

## 8. Kraftvarme- og kraftværker

I 1986 indgik den danske regering en energipolitisk aftale, der bl.a. indebar, at der frem til 1995 skulle bygges decentrale kraftvarmeværker med en samlet elektrisk effekt på i alt 450 MW fyret med indenlandske brændsler som halm, træ, affald, biogas og naturgas. I 1990 indgik regeringen yderligere en aftale om øget anvendelse af naturgas og biobrændsler, fortrinsvis ved opførelse af nye kraftvarmeanlæg og ombygning af eksisterende kul- og oliefyrede fjernvarmeanlæg til naturgas- og biomassebaseret kraftvarmeproduktion.

### Princippet for kraftvarmeværker

På et traditionelt kulfyret kraftværk (kondenserende) omsættes 40-45% af den indfyrede energi til elektricitet. Resten af energien udnyttes ikke. Den forsvinder med den varme røggas fra kedlen via skorstenen op i den blå luft og med kølevandet ud i havet (se figur 20).

I et kraftvarmeværk produceres elektricitet på samme måde som i et kraftværk, men i stedet for at lede kondensationsvarmen fra dampen med kølevandet ud i havet, bliver dampen kølet med returvand fra et fjernvarmeledningsnet, som dermed bliver opvarmet.

Fordelene ved et kraftvarmeværk fremfor et kraftværk er bl.a., at det ikke kræver havvand til køling og derfor kan placeres ved større byer (decentralt), hvor der er et tilstrække-



foto: burmeister & wain energi

Masnedø Kraftvarmeværk er idriftsat i 1996 og bruger ca. 40.000 tons halm om året. Herudover anvendes ca. 8.000 tons træflis.

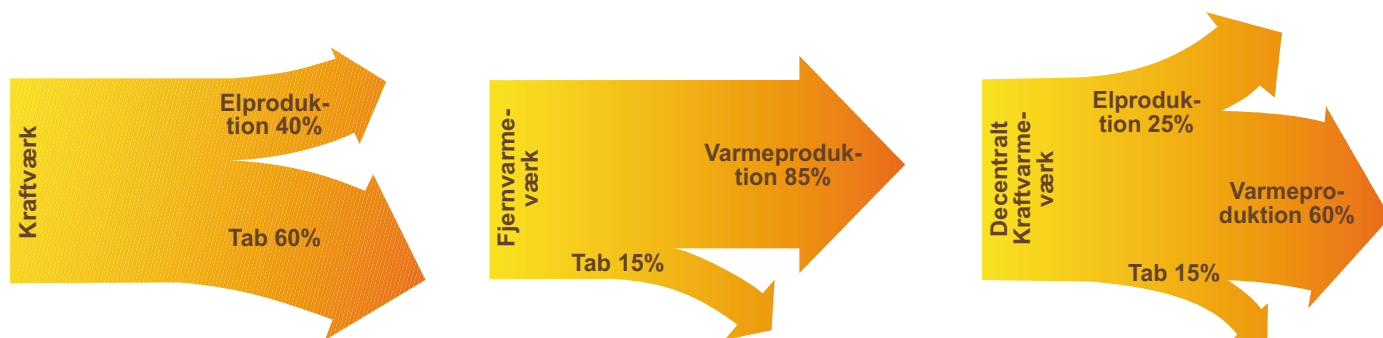
ligt stort fjernvarmebehov og fjernvarmeledningsnet. En anden fordel er, at den med brændslet tilførte energi, kan udnyttes op til 85-90% (se figur 20).

Til gengæld er det samtidig med fjernvarmeproduktion ikke muligt på et kraftvarmeværk at opnå lige så høje elvirkningsgrader, d.v.s. forholdet mellem produceret elektricitet og indfyret energi, som på et kraftværk. El-virkningsgraden for halmanlæg er 20-30%.

Ved drift af et kraftvarmeværk er års-elvirkningsgraden (gennemsnit over et år) ikke nødvendigvis et udtryk for, hvad der er teknisk muligt. Krav til procesdampleverance, prioritering af fjernvarmeforsyningen og

elproduktion efter bestemte afregningstariffer resulterer i en lavere elvirkningsgrad end fuldlast-elvirkningsgraden. Se tabel 6.

På kraftvarmeværket er det muligt inden for visse grænser at regulere på turbinen, så der ændres på forholdet mellem el- og varmeproduktion, men principielt er det sådan, at jo større varmebehovet er, jo mere damp kan fjernvarmevandet køle ned, og jo mere damp kan kedlen producere med deraf større elektricitetsproduktion. På et kraftværk er der ikke denne afhængighed, da der hele tiden er rigelig med kølekapacitet i havvandet. For at gøre elektricitetsproduktionen på kraftvarmeværket mere uafhængig af fjernvarmebeho-



Figur 20: Ved adskilt el- og varmeproduktion på et kraftværk og et fjernvarmeværk er tabene meget større end ved kombineret produktion på et kraftvarmeværk. Tab er inkl. egetforbrug på værket.

