

CODEN: LUTFD2/(TFRT-5407)/1-71/(1989)

Vattenkraftens bidrag till dämpningen
av långsamma effektpendlingar
i stora elkraftsystem

Jerker Persson

Institutionen för Reglerteknik
Tekniska Högskolan i Lund
Oktober 1989

**TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET
UTLÅNAS EJ**

Department of Automatic Control Lund Institute of Technology P.O. Box 118 S-221 00 Lund Sweden		<i>Document name</i> Master Thesis	
		<i>Date of issue</i> October 1989	
		<i>Document Number</i> CODEN: LUTFD2/(TFRT-5407)/1-71/(1989)	
<i>Author(s)</i> Jerker Persson		<i>Supervisor</i> Rolf Johansson LTH, Sture Lindahl Sydkraft	
		<i>Sponsoring organisation</i>	
<i>Title and subtitle</i> Vattenkraftens bidrag till dämpningen av långsamma effektpendlingar i stora elkraftsystem. (Hydroelectric power plants contribution to the damping of low frequency power oscillations in large power systems.)			
<i>Abstract</i> <p>Low frequency power oscillations in large electric power system may cause severe problems. System separation may occur as a result which leads to a risk for collapse. It is desirable to reduce this kind of oscillations to prevent system separation. If the oscillations can be reduced, then it is possible to increase the maximum value of transmitted power. This means a better utilization of the production apparatus.</p> <p>The purpose of this thesis has been to analyse, whether the turbine governor and the waterturbine with its water passages contributes with positive or negative damping when the power system oscillates, and if it is possible to introduce more damping with an appropriate choice of parameter values in the turbine governor.</p> <p>The result from the simulations shows that positive damping may be introduced when the power system oscillates if the water starting time is normal to short. This is true if the transient amplification is low. Waterpower stations that have long water starting times contributes with negative damping when the system oscillates. This contribution may, however, be limited if the transient amplification in the turbine governor is chosen low.</p>			
<i>Key words</i>			
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>			
<i>Supplementary bibliographical information</i>			
<i>ISSN and key title</i>			<i>ISBN</i>
<i>Language</i> Swedish	<i>Number of pages</i> 71	<i>Recipient's notes</i>	
<i>Security classification</i>			

The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through the University Library 2, Box 1010, S-221 03 Lund, Sweden, Telex: 33248 lubbis lund.

Förord

Föreliggande examensarbete har till största delen utförts under våren 1988 på Sydkraft AB. Arbetet utfördes vid driftavdelningens systemtekniska kontor på huvudkontoret i Malmö, och bestod i huvudsak av datorsimuleringar. Dessutom har bodediagram beräknats med Fortran-program och uppritats med programpaketet Tlspac.

Handledare på Sydkraft AB har varit docent Sture Lindahl. Handledare på Tekniska Högskolan har varit universitetslektor Rolf Johansson vid Institutionen för reglerteknik. Jag vill här passa på att tacka mina handledare samt övrig personal på Sydkraft AB, som har hjälpt mig med arbetet.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
2	Elkraftsystemet	3
2.1	Allmänt	3
2.2	Matematiska samband	4
2.3	Beteckningar	6
3	Vattenkraft	7
3.1	Vattenturbinen och vattenvägarna	7
3.2	Matematiska samband	8
3.2.1	Tilloppstuben	8
3.2.2	Pelton turbinen	10
3.2.3	Francis turbinen	13
3.2.4	Kaplan turbinen	16
3.2.5	Sugröret	19
3.2.6	Beteckningar	21
4	Regulatorn	22
4.1	Reglering av vattenturbinen	22
4.2	Matematiska samband	23
5	Använda modeller och samband	24
5.1	Elkraftsystemet	24
5.2	Vattenturbinen	24
5.2.1	Tilloppstuben	24
5.2.2	Pelton turbinen	24
5.2.3	Kaplan turbinen	25
5.2.4	Francis turbinen	25
5.3	Regulatorn	25
6	Genomförandet	26
6.1	Modellstrukturer	26
6.2	Villkor för simuleringen	27
6.3	Regulatorinställningarna	28
6.4	Simuleringsbilderna	28
6.5	Bodediagrammen	31
7	Slutsatser	33
8	Referenser	34

Bilagor

- 1 Inledning** Som inledning på detta examensarbete ges här, i avsnitt 1.1, bakgrunden till de dämpproblem som uppstår i elkraftsystemet och som är relevanta för examensarbetet, samt syftet med arbetet, i avsnitt 1.2.
- 1.1 Bakgrund** Nordelsystemet är benämningen på det samordnade elkraftsystemet i Norden och kan betraktas som ett antal maskingrupper eller block sammankopplade med överföringsledningar. Det är reaktansen hos dessa överföringsledningar, som bestämmer hur starkt systemet är hopkopplat. Vinkeldifferensen mellan olika block bestäms av såväl reaktans och spänning som överförd aktiv effekt. Detta gäller i princip även under pendlingsförlopp. Vinkeldifferensen mellan två intilliggande block får inte varken statiskt eller dynamiskt överstiga vissa givna värden, om synkronismen skall kunna bibehållas i systemet. I annat fall sker urfasfall med risk för sammanbrott i systemet som följd.

När det gäller effektpendlingar mellan olika maskingrupper i Nordelsystemet, finns det ett antal naturliga pendlingsmoder. Flertalet enskilda aggregat eller kraftstationer har i samband med en störning normalt en väl dämpad pendling mot övriga systemet med en pendeltid på cirka en sekund. För pendlingar mellan olika maskingrupper är däremot dämpningen normalt sämre och pendeltiden längre. Vilka maskingrupper som kommer att pendla mot varandra samt pendlingsfrekvensen dem emellan bestäms i huvudsak av var störningen inträffar, typen av störning och den aktuella produktions- och nätbildens. För perioden 1980-85 har man konstaterat att flertalet pendlingar, som enbart berör enskilda samkörningsförbindelser har periodtiden omkring två sekunder. Periodtiden ökar något, om infasad maskineffekt eller överföringen på systemet ökar. Denna typ av pendling innebär att övriga Nordelnätet pendlar enskilt mot det svenska systemet. Pendlingar med en period i området tre till fem sekunder uppstår då de yttre delarna av Nordelnätet pendlar mot varandra. Detta innebär södra Finland mot södra Norge, södra Sverige samt Själland. Norra Sverige deltar endast obetydligt i denna typ av pendling. Normalt under ett pendlingsförlopp finns alla dessa pendlingsformer samtidigt, men mer eller mindre utpräglat.

Fel som uppstår i utrustningar upptäcks normalt om de påverkar den lokala funktionen, men inte om de enbart påverkar inflytandet på dämpningen i nätet. Om en pendling uppträder i nätet, finns det i dag ingen möjlighet att konstatera om en enskild generator har bidragit till att dämpa pendlingen eller kanske istället till att förvärra den. Pendlingar sker oftast mellan olika delsystem, och tas ett delsystem bort, kan pendlingen mellan de övriga öka. Generatorernas regulatorer kan påverka dämpningen både positivt och negativt. För pendlingar med periodtiden två till fyra sekunder förbättrar dämpningarna på maskinerna inte dämpningen speciellt mycket. Stor förstärkning hos spänningsregulatorerna försämrar normalt dämpningen. Turbinregulatorn för vattenkraft påstås kunna introducera negativ dämpning på grund av samverkan med vattenvägarna. Även lastens dynamiska egenskaper påverkar dämpningen. Beroende på felfall, överföringssituation och del av nätet, leder en mer spänningsavhängig last till positiv eller ibland negativ dämpning, medan en mer frekvensberoende last alltid betyder mer positiv dämpning. Om överföringen på samkörningsförbindelserna ökar, förändras dämpningen.

Bakgrunden, som den formuleras här, är i stort hämtat från rapporten "Stabilitets och dämpningsproblem i Nordelsystemet" skrivet av Bengt Ingemars på Vattenfall.

1.2

Syfte

Syftet med examensarbetet är att utreda, huruvida vattenkraften i form av vattenvägarna, vattenturbinen och turbinregulatorn bidrar med positiv eller negativ dämpning vid ett pendlingsförlopp, samt om det är möjligt att introducera positiv dämpning genom att välja lämpliga parametervärden i turbinregulatorn. Det är önskvärt att introducera mer dämpning i elkraftsystemet, för att därigenom minska risken för odämpade effektpendlingar. Kan man minska effektpendlingarna, medför det att man kan höja gränsen för tillåten kraftöverföring och därmed utnyttja produktionsapparaten bättre.

2 Elkraftsystemet

I det här kapitlet presenteras en översiktlig bild av elkraftsystemet, avsnitt 2.1 behandlar några av elkraftsystemets egenskaper som har betydelse i anknytning till det här examensarbetet. Avsnitt 2.2 beskriver den klassiska modellen för synkrongeneratorn samt de ekvationer som leder fram till modellen. I avsnitt 2.3 finns en lista på de beteckningar som används i avsnitt 2.2.

2.1 Allmänt

Ett stort elkraftsystem är uppbyggd av en mängd olika elproducerande enheter. Om möjligt placeras de olika enheterna nära konsumenterna för att försörjning och överföring skall kunna ske med så små förluster som möjligt. För vattenkraften är det vattenmängderna i älvarna och landskapets höjdskillnader, som skapar de förutsättningar, som krävs för etablering. Den energi som kan utvinnas ur en vattenkraftstation står i direkt förhållande till fallhöjd och vattenmängd. Vattendrag med stora fallhöjder och goda vattentillgångar är därför bäst lämpade för kraftproduktion. I Norden finns de vattenkraftstationer, som producerar större delen av vattenenergin långt från konsumenterna. Detta faktum samt att vissa kraftstationer kan ha kraftöverskott, medan andra kraftstationer har kraftunderskott, medför ett behov av att kunna överföra elkraft mellan olika geografiska platser.

I elkraftsystemet är de olika enheterna sammankopplade med elkraftledningar som karakteriseras av sin reaktans, denna samt spänningsnivån på nätet bestämmer styvheten på ledningen. Styvheten på ledningen har betydelse för möjlig kraftöverföring, samt för hur nätet beter sig vid en störning. De olika enheterna har skilda karakteristiker och en sammanfogning kan introducera problem, vid samordningen av systemet. Tillkoppling av en ny enhet ändrar den karakteristiska oscillationsperioden för systemet. Den nya oscillationsperiod som uppkommer bestäms av systemets tröghet och den ekvivalenta ledningens styvhet. Tillkopplingen kan medföra att dämpningen för systemet ändras från positiv till negativ. Bidrag till den negativa dämpningen kan komma från någon eller många källor exempelvis från regulatorerna, de producerande enheterna eller från systemets förluster.

En av egenskaperna i elkraftsystemet är att det praktiskt inte kan lagras någon energi i systemet, i form av växelström. Därför måste den mekaniska ineffekten till systemet och den elektriska uteffekten plus nätförlusterna vid alla tidpunkter vara i balans i hela systemet. För att kunna bibehålla denna balans måste systemet vara stabilt. Ett stabilt elkraftsystem är ett system, där de elkraftproducerande synkronmaskinerna, när de blir störda, återvänder till ursprungsläget, om ingen nettoändring sker. Om nettoförändring sker, så antas ett nytt läge, utan att synkronismen tappas. Vanligtvis orsakar störningen en transient, som har oscillativ karaktär. Om systemet är stabilt, kommer denna oscillation att dämpas ut.

Ett viktigt stabilitetsproblem i stora elkraftsystem är lågfrekvent oscillation hos systemet, vanligtvis från delar av Hz till några Hz. Oscillationen kan fortgå under flera minuter eller växa, så att systemseparation sker, om inte tillräcklig dämpning finns vid den frekvens som systemet pendlar vid. Den lågfrekventa svängningens periodtid beror på trögheten hos synkronmaskinerna samt av styvheten på överföringsledningarna.

Ett sätt att mäta stabilitet är att titta på synkronmaskinens rotorvinkel mätt relativt ett synkront roterande referenssystem. Om skillnaden i vinkel mellan två maskiner ökar oavbrutet, eller om svängningens transient inte är tillräckligt dämpad, då är systemet instabilt.

2.2 Matematiska samband

Ett elkraftsystems dynamiska problem är huvudsakligen de från synkrongeneratoren. Den matematiska modell som används för synkrongeneratoren är en andra ordningens modell, den så kallade klassiska modellen. De ekvationer som leder fram till denna modell är följande.

Momentekvationen för synkrongeneratoren kan skrivas.

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e - T_d - T_l \quad (2.1)$$

J är tröghetsmomentet för de roterande delarna i synkrongeneratoren, ω_m är vinkelhastigheten på synkrongeneratoren, T_m är det tillförda mekaniska momentet, T_e är det elektriska moment som uppkommer i synkrongeneratoren då elektrisk effekt överförs från den, T_d motsvarar det moment som uppkommer på grund av förlusterna i synkrongeneratoren, T_l är det elektriska moment som uppkommer på grund av den effekt som förbrukas av en lokal last, sedd från synkrongeneratoren. Normering av ekvationen med basmomentet T_b medför att resultaten görs oberoende av verkliga värden. Det vill säga olika stora synkrongeneratorer ger samma simuleringsresultat.

$$T_b = \frac{P_b}{\omega_{mb}} \quad (2.2)$$

P_b är den valda baseffekten och ω_{mb} är den mekaniska vinkelbashastigheten.

$$\frac{\omega_{mb}}{P_b} \cdot \frac{P_b}{\omega_{mb}} \cdot J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_m}{T_b} - \frac{T_e}{T_b} - \frac{T_d}{T_b} - \frac{T_l}{T_b} \quad (2.3)$$

Tröghetskonstanten H för en generator definieras som

$$H = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \frac{\omega_{mb}^2}{S_b} \quad (2.4)$$

där $J \cdot \omega_{mb}^2/2$ motsvarar det roterande systemets kinetiska energi.

Tröghetskonstanten H representerar joule per volt ampere, J/VA , och har enheten sekunder. Det antas att vinkeln mellan spänning och ström är liten, det vill säga att den skenbara effekten, S_b , kan approximeras med den aktiva effekten, P_b . Vridmomentet skrivs som $T = P/w$, w som är en normerad storhet är väsentligen lika med ett. Därför kan i normerad version effekten med god approximation ersätta vridmomentet i differentialekvationen. Ekvationen skrivs då som.

$$2 \cdot H \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - P_d - P_l \quad (2.5)$$

Effektvinkeln är benämningen för synkrongenerators rotorvinkel i förhållande till ett roterande referenssystem. Effektvinkelns ändringshastighet beskrivs enligt följande.

$$\frac{d(\delta)}{dt} = \omega_b \cdot (\omega - 1) \quad (2.6)$$

Ekvationen uttrycks i radianer per sekund.

Den klassiska modellen utgörs av de här två differentialekvationerna.

För de ingående effekterna gäller följande. P_m är den mekaniska in-effekten till synkronmaskinen som levereras av vattenturbinen. P_e är den uttagna och överförda elektriska effekten och skrivs som.

$$P_e = \frac{e \cdot v_t}{X_{12}} \cdot \sin(\delta) \quad (2.7)$$

$$e = v_t + j \cdot X_{12} \cdot i \quad (2.8)$$

Trögheten av maskinerna i ett stort elkraftsystem kommer att innebära, att spänningen väsentligen kommer att vara konstant, åtminstone vid små störningar. Förenklat skrivs ekvationen som.

$$P_e = \frac{\sin(\delta)}{X_{12}} \quad (2.9)$$

P_d är förlusteffekten och skrivs som.

$$P_d = D \cdot \omega \quad (2.10)$$

P_l är den effekt som förbrukas av en lokal last och skrivs som.

$$P_l = P_{l1} \cdot \omega_{\text{freber}} \quad (2.11)$$

Parametern ω_{freber} anger den lokala lastens frekvensberoende.

Frekvensen på nätet skiljer sig från den mekaniska frekvensen med en faktor som beror på poltalet. Normerade med respektive normeringsfaktor är de dock båda approximativt lika med ett, och de kan därför sättas lika. Konventionen är att använda frekvensen på nätet som bas-hastighet och elektriska radianer för effektvinkeln.

2.3

Beteckningar

Variablerna från avsnitt 2.2, är samlade i detta avsnitt.

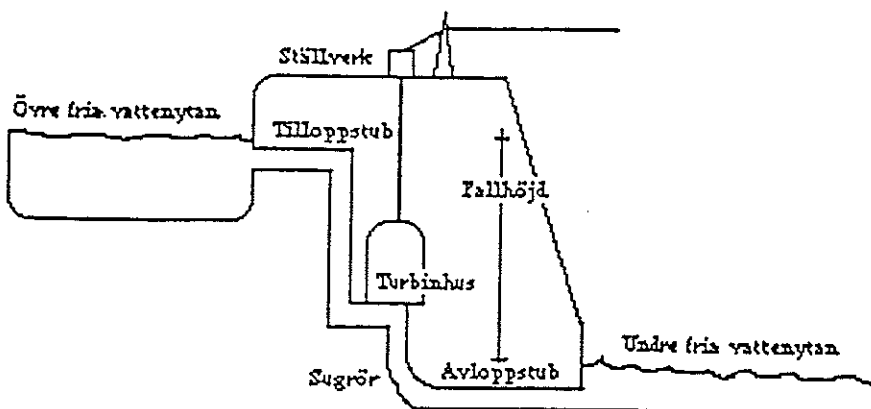
J	Tröghetsmoment, kgm^2
wm	Synkrogenerators vinkelhastighet, rad/s.
wmb	Mekanisk basvinkelhastighet, rad/s.
wb	Elektrisk basvinkelhastighet, rad/s.
w	Normerad vinkelhastighet, p.u.
Tm	Tillfört mekaniskt moment, Nm.
Te	Elektriskt moment tillförd av överförd effekt, Nm.
Td	Elektriskt moment tillförd av förlusterna, Nm.
Tl	Elektriskt moment tillförd av belastningen, Nm.
Tb	Basmomentet, Nm.
Pm	Normerad tillförd mekanisk effekt, p.u.
Pe	Normerad elektrisk effekt, p.u.
Pd	Normerad förlust effekt, p.u.
Pl	Normerad belastnings effekt, p.u.
Pl1	Normerad belastnings effekt vid nominell frekvens, p.u.
Pb	Baseffekten, W.
Sb	Generators märkeffekt, VA.
freber	Bestämmer frekvensberoendet för belastningen, p.u.
H	Tröghetskonstanten för en elkraftsgenerator, s.
e	Generators spänning, V.
vt	Elkraftsnätets spänning, V.
i	Elkraftsnätets ström, A.
X12	Elkraftsnätets reaktans, ohm.
D	Generators förlustfaktor, p.u.

3 Vattenkraft

I det här kapitlet behandlas de delar av vattenkraften som har betydelse för examensarbetet, det vill säga vattenturbinen samt dess vattenvägar. Avsnitt 3.1 visar en principiell vattenkraftstation i stora drag dessutom presenteras de olika vattenturbiner som används idag. Avsnitt 3.2 behandlar de matematiska samband som leder fram till simuleringsmodellerna, avsnittet är indelat i tilloppstuben, peltonturbinen, francisturbinen, kaplanturbinen och sugröret. I avsnitt 3.2.6 finns en lista på de beteckningar som används i avsnitt 3.2.

3.1 Vattenturbinen och vattenvägarna

En vattenkraftstations uppgift är att omvandla vattnets lägesenergi till elektrisk energi. För att åstadkomma den här omvandlingen fodras det att antalet komponenter förutom vattenturbinen, figur 3.1 visar en principskiss av en vattenkraftstation.



Figur 3.1. Principskiss av en vattenkraftstation.

Tilloppstuben omvandlar vattnets lägesenergi till ett övertryck vid vattenturbinen. Tryckskillnaderna i turbinen ger upphov till ett vridmoment på löpskovlarna, som omvandlas till elektrisk energi i en synkrongenerator.

Vattenturbiner delas in i två grupper beroende på principen för hur omvandlingen sker, de två grupperna är impulsturbiner och reaktionsturbiner. De vattenturbiner som i huvudsak används för elkraftproduktionen är peltonturbiner, francisturbiner och kaplanturbiner. Peltonturbinen är en impulsturbin de andra är reaktionsturbiner.

Impulsturbiner är av liktryckstyp där tillgänglig energi omvandlas till kinetisk energi i ett eller flera munstycke. Vattnet från munstyckena träffar löpskovlarna på turbinhjulet under atmosfäriskt tryck och faller där efter fritt till en undre fri vattenyta. Den energi som vattnet besitter, då det lämnar löpskovlarna, går därför förlorad.

Reaktionsturbiner är av övertryckstyp, där en del av vattnets energi omvandlas till kinetisk energi i justerbara ledskovlar, innan vattnet får träffa löpskovlarna, där resterande energi omvandlas till kinetisk energi.

Ledskovlar och löpskovlar är vid alla tidpunkter omslutna av vatten, vilket gör det möjligt att använda ett sugrör tillsammans med den här sortens vattenturbin.

Sugröret, som återfinns tillsammans med de flesta reaktionsturbiner, har till uppgift att ta tillvara den kinetiska energi som vattnet besitter då det lämnar löpskovlarna. Sugrörets area ökar med avståndet från löpskovlarna, vilket medför en hastighetsminskning hos vattnet. Detta medför att trycket på vattnet då det lämnar löpskovlarna är mindre än vad trycket är vid den undre fria vattenytan. Den här tryckminskningen innebär att all energi kan tas tillvara trots att turbinen är placerad ovanför den nedre fria vattenytan, det förekommer dock små friktionsförluster, som förbrukar en del energi.

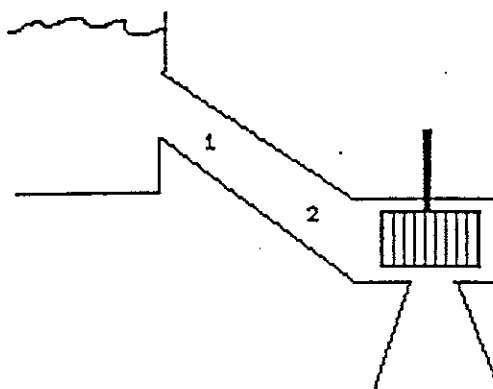
Vattnets lägesenergi bestäms av massan på vattnet och övre vattenytans höjd över den undre vattenytan, denna höjd benämns fallhöjd. Effektiv fallhöjd är den fallhöjd, som verkar på turbinen. Vid stationärt flöde är denna lika med höjden mellan övre och undre vattenytan, det vill säga fallhöjden. Den effektiva fallhöjden skiljer sig från fallhöjden, då flödet genom turbinen ändrar sig, eftersom en ändring på flödet förbrukar en del av vattnets lägesenergi till att accelerera vattnet till den nya flödes-hastigheten. Kvar finns då en mindre del av energin, som verkar på turbinen.

3.2 Matematiska samband

De dynamiska förlopp, som uppkommer i en vattenkraftstation, bestäms av vattenflödet i tilloppstuben. Omvandlingen av flödet till effekt i turbinen innehåller endast icke dynamiska relationer.

3.2.1 Tilloppstuben

Vattenflödet i tilloppstuben beskrivs av en första ordningens differentialekvation. Följande härledning leder fram till denna ekvation. Figur 3.2 visar en godtycklig tilloppstub. Index i ekvationerna hänför sig till de i figuren markerade punkterna.



Figur 3.2. Godtycklig tilloppstub.

Tillämpning av Bernoullisekvation på tilloppstuben ger följande ekvation, uttryckt i enheten meter.

$$\frac{P_1}{\text{RAU} \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + H_1 = \frac{P_2}{\text{RAU} \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + H_2 + h_f \quad (3.1)$$

P betecknar trycket, V betecknar vattenhastigheten, H betecknar höjden över en referensnivå, dessutom betecknar h_f fallhöjdsförlust på grund av strömningsförlusterna. Massan, M, av vattnet i tilloppstuben är summan av produkten mellan längd och area, $\Sigma (L \cdot A)$. Produkten beräknas för den dellängd av tilloppstuben som har konstant area. Trycket vid punkt 2 kan skrivas med hjälp av Newtons andra lag enligt följande.

$$P_2 = P_1 + \frac{M}{A_2} \cdot \frac{dV_2}{dt} = P_1 + \frac{\text{RAU} \cdot \Sigma (L \cdot A)}{A_2} \cdot \frac{dV_2}{dt} \quad (3.2)$$

Fallhöjd och flöde skrivs

$$H = H_1 - H_2 \quad (3.3)$$

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (3.4)$$

En kombination av dessa ekvationer ger

$$\frac{\Sigma (L \cdot A)}{g \cdot A_2^2} \cdot \frac{dQ}{dt} = H - h_f + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_1^2} - \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_2^2} \quad (3.5)$$

Ekvationens vänsterled förlängs med basflödet Q_b , vänster och högerled normeras med basfallhöjden H_b .

$$\frac{L \cdot A}{g \cdot A_2^2} \cdot \frac{Q_b}{H_b} \cdot \frac{dQ/Q_b}{dt} = \frac{H}{H_b} - \frac{h_f}{H_b} + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot H_b \cdot A_1^2} - \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot H_b \cdot A_2^2} \quad (3.6)$$

Den effektiva fallhöjden, H_T , som verkar vid punkt 2, skrivs som

$$H_T = \frac{Q^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \quad (3.7)$$

Vattentidskonstanten TW skrivs som

$$TW = \frac{\Sigma (L \cdot A)}{g \cdot A_2^2} \cdot \frac{Q_b}{H_b} \quad (3.8)$$

Den normerade differentialekvationen skrivs i per enhet enligt följande.

$$TW \cdot \frac{dQ_n}{dt} = H_n - H_{Tn} \quad (3.9)$$

Med en likformig tilloppstub, det vill säga arean är konstant längs hela tilloppstuben, kan vattenkonstanten skrivas

$$TW = \frac{L \cdot Vb}{g \cdot Hb} \quad (3.10)$$

Vid simuleringarna används normerade ekvationer, de normeringsstorheter som används är

$$Vb = \text{SQRT}(2 \cdot g \cdot Hb) \quad (3.11)$$

$$Qb = Vb \cdot Ab \quad (3.12)$$

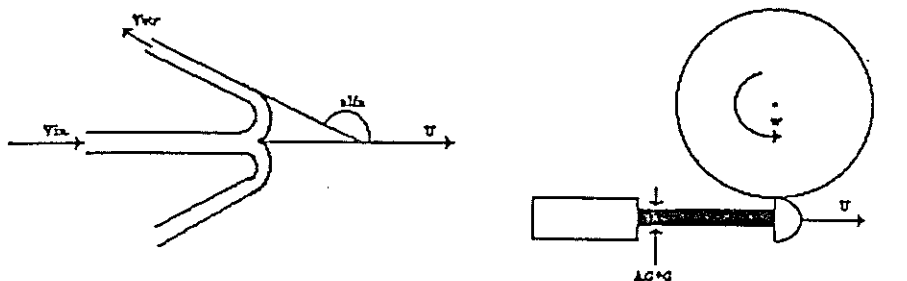
$$Pb = \text{RAU} \cdot g \cdot Hb \cdot Qb \quad (3.13)$$

Hb väljs oftast att vara avståndet mellan övre och undre fria vattenytan, Ab väljs till att vara ledskovelöppningen vid fullt öppna ledskovlar.

