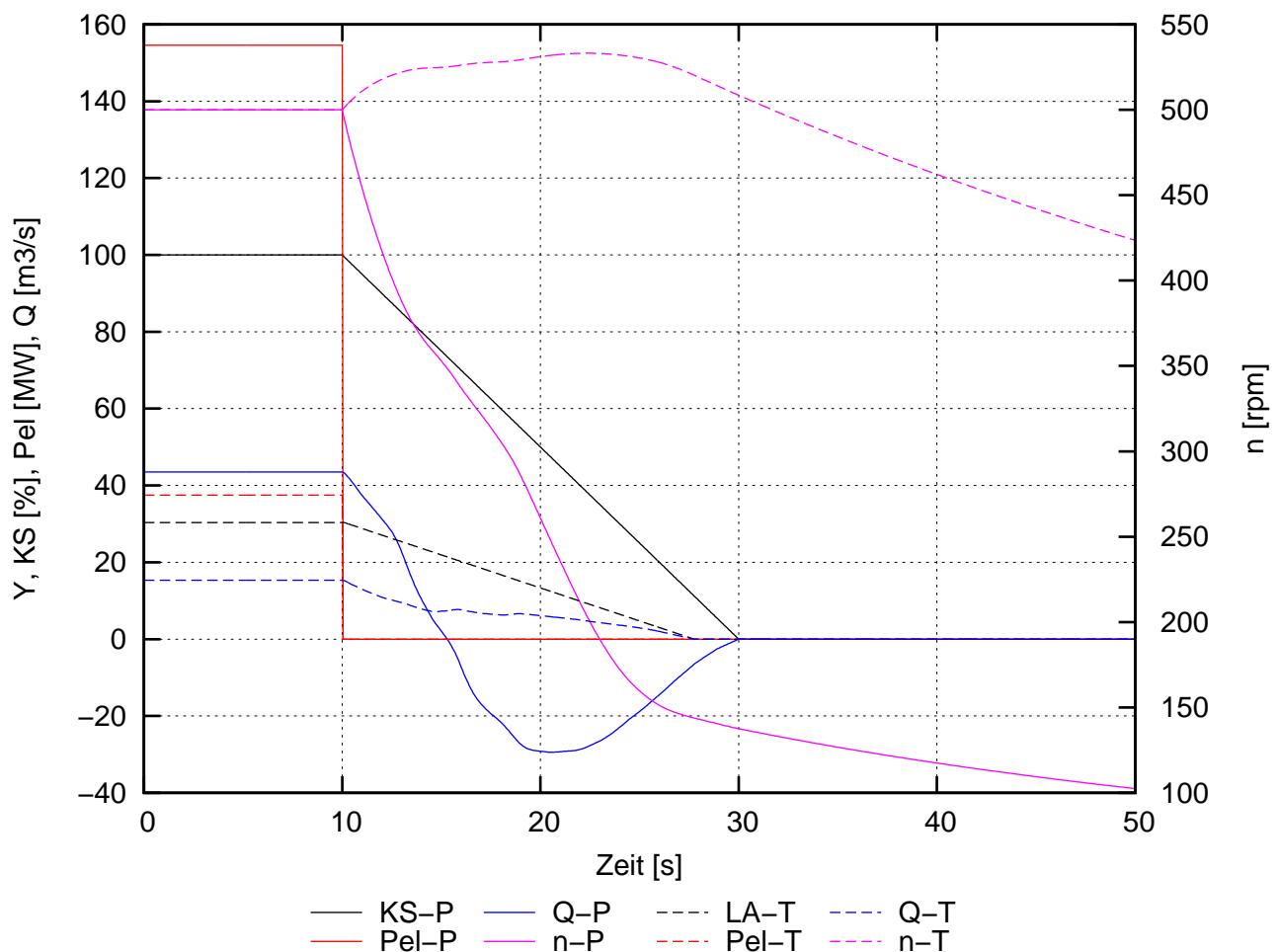
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf Pu2 aus Mischbetrieb Vollast Tu1 und Pu2