	Rudkøbing	Haslev	Slagelse	Masnedø	Grenå	Måbjerg	Maribo/ Sakskøbing
Eleffekt (netto)	2,3 MW	5,0 MW	11,7 MW	8,3 MW	18,6 MW	28 MW	9,3 MW
Varmeydelse	7,0 MJ/s	13,0 MJ/s	28,0 MJ/s	20,8 MJ/s	60,0 MJ/s	67 MJ/s	20,3 MJ/s
Fuldlast elvirkningsgrad, netto	21%	23%	27%	26%	18%	27%	29%
Årsvirkningsgrad, el	17%	17%	22%	23%	14%	20%	26%

*Tabel 6: Eleffekt, varmeydelse og elvirkningsgrad for de syv decentrale kraftvarmeværker. Som forklaret i teksten er års-elvirkningsgraden lavere end virkningsgraden ved fuldlast. Års-elvirkningsgraden er beregnet på basis af produktionsstal for 1997, bortset fra Maribo/Sakskøbing, der er et forventet tal. De høje tal for Slagelse skyldes at dampen fra affaldsanlægget regnes uden kedeltabet. De lave tal for Grenå Kraftvarmeværk skyldes leverancer af procesdamp til industriformål. Alle oplyste tal er nettotal. d.v.s. værkets egetforbrug af el og varme er fratrukket. Se også tabel 7.*

vet, er alle anlæg udstyret med en akkumuleringstank, hvor kondensationsvarmen kan lagres, når fjernvarmebehovet er lavt.

I Danmark har kombineret el- og varmeproduktion høj prioritet, også når det gælder kraftværker placeret i nærheden af store byer som København, Århus, Aalborg, Odense m.fl. På disse kraftværker udnyttes en del af det på figur 20 viste tab på ca. 60% til fjernvarmeproduktion.

De seks halmfyrede decentrale kraftvarmeværker, der allerede er idriftsat, og det kommende værk i Maribo/Sakskøbing er alle baseret på det beskrevne kraftvarmepincip. Da værkerne til dels er opført som

demonstrationsværker af halmfyringsteknologien, er de imidlertid ret forskellige i anlægsopbygningen. Sammenlignende data for de syv værker fremgår af tabel 6, 7, 8 og 9.

### Rudkøbing, Haslev, Slagelse, Masnedø og Maribo/Sakskøbing

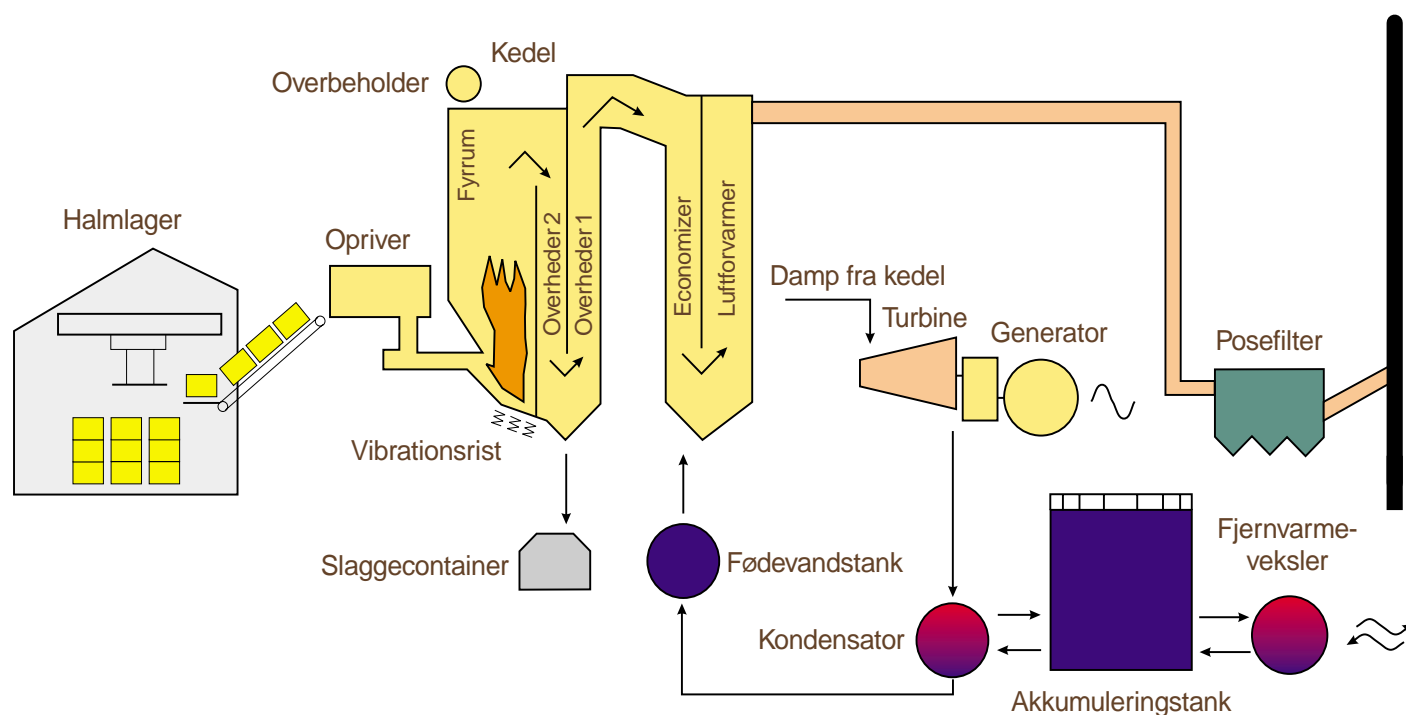
Kraftvarmeværkerne i Haslev og Rudkøbing er idriftsat i 1989 og 1990, og er Danmarks og, så vidt vides, verdens første elproducerende anlæg, der udelukkende fyres med halm. Værket på Masnedø ved Vordingborg, der er idriftsat 1996, er også rent halmfyret, men er udlagt til