Den effektiva fallhöjden för en likformig tilloppstub har inget värde förrän munstycken eller ledskovlar ansluts till tilloppstuben. Följande avsnitt visar relationerna då dessa ansluts.

3.2.2 Peltonturbinen

Peltonturbinen är den enda vattenturbin av liktryckstyp som tillverkas idag. Den används företrädesvis vid små flöden och stora fallhöjder. Turbinen är en impulsturbin, vilken omvandlar den tillgängliga energin till kinetisk energi i ett eller flera munstycken. Mynningsarean på munstyckena bestämmer flödet och därmed effekten. Vattnet lämnar munstyckena med hög hastighet och träffar löpskovlarna på löphjulet i tangentiell riktning. Efter att ha passerat löpskovlarna får vattnet falla fritt till den undre fria vattenytan. Den läges- och rörelseenergi, som vattnet besitter då det lämnar löpskovlarna, går därför förlorad. Figur 3.3 visar en löpskovel och hur vattnet omlänkas av den, dessutom visas löphjulet med en löpskovel.

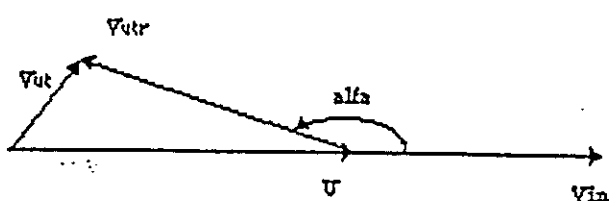


Figur 3.3. Omlänkning i löpskovel och löphjulet med en löpskovel.

Vattnet omlänkas i löpskoveln, och den kraft som då uppkommer på löpskoveln kan med impulssatsen skrivas.

$$F = \frac{dM}{dt} \cdot (V_{in} - V_{ut}) \quad (3.14)$$

Hastigheterna i impulssatsen kan vara absoluta eller relativa hastigheter, så länge båda väljs till att vara samma. Hastighetstriangeln för vattenhastigheterna vid löpskovlarna visas i figur 3.4. I figuren betecknar U hastigheten på löpskovlarna, index r betecknar hastighet relativt löpskoveln och övriga hastigheter är absoluta hastigheter.



Figur 3.4. Hastighetstriangeln för en Peltonturbin.

Hastigheterna i impulssatsen kommer att vara relativ hastighet i tangentiell riktning och uttrycks som.

$$V_{int} = V_{inr} \quad (3.15)$$

$$V_{utt} = V_{utr} \cdot \cos(\text{alfa}) \quad (3.16)$$

Dessutom gäller att

$$V_{inr} = V_{utr} = V_{in} - U \quad (3.17)$$

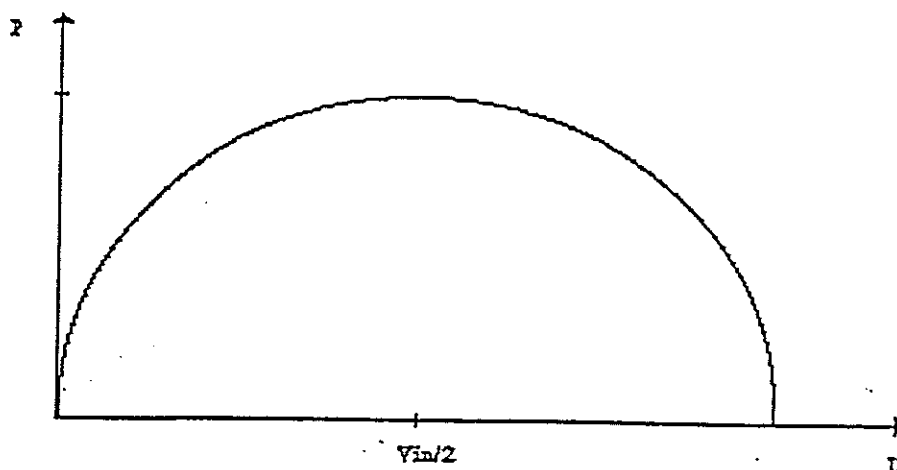
Vilket leder fram till den slutliga formen på impulssatsen

$$F = \frac{dM}{dt} \cdot (V_{in} - U) \cdot (1 - \cos(\text{alfa})) \quad (3.18)$$

Uttagen effekt från vattnet kan då skrivas

$$\begin{aligned} P &= \frac{dM}{dt} \cdot U \cdot (V_{in} - U) \cdot (1 - \cos(\text{alfa})) \\ &= RAU \cdot Q \cdot U \cdot (V_{in} - U) \cdot (1 - \cos(\text{alfa})) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Figur 3.5 visar hur effekten varierar med hastigheten på skoveln.



Figur 3.5. Effekt som funktion av löpskovelhastighet.

Vattenturbinen är mekaniskt sammankopplad med en generator, vilket innebär att turbinens hastighet är nästan konstant och bundet till generatorns poltal och frekvensen på nätet. Av ekonomiska skäl väljs hastigheten på löphjulet, så att vattenturbinen avger maximal effekt. Vattnets omlänkning är oftast mycket nära 180 grader. Om detta används tillsammans med hastigheten som ger maximal effekt, kan ekvationen för effekten uttryckas som.

$$P = \text{RAU} \cdot Q \cdot \frac{v_{in}^2}{2} = \frac{\text{RAU} \cdot Q^3}{2 \cdot \text{AG}^2 \cdot G^2} \quad (3.20)$$

Där $\text{AG} \cdot G$ är arean på vattenstrålen, G bestämmer pådraget och väljes att vara mellan noll och ett. Tillgänglig effekt vid vattenturbinen är.

$$P = \frac{dM}{dt} \cdot g \cdot \text{HT} = \text{RAU} \cdot Q \cdot g \cdot \text{HT} \quad (3.21)$$

Den på turbinen verkande effektiva fallhöjden kan med dessa ekvationer skrivas.

$$\text{HT} = \frac{P}{\text{RAU} \cdot Q \cdot g} = \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot \text{AG}^2 \cdot G^2} \quad (3.22)$$

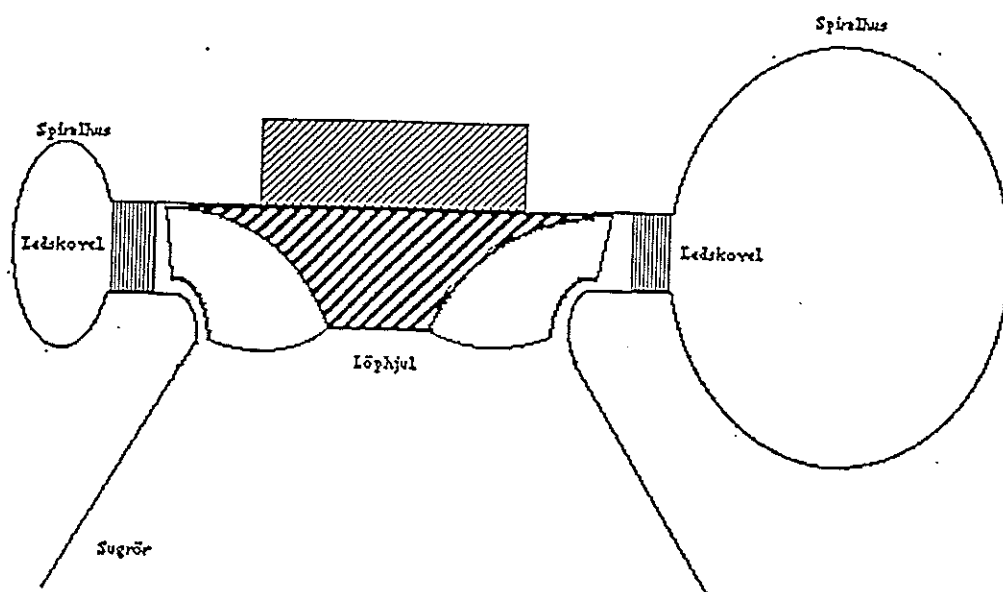
Effekten och den effektiva fallhöjden skrivs normerat enligt följande.

$$P_n = \frac{P}{P_b} = \frac{Q_n^3}{G^2} \cdot \frac{Q_b^2}{2 \cdot g \cdot \text{AG}^2 \cdot H_b} \quad (3.23)$$

$$\text{HT}_n = \frac{\text{HT}}{\text{HT}_b} = \frac{Q_n^2}{G^2} \cdot \frac{Q_b^2}{2 \cdot g \cdot \text{AG}^2 \cdot H_b} \quad (3.24)$$

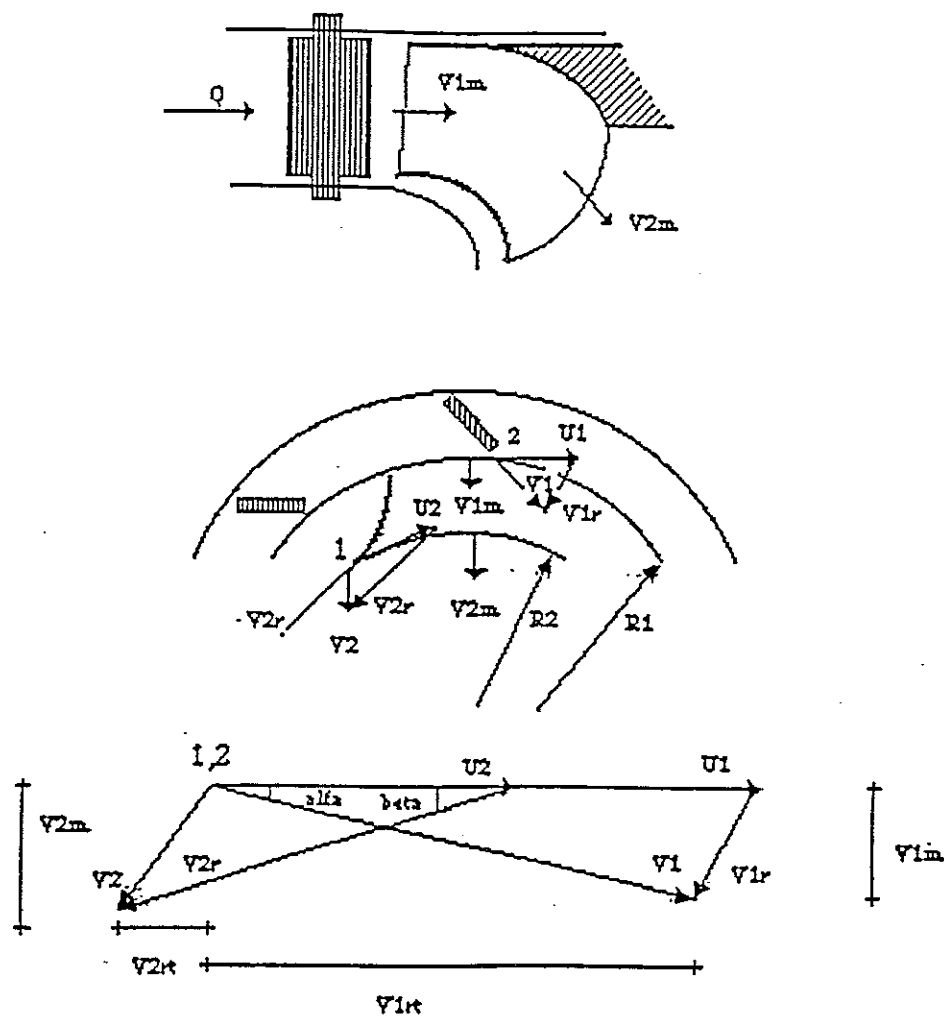
3.2.3 Francisturbinen

Francisturbinen är en radiell eller halvaxiell övertrycksturbin. Turbinen används vid medelstora vattenflöden och medelstora fallhöjder. Turbinen är av reaktionstyp och är hela tiden omsluten av vatten. Tillloppet till löpskovlarna sker genom en tilloppstub, som avslutas i ett spiralhus. Spiralhuset omsluter ledskovlarna, som genomströmmas av vattnet i radiell riktning. Öppningen på ledskovlarna bestämmer flödet och därmed effekten, som produceras av turbinen. Vätskan träffar löphjulet, så att den relativa hastigheten är tangentiell till den yttre delen av löpskovelhjulet. Den radiella komponenten ändras gradvis till en axiell komponent, och den tangentiella komponenten minskar när vattnet passerar löpskovel. Vid utloppet är flödet axiellt med väldigt liten tangentiell komponent. Trycket har reducerats till mindre än atmosfärstrycket i sugröret. En francisturbin med spiralhus, ledskovlar, löphjul och sugrör visas i figur 3.6.



Figur 3.6. Francisturbin.

Kraften på löpskovlarna beräknas med hjälp av hastighetstrianglarna som visas i figur 3.7, där även led- och löpskovlar visas. Markerade punkter i figuren är de punkter som används som referenspunkter för hastighetstrianglarna.



Figur 3.7. Hastighetstrianglar och punkter, där hastigheterna uppträder.

Index i följande ekvationer hänför sig till de i figur 3.7 markerade punkter, vinklar och hastigheter. Index m betecknar medelhastigheten över tvärsnittsytan i respektive punkt. Hastigheterna V_1 och V_2 är absoluta hastigheter, U_1 och U_2 är hastigheterna på löpskovel, V_{1r} och V_{2r} är hastigheter relativt löpskovel i respektive punkter dessutom är V_{1rt} och V_{2rt} de tangentiella komponenterna av V_{1r} och V_{2r} .

Medelhastigheterna i radiell riktning kan skrivas

$$V_{1m} = V_1 \cdot \sin(\alpha) = \frac{Q}{AG \cdot G} \cdot \sin(\alpha) \quad (3.25)$$

$$V_{2m} = V_2 \cdot \sin(\beta) \quad (3.26)$$

$$V_{2m} = \frac{A_1}{A_2} \cdot V_{1m} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{Q}{AG \cdot G} \cdot \sin(\alpha) \quad (3.27)$$

där Q är vattenflödet och $AG \cdot G$ är den effektiva arean vid ledskovlarna. A_1 och A_2 är de effektiva areorna vid punkt 1 och punkt 2. Vinkeln α är vinkeln under vilken vattnet träffar löpskovlarna vid punkt 1, denna vinkel beror på öppningsvinkeln på ledskovlarna. Vinkeln β är vinkeln under vilken vattnet lämnar löpskovlarna. Denna vinkel beror på utformningen på löpskovlarna. Med hjälp av dessa samband kan de relativa hastigheterna, i tangentiell led, på löpskovlarna uttryckas enligt följande.

$$V_{1rt} = V_1 \cdot \cos(\alpha) \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} V_{2rt} &= U_2 - V_{2r} \cdot \cos(\beta) = U_2 - \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{Q}{AG \cdot G} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} \cdot \cos(\beta) \\ &= U_2 - \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{Q}{AG \cdot G} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cot(\beta) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Dessutom så är

$$R_1 = K \cdot R_2 \quad K > 1.0 \quad (3.30)$$

$$R_m = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (3.31)$$

Vilket ger att

$$U_m = R_m \cdot w \quad (3.32)$$

$$U_2 = R_2 \cdot w = \left(\frac{2 \cdot R_m}{K + 1} \right) \cdot w = \frac{2 \cdot U_m}{K + 1} \quad (3.33)$$

Kraften på löpskovlarna skrivs med hjälp av impulslagen

$$\begin{aligned} F &= RAU \cdot Q \cdot \left(\frac{Q}{AG \cdot G} \cdot \cos(\alpha) - \frac{2 \cdot U_m}{K + 1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{Q}{AG \cdot G} \right) \\ &\cdot \sin(\alpha) \cdot \cot(\beta) \end{aligned} \quad (3.34)$$

Vilket ger effekten

$$\begin{aligned} P &= F \cdot U_m = RAU \cdot Q \cdot U_m \cdot \left(\frac{Q}{AG \cdot G} \cdot \cos(\alpha) - \frac{2 \cdot U_m}{K + 1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{Q}{AG \cdot G} \right) \\ &\cdot \frac{Q}{AG \cdot G} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cot(\beta) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Turbinen är mekaniskt sammankopplad med en generator, vilket innebär att turbinens hastighet är nästan konstant och bundet till frekvensen på nätet genom generatorns poltal. Av ekonomiska skäl väljs hastigheten på turbinen, så att maximal energi produceras av turbinen. Maximal effekt och motsvarande hastighet skrivs. Hastigheten som avses här är medelhastigheten på löpskoveln, U_m .

$$P = \text{RAU} \cdot Q^3 \cdot \frac{K+1}{8} \cdot \left(\frac{1}{\text{AG} \cdot G} \cdot \text{COS}(\text{alfa}) + \frac{\text{A1}}{\text{A2}} \cdot \frac{1}{\text{AG} \cdot G} \cdot \text{SIN}(\text{alfa}) \cdot \text{COT}(\text{beta}) \right)^2 \quad (3.36)$$

$$\text{Um} = \frac{K+1}{4} \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{\text{AG} \cdot G} \cdot \text{COS}(\text{alfa}) + \frac{\text{A1}}{\text{A2}} \cdot \frac{1}{\text{AG} \cdot G} \cdot \text{SIN}(\text{alfa}) \cdot \text{COT}(\text{beta}) \right) \quad (3.37)$$

Tillgänglig effekt till turbinen är

$$P = \frac{dM}{dt} \cdot g \cdot \text{HT} = \text{RAU} \cdot Q \cdot g \cdot \text{HT} \quad (3.38)$$

Vilket ger att den på turbinen verkande effektiva fallhöjden är

$$\text{HT} = \frac{P}{\text{RAU} \cdot Q \cdot g} = \frac{K+1}{8 \cdot g} \cdot Q^2 \cdot \left(\frac{1}{\text{AG} \cdot G} \cdot \text{COS}(\text{alfa}) + \frac{\text{A1}}{\text{A2}} \cdot \frac{1}{\text{AG} \cdot G} \cdot \text{SIN}(\text{alfa}) \cdot \text{COT}(\text{beta}) \right)^2 \quad (3.39)$$

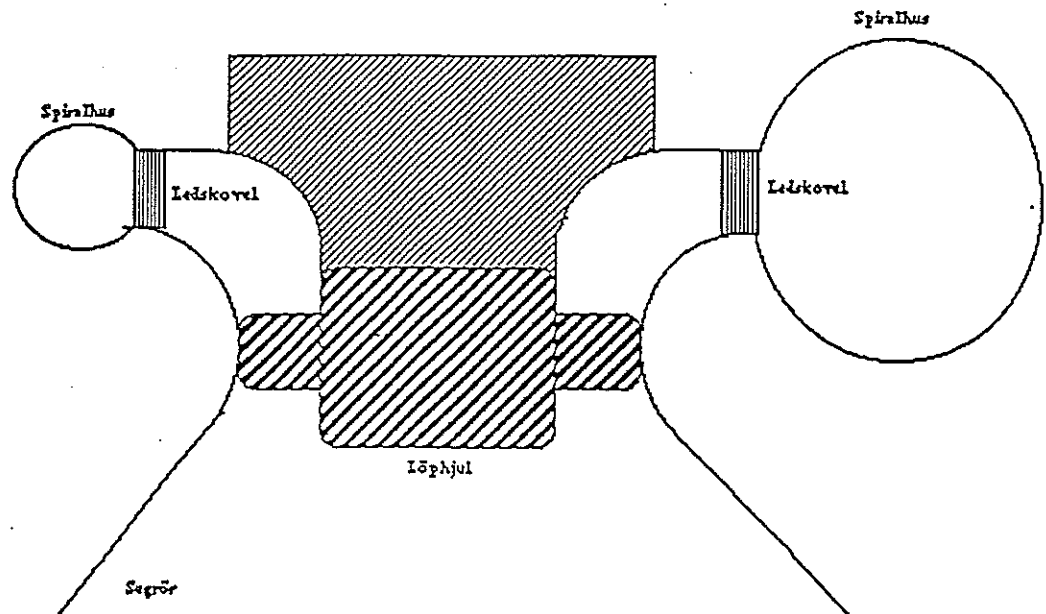
Normerat skrivs effekten och den effektiva fallhöjden enligt följande.

$$\text{Pn} = \frac{P}{\text{Pb}} = \frac{Qn^3}{G^2} \cdot \left(\frac{1}{\text{AG}} \cdot \text{COS}(\text{alfa}) + \frac{\text{A1}}{\text{A2}} \cdot \frac{1}{\text{AAG}} \cdot \text{SIN}(\text{alfa}) \cdot \text{COT}(\text{beta}) \right)^2 \cdot \frac{K+1}{8 \cdot \text{Hb} \cdot g} \cdot Qb^2 \quad (3.40)$$

$$\text{HTn} = \frac{\text{HT}}{\text{HTb}} = \frac{Qn^2}{G^2} \cdot \left(\frac{1}{\text{AG}} \cdot \text{COS}(\text{alfa}) + \frac{\text{A1}}{\text{A2}} \cdot \frac{1}{\text{AG}} \cdot \text{SIN}(\text{alfa}) \cdot \text{COT}(\text{beta}) \right)^2 \cdot \frac{K+1}{8 \cdot \text{Hb} \cdot g} \cdot Qb^2 \quad (3.41)$$

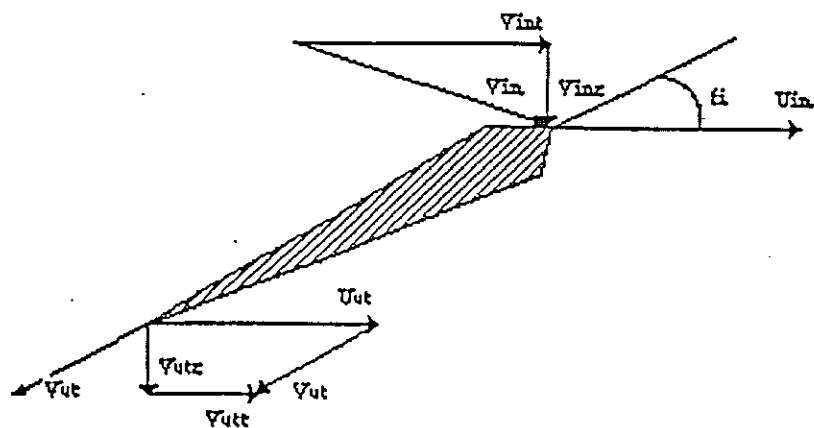
3.2.4 Kaplanturbinen

Kaplanturbinen är en axiell övertrycksturbin, som företrädesvis används vid stora vattenflöden och små fallhöjder. Turbinen är av reaktionstyp och är hela tiden omsluten av vatten. Tilloppet till löpskovlarna sker genom en tilloppstub som avslutas i ett spiralhus. Spiralhuset omsluter ledskovlarna, som genomströmmas av vattnet i radiell riktning. Öppningen på ledskovlarna och i någon mån löpskovelvinkeln bestämmer flödet och därmed effekten, som produceras av turbinen. Mellan ledskovlarna och löpskovlarna finns ett skovellöst rum, där strömmen omböjes från radiell riktning till axiell riktning. Löphjulet innehåller ett fåtal vridbara löpskovlar. Efter löphjulet ansluts vanligtvis ett sugrör för att ta tillvara den rörelseenergi, som vattnet besitter, då den lämnar löphjulet. En kaplanturbin med spiralhus, ledskovlar, löphjul och sugrör visas i figur 3.8.



Figur 3.8. Kaplanturbin.

Kraften som påverkar löpskovlarna i en kaplanturbin analyseras med hjälp av hastighetstrianglar, som beskriver hastigheterna vid löpskovlarna.



Figur 3.9. Hastighetstrianglarna vid en kaplanlöpskovel.

Hastighetstrianglarna och en löpskovel visas i figur 3.9. V_{in} och V_{ut} är vattenhastigheterna på löpskoveln vid den effektiva momentarmen på inflödet respektive utflödet. V_{in} är absolut hastighet, medan V_{ut} är hastigheten relativt löpskoveln. V_{int} och V_{utt} är vattnets hastighetskomponenter i tangentens riktning. V_{inz} och V_{utz} är vattnets axiella

hastighets komponenter, dessutom är U_{in} och U_{ut} löpskovelns hastighet vid in och utflödet. Under antagande att den effektiva momentarmen är konstant, skrivs löpskovelns hastighet som.

$$U = U_{in} = U_{ut} = R \cdot N \quad (3.42)$$

där N är varvtalet på turbinen. Konstant area, A , längs löpskoveln ger den axiella hastigheten

$$V_z = V_{inz} = V_{utz} = \frac{Q}{A} \quad (3.43)$$

Hastigheten i tangentens riktning vid inloppet till löpskovlarna kan skrivas

$$V_{int} = \frac{Q}{AG \cdot G} \quad (3.44)$$

Där $AG \cdot G$ är arean vid ledskovlarna, G bestämmer pådraget och väljes att vara mellan noll och ett. Impulssatsen ger kraften på löpskovlen.

$$F = \frac{dM}{dt} \cdot (V_{int} - V_{utt}) \quad (3.45)$$

Den hydrauliska effekt, som verkar på turbinen, skrivs då

$$P = F \cdot U = \frac{dM}{dt} \cdot U \cdot (V_{int} - V_{utt}) \quad (3.46)$$

Från figur 3.9 kan hastigheten V_{utt} skrivas enligt följande.

$$V_{utt} = U - V_z \cdot \cot(\beta) = U - \frac{Q}{A} \cdot \cot(\beta) \quad (3.47)$$

Insättes hastigheterna V_{int} och V_{utt} i ekvationen för den hydrauliska effekten fås följande ekvation.

$$\begin{aligned} P &= \frac{dM}{dt} \cdot U \cdot \left(\frac{Q}{AG \cdot G} + \frac{Q}{A} \cdot \cot(\beta) - U \right) \\ &= RAU \cdot Q \cdot U \cdot \left(\frac{Q}{AG \cdot G} + \frac{Q}{A} \cdot \cot(\beta) - U \right) \end{aligned} \quad (3.48)$$

Turbinen är mekaniskt sammankopplad med en generator, vilket innebär att turbinens hastighet är konstant och bundet till frekvensen på nätet genom generatorns poltal. Av ekonomiska skäl väljs hastigheten på löpskovelns, så att maximal energi produceras av turbinen. Maximal effekt och motsvarande hastighet skrivs

$$P = \frac{RAU \cdot Q^3}{4} \cdot \left(\frac{1}{AG \cdot G} + \frac{1}{A} \cdot \cot(\beta) \right)^2 \quad (3.49)$$

$$U = \frac{Q^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{AG \cdot G} + \frac{1}{A} \cdot \cot(\Omega) \right) \quad (3.50)$$

Tillgänglig effekt till turbinen är

$$P = \frac{dM}{dt} \cdot g \cdot HT = RAU \cdot Q \cdot g \cdot HT \quad (3.51)$$

Vilket ger att den på turbinen verkande effektiva fallhöjden är

$$HT = \frac{P}{RAU \cdot Q \cdot g} = \frac{Q^2}{4 \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{AG \cdot G} + \frac{1}{A} \cdot \cot(\Omega) \right)^2 \quad (3.52)$$

Normerat skrivs effekten och den effektiva fallhöjden enligt följande.