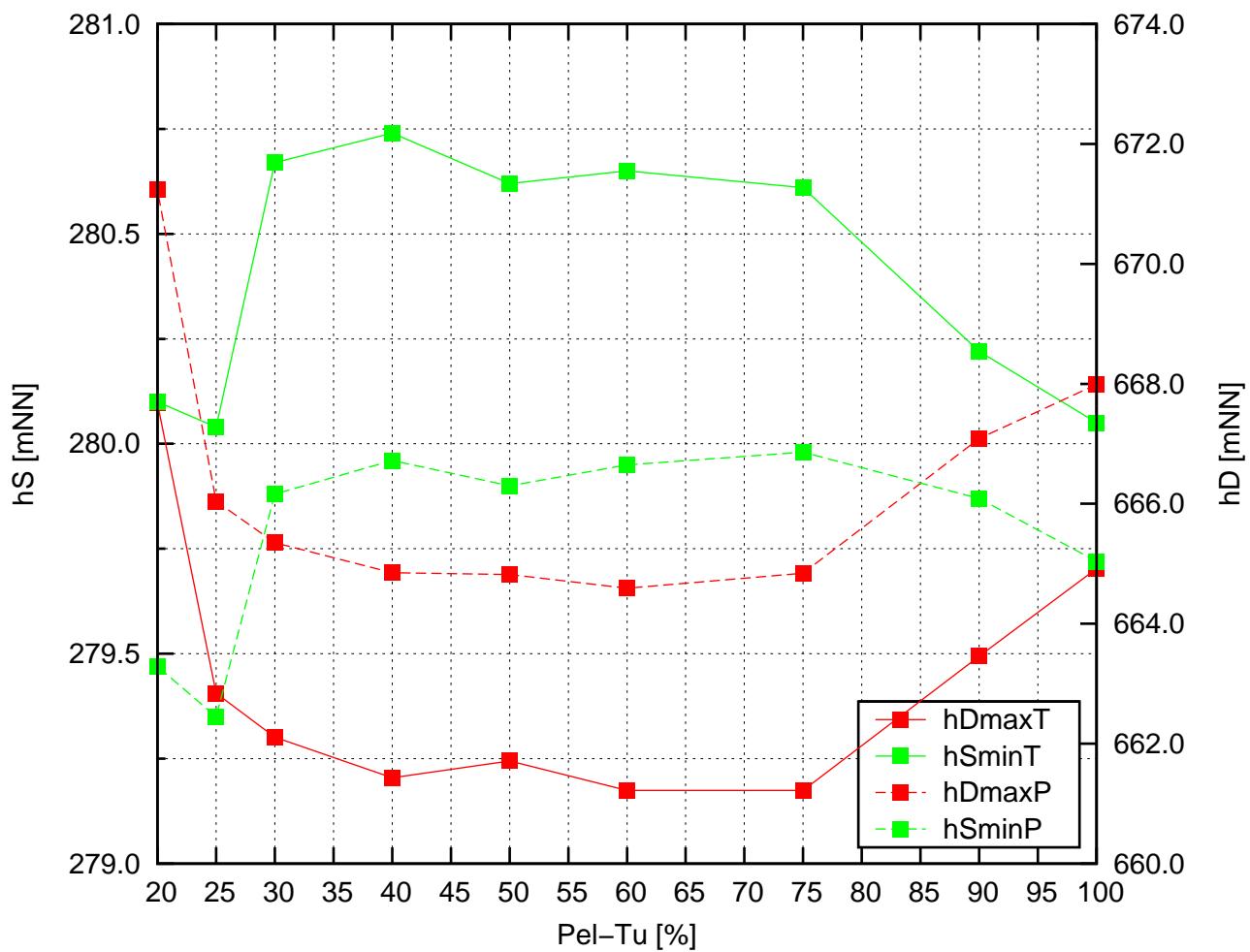
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf aus Mischbetrieb Tu1(25%Pel) und Pu1



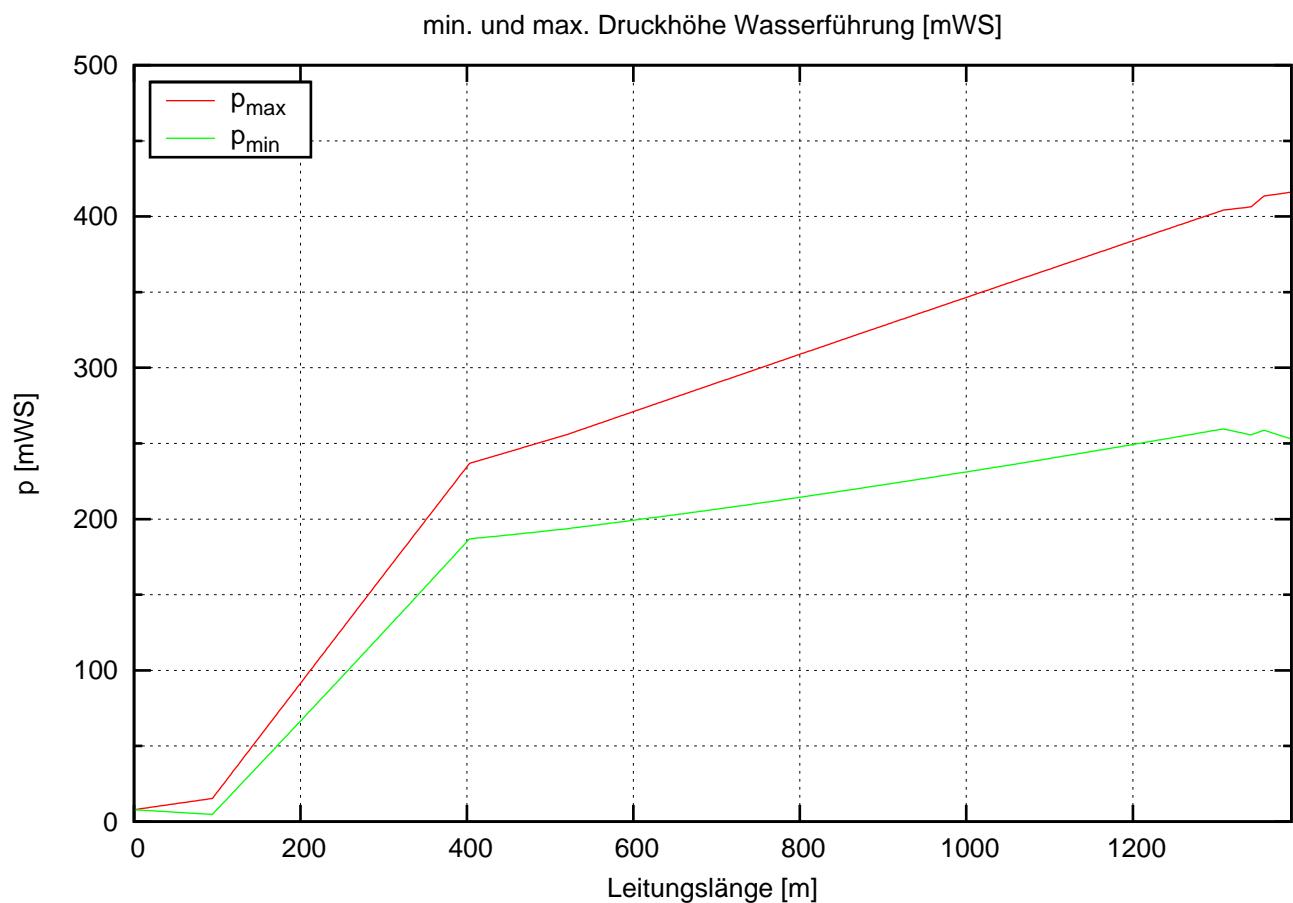