samtidig at kunne fyre træflis op til 20% af den samlede indfyrede effekt. Værket ved Maribo/Sakskøbing idriftsættes primo 2000 og er udelukkende halmfyret.

Værkerne ejes og drives af el-selskaberne: I/S Sjællandske Kraftværker, SK Energi, og I/S Fynsværket. Den producerede elektricitet leveres til det offentlige el-distributionsnet, og varmen leveres til byernes fjernvarmesystemer.

### Anlægsstørrelse

Eleffekten på værkerne, Rudkøbing, Haslev og Masnedø, er henholdsvis: 2,3 og 5 og 8,3 MW<sub>el</sub> (MW elektrisk). Med en varmeydelse på henholdsvis



*Figur 21. Principdiagram for Rudkøbing Kraftvarmeværk. Røggassen ledes gennem fyrrummet til overhedersektionen videre gennem en economizer og lufforvarmer og renses i et posefilter inden den forlader skorstenen ved ca. 110°C.*

7,0, 13 og 20,8 MJ/s er det årlige forbrug af halm ca. 12.500, 25.000 og 40.000 tons. Effekt og ydelse er nettotal, d.v.s. værkernes eget forbrug af el og varme er fratrukket.

Da anlægget i Slagelse er sammensat af en affaldsfyret og en halmfyret kedel, der producerer damp til den samme turbine, er data i tabel 6 og 7 for hele anlægget, henholdsvis 11,7 MW<sub>el</sub> og 28 MJ/s varme. 65-70% af produktionen er baseret på halm svarende til et årligt halmforbrug på ca. 25.000 tons.

Værket ved Maribo/Sakskøbing får en eleffekt på 9,3 MW og en varmeydelse på 20,3 MJ/s. Det årlige halmforbrug er ca. 40.000 tons.

### Indfyrings -og forbrændings-system

I Slagelse sørger to automatiske kraner for transport af storballerne fra rækkerne på lageret frem til tre parallelle halmlinier. Her føres ballerne via et lukket brandslusesystem (der hindrer evt. tilbagebrænding at nå ud i halmlageret) frem mod halmoprivningen af samme type som anvendes på Grenå Kraftvarmeværk. Snorene, der holder halmballerne sammen, skæres automatisk over og fjernes.

Opriveren består af tre roterende cylindre placeret ovenover hinanden, monteret med en slags tallerkenrive. Den løse halm falder fra opriveren ned i en cellesluse og herfra

til stokersneglene, der for hvert af de tre indfyringssystemer består af tre snegle. Stokersneglene presser halmen gennem indfyringskanalen ind på risten, der består af en skrå bevægelig skubberist efterfulgt af en kort vandret skubberist. Efter udbrænding falder asken/slaggen via et slaggefald til et vandfyldt slaggebad, hvorfra et transportanlæg fører den våde aske/slagge til containere.