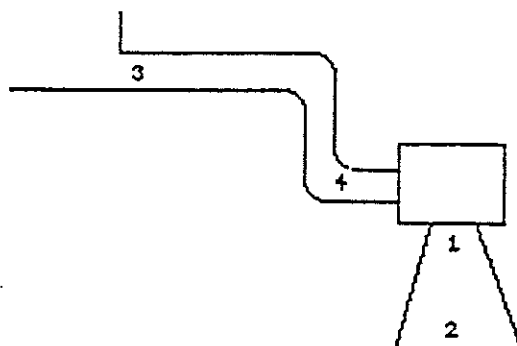
$$Pn = \frac{P}{Pb} = Qn^3 \cdot \left(\frac{1}{AG \cdot G} + \frac{1}{A} \cdot \cot(\Omega) \right)^2 \cdot \frac{Qb^2}{4 \cdot g \cdot Hb} \quad (3.53)$$

$$HTn = \frac{HT}{HTb} = Qn^2 \cdot \left(\frac{1}{AG \cdot G} + \frac{1}{A} \cdot \cot(\Omega) \right)^2 \cdot \frac{Qb^2}{4 \cdot g \cdot Hb} \quad (3.54)$$

3.2.5

Sugröret

I en reaktionsturbin har sugröret till uppgift att ta tillvara den energi, som finns kvar i vattnet då det lämnar löpskovlarna. Detta sker genom att gradvis öka tvärsnittsarean ju längre från löpskovlarna man kommer. Sugrörets fallhöjd omvandlas till en tryckminskning, vilket medför att den effektiva fallhöjd, som verkar på turbinen, motsvarar hela det geometriska avståndet mellan den övre och den undre fria vattenytan. Figur 3.10 visar en vattenkraftstation med tilloppstub och sugrör. En beräkning på sugröret med Bernoullis ekvation visar att trycket vid löpskovlarna är mindre än atmosfärstrycket. I beräkningarna som följer hänför sig index till de i figuren markerade punkterna. Atmosfärstrycket sätts i beräkningarna till noll, och referensnivån för höjderna är den undre fria vattenytan.



Figur 3.10. Vattenkraftstation med tilloppstub och sugrör.

$$\frac{P_1}{RAU \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + H_1 = 0 \quad (3.55)$$

$$\frac{P_1}{RAU \cdot g} = -\left(\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + H_1 \right) \quad (3.56)$$

Under antagande att vattenhastigheten är konstant genom turbinen, samt att höjden på turbinen är försumbar. Då är Bernoullis ekvation tillämpad på tilloppstuben följande.

$$\frac{P_3}{\rho \cdot g} + \frac{V_3^2}{2 \cdot g} + H_3 = \frac{P_4}{\rho \cdot g} + \frac{V_4^2}{2 \cdot g} + H_4 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} \quad (3.57)$$

P_4 är trycket vid turbinen då inget sugrör är tillkopplat. Ekvationen blir då

$$\frac{P_3}{\rho \cdot g} + \frac{V_3^2}{2 \cdot g} + H_3 = \frac{P_1}{\rho \cdot g} \quad (3.58)$$

Vilket visar att hela fallhöjden verkar på turbinen, då sugröret är tillkopplat.

3.2.6 Beteckningar

Variablerna från avsnitt 3.2, är samlade i detta avsnitt. Index, i, för variablerna innebär, att de uppträder på olika platser.

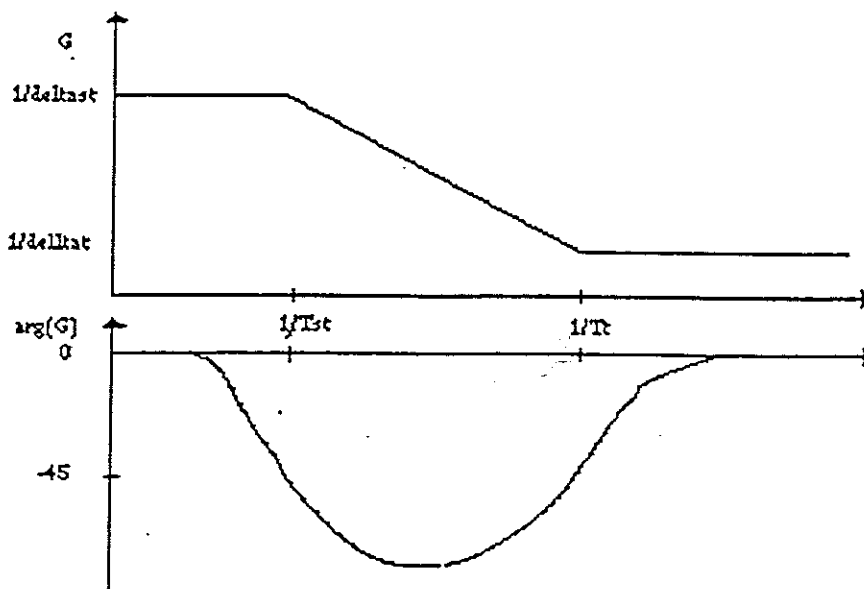
P1	Tryck, N/m^2
RAU	Densiteten på vattnet, $998 \text{ kg}/m^3$
V1	Vattenhastigheter, m/s
g	Tyngdaccelerationen, $9.81 \text{ m}/s^2$.
hf	Strömmnings förluster uttryckt i meter, m.
H	Fallhöjd, m.
HT	Effektiv fallhöjd, m.
H1	Höjder, m.
AG	Area vid ledskovlarna, m^2 .
G	Ledskovelöppning, värdet ligger mellan noll och ett.
M	Massan, kg.
A1	Areor, $m \cdot m$.
Qb	Basvattenflödet, m^3/s .
Q	Verkligt vattenflöde, m^3/s .
Qn	Normerat vattenflöde, p.u.
TW	Vattentidkonstanten, s.
Alfa,beta,fi	Vinklar på vattenhastigheter.
U	Hastigheten på löpskoveln, m/s .
N	Varvtalet på turbinen, $1/s$.

4 Regulatorn

Den regulator som idag används för att reglera vattenturbinen är en proportionell, integrerande och proportionell regulator, PIP regulator. Simuleringarna har skett med en modell med just denna struktur. För regulatorn gäller det att finna, de regulatorparametrar som ger den bästa möjliga dämpning av effektpendlingen. Regleringens förutsättningar och villkor presenteras i avsnitt 4.1. De matematiska samband, som gäller för regulatorn, presenteras i avsnitt 4.2.

4.1 Reglering av vattenturbinen

Vid normala driftlägen används kraftslag med låg rörlig kostnad som baskraft, vilket innebär att kärnkraft och vattenkraft lägger grunden för vårt kraftbehov. Kol- och oljeeldade kraftverk används i sista hand. Kärnkraft är relativt trög reglerad, och därför används vattenkraften för att upprätthålla effektbalansen på elkraftnätet. Effektbalansen mellan producerad och konsumerad effekt kan utläsas genom att betrakta frekvensvariationer, konstant frekvens innebär att elkraftnätet är i balans. Stora ändringar i kraftbalansen kräver att personalen beordrar start av kraftverk eller beordrar en ändring av effektbörvärdet. Mindre frekvensavvikelse, små ändringar i kraftbalansen, regleras automatiskt av en regulator, som har frekvensen på nätet som ärvärde. Utsignalen styr pådraget på ledskovlarna till vattenturbinen. En statisk del i regulatorn bestämmer grundpådraget. Ytterliggare pådrag bestäms av en PIP regulator. Figur 4.1 visar amplitud och faskurvan för regulatorn.



Figur 4.1 Amplitud och faskurvor för en PIP regulator.

4.2 Matematiska samband

Ekvationerna för regulatorm skrivs

$$\frac{dx}{dt} = E - \frac{x}{T_{st}} \quad (4.1)$$

$$E = Y_{ref} - Y \quad (4.2)$$

$$U = P_{st} + \left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_{st}} \right) \cdot x + E \cdot \frac{1}{\text{deltat}} \quad (4.3)$$

Där x är tillståndsvariabeln i ekvationen. E är felet mellan Y_{ref} , som är referensvärdet på frekvensen, och Y , som är frekvensen på nätet. P_{st} är den statiska beordrade effekten för turbinen, effektbörvärdet. T_t och T_{st} bestämmer brytpunkterna för överföringsfunktionen. Beteckningen deltat är förstärkningen för förlopp med periodtider kortare än T_t . Dessutom är $\text{deltast} = \text{deltat} \cdot T_t / T_{st}$, vilket är förstärkningen för förlopp med periodtider längre än T_{st} .

Modellen för regulatorm är en beskrivning på en verklig regulator, och därför begränsas de ingående parametrarna till följande värden.

$$\begin{array}{rclcl} 5 & < & T_t & < & 8 \\ 0.3 & < & \text{deltat} & < & 0.8 \\ 0.02 & < & \text{deltast} & < & 0.08 \end{array}$$

Detta ger

$$18.75 < T_{st} < 320$$

5 Använda modeller och samband

Detta kapitel innehåller de modeller som använts vid simuleringarna samt viktiga samband. Modellerna redovisas som matematiska samband utan några direkta förklaringar. Beteckningar och förklaringar återfinns i respektive kapitel.

5.1 Elkraftsystemet

$$2 \cdot H \cdot \frac{dw}{dt} = P_m - P_e - P_d - P_l \quad (5.1)$$

$$\frac{d(\delta)}{dt} = w_b \cdot (w - 1) \quad (5.2)$$

$$H = \frac{J \cdot w_b^2}{2 \cdot S_b} \quad (5.3)$$

P_m är tillförd effekt •

$$P_e = \frac{\sin(\delta)}{X_{12}} \quad (5.4)$$

$$P_d = D \cdot w \quad (5.5)$$

$$P_l = P_{l1} \cdot w^{\text{freber}} \quad (5.6)$$

5.2 Vattenturbinen

Delkapitlet uppdelas i tillloppstub, peltonturbin, francisturbin och kaplanturbin. Sugröret är tillkopplat och därför förutsätts fallhöjden vara hela höjden mellan övre och undre fria vattenytan.

5.2.1 Tillloppstuben

$$TW \cdot \frac{dQ_n}{dt} = H_n - H_{Tn} \quad (5.7)$$

$$TW = \frac{L \cdot V_b}{g \cdot H_b} \quad (5.8)$$

$$V_b = \text{SQRT}(2 \cdot g \cdot H_b) \quad (5.9)$$

$$Q_b = V_b \cdot A_b \quad (5.10)$$

$$P_b = RAU \cdot g \cdot H_b \cdot Q_b \quad (5.11)$$

5.2.2 Peltonturbinen

$$P_n = \frac{Q_n^3}{G^2} \cdot \frac{Q_b^2}{2 \cdot g \cdot AG^2 \cdot H_b} \quad (5.12)$$

$$H_{Tn} = \frac{Q_n^2}{G^2} \cdot \frac{Q_b^2}{2 \cdot g \cdot AG^2 \cdot H_b} \quad (5.13)$$

5.2.3 Francisturbinen

$$P_n = \frac{Qn^3}{G^2} \cdot \left(\frac{1}{AG} \cdot \cos(\alpha) + \frac{A1}{A2} \cdot \frac{1}{AG} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cot(\beta) \right)^2 \cdot \frac{K+1}{8 \cdot Hb \cdot g} \cdot Qb^2 \quad (5.14)$$

$$HT_n = \frac{Qn^2}{G^2} \cdot \left(\frac{1}{AG} \cdot \cos(\alpha) + \frac{A1}{A2} \cdot \frac{1}{AG} \cdot \cos(\alpha) + \frac{A1}{A2} \cdot \frac{1}{AG} \cdot \sin(\alpha) \cdot \cot(\beta) \right)^2 \cdot \frac{K+1}{8 \cdot Hb \cdot g} \cdot Qb^2 \quad (5.15)$$

5.2.4 Kaplanturbinen

$$P_n = Qn^3 \cdot \left(\frac{1}{AG \cdot G} + \frac{1}{A} \cdot \cot(\beta) \right)^2 \cdot \frac{Qb^2}{4 \cdot g \cdot Hb} \quad (5.16)$$

$$HT_n = Qn^2 \cdot \left(\frac{1}{AG \cdot G} + \frac{1}{A} \cdot \cot(\beta) \right)^2 \cdot \frac{Qb^2}{4 \cdot g \cdot Hb} \quad (5.17)$$

5.3 Regulatorn

$$\frac{dx}{dt} = E - \frac{x}{Tst} \quad (5.18)$$

$$E = Yref - Y \quad (5.19)$$

$$U = Pst + \left(\frac{1}{Tt} - \frac{1}{Tst} \cdot x + E \right) \cdot \frac{1}{deltat} \quad (5.20)$$

6 Genomförandet

Nordelsystemets naturliga pendlingsmoder är, pendling på enskilda samkörningsförbindelser och pendling mellan de yttre delarna av systemet. Periodtiden i det första fallet är ungefär två sekunder. I det andra fallet pendlar systemet med en periodtid inom området tre till fem sekunder. Ett pendlingsförlopp uppkommer, då balansen i systemet störs. I de redovisade simuleringarna har denna balans störts med en laststörning i form av en impuls. Statiskt sker ingen effektöverföring på samkörningsförbindelserna.

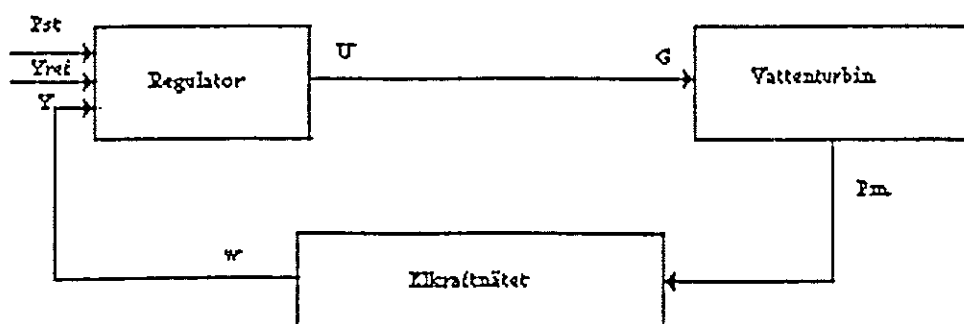
De modellstrukturer som använts för de två olika pendlingsmoderna redovisas i avsnitt 6.1. För att efterlikna verklighetens pendlingsförlopp måste vissa villkor gälla, dessa redovisas i avsnitt 6.2. Använda regulatorinställningar redovisas i avsnitt 6.3. Avsnitt 6.4 och 6.5 ger förklaringar och kommentarer på simuleringsbilderna och bodediagrammen.

6.1 Modellstrukturer

De modellstrukturer som används är följande.

- 1 Pendlingen sker på enskilda samkörningsförbindelser. Modellen består av en generator som matar ett oändligt nät. Blockschemat för modellen visas i figur 6.1.

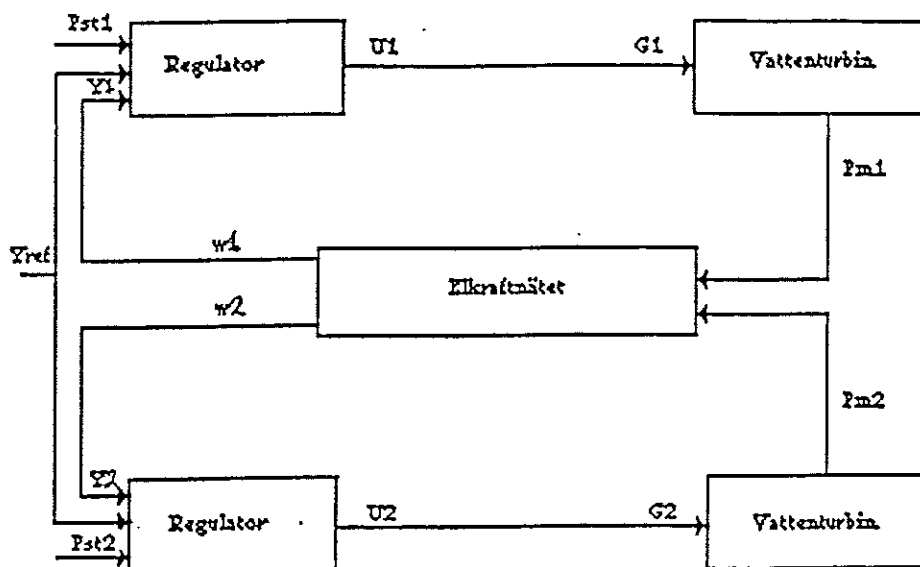
Insignalerna till regulatorn är effektbörvärdet, P_{st} , referensvärdet för frekvensen, Y_{ref} , samt det verkliga värdet på frekvensen, Y . Regulatorns styrsignal, u , styr ut ledskovlarna. Värdet på G representerar hur stor del av den maximala ledskovelöppningen som är öppen. Elkraftnätet påverkas genom en synkrogenerator av vattenturbinen, P_m .



Figur 6.1. Blockschemat över modellen för fall ett.

- 2 Pendlingen sker mellan de yttre delarna av systemet. Modellen består av två generatorer som vardera matar en lokal last och utbyter effekt via en samkörningsförbindelse. Blockschemat för modellen visas i figur 6.2.

Modellen är i stort en dubbling av första fallet. Det som skiljer är att generatorerna inte matar ett oändligt nät.



Figur 6.2. Blockschemat över modellen för fall två.

De simnonprogram som använts redovisas i appendix. I de simuleringar som redovisas används endast modellen för peltonturbinen, eftersom dynamiken i stort bestäms av tilløpstuben. Uppförandet är det samma för francis- och kaplanturbinen, vilket visas av ekvationerna för de olika vattenturbinerna. Dessa ekvationer redovisas i kapitel 5.2. Det bör påpekas att ekvationerna för kaplanturbinen är något förenklade, eftersom dessa utelämnar den ekvation, som beskriver löpskovlarnas rörelse i förhållande till ledskovlarna.

6.2

Villkor för simuleringen

Det som bestämmer det simulerade pendlingsförloppets periodtid och dämpning är parametrarna i modellerna för regulator, vattenturbin och elkraftnät. Regulatormodellens parametrar varieras, samtidigt som alla övriga parametrar hålls konstanta. Detta ger en uppfattning om hur regulatorn påverkar dämpningen. I modellen för vattenturbinen varieras vattentidskonstanten för att se hur detta påverkar dämpningen. Tre olika värden används, dessa motsvarar korta, normala och långa vattentidskonstanter. Parametrarna som ingår i modellen för elkraftnätet hålls konstanta vid alla simuleringarna. Värdena väljs så att verklighetens pendlingsförlopp efterliknas. Periodtiden bestäms väsentligen av reaktansen på överföringsledningen, X12, samt av tröghetskonstanten för synkrongeneratorn, H. För en vattenkraftstation gäller att ett normalt värde på tröghetskonstanten är fyra sekunder. För att erhålla rätta värden på periodtiden medför detta att värdet på reaktansen måste väljas till att vara, 4.0 i fall ett och 35.0 i fall två. Dämpningen av pendlingsförloppet bestäms av värdena på förlustfaktorn, D, och lastens frekvensberoende, freber. Förlusterna i systemet är små, värdet på förlustfaktorn sätts därför till att vara 0.001. Att lasten är frekvensberoende innebär att en positiv dämpning tillförs systemet. Hur stort detta bidrag är beror på värdet på parametern freber. Denna parameter har valts så att

systemet är stabilt för viss inställning av regulatorn, då vattentidskonstanten är tre sekunder. Tre sekunder är en övre gräns på vattentidskonstanten. Värdet på parametern freber har valts till att vara 5.0 i båda fallen. Frekvensberoendet i verkligheten är inte så stort, men det visade sig nödvändigt att använda detta värde för att erhålla stabila pendlingsförlopp med de här modellerna.

6.3 Regulatorinställningarna

Inom ramen för de inställningsmöjligheter som finns på regulatorn, har fyra olika inställningar valts. Dessa fyra inställningar torde ge en bra bild av hur regulatorn har möjlighet att påverka systemet. Bodediagrammet för regulatorn återfinns i appendix, diagramblad 2, och visar alla fyra inställningarna i ett och samma diagram. För de olika inställningarna gäller följande.

- 1 Inställningen har hög stationär förstärkning och hög transient förstärkning. Den transienta tidskonstanten är fem sekunder, vilket ger att den stationära tidskonstanten är sjuttiofem sekunder.
- 2 Inställningen har låg stationär förstärkning och låg transient förstärkning. Den transienta tidskonstanten är åtta sekunder, vilket ger att den stationära tidskonstanten är åttio sekunder.
- 3 Inställningen har låg stationär förstärkning och hög transient förstärkning. Den transienta tidskonstanten är åtta sekunder, vilket ger att den stationära tidskonstanten är trettio sekunder.
- 4 Inställningen har hög stationär förstärkning och låg transient förstärkning. Den transienta tidskonstanten är åtta sekunder, vilket ger att den stationära tidskonstanten är trehundraåtta sekunder.

Sammanställning av parametervärdena finns i tabell 1.

Tabell 1. Regulatorns parametervärden.

Inställning	Stationär förstärkning deltat	Transient förstärkning deltat	Stationär tidskonstant Tst	Transient tidskonstant Tt
1	0.02	0.3	75.0	5.0
2	0.08	0.8	80.0	8.0
3	0.08	0.3	30.0	8.0
4	0.02	0.8	320.0	8.0

6.4 Simuleringsbilderna

Under arbetets gång har många simuleringar genomförts. Till en början ändrades värdet på någon av modellparametrarna, mellan simuleringarna, för att se hur denna ändring påverkade systemets dämpning. Efterhand systematiserades simuleringarna för att lättare kunna tolka resultatet. För att på något enkelt sätt kunna visa resultatet, valdes värdena på parametrarna i elkraftnätet att vara de som redovisades i avsnitt 6.2. I modellen för vattenturbinen valdes tre värden på vattentidskonstanten. Värdena motsvarar korta, normala och långa tider på

vattentidskonstanten. Regulatorns olika parameterinställningar är de som redovisades i avsnitt 6.3. Nitton simuleringsbilder visar resultatet. De är samlade i appendix för att underlätta en direkt jämförelse mellan de olika inställningarna. På alla bilderna, utom bild 1 och bild 10, visas förutom den aktuella simuleringen även hur nätet betar sig, då det inte påverkas av regulatorn och vattenkraftstationen.

Pendlingen på enskilda samkörningsförbindelser visas i bilderna 1 till 10. Bild 1 visar ett typiskt pendlingsförlopp, samt laststörningen som ger upphov till pendlingen. Bilderna visar överförd effekt, PE, och nätfrekvensen, W, dels när turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar påverkar elkraftnätet, och dels för elkraftnätet ensamt utan påverkan från dessa. Dessutom visas styrsignalen från den regulator, som styr ut ledskovlarna, och den effekt, som då levereras från vattenturbinen.

En vattenkraftstation med normal lång vattentidskonstant, en sekund, simuleras i bilderna 2 till 5. Bild 2 visar hur systemet uppför sig då regulatorparametrarna har inställning ett. Denna inställning på regulatorn medför att dämpningen av effektpendlingen avsevärt försämras jämfört med elkraftnätet utan påverkan. Regulatorinställningen är den inställning som har den största förstärkningen vid alla frekvenser. Sänks förstärkningen till den minsta möjliga, inom de givna gränserna, erhålles regulatorinställning två. Bild 3 visar hur systemet betar sig med denna inställning. Dämpningen har förbättrats jämfört med tidigare inställning. Jämfört med hur elkraftnätet betar sig utan påverkan, bild 3, finner man att inställningen, trots förbättringen, bidrar med negativ dämpning under pendlingsförloppet. Den tredje regulatorinställningen, innebär att den låga stationära förstärkningen behålls, medan den transienta förstärkningen antar sitt största värde. I likhet med inställning ett försämras dämpningen avsevärt. Simuleringen visas i bild 4. Den sista regulatorinställningen, inställning fyra, innebär att regulatorn har en hög stationär förstärkning och en låg transient förstärkning. Simuleringen, bild 5, visar att denna inställning bidrar med negativ dämpning under ett pendlingsförlopp.

Från dessa fyra bilder ser man att turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar bidrar med negativ dämpning vid ett pendlingsförlopp. Detta gäller då vattenkraftstationen har en vattentidskonstant som är en sekund, och när pendlingen sker på enskilda samkörningsförbindelser. Regulatorn kan inte under dessa förutsättningar fås att introducera mer dämpning. Dock kan det sägas att regulatorinställningarna som har låga transienta förstärkningar är att föredra.

En vattenkraftstation med lång vattentidskonstant, tre sekunder, simuleras i bilderna 6 till 9. Värdet på vattentidskonstanten kan anses vara en övre gräns. Regulatorinställning ett, det vill säga maximal förstärkning vid alla frekvenser, medför att systemet är instabilt, bild 6. Detta får till följd att generatoren faller ur fas, då den störs. Risken är stor för sammanbrott i systemet. Inställningen på regulatorn är olämplig tillsammans med en så här pass lång vattentidskonstant. En sänkning av förstärkningen i regulatorn ger inställning två. Simuleringen visar, att systemet är stabilt, bild 7. Dämpningen har försämrats, jämfört med hur nätet betar sig utan påverkan. I inställning tre får regulatorns transienta förstärkning anta sitt högsta värde medan den stationära förstärkningen får anta sitt lägsta värde. Simuleringen visas i bild 8. Denna inställning tillsammans med vattenkraftstationens långa vattentidskonstant medför att systemet är instabilt. Vid en störning innebär detta, att

generatoren faller ur fas med risk för sammanbrott i systemet. Simuleringen som visas i bild 9, har simulerats med regulatorinställning fyra. Denna inställning medför att turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar, bidrar med negativ dämpning under ett pendlingsförlopp.