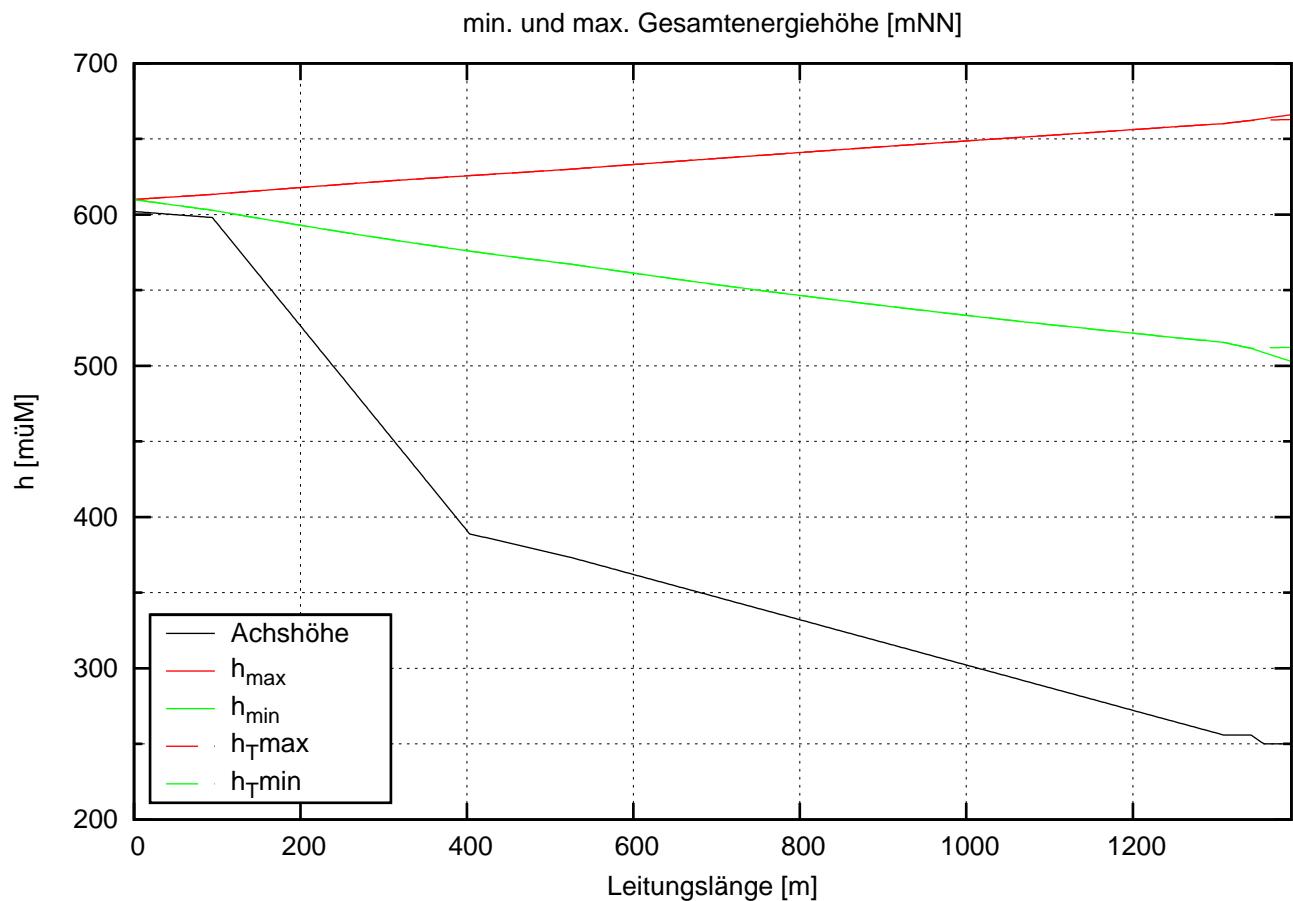
$H = 322.0 \text{ mWS}$: $H_{OWmin} = 610.0 \text{ mNN}$, $H_{UWmin} = 288.0 \text{ mNN}$