På Rudkøbing Kraftvarmeværk, med en indfyringskapacitet på 10,7 MW, er der kun behov for et enkelt indfyringsystem. Efter oprivning falder halmen ned til et rektangulært stempel der ved frem- og tilbagegående bevægelser skubber halmen

Data	Enhed	Rudkøbing	Haslev	Slagelse <sup>3)</sup>	Masnedø	Grenå	Måbjerg <sup>1)</sup>	Maribo Sakskøbing
El-effekt (netto)	MW	2,3	5,0	11,7 <sup>4)</sup>	8,3	18,6	28 <sup>2)</sup>	9,3
Varmeydelse	MJ/s	7,0	13	28 <sup>4)</sup>	20,8	60,0 <sup>5)</sup>	67 <sup>2)</sup>	20,3
Damptryk	bar	60	67	67	92	92	67	93
Damptemperatur	°C	450	450	450	522	505	410/520	542
Maks. dampflow	tons/h	13,9	26	40,5	43,2	104	125	43,2
Akkumuleringstank	m <sup>3</sup>	2.500	3.200	3.500	5.000	4.000	5.000	5.600
Røggasflow, maks.	kg/s	6,8	9,9	13,4	14	39	71	14
Røggastemperatur	°C	110	120	120	120	135	110	110
Halmlager	tons	350	350	550	1.000	1.100	432	1.000
Halmforbrug	tons/år	12.500	25.000	25.000	40.000	55.000	35.000	40.000
Vandindhold, halm	%	10-25	10-25	10-25	maks. 25	10-23	10-25	maks. 25
Filtertype		posefilter	posefilter	elfilter	elfilter	elfilter	posefilter	posefilter
Fyringssystem		revet/stoker	cigarbrænder	revet/stoker	revet/stoker	revet/pneumatisk	cigarbrænder	revet/stoker
Anlægsomkostninger	mio. kr.	64	100	140 <sup>6)</sup>	240	365	600	240
Idriftsat	år	1990	1989	1990	1996	1992	1993	2000
Specifik 1995-pris <sup>7)</sup>	mio. kr./MW <sub>el</sub>	30	23	21	28	21	22	23

1): Værket består af to affaldsfyrede- og en halm/flisfyret kedel, der producerer damp til samme turbine.

2): Data er halm/flis- og affaldskedlernes samlede produktion af el og varme. Halm/fliskedlen producerer ca. 27%.

3): Værket består af en affaldsfyret- og en halmfyret kedel, der producerer damp til samme turbine.

4): Data er halm- og affaldskedlernes samlede produktion af el og varme, hvoraf halmkedlen producerer ca. 66%.

5): Fordelt mellem fjernvarme (maks. 32 MJ/s) og procesdamp (maks. 53 MJ/s).

6): Anlægspris kun for halmkedlen.

7): Den specifikke pris er kun retningsgivende idet der er variation i hvor meget anlægsomkostningerne omfatter. Ved sammenligning med andre typer kraftvarmeværker bør det oplyses at her er netto-eleffekten brugt ved beregning af den specifikke pris, og ikke brutto-eleffekten (bruttototal inkluderer egetforbrug på værket).

Tabel 7: Data for de syv halmfyrede decentrale kraftvarmeværker.

gennem en vandkølet kanal ind på risten. Ved stempelbevægelserne presses halmen sammen i indfyriingskanalen til en gastæt prop, der hindrer tilbagebrænding. Halmen udbrænder på en vibrationsrist og asken/slaggen falder i et vandkølet slaggebad, hvorfra den føres til container.

På Haslev Kraftvarmeværk indfyres storballerne uden oprivning i fire parallelle cigarbrændersystemer. Cigarbrænderen er beskrevet i kapitel 7 om fjernvarmeværker.

På Masnedø Kraftvarmeværk håndteres halmen frem til indfyriings-systemet via kran og to halmlinier. Til indfyriing af halmen er der udviklet et helt nyt system, hvor halmballen presses mod to lodretstående snegle, der ved deres rotation river halmen op og transporterer den løse halm til et vandretliggende sæt stokersnegle, der ved modsatrettet rotation presser halmen som en gastæt prop igennem en næsten rektangulær indfyriingskanal og derfra ind på risten. Med to af disse indfyriings-systemer er anlægget i stand til ved fuldlast at indfyre 19 storballer, svarende til 10 tons halm, i timen. På hvert af de to indfyriings-systemer er der indbygget mulighed for at fyre træflis samtidig med halmen. Foreløbige forsøg viser, at flisen kan udgøre op til 40% af den totale indfyrede energi. Anlægget er udlagt til 20% flis.

### Aske- og slaggehåndtering

På alle værker bliver slaggen og asken