Bild 6 till bild 9 visar, att turbinregulatorns olika parameterinställningar inte medför någon förbättring av dämpningen. Dessutom finns risken att systemet faller ur fas, om den transienta förstärkningen väljes att vara alltför stor. Detta gäller då vattenkraftstationen har en lång vattentidskonstant, samt då pendlingen sker på enskilda samkörningsförbindelser.

Simuleringsbild 10 visar hur systemet beter sig då vattenkraftstationen har en kort vattentidskonstant. Den regulatorinställning som valts är inställning ett. Att just den inställningen har valts beror på att den bidrar med minst dämpning på de tidigare visade pendlingsförloppen. Då vattenkraftstationen har en kort vattentidskonstant, bidrar stationen tillsammans med turbinregulatorn med positiv dämpning.

Med dessa simuleringsbilder som underlag, kan följande slutsatser dras. Då pendlingen sker på enskilda samkörningsförbindelser, är risken stor att turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar försämrar dämpningen i systemet. Detta gäller, då vattentidskonstanterna är vad som kan anses normala till långa. Vid korta vattentidskonstanter är slutsatsen, att turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar alltid kommer att förbättra dämpningen i systemet. Generellt för fallet pendling på enskild samkörningsförbindelse gäller, att låga transienta förstärkningar är att föredra med avseende på dämpningen. Utstyrningen av ledskovlarna får då också ett bättre utförande.

Pendling mellan de yttre delarna av systemet visas i bilderna 11 till 19. Ett typiskt pendlingsförlopp visas i bild 11. Den laststörning som ger upphov till pendlingen visas också. Denna störning är orsaken till att pendlingsförloppet uppstår, och går igen vid alla simuleringarna. I simuleringarna följs regulatorinställningarna åt i de olika delarna av systemet. I bilderna 12 till 19 visas, i likhet med bilderna 2 till 9, simuleringar där vattenkraftstationen har två olika vattentidskonstanter. I bilderna 12 till 15 visas simuleringar där vattenkraftstationen har ett normalt värde på vattentidskonstant.

Simulering med regulatorinställning ett, visas i bild 12. Denna bild visar, att turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar inte försämrar dämpningen på systemet. Inställningen på regulatorn innebär största möjliga förstärkning vid alla frekvenser. Om förstärkningen sänks i regulatorn till de minsta tillåtna värdena fås inställning två. Simulering med dessa värde visas i bild 13. Inställningen medför att dämpningen av systemet förbättras något. Den lägre förstärkningen medför också, att ledskovlarna styrs ut mindre än vid den tidigare inställningen. Bild 14 visar en simulering med regulatorinställning tre. Detta innebär låg stationär och hög transient förstärkning. Dämpningen i systemet förbättras en aning med den här inställningen. Regulatorinställning fyra, hög stationär och låg transient förstärkning, visas i bild 15. Denna inställning medför en viss förbättring av dämpningen i systemet. Bilderna 12 till 15 visar, att turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar introducerar positiv dämpning i systemet. Detta gäller när pendlingen sker mellan de yttre delarna av systemet, och då vattentidskonstanterna är korta till normala.

I bilderna 16 till 19 har vattentidskonstanten ökats, från en sekund till tre sekunder. Detta innebär att konstanten har ett värde, som kan anses vara det största realistiska värde som uppträder i en vattenkraftstation. Simulering med regulatorinställning ett, visas i bild 16. Denna medför att systemet är instabilt. Till följd av detta faller synkrogeneratorn urfas då den störs. En sänkning av förstärkningen i regulatorn innebär steget från inställning ett till inställning två. Simulering med denna visas i bild 17, systemet är nu stabilt. Dämpningen har dock försämrats jämfört med elkraftnätet utan påverkan. Turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar bidrar alltså med negativ dämpning vid ett pendlingsförlopp, med denna inställning. I bild 18 har regulatorns transienta förstärkningen ökats till sitt största värde, detta medför att systemet åter blir instabilt. Med den här inställningen faller generatorn urfas, vilket kan få ett sammanbrott i systemet till följd. Inställning fyra har hög stationär och låg transient förstärkning. Simulering med denna regulatorinställning visas i bild 19. Systemet är stabilt, men dämpningen försämras något.

Med bilderna 12 till 19 som underlag, kan följande slutsatser dras. Då pendlingen sker mellan de yttre delarna av systemet kommer dämpningen inte att försämrats, om vattentidskonstanterna kan anses vara korta till normala. Väljs den transienta förstärkningen att vara låg, kommer turbinregulator och vattenturbinen med sina vattenvägar alltid att bidra med positiv dämpning vid ett pendlingsförlopp. Om vattenkraftstationen däremot har en lång vattentidskonstant, kommer turbinregulator och vattenturbinen med sina vattenvägar alltid att försämra dämpningen. Hög transient förstärkning medför dessutom en risk att generatorn faller urfas, vid en störning. Generellt för fallet pendling mellan de yttre delarna av systemet gäller, att låga transienta förstärkningar är att föredra, med avseende på dämpningen av effektpendlingen och utstyrningen av ledskovlarna.

6.5 Bodediagrammen

Bodediagrammen, i appendix, visar belopp- och frekvenskurvor för överföringsfunktionerna på vattenturbinen och turbinregulatorn, samt för överföringsfunktionen mellan avgiven mekanisk effekt, P_m , och nätfrekvensen, W . Överföringsfunktionen mellan avgiven mekanisk effekt och nätfrekvensen visas dels när pendlingen sker på enskilda samkörningsförbindelser och dels när pendlingen sker mellan de yttre delarna av systemet.

Diagramblad 1 visar överföringsfunktionen för en vattenturbin i form av en lineariserad peltoneturbin. Brytpunkterna i bodediagrammen bestäms dels av vattentidkonstanten, T_W , dels av flödets stationära punkt, Q_0 . Detta innebär, att en annan stationär punkt ger ett annorlunda utseende på bodediagrammen. Det medför också att simuleringarna kommer att ha ett annorlunda beteende för samma vattentidskonstant. Till följd av detta kan resultaten av simuleringen inte ge några exakta gränser. Från faskurvan framgår det att vattenturbinen är ett icke-minimum fas system. Vid en störning innebär detta, att turbineffekten till en början kommer att ändras åt fel håll. Detta är en anledning till problemen som uppstår vid en effektpendling.

De olika regulator inställningar, som redovisades i kapitel 6.3, visas i diagramblad 2. Väljs parametervärdena så att största möjliga förstärkning erhålles vid alla frekvenser, ser bodediagrammet ut såsom kurvorna

för inställning 1 visar. Minsta möjliga förstärkning erhålles med inställning 2. Dessa gränsvärden har använts vid simuleringarna, dessutom har två inställningar som ligger däremellan använts. Inställning 3 har låg stationär och hög transient förstärkning. Inställning 4 har hög stationär och låg transient förstärkning. Dessa fyra inställningar torde ge en bra bild av turbinregulatorns möjligheter.

Överföringsfunktionen mellan avgiven mekanisk effekt, PM, och nätfrekvensen, W, visas i diagramblad 3 till 6. Överföringsfunktionen för fall ett det vill säga pendling på enskilda samkörningsförbindelser, visas i diagramblad 3 och 4. I diagramblad 3 är vattentidskonstanten en sekund. Avläses fasen för vinkelfrekvensen 3.14 rad/s, vilket motsvarar periodtiden 2 sekunder, framgår det att fasen är mindre än -90 grader. Detta gäller för alla inställningar av turbinregulatorn. Detta medför att turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar bidrar med negativ dämpning. Vilket också visas av simuleringsbilderna 2 till 5.

Diagramblad 4 visar bodediagrammen för fall ett, då vattentidskonstanten är tre sekunder. Fasen avläses för frekvensen 3.14 rad/s. Från dessa avläsningar framgår det klart, att turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar bidrar med negativ dämpning. Simuleringsbilderna 6 till 9 visar samma sak.

Diagramblad 5 och 6 visar överföringsfunktionerna för fall två, pendling mellan de yttre delarna av systemet. I diagramblad 5 är vattentidskonstanten en sekund. En vanligt förekommande effektpendling har här en periodtid på fyra sekunder. Detta motsvarar en vinkelfrekvens som är 1.57 rad/s. Avläses fasen vid denna vinkelfrekvens framgår det, att turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar bidrar med positiv dämpning. Simuleringsbild 12 till 15 visar att detta gäller.

I diagramblad 6 visas bodediagram för fall två, då vattentidskonstanten är tre sekunder. En avläsning av fasen visar, att fasen är mindre än -90 grader för alla inställningar av regulatorn. Turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar bidrar således med negativ dämpning för alla inställningar av regulatorn. Det kan också ses i simuleringsbilderna 16 till 19.

- 7 **Slutsatser** Syftet med examensarbetet har varit att utreda huruvida turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar bidrar med positiv eller negativ dämpning vid effektpendlingar på elkraftnätet, samt om det är möjligt att introducera mer dämpning genom att välja lämpliga parametervärden i turbinregulatorn. Målsättningen är att med ett bra val av regulatorparametrarna kunna minska effektpendlingarna på samkörningsförbindelserna och därmed utnyttja produktionsapparaten bättre.

Med simuleringsbilderna och bodediagrammen som underlag kan följande slutsatser dras.

Vattenkraftstationer som har korta vattentidskonstanter kommer alltid att förbättra dämpningen av långsamma effektpendlingar på elkraftnätet. Detta gäller också för vattenkraftstationer, som har vad som anses som normala vattentidskonstanter, om pendlingen sker mellan de yttre delarna av systemet. Sker pendlingen på enskilda samkörningsförbindelser, bidrar turbinregulatorn och vattenturbinen med sina vattenvägar till en försämring av dämpningen.

Vattenkraftsstationer som har långa vattentidskonstanter kommer alltid att försämra dämpningen av långsamma effektpendlingar på elkraftnätet. Dessa försämringar kan minimeras genom att välja en låg transient förstärkning i regulatorn.

För de olika fallen gäller att låg transient förstärkning i turbinregulatorn är att föredra dels med avseende på dämpningen av effektpendlingen och dels på grund av utstyningen av ledskovlarna.

Bengt Ingemars (1981): Stabilitets och dämpningsproblem i Nord-
elsystemet. Vattenfall rapport DST-B1/Dq-231.

IEEE committee report (1973): Dynamic models for steam and hydro
turbines in power system studies.

Taylor, Cresap (1976): Real time power system simulation for automatic
generation control, Appendix A. IEEE Transactions on power apparatus
and system vol PAS-95 no 1.

Yu Yao-nan (1983): Electric power system dynamics. New York: Academic
Press

Åström K J (1985): A simon tutorial. Lund: Department of automatic
control Institute of Technology.

Åström K J (1976): Reglerteori. Uppsala: Almqvist & Wiksell.

Gustavsson B, Nilsson E (1985): kompendium i strömningsmaskinteknik.
Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Csanady G (1964): Theory of turbomachines. New York: McGraw-Hill

Streeter V (1962): Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill

Meerwath K (1963): Wasserkraftmaschinen. Berlin: Springer Verlag

CONTINUOUS SYSTEM NATET

"En generator verkande mot ett oändligt nät", skrivet våren 1988 av Jerker Persson. Använt i examensarbetet, "Analys av vattenkraftens bidrag till dämpningen av långsamma effektpendlingar i stora elkraftsystem", utfört på Sydkraft AB, Malmö.

INPUT PM PL1
OUTPUT W
STATE X1 X2
DER DX1 DX2
TIME T

"tilldelar insignalerna
U1=PM
U2=PL1

"tillståndsinittiering
X1:1
X2:0.0

"w
"deth, vinkelskillnaden

"parametrar

H:4
X12:4
D:0.001
FREBER:5.0
PI:3.141593
WB=2 • PI • 50
PE=SIN(X2)/X12
PL=U2 • X1^FREBER
PD=D • X1

"tröghetskonstant
"reaktans
"förlustfaktor
"lastens variation
"förhållande mellan omkrets och diameter
"basvinkelfrekvensen
"överförd effekt
"lokal last
"förluster

"differentialekvationerna
DX1=(U1-PE-PL-PD)/(2 • H)
DX2=WB • (X1-1)

"utsignalen
W=X1

END

CONTINUOUS SYSTEM NÄTET

"Två generatorer verkande på ett och samma nät", skrivet våren 1988 av Jerker Persson. Använt i examensarbetet, "Analys av vattenkraftens bidrag till dämpningen av långsamma effektpendlingar i stora elkraftsystem", utfört på Sydkraft AB, Malmö.

INPUT PM1 PL10 PM2 PL20
OUTPUT W1 W2
STATE X1 X2 X3 X4
DER DX1 DX2 DX3 DX4
TIME T

"tilldelar insignalerna

U1=PM1
U2=PL10
U3=PM2
U4=PL20

"tillståndsinitering

X1:1.0 "w1
X2:0.0 "theta1
X3:1.0 "w2
X4:0.0 "theta2

"parametrar

H1:4 "tröghetskonstant
H2:4 "tröghetskonstant
X12:35 "reaktans
D1:0.001 "förlustfaktor
D2:0.001 "förlustfaktor
FREBER1:5.0 "lastens variation
FREBER2:5.0 "lastens variation
PI:3.141593 "förhållande omkrets och diameter
WB=2 * PI * 50 "basvinkelfrekvensen
DETH=X2-X4 "vinkelskillnaden
PE=SIN(DETH)/X12 "överförd effekt
PL1=U2 * X1^FREBER1 "lokal last
PD1=D1 * X1 "förluster
PL2=U4 * X3^FREBER2 "lokal last
PD2=D2 * X3 "förluster

"differentialekvationerna

DX1=(U1-PE-PD1-PL1)/(2 * H1)
DX2=WB * (X1-1)
DX3=(U3+PE-PD2-PL2)/(2 * H2)
DX4=WB * (X3-1)

"utsignalen

W1=X1
W2=X3

END

CONTINUOUS SYSTEM TURBIN

"Peltonturbin", skrivet våren 1988 av Jerker Persson. Använt i examensarbetet, "Analys av vattenkraftens bidrag till dämpningen av långsamma effektpendlingar i stora elkraftsystem", utfört på Sydkraft AB, Malmö.

INPUT U
OUTPUT Y
STATE Q
DERDQ
TIME T

"Logisk variabel som anger begränsning eller ej, samt dess värde

BEGR:0
BVARDE:1.0

"Tilldelar insignal, utsignal

G=U
Y=IF BEGR<0.5 THEN P ELSE PBEGR
PBEGR=IF P<BVARDE THEN P ELSE BVARDE

"Parametrar

TW:1.0	"Vatten konstant
HB:100	"Statisk fallhöjd
AG:0.5	"Area i munstycket
RAU:998	"Densiteten
GACC:9.81	"Tyngd accelerationen

"Normeringsstorheter

VB=SQRT(2 • GACC • HB)	"Hastigheten i munstycket, stationärt
QB=VB • AG	"Flödet
PB=RAU • GACC • HB • QB	"Tillgänglig effekt

"Verkliga värden

QV=Q • QB
PV=RAU • QV³/(2 • AG² • G²)
HTV=PV/(RAU • QV • GACC)

"Normerade värden

HT=HTV/HB
P=PV/PB

"Initierar tillståndet

Q:0.8

"Stationärt är flödet

INQ=AG • G • SQRT(2 • HB • GACC)/QB

"Differential ekvationen

DQ=(1-HT)/TW

END

CONTINUOUS SYSTEM TURBIN

"Kaplanturbin", skrivet våren 1988 av Jerker Persson. Använt i examensarbetet, "Analys av vattenkraftens bidrag till dämpningen av långsamma effektpendlingar i stora elkraftsystem", utfört på Sydkraft AB, Malmö.

INPUT U
OUTPUT Y
STATE Q
DERDQ
TIME T

"Logisk variabel som anger begränsning eller ej, samt dess värde
BEGR:0
BVARDE:1.0

"Tilldelar insignal, utsignal
G=U
Y=IF BEGR<0.5 THEN P ELSE PBEGR
PBEGR=IF P<BVARDE THEN P ELSE BVARDE

"Parametrar

TW:1	"Vattenkonstanten
PI:3.141593	"Förhållande mellan omkrets och diameter
HB:100	"Statisk fallhöjd
AT:10	"Area i tilloppstuben
AG:10	"Area vid ledskovlarna
AS:10	"Area vid skovelhjulet
RAU:998	"Densiteten
GACC:9.81	"Tyngd accelerationen
FI:45	"Vinkeln på löpskovlarna
FIRAD=PI * FI/180	
COT=1/TAN(FIRAD)	

"Normeringsstorheter

VB=SQRT(2 * GACC * HB)	"Hastigheten vid ledskovlarna, stationärt
QB=VB * AG	"Flödet
PB=RAU * GACC * HB * QB	"Tillgänglig effekt

"Verkliga värden

QV=Q * QB
PV=RAU * QV^3 * ((1/(AG * G))+(COT/AS))^2/4
HTV=PV/(RAU * QV * GACC)

"Normerade värden

HT=HTV/HB
P=PV/PB

"Initierar tillståndet

Q:0.8

"Beräknar ledskovelöppning för att erhålla önskad effekt

PO:0.8
ING=1/(AG * ((SQRT(4 * GACC * HB)/(PO * QB))-(COT/AS)))

"Stationärt
 $INQ = \sqrt{4 \cdot HB \cdot GACC} / (1 / (AG \cdot G) + COT / AS)$

"Diffekvationen
 $DQ = (1 - HI) / TW$

END

CONTINUOUS SYSTEM TURBIN

"Francisturbin", skrivet våren 1988 av Jerker Persson. Använt i examensarbetet, "Analys av vattenkraftens bidrag till dämpningen av långsamma effektpendlingar i stora elkraftsystem", utfört på Sydkraft AB, Malmö.

INPUT U
OUTPUT Y
STATE Q
DERDQ
TIME T

"Logisk variabel som anger begränsning eller ej, samt dess värde
BEGR:0
BVARDE:1.0

"Tilldelar insignal, utsignal
G=U
Y=IF BEGR<0.5 THEN P ELSE PBEGR
PBEGR=IF P<BVARDE THEN P ELSE BVARDE

"Parametrar

TW:1
PI:3.141593

HB:100

AT:10

AG:10

A1:10

A2:10

RAU:998

GACC:9.81

BETA:45

$BETARAD=PI \cdot BETA/180$

$COTB=1/TAN(BETARAD)$

$ALFA=ARCCOS(1-G)$

$SINA=SIN(ALFA)$

$COSA=COS(ALFA)$

K:2

R2:1

$R1=K \cdot R2$

"Normeringsstorheter

$VB=SQRT(2 \cdot GACC \cdot HB)$

$QB=VB \cdot AG$

$PB=RAU \cdot GACC \cdot HB \cdot QB$

"Vattenkonstanten

"Förhållande mellan omkrets och diameter

"Statisk fallhöjd

"Area i tilloppstuben

"Area vid ledskovlarna

"Area vid skovelhjulet ytter radie

"Area vid skovelhjulet inner radie

"Densiteten

"Tyngd accelerationen

"Vinkeln som vattnet lämnar skovelhjulet med

"Vinkeln som vattnet träffar skovelhjulet med

"beror på ledskovelöppningen

"Förhållande mellan ytter och inner radie

"Inner radie

"Ytter radie

"Hastigheten vid ledskovlarna, stationärt

"Flödet

"Tillgänglig effekt

"Verkliga värden

$$QV=Q \cdot QB$$

$$HJALP=\left(\frac{COSA}{AG \cdot G}\right) + (A1 \cdot SINA \cdot COTB / (A2 \cdot AG \cdot G))^2$$

$$PV=\left(\frac{K+1}{8}\right) \cdot RAU \cdot QV^3 \cdot HJALP$$

$$HTV=PV / (RAU \cdot QV \cdot GACC)$$

"Normerade värden

$$HT=HTV / HB$$

$$P=PV / PB$$

"Initierar tillståndet

$$Q:0.8$$

"Beräknar ledskovelöppning för att erhålla önskad effekt

$$PO:0.8$$

$$ING=\left(\frac{COSA}{AG}\right) + (A1 \cdot SINA \cdot COTB / (A2 \cdot AG)) \cdot PO \cdot QB / (\sqrt{8 \cdot HB \cdot GACC} / (K+1))$$

"Stationärt

$$INQ=\sqrt{8 \cdot HB \cdot GACC / (K+1)} / \left(\frac{COSA}{AG \cdot G}\right) + (A1 \cdot SINA \cdot COTB / (A2 \cdot AG \cdot G))$$

"Diffekvationen

$$DQ=(1-HT)/TW$$

END

CONTINUOUS SYSTEM REG

"PIP-REGULATOR", skrivet våren 1988 av Jerker Persson. Använt i examensarbetet, "Analys av vattenkraftens bidrag till dämpningen av långsamma effektpendlingar i stora elkraftsystem", utfört på Sydkraft AB, Malmö.

INPUT Y YREF PST
OUTPUT U
TIME T
STATE X
DER DX

"Innitterar tillståndet
X:0

"Parametrar
TT:5 "RIMLIGA VÄRDEN 5-8
DELTAST:0.02 "RIMLIGA VÄRDEN 0.02-0.08
DELTAT:0.3 "RIMLIGA VÄRDEN 0.3-0.8
UMIN:0.1 "BEGRÄNSAR UTSIGNALEN
UMAX:1.0 "BEGRÄNSAR UTSIGNALEN

"Felet, stationär tidskonstant och hjälp ekvation
E=YREF-Y
TST=TT • (DELTAT/DELTAST)
HELP=(1/TT)-(1/TST)

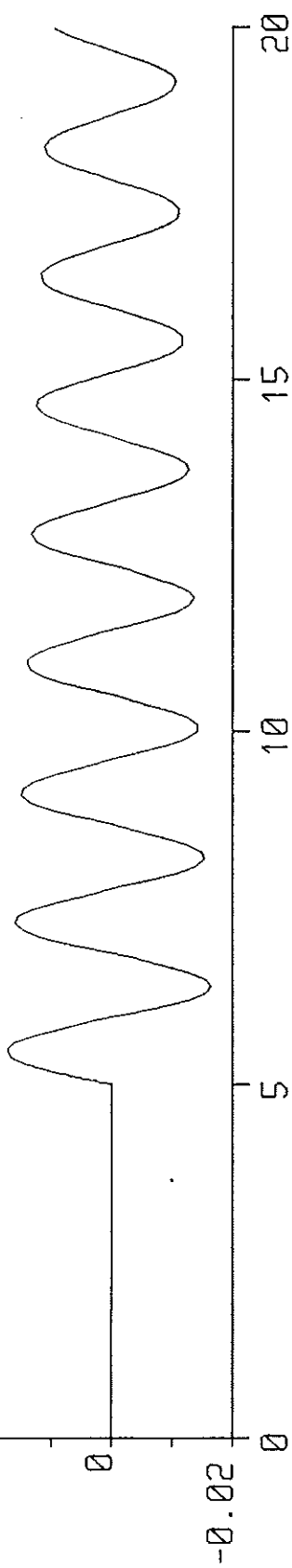
"Differential ekvationen
DX=E-(X/TST)

"Utsignalen, begränsas mellan värdena på umin och umax
UVERKLIG=PST+(HELP • X+E)/DELTAT
U=IF UVERKLIG<UMIN THEN UMIN ELSE IF UVERKLIG<UMAX THEN
UVERKLIG ELSE UMAX

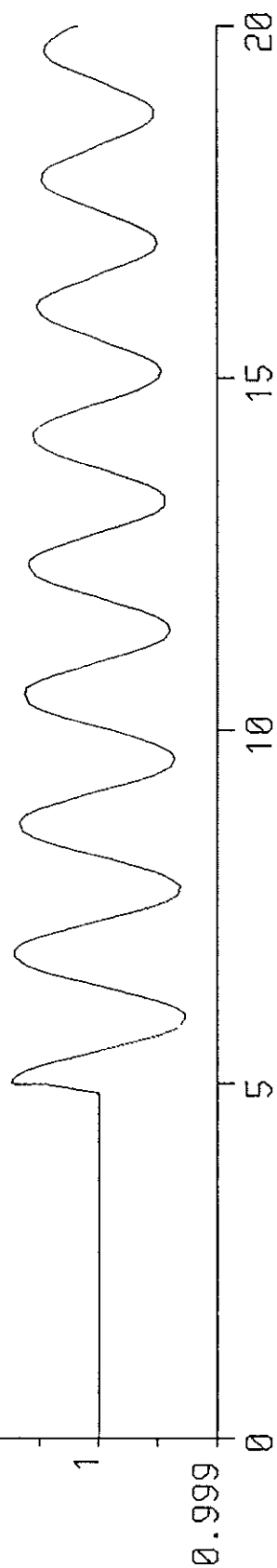
END

BILD=1

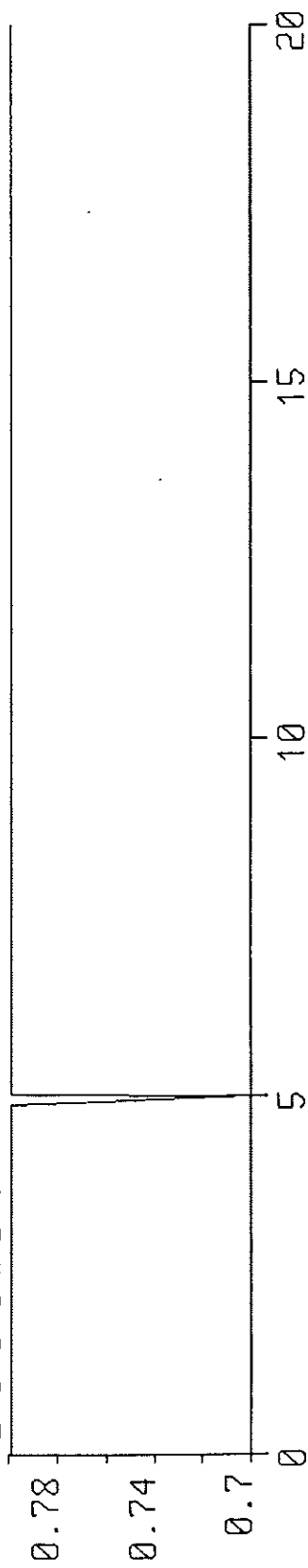
0.02 OVERFORDEFFEKT, PE. PENDINGSFORLOPP 1.