Lastabwurf aus Mischbetrieb Pu1 + Tu1 ($x\% \text{Pel}$)



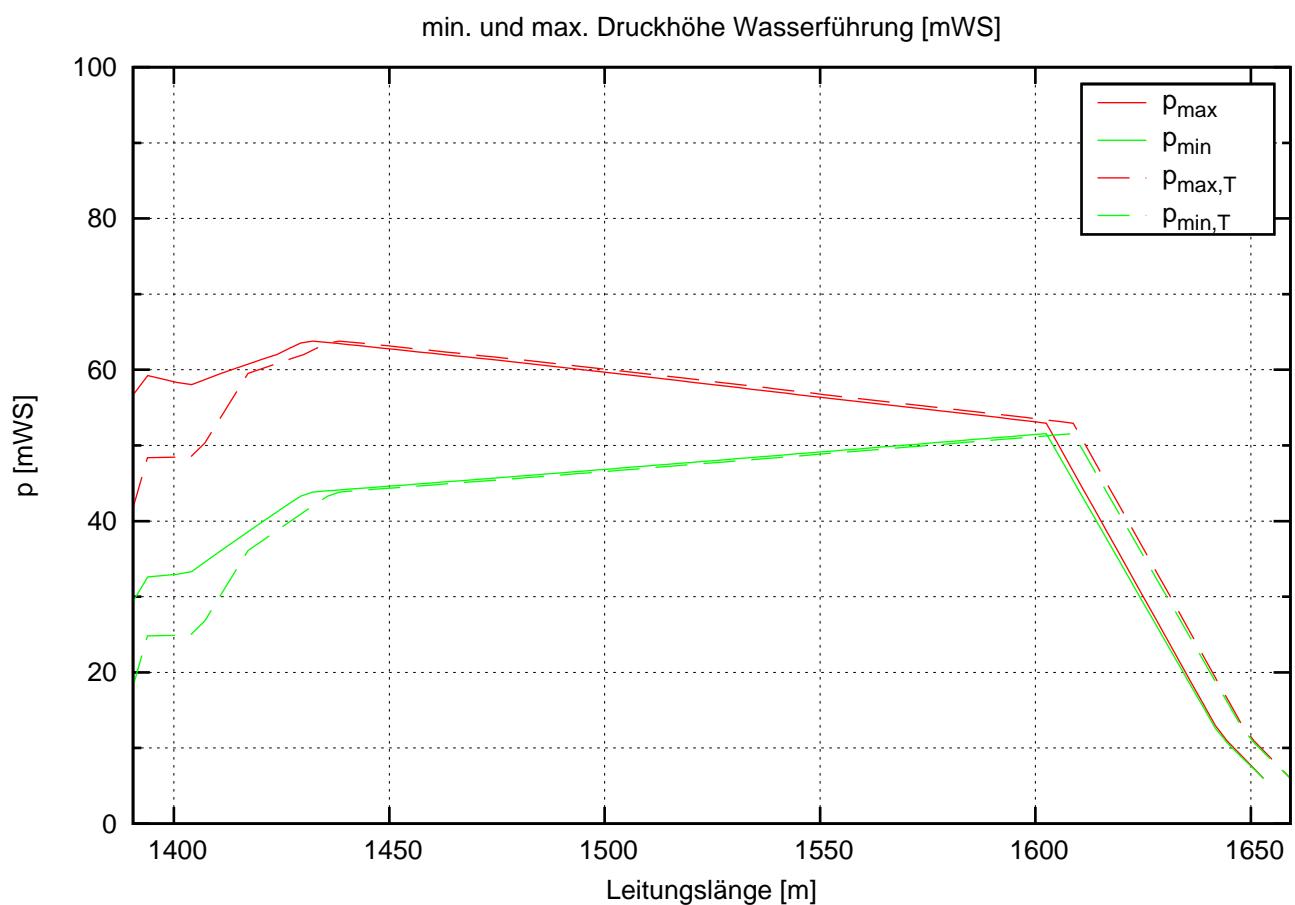
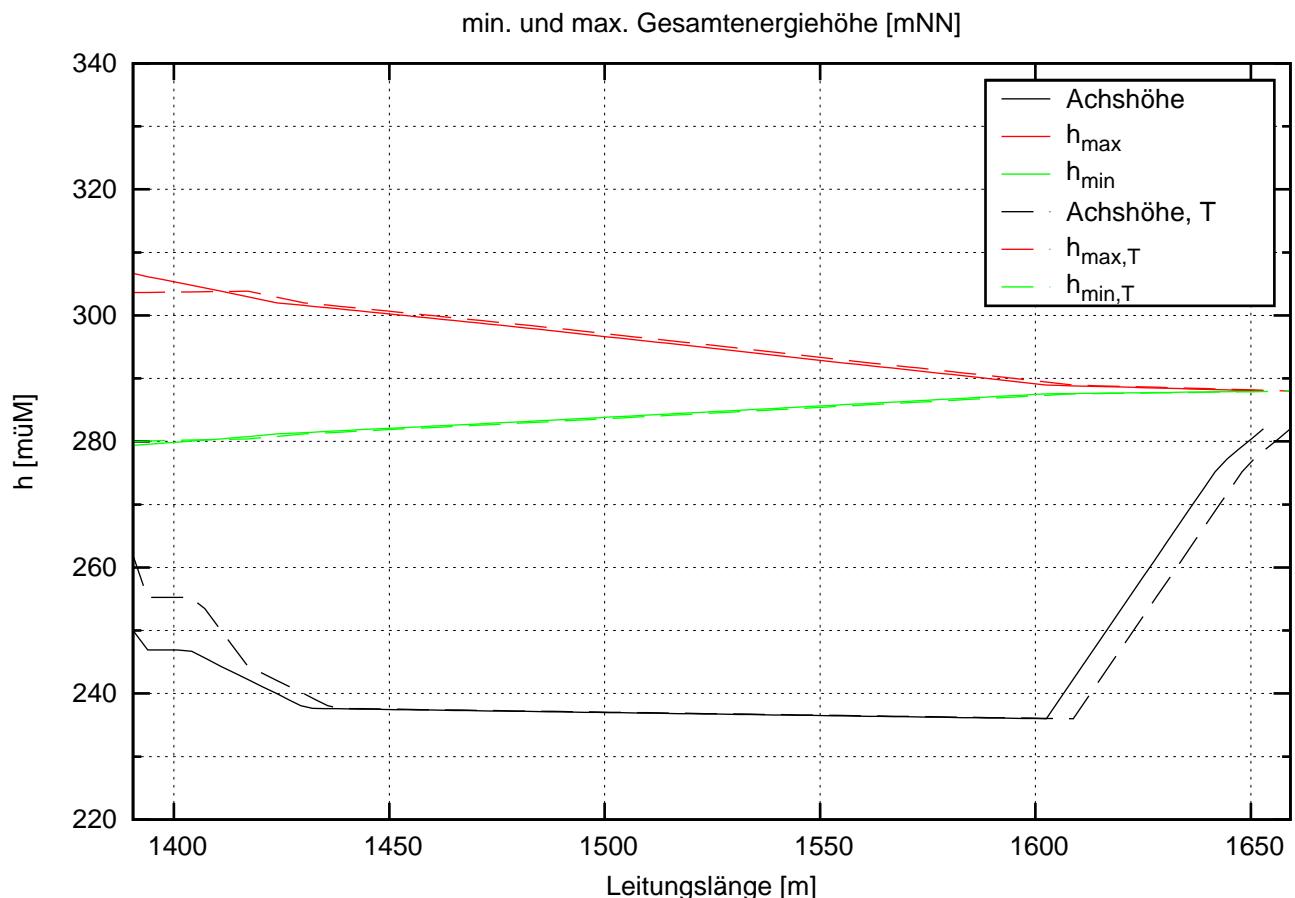