1.001 NATFREKVENSEN

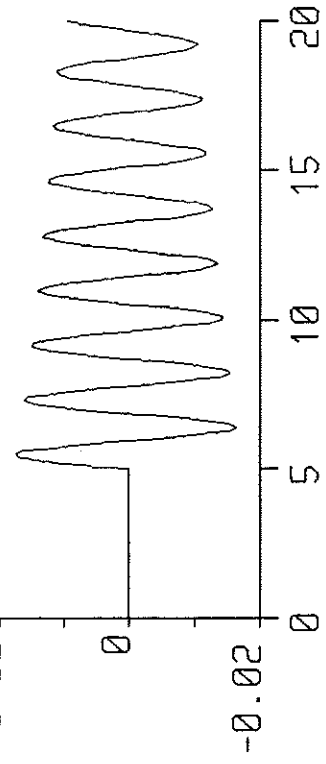


LASTSTORNING

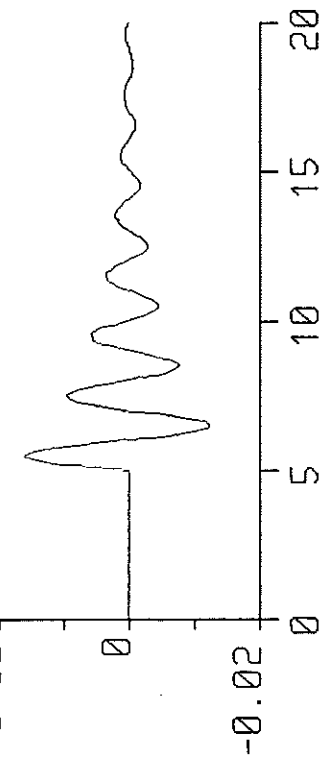


TT=5. TST=75. DELTAT=0.3 DELTAST=0.02 TW=1. PST=0.8 BILD=2

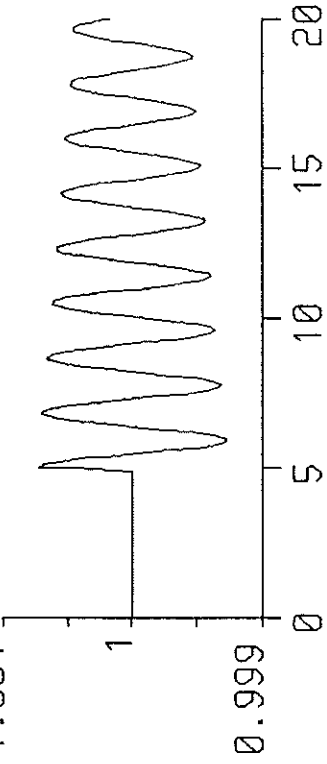
0.02 PE



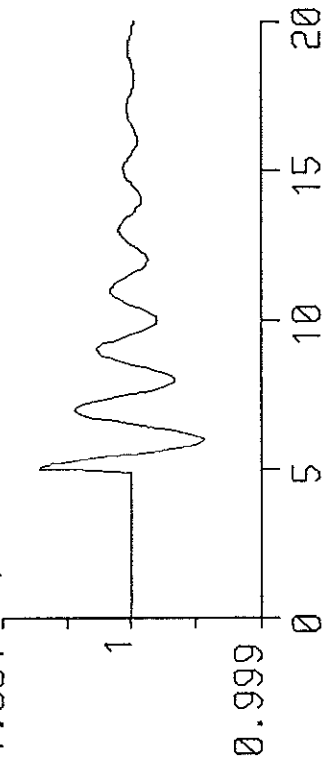
0.02 PE, ENDAST NATET



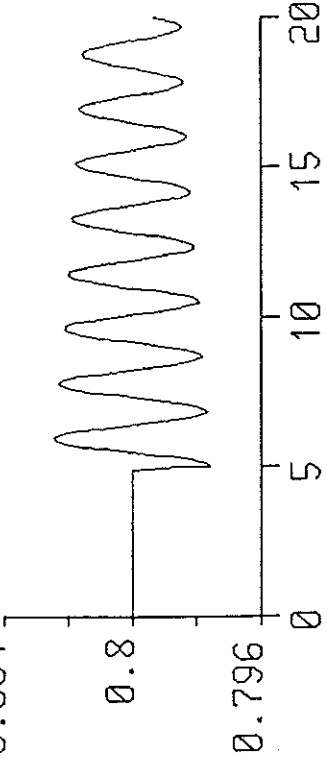
1.001 W



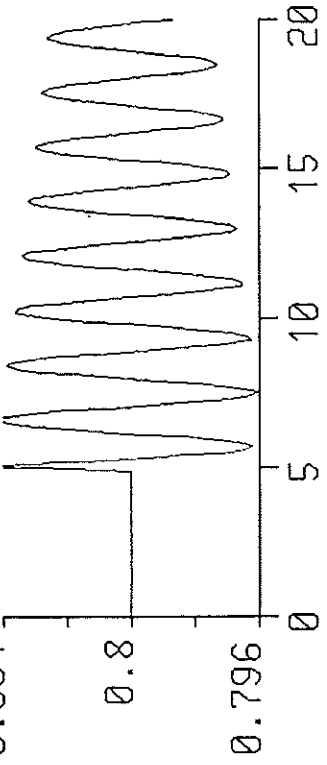
1.001 W, ENDAST NATET



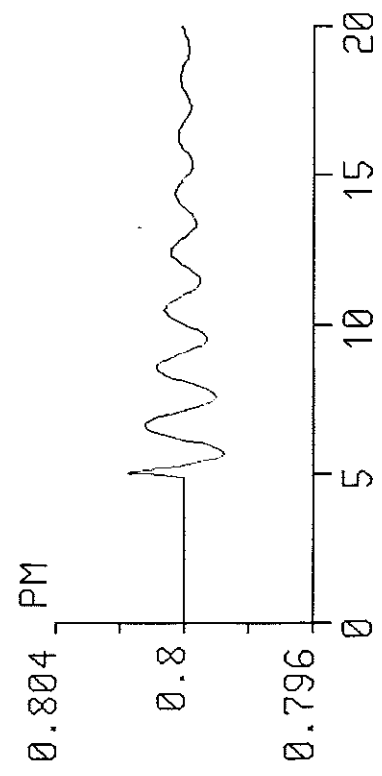
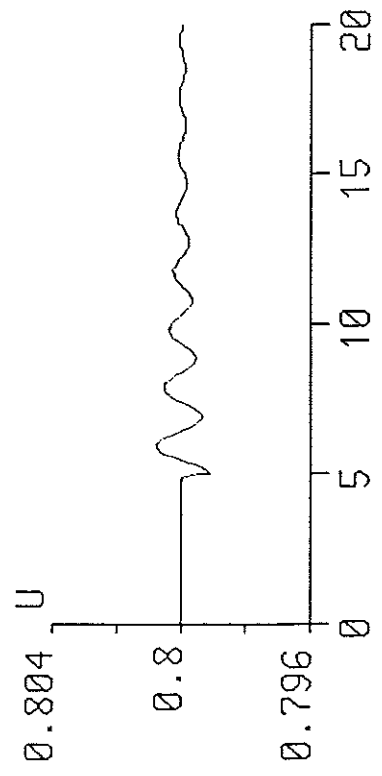
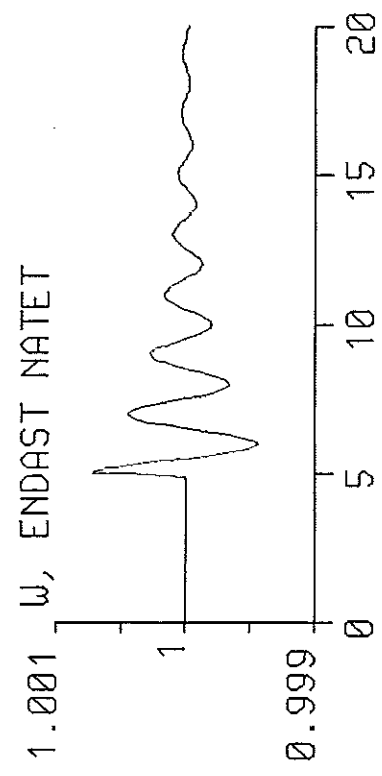
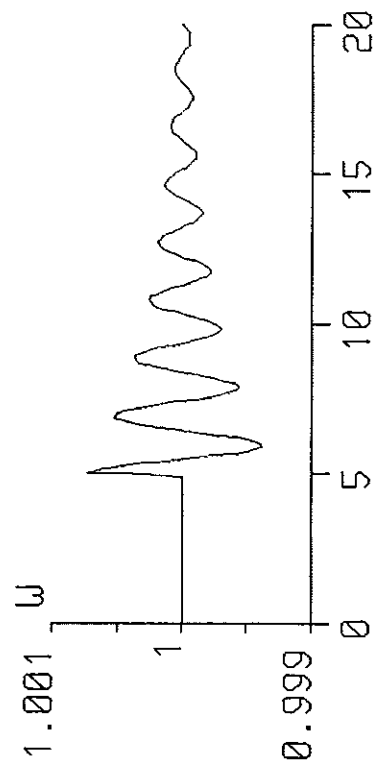
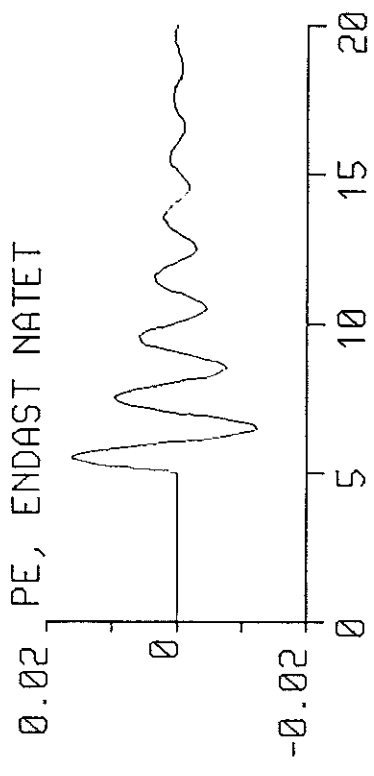
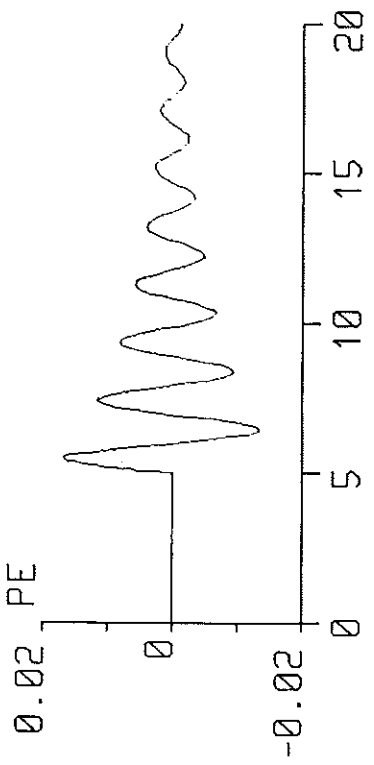
0.804 U



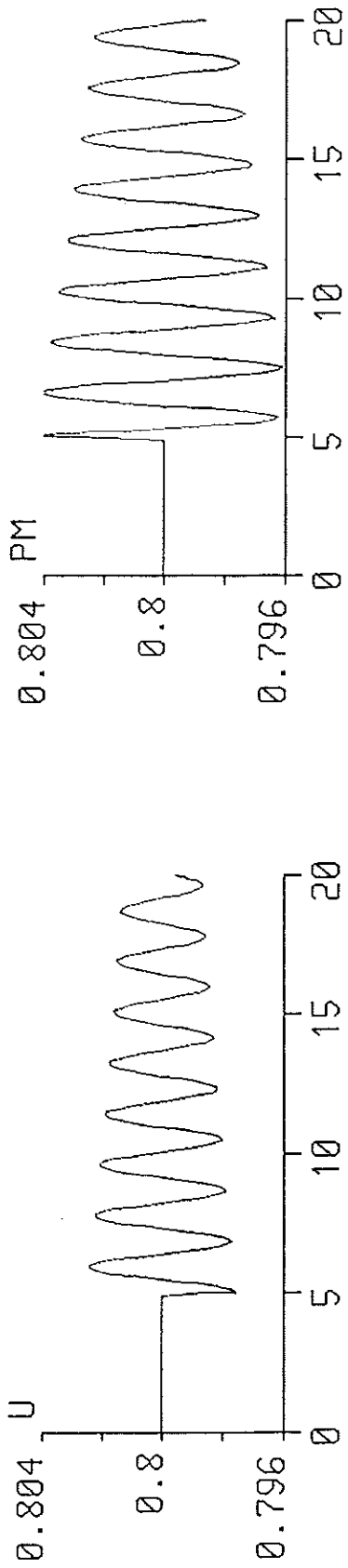
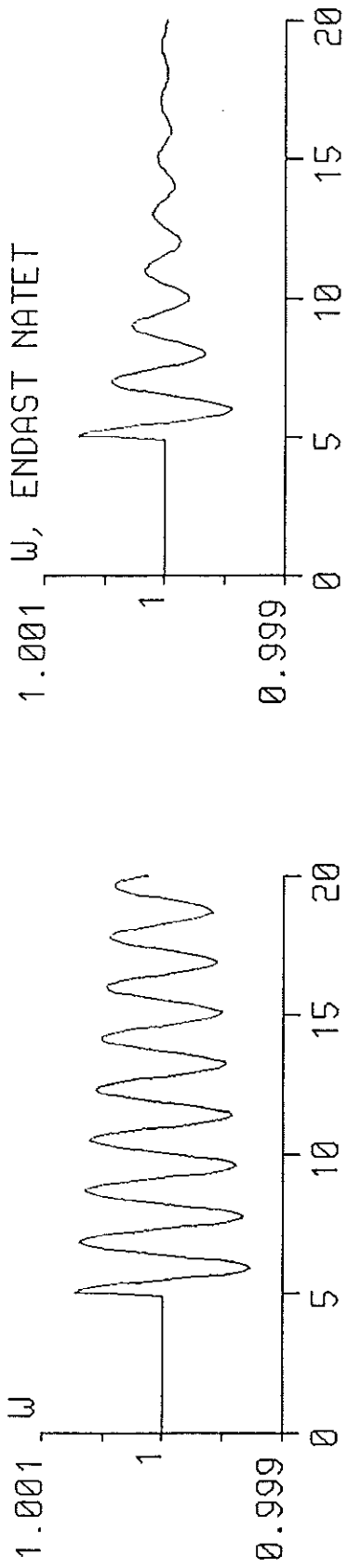
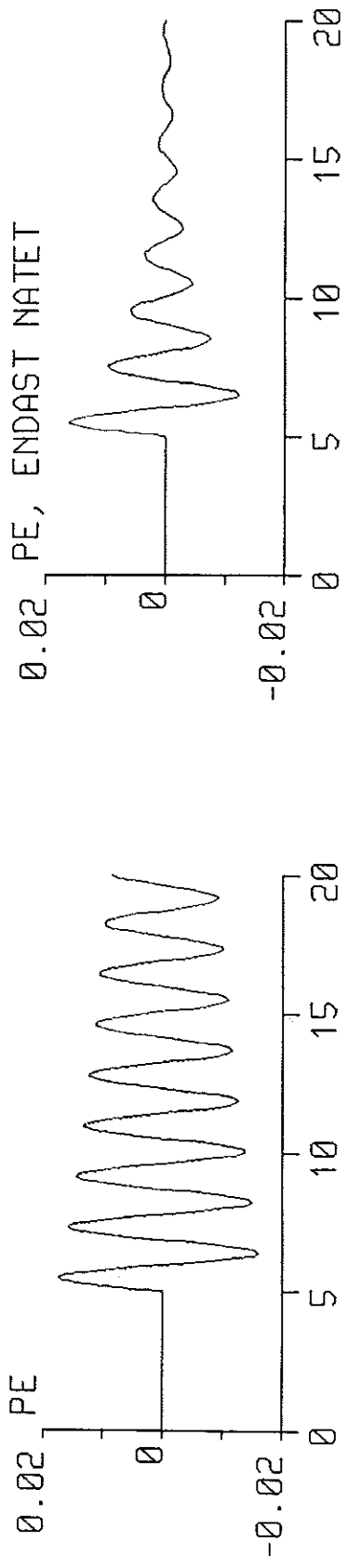
0.804 PM



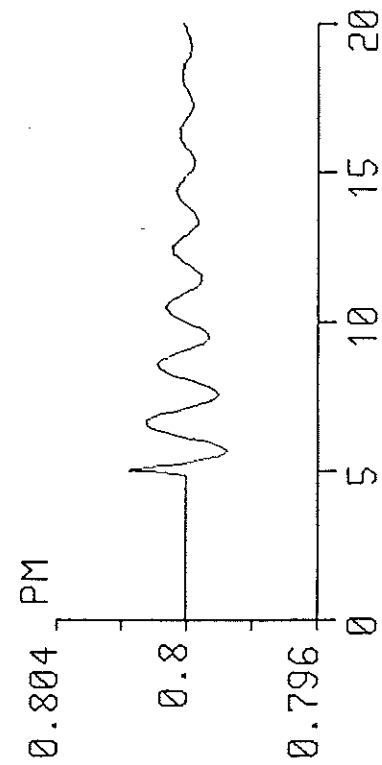
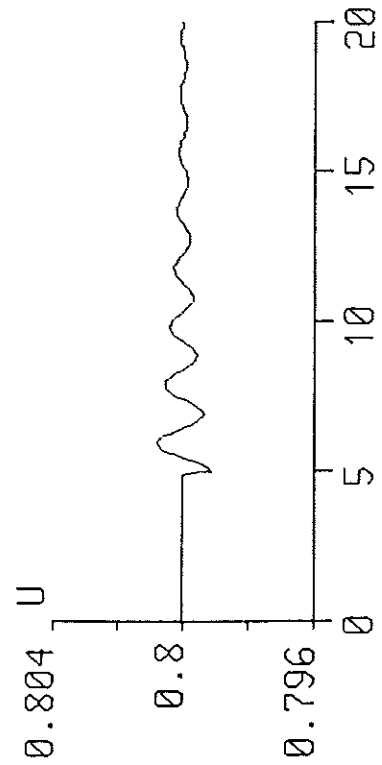
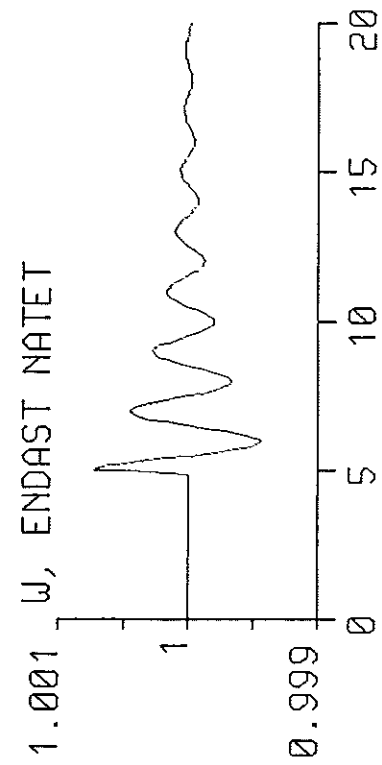
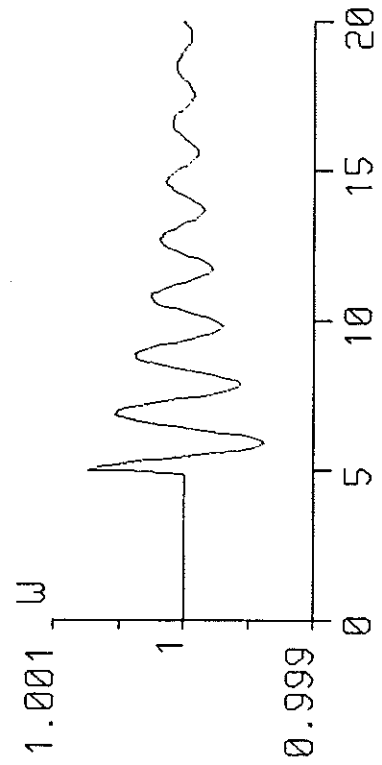
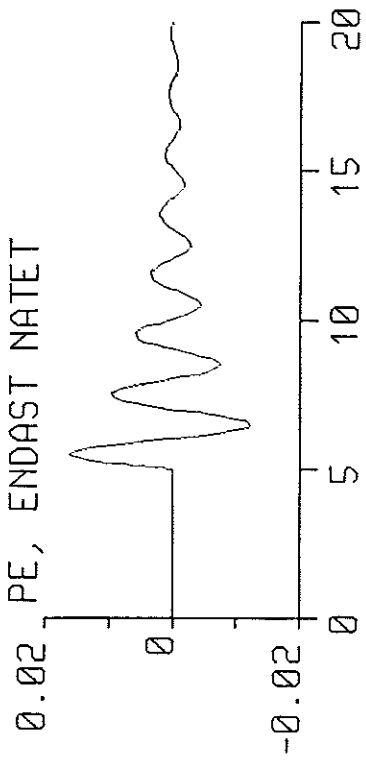
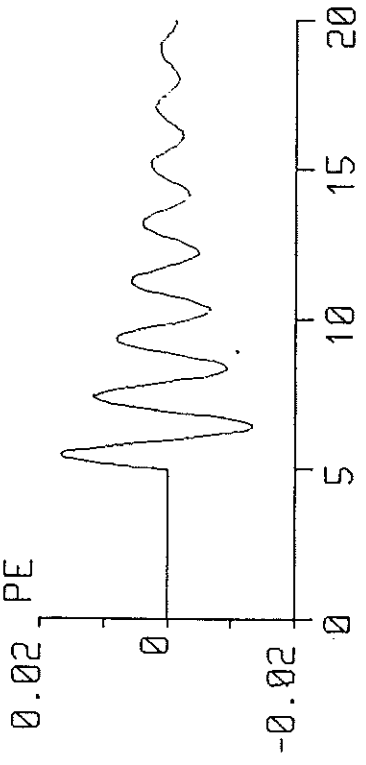
TT=8. TST=80. DELTAT=0.8 DELTAST=0.08 TW=1. PST=0.8 BILD=3



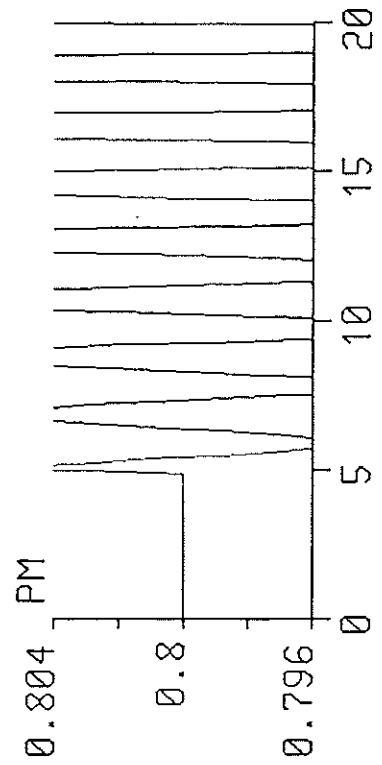
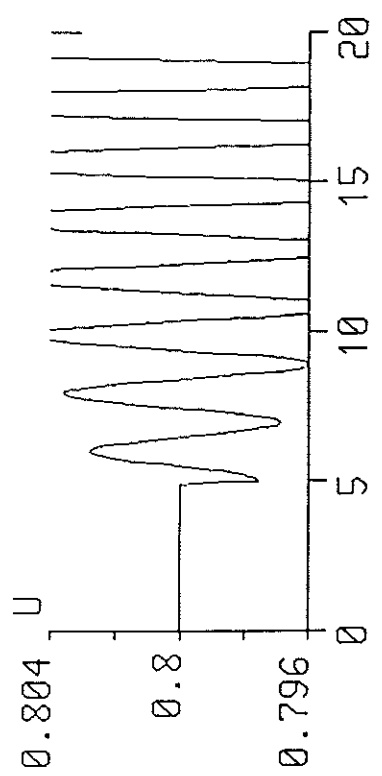
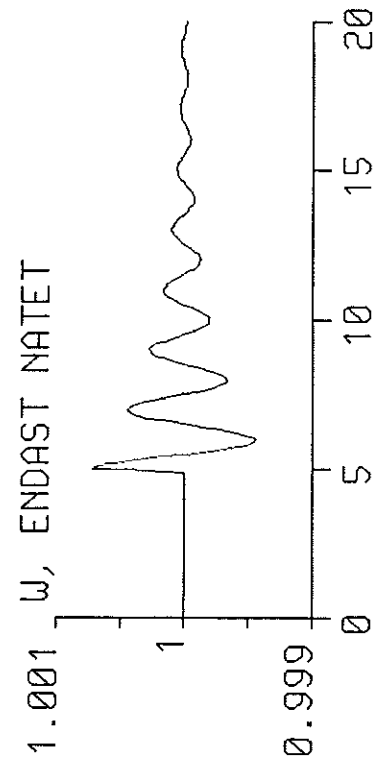
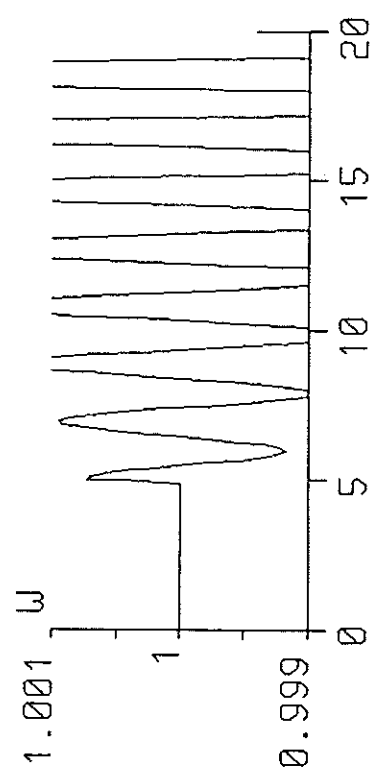
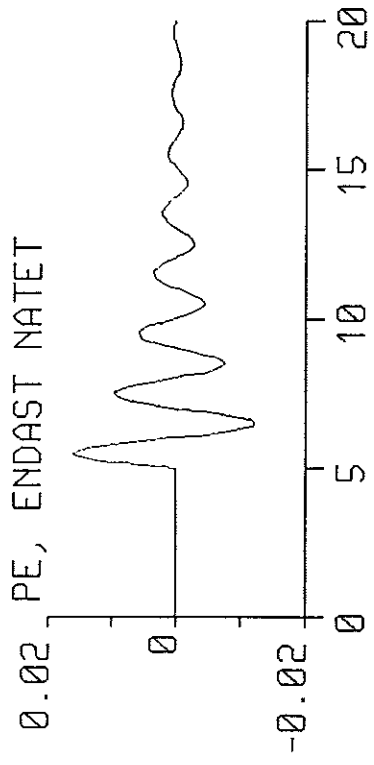
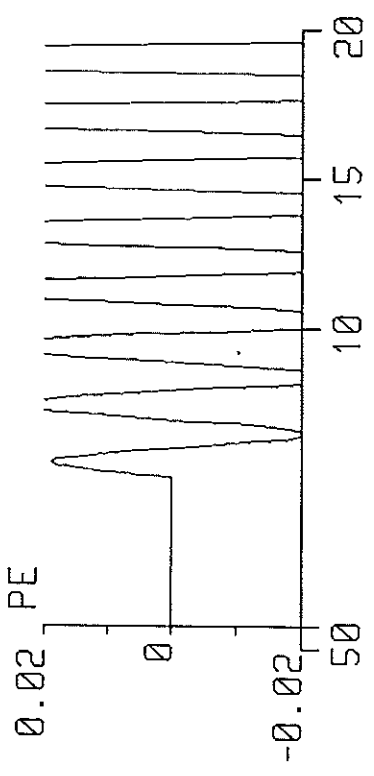
TT=8. TST=30. DELTAT=0.3 DELTAST=0.08 TW=1. PST=0.8 BILD=4