H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

Lastabwurf aus Mischbetrieb Tu1(25%Pel) und Pu1

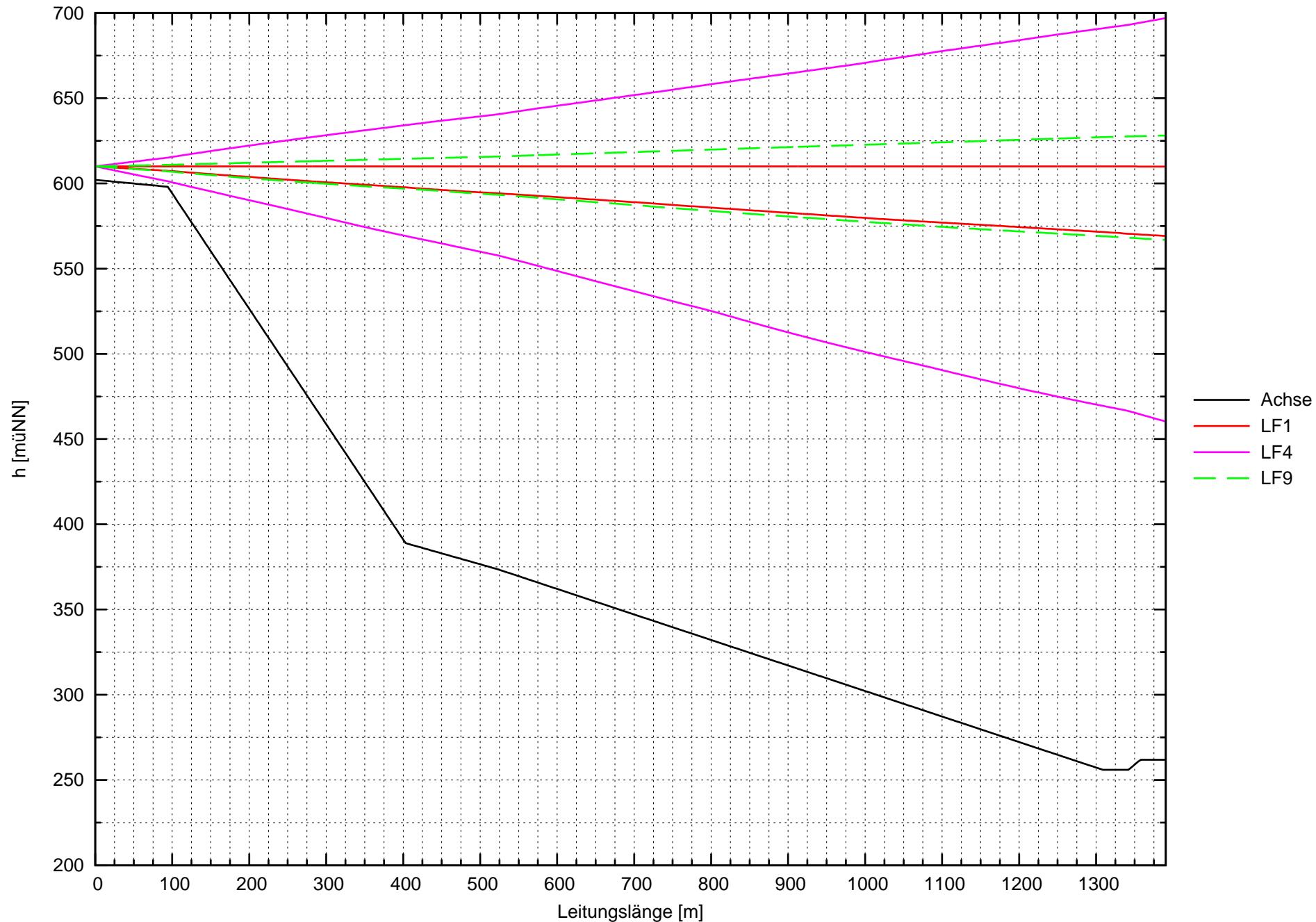


H = 322.0 mWS: $H_{OWmin} = 