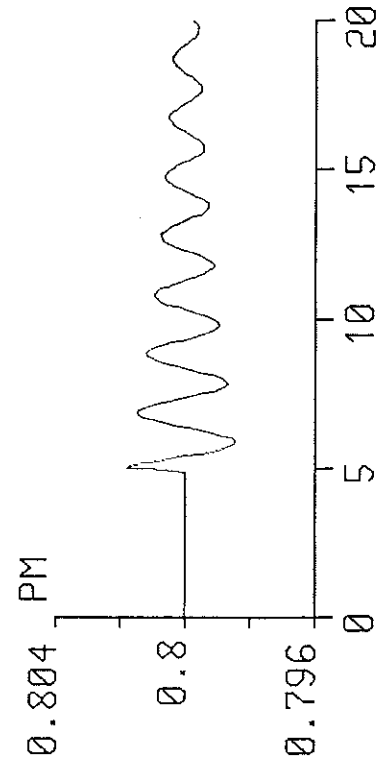
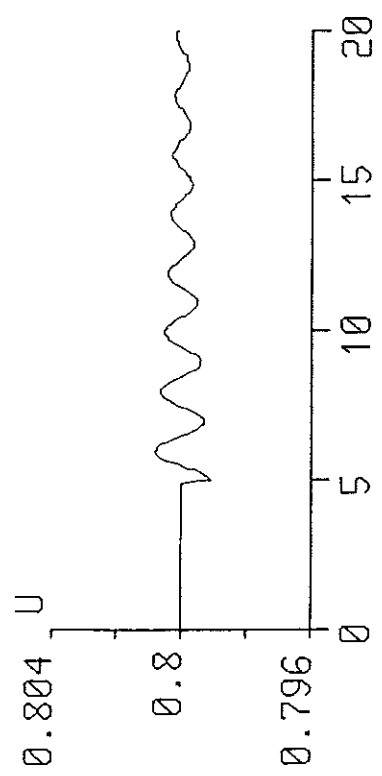
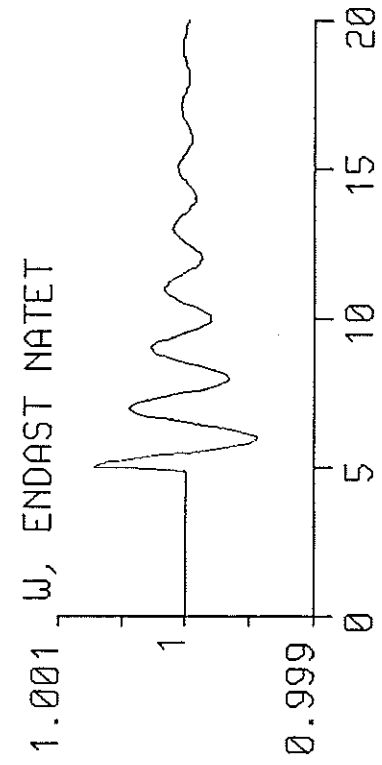
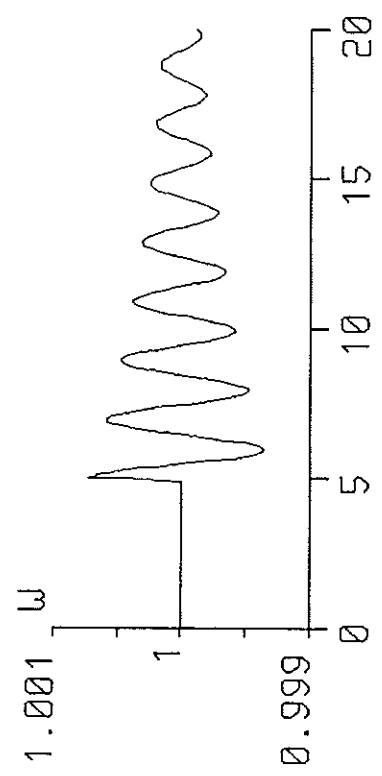
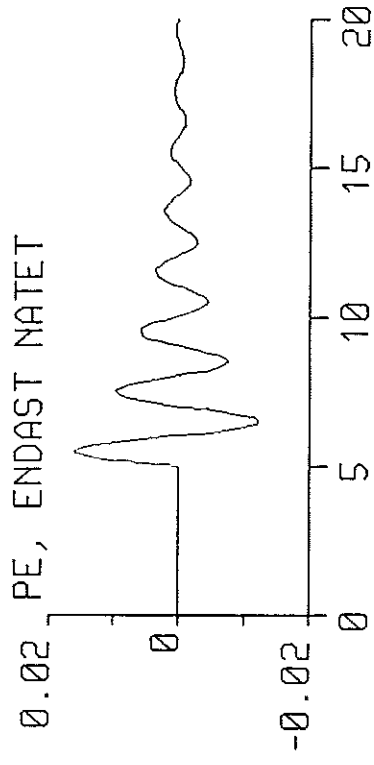
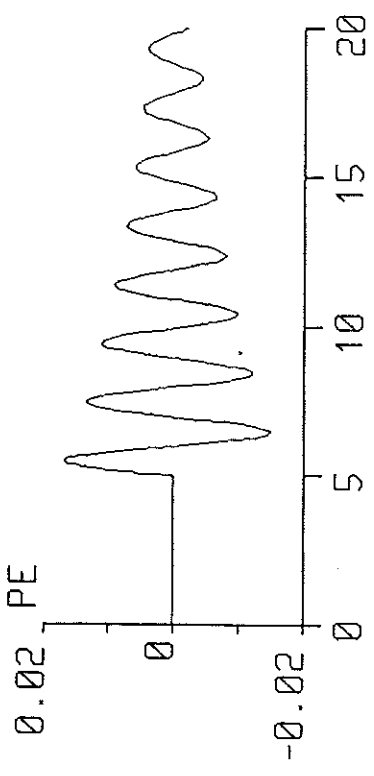
TT=8. TST=320. DELTAT=0.8 DELTAST=0.02 TW=1. PST=0.8 BILD=5
0.02 PE, ENAST NATET



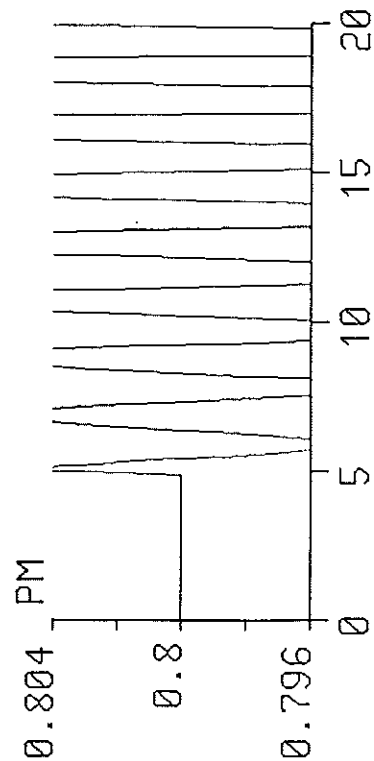
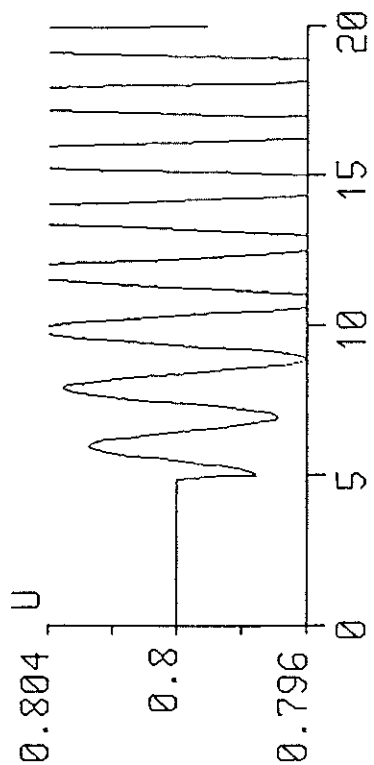
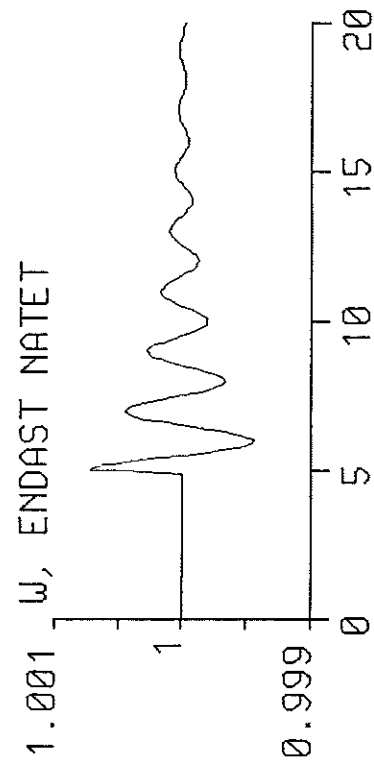
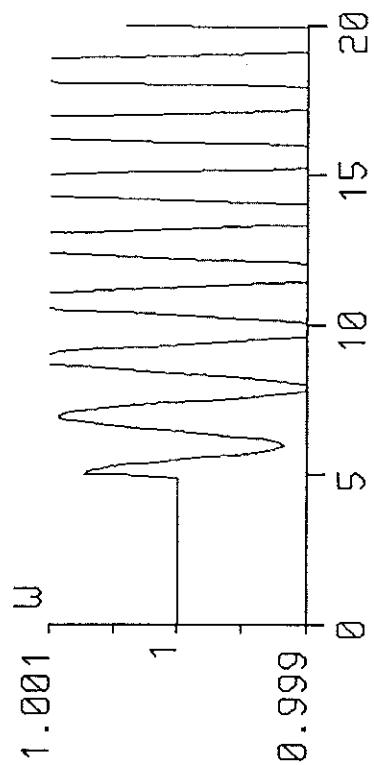
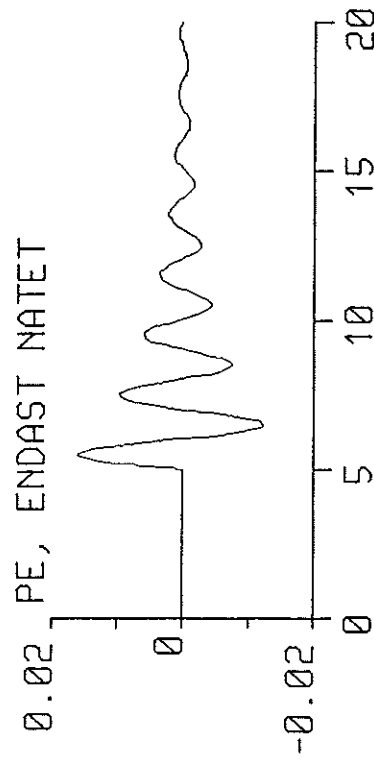
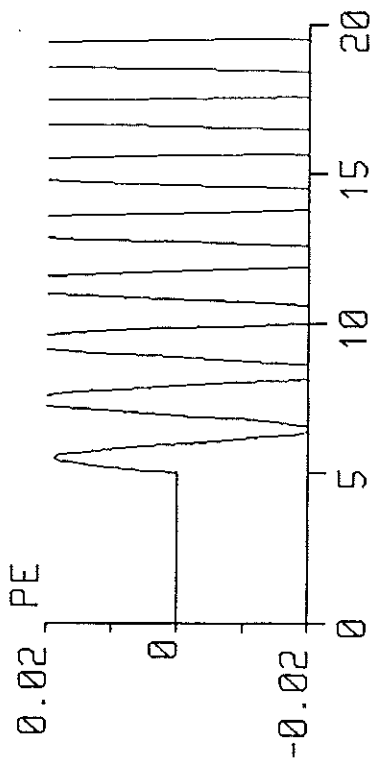
TT=5. TST=75. DELTAT=0.3 DELTAST=0.02 TW=3. PST=0.8 BILD=6



TT=8. TST=80. DELTAT=0.8 DELTAST=0.08 TW=3. PST=0.8 BILD=7

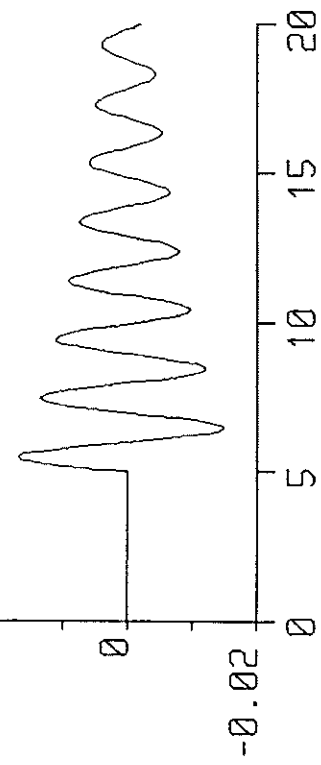


TT=8. TST=30. DELTAT=0.3 DELTAST=0.08 TW=3. PST=0.8 BILD=8

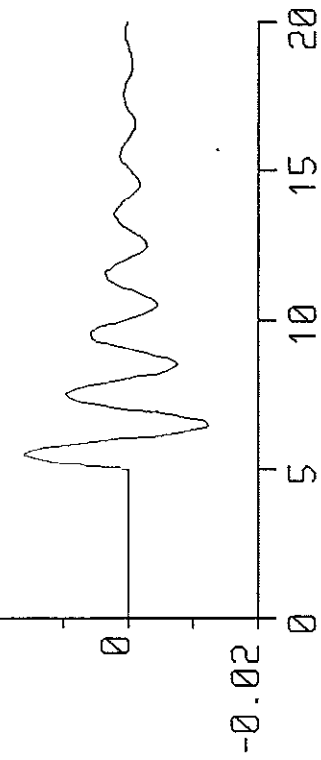


TT=8. TST=320. DELTAT=0.8 DELTAST=0.02 TW=3. PST=0.8 BILD=9

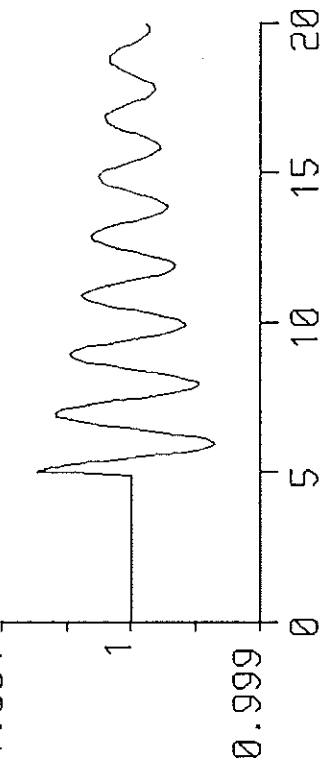
0.02 PE



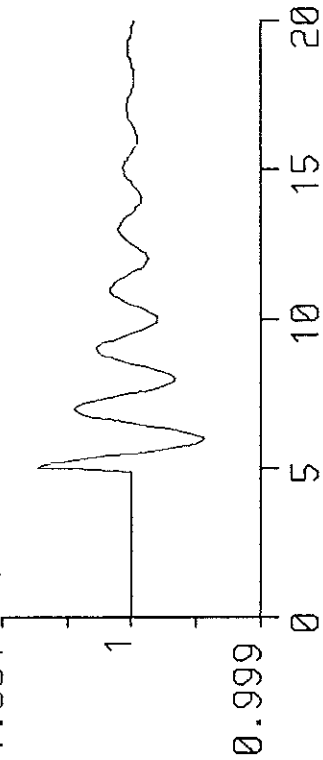
0.02 PE, ENDAST NATET



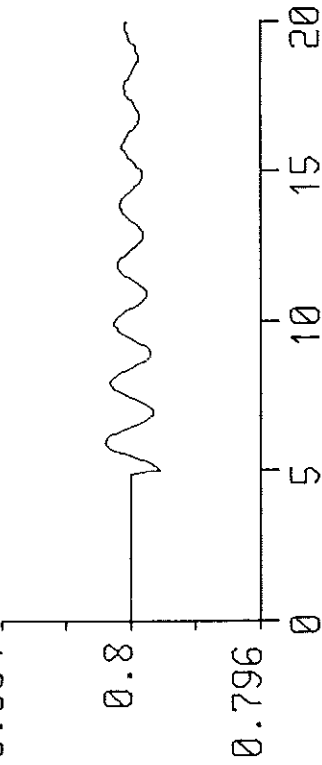
1.001 w



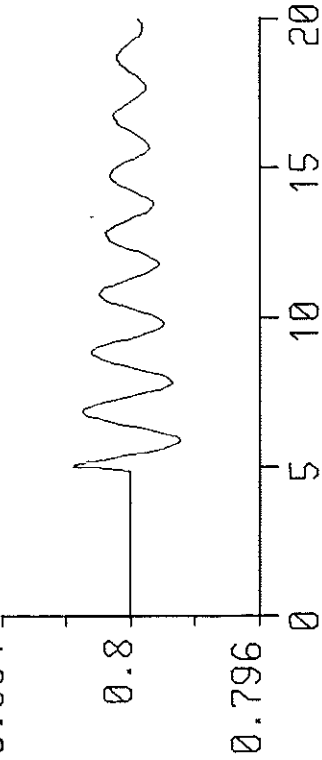
1.001 w, ENDAST NATET



0.804 U

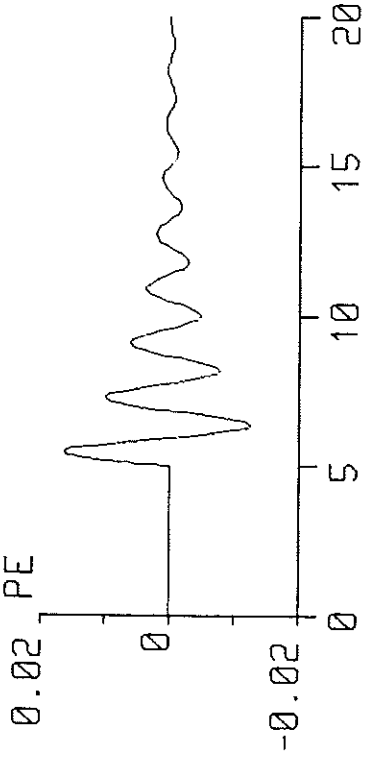


0.804 PM

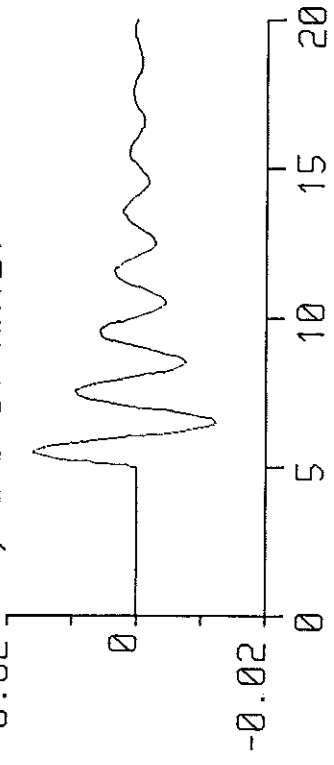


TT=5. TST=75. DELTAT=0.3 DELTAST=0.02 TW=0.5 PST=0.8 BILD=10

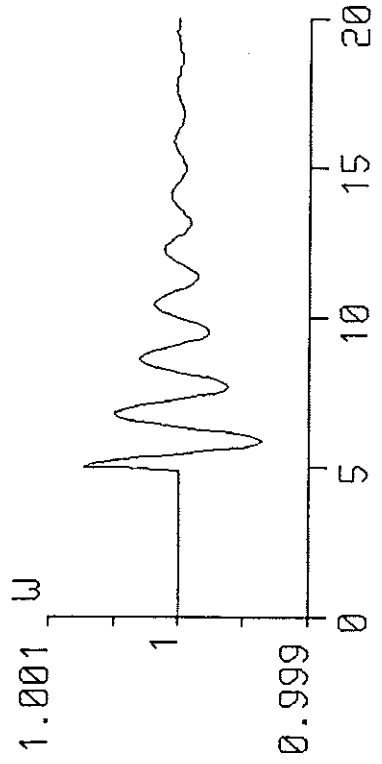
0.02 PE



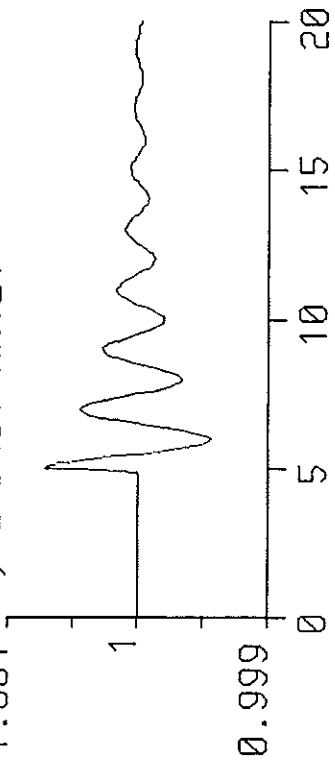
0.02 PE, ENDAST NATET



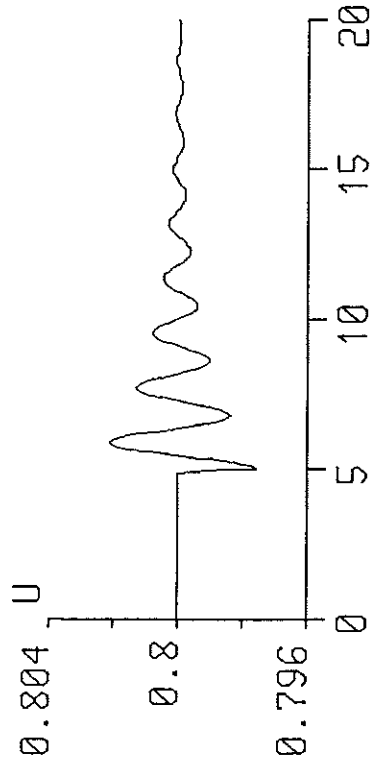
1.001 w



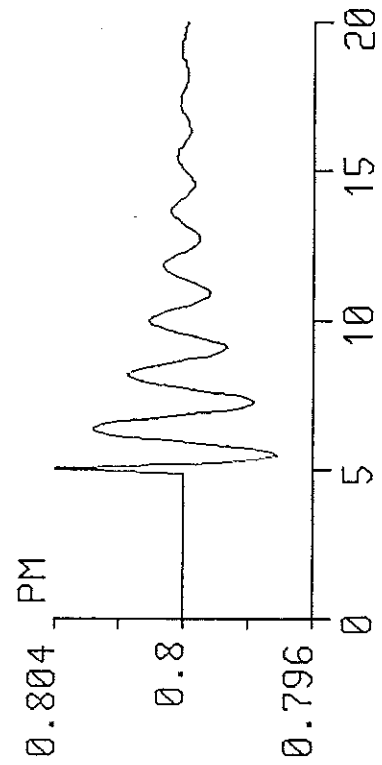
1.001 w, ENDAST NATET



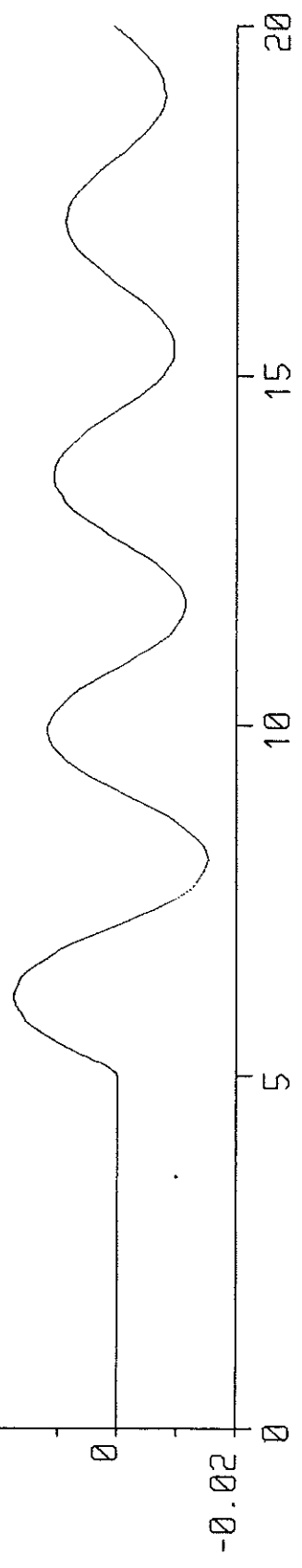
0.804 U



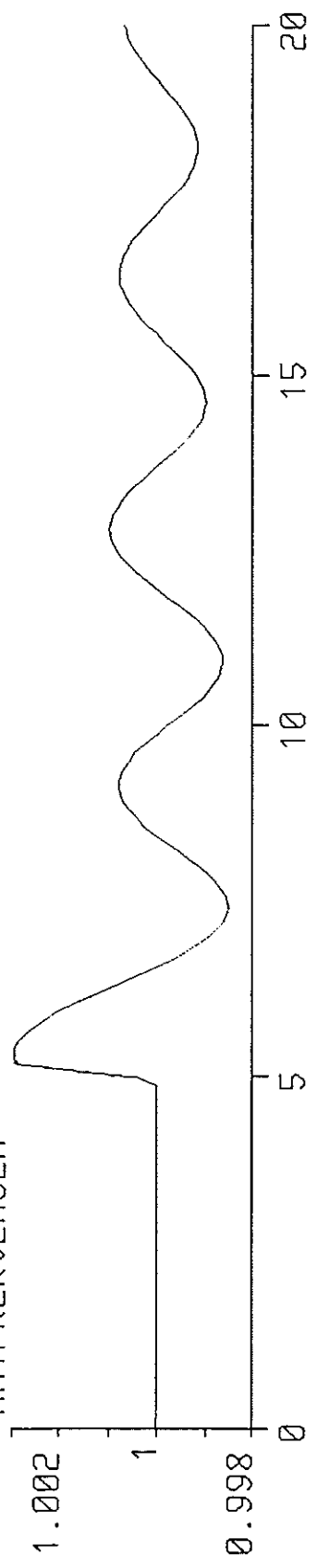
0.804 PM



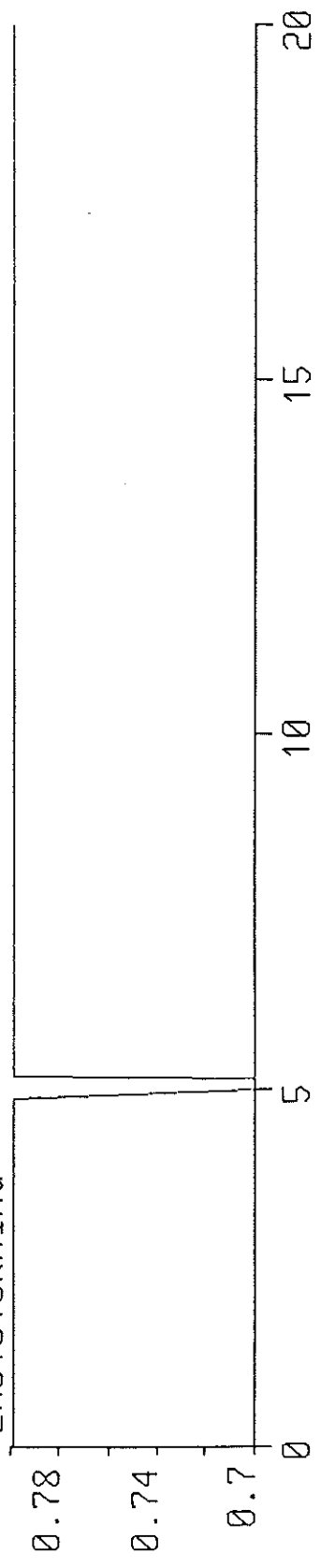
0.02 OVERFORD EFFEKT, PE. PENDLINGSFORLOPP 2.



NATFREKVENSEN

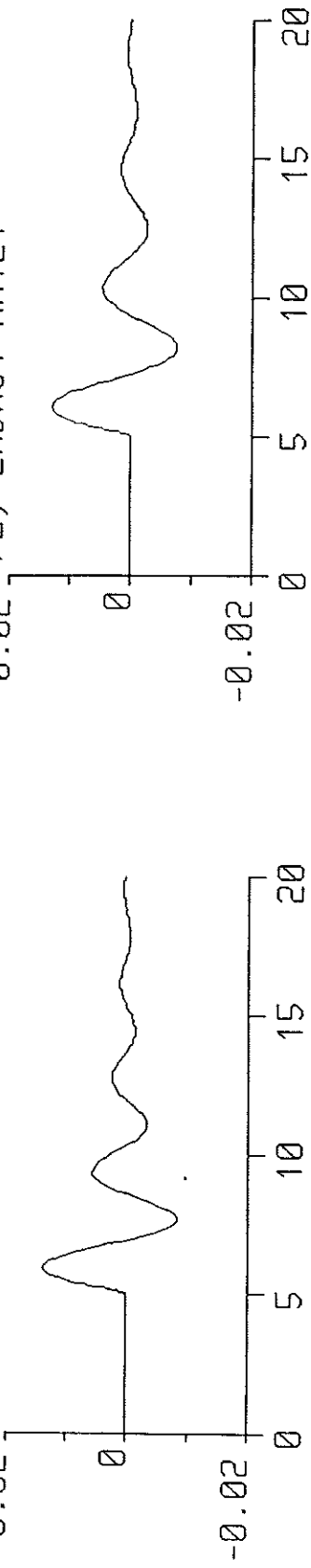


LASTSTORNING

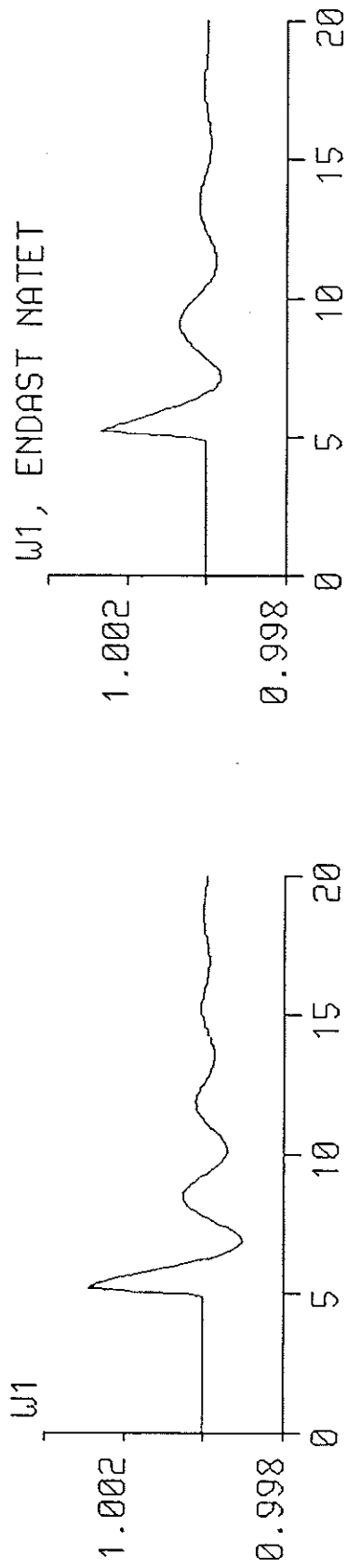


TT=5. TST=75. DELTAT=0.3 DELTAST=0.02 TW=1. PST=0.8 BILD=12

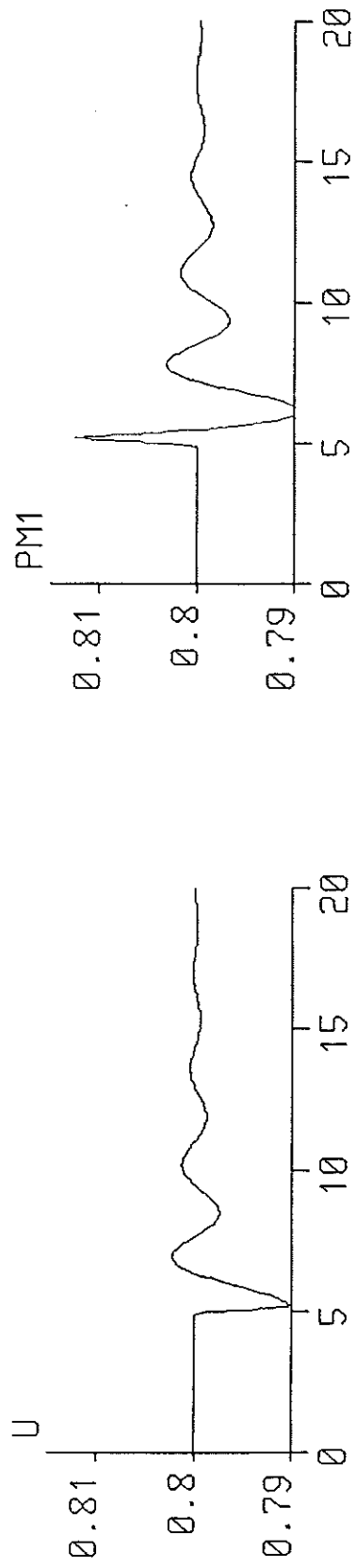
PE



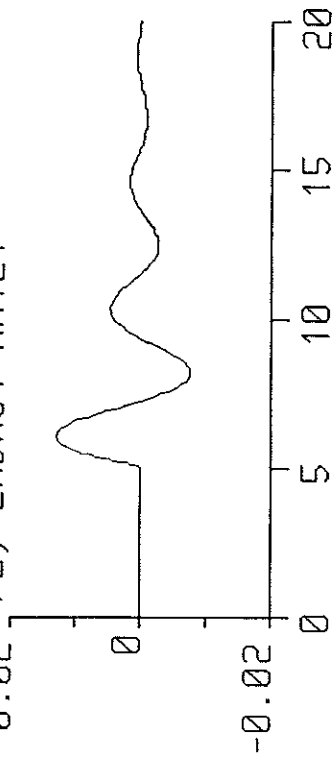
W1



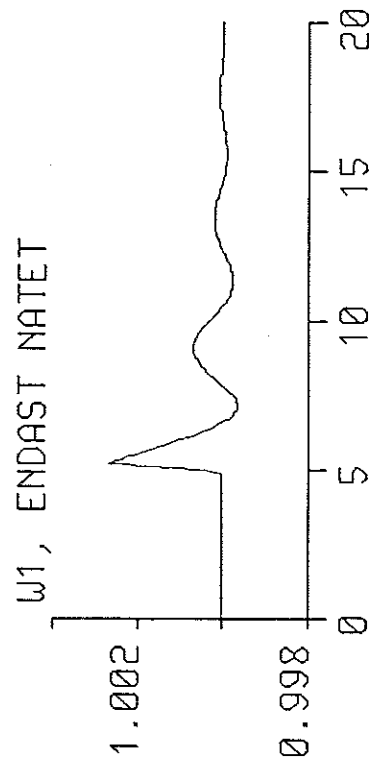
U



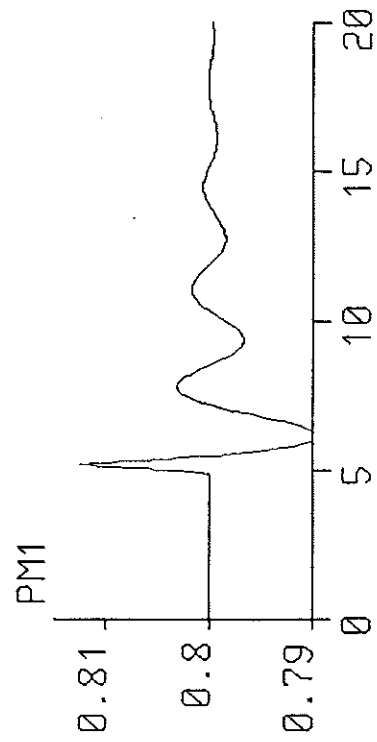
PE



W1, ENAST NATET

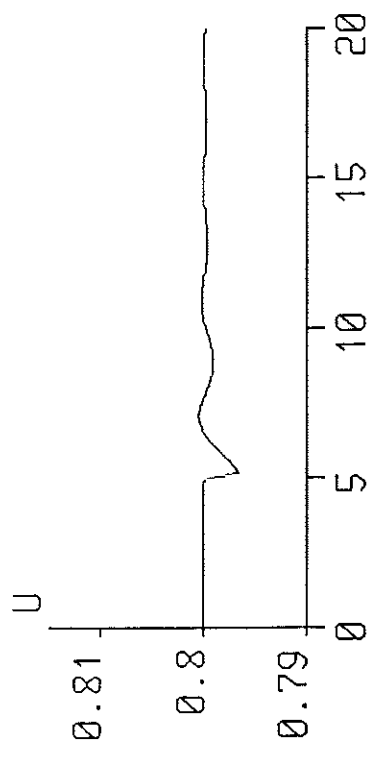
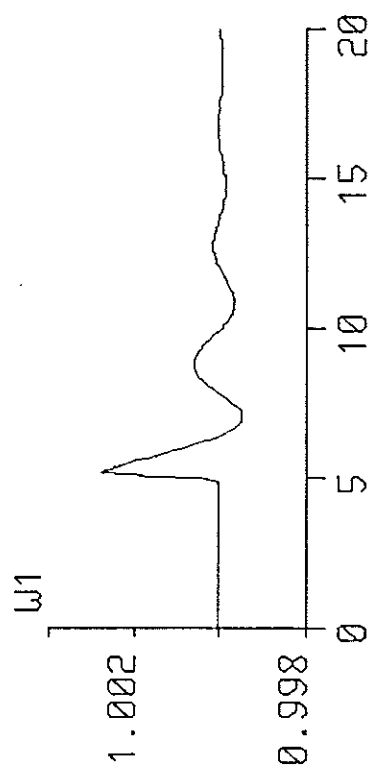
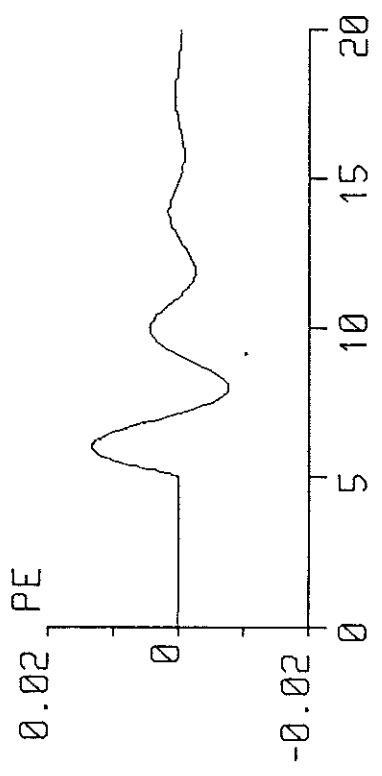
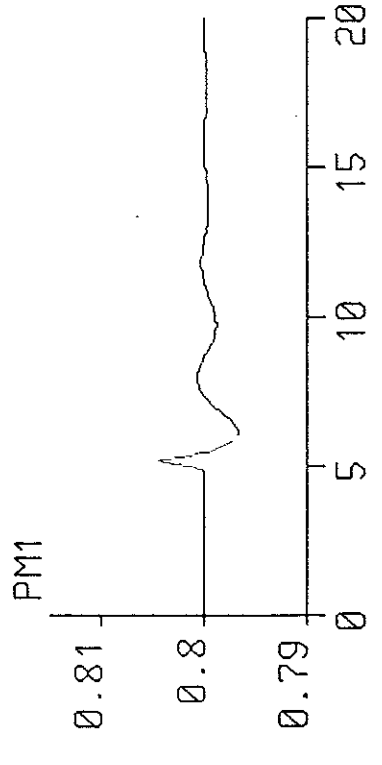
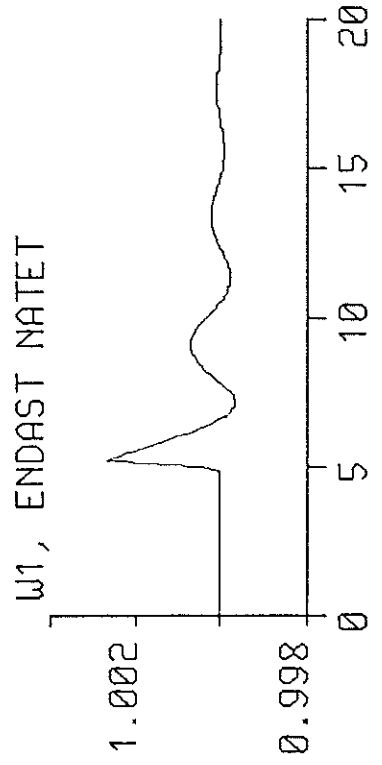
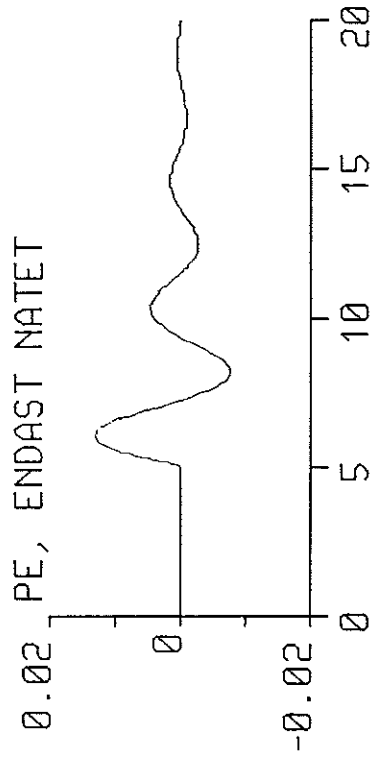


PM1



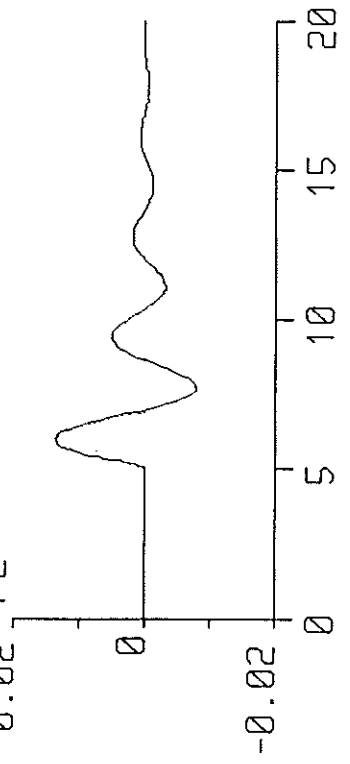
BILD=13

TT=8. TST=80. DELTAT=0.8 DELTAST=0.08 TW=1. PST=0.8

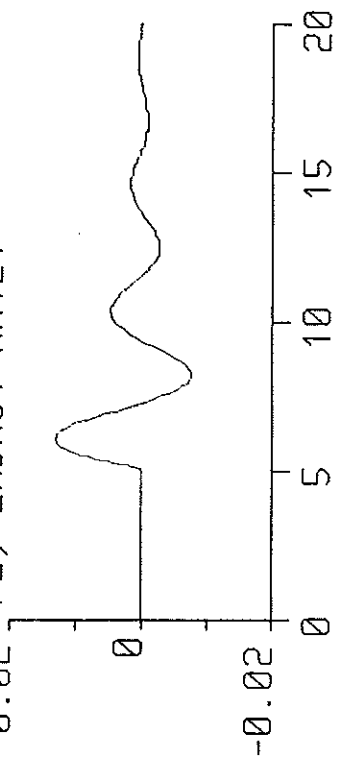


TT=8. TST=30. DELTAT=0.3 DELTAST=0.08 TW=1. PST=0.8 BILD=14

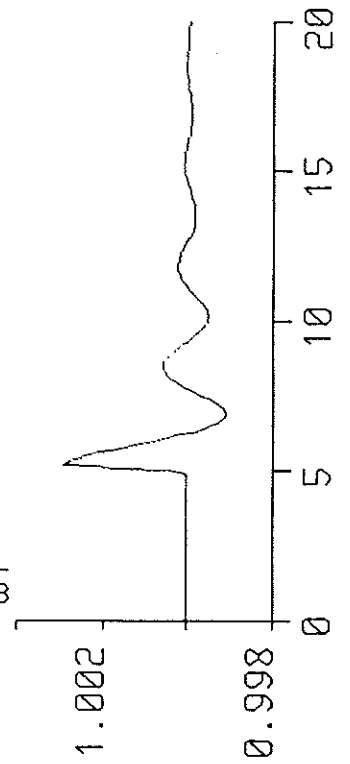
0.02 PE



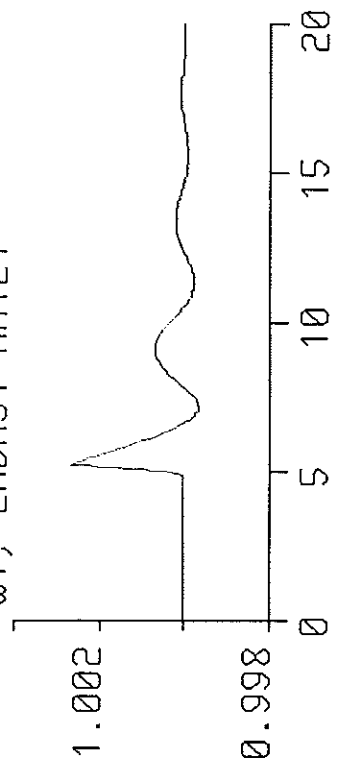
0.02 PE, ENDAST NATET



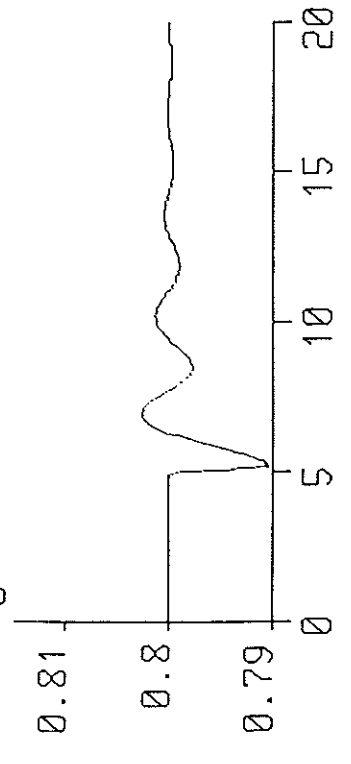
W1



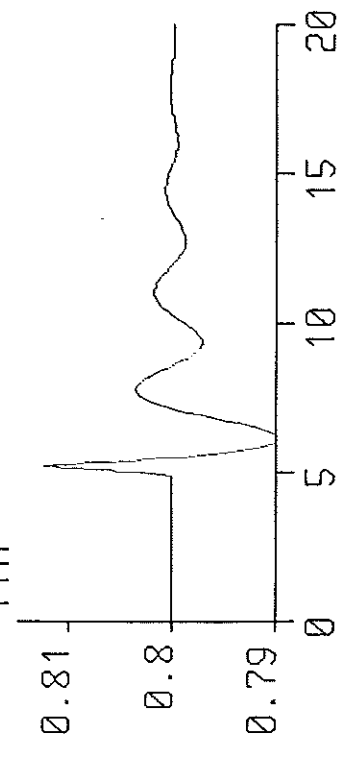
W1, ENDAST NATET



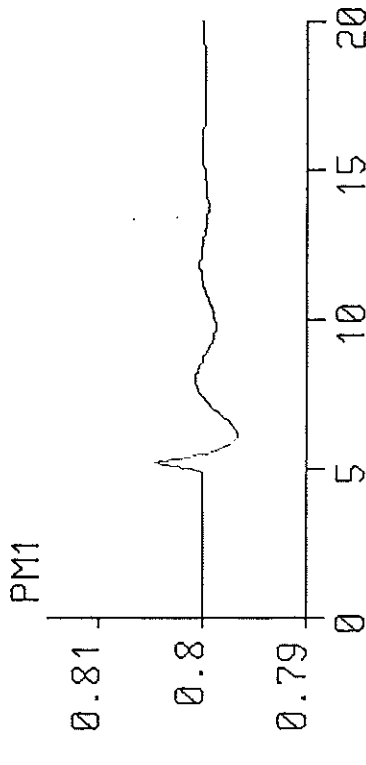
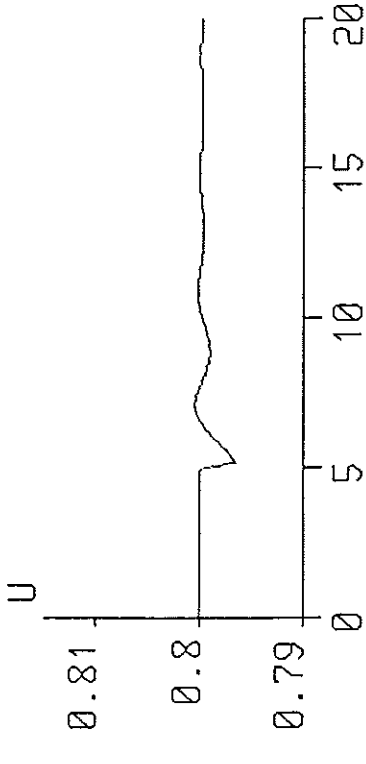
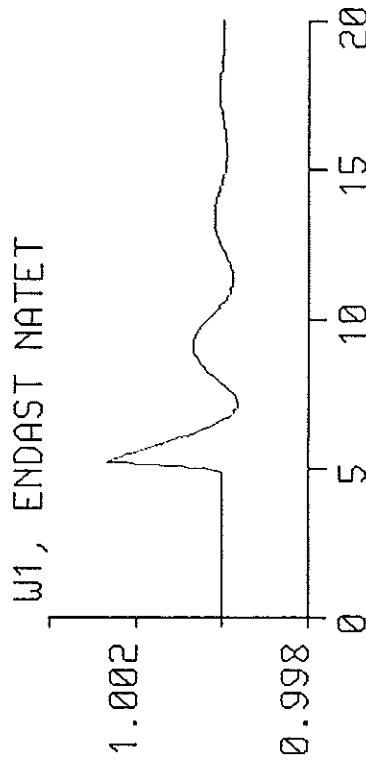
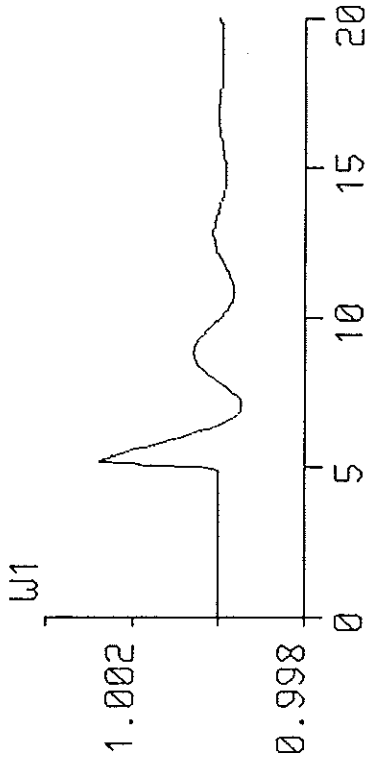
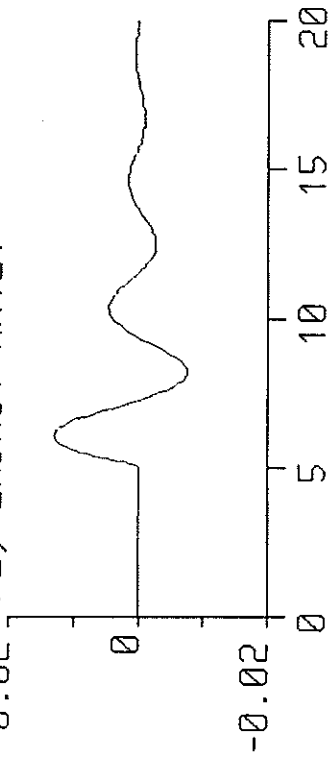
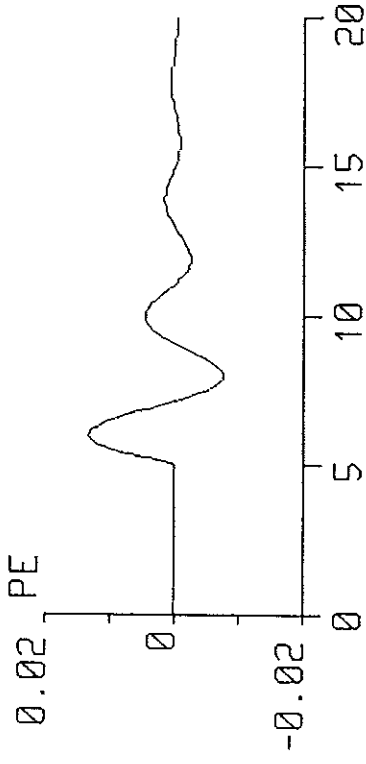
U