610.0$ mNN, $H_{UWmin} = 288.0$ mNN

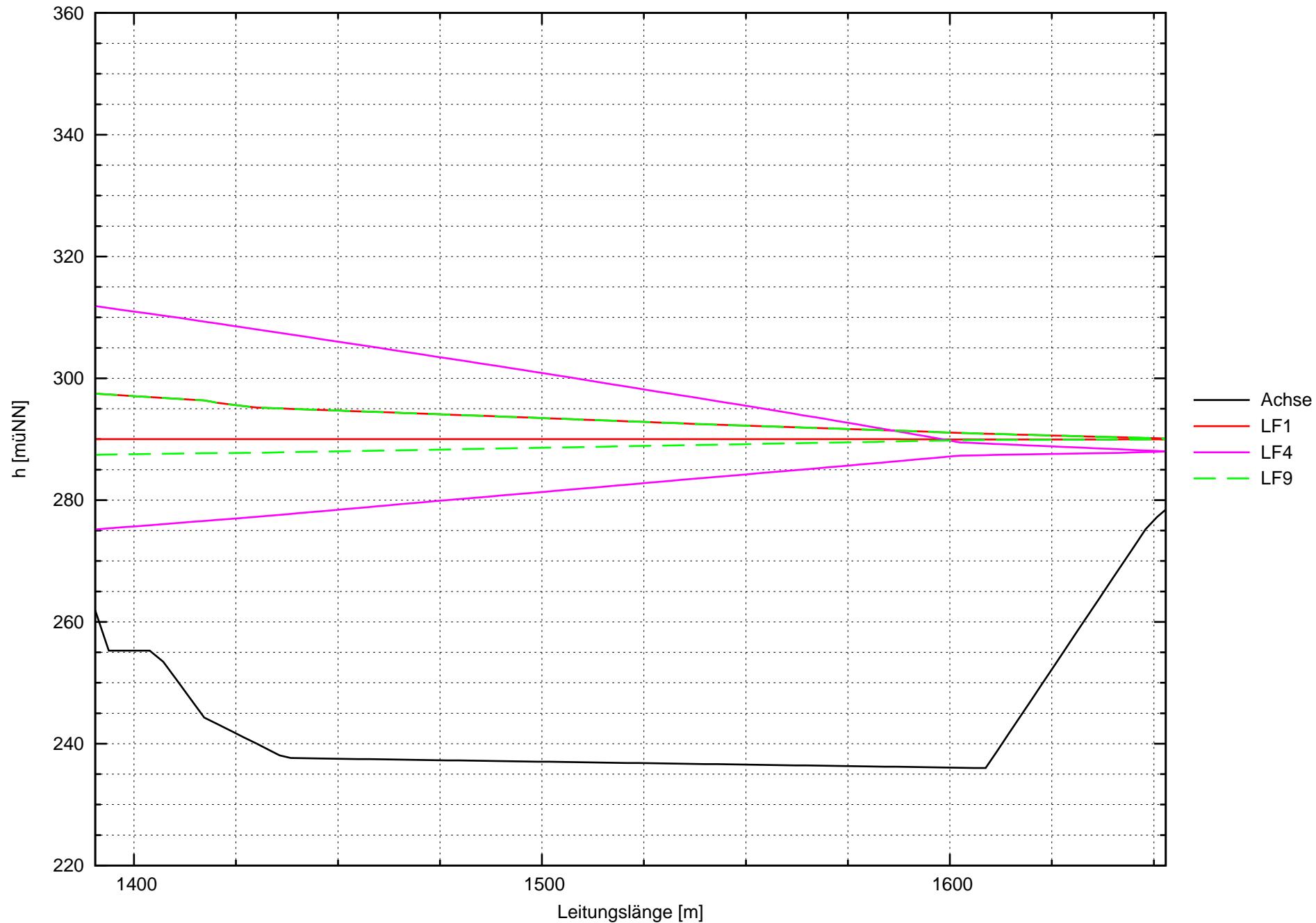
Lastabwurf aus Mischbetrieb Tu1(25%Pel) und Pu1



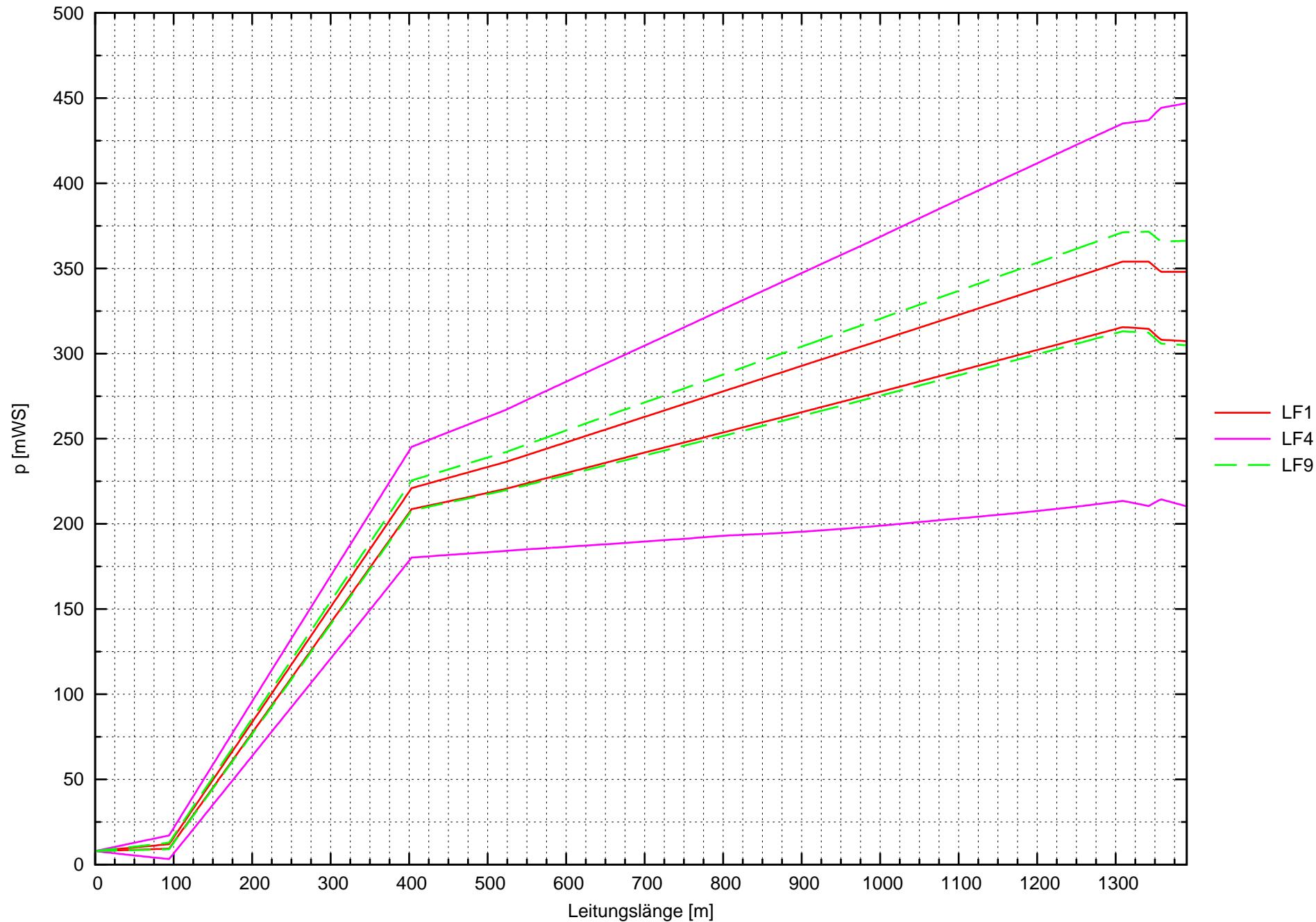
Projekt Energiespeicher Riedl
Energiehöhe entlang Oberwasserführung



Projekt Energiespeicher Riedl
Energiehöhe entlang Unterwasserführung



Projekt Energiespeicher Riedl
Energiehöhe entlang Oberwasserleitung



Projekt Energiespeicher Riedl
Energiehöhe entlang Unterwasserführung