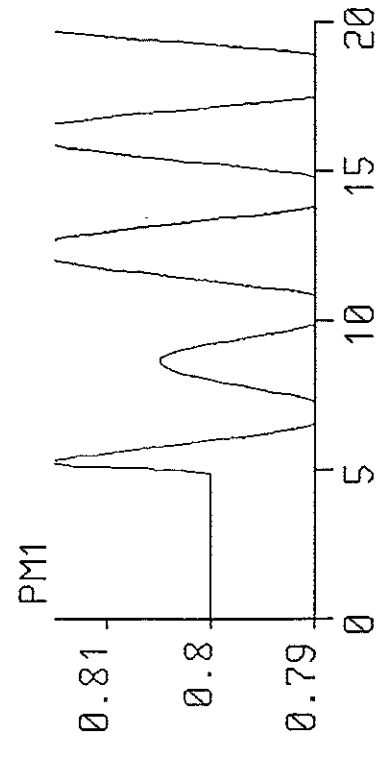
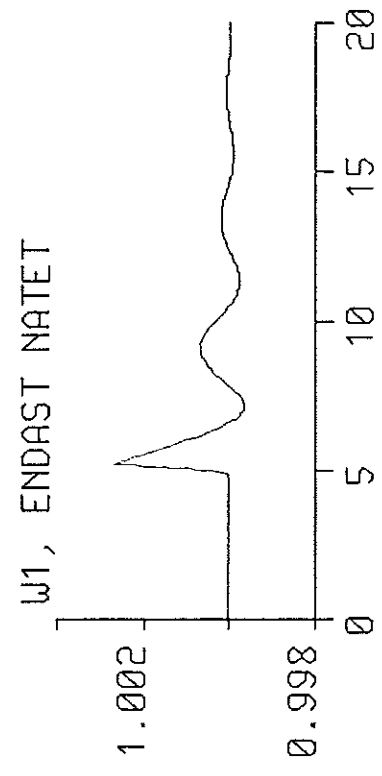
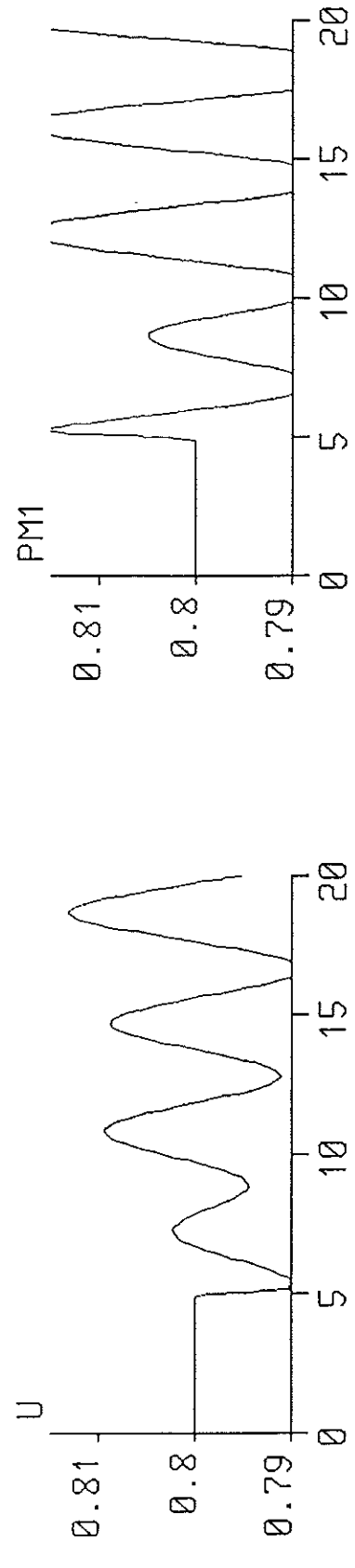
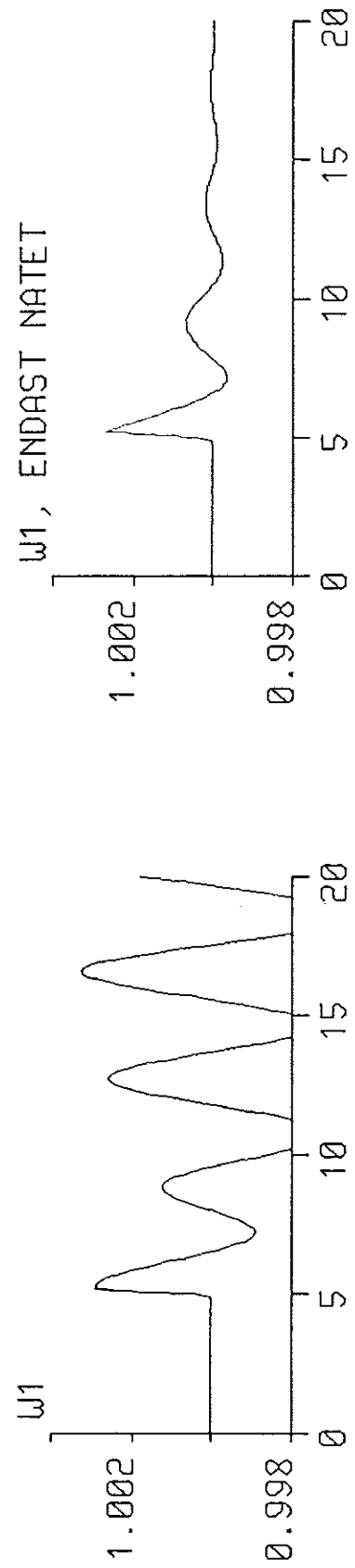
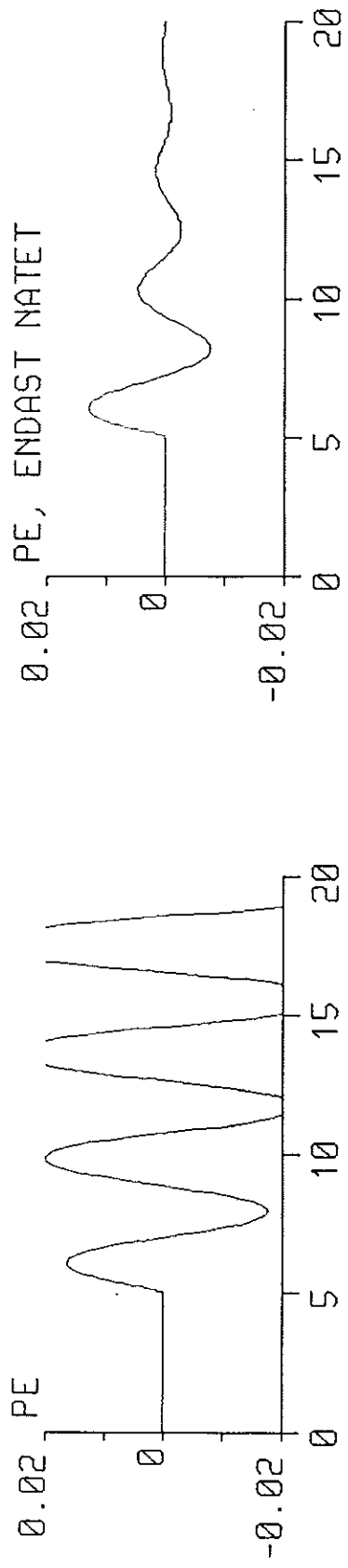
PM1



TT=8. TST=320. DELTAT=0.8 DELTAST=0.02 TW=1. PST=0.8 BILD=15
PE PE, ENDAST NATET



TT=5. TST=75. DELTAT=0.3 DELTAST=0.02 TW=3. PST=0.8 BILD=16



BILD=17

PST=0.8

TW=3

DELTA=0.8

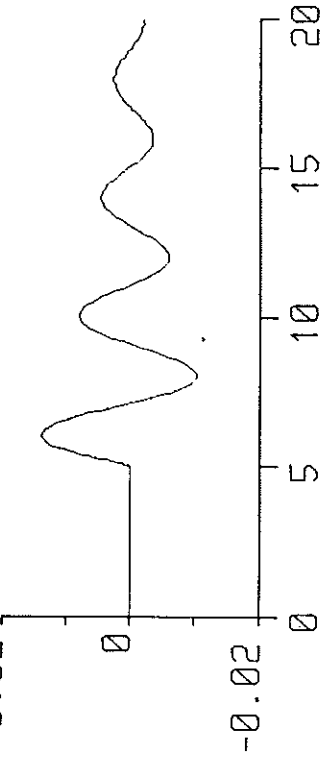
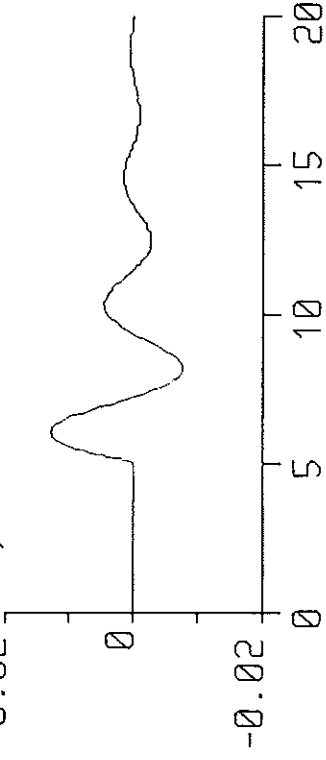
DELTA=0.8

DELTA=0.8

DELTA=0.8

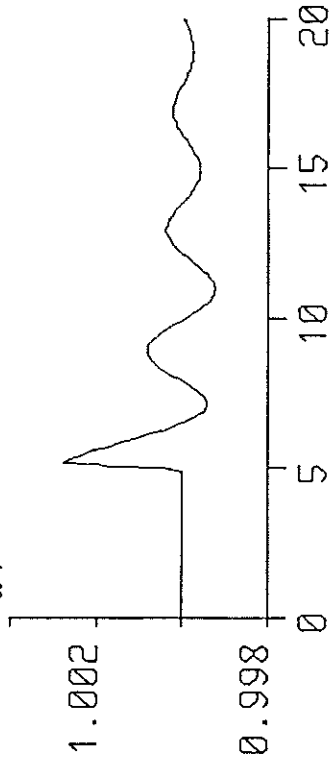
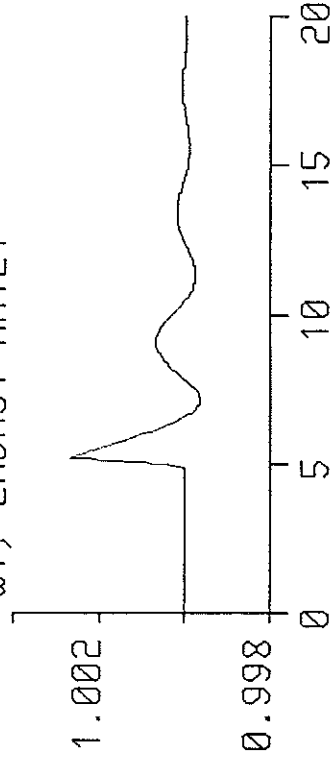
PE, ENAST NATET

PE



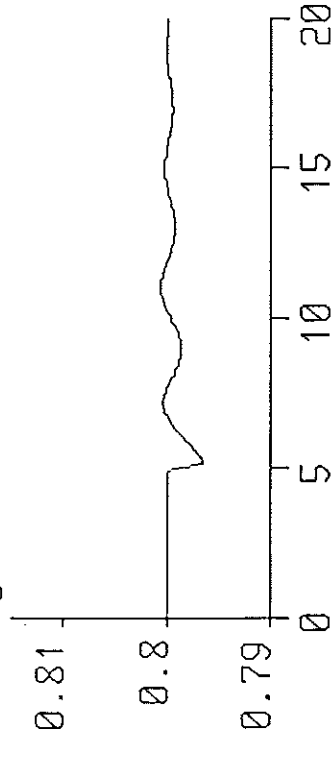
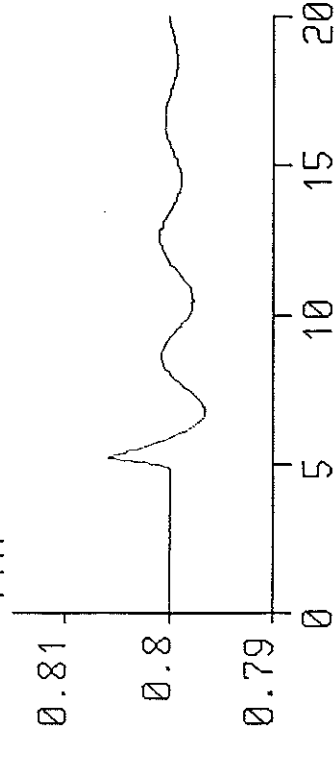
w1, ENAST NATET

w1

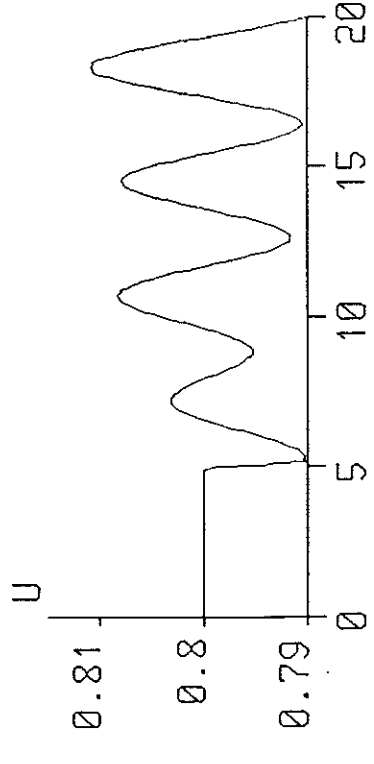
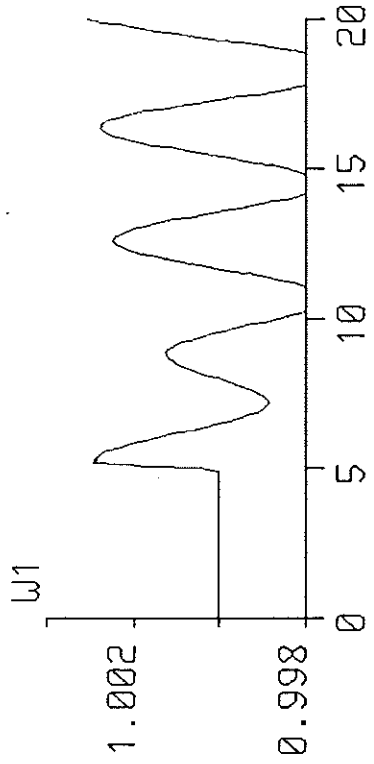
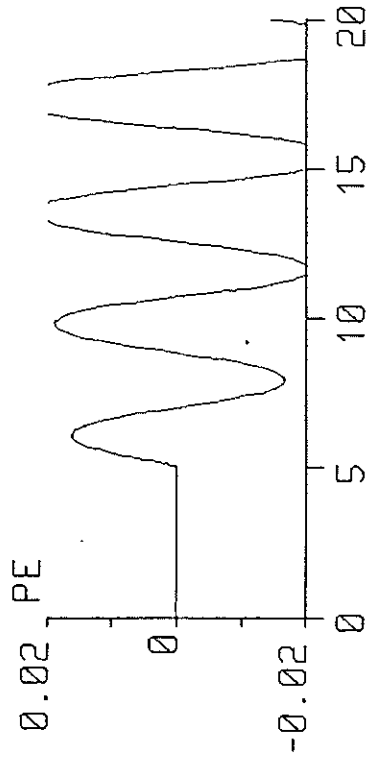
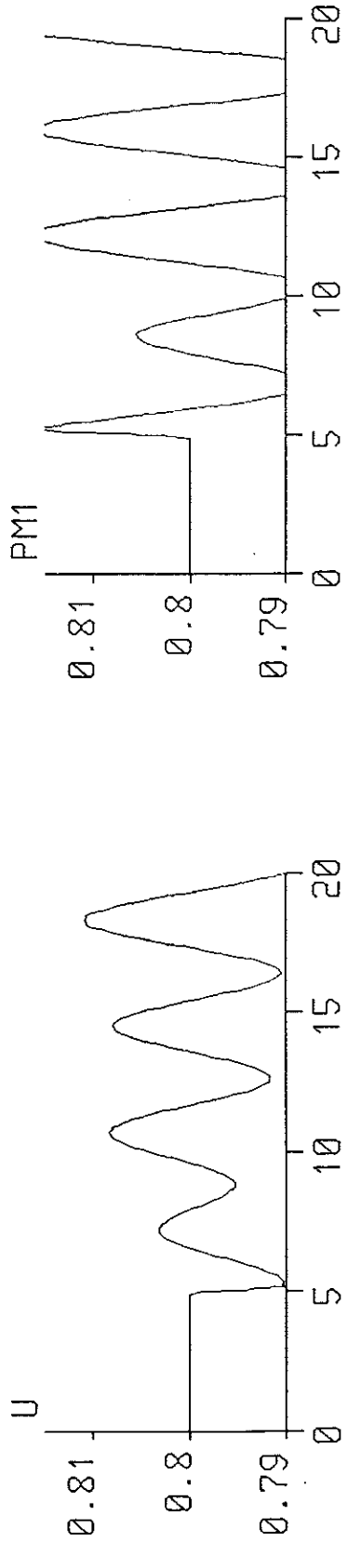
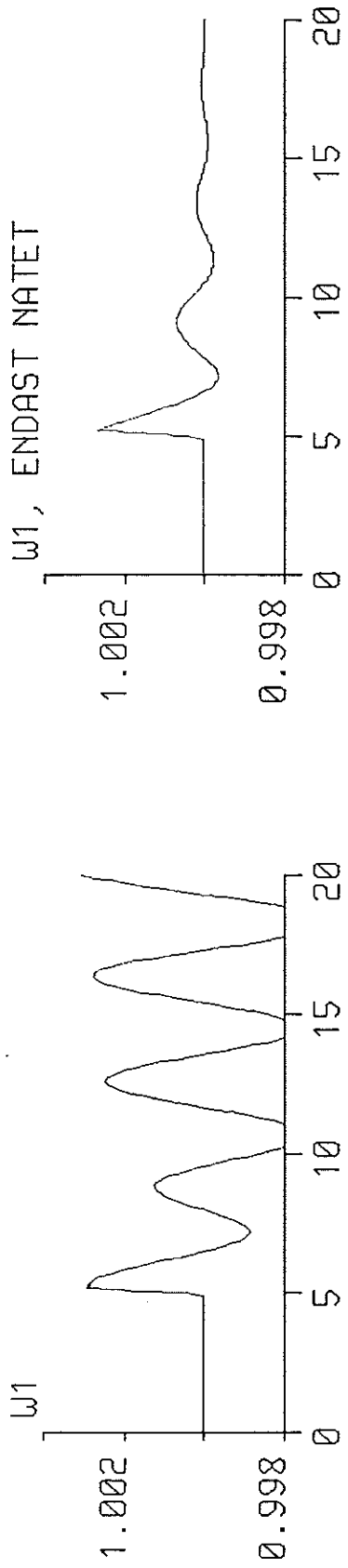
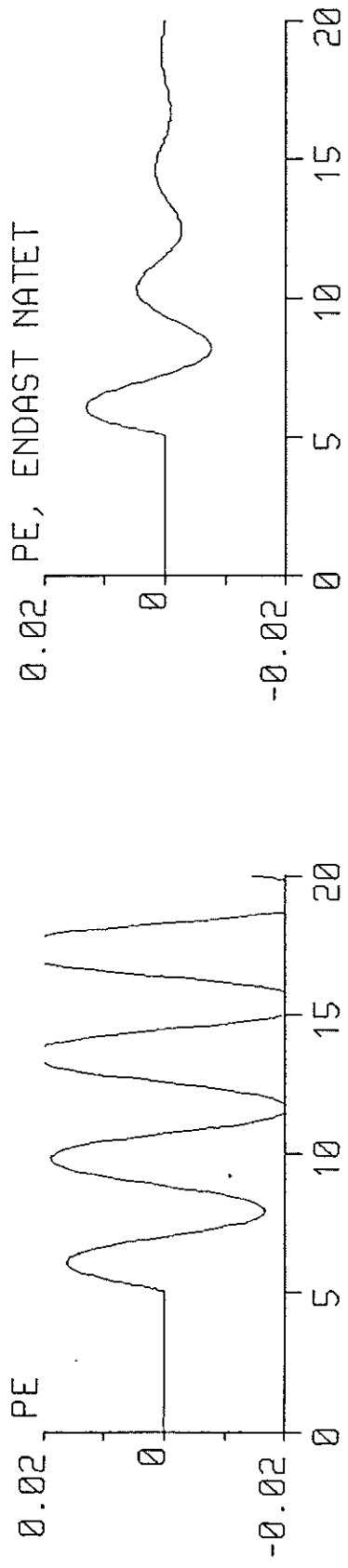


PM1

U

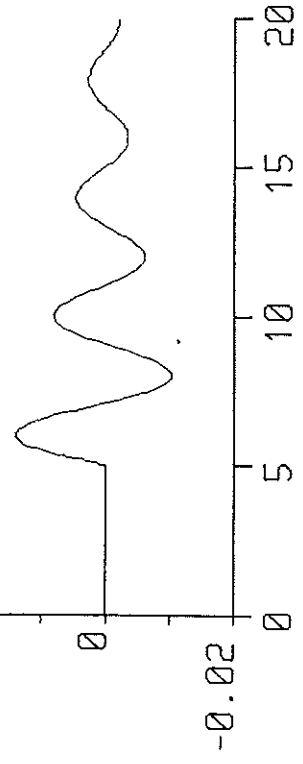


TT=8. TST=30. DELTAT=0.3 DELTAST=0.08 TW=3. PST=0.8 BILD=18

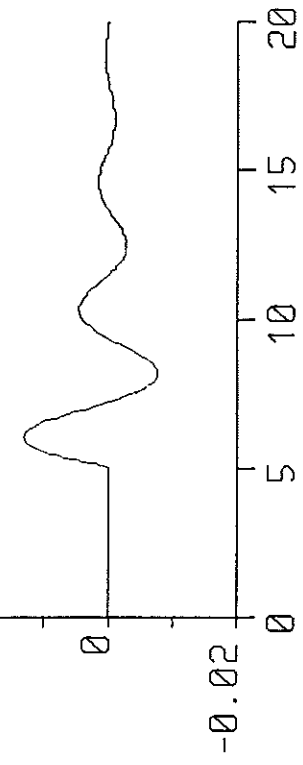


TT=8. TST=320. DELTAT=0.8 DELTAST=0.02 TW=3. PST=0.8 BILD=19

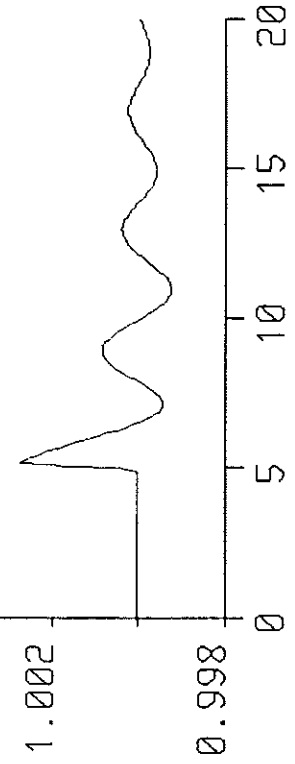
PE



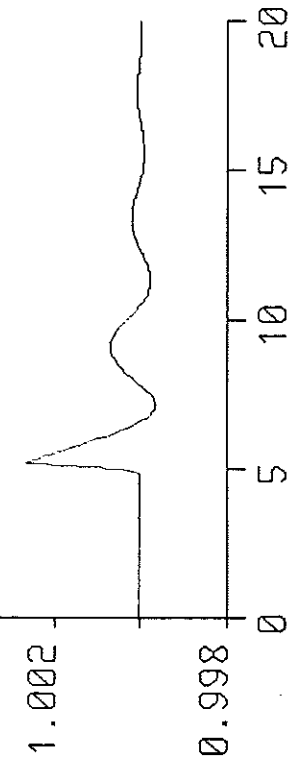
0.02 PE, ENDAST NATET



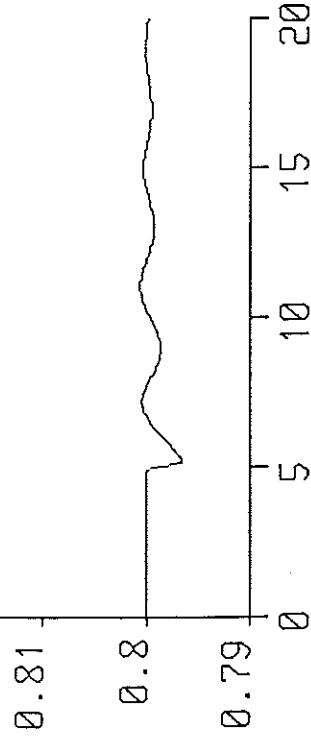
W1



W1, ENDAST NATET



U



PM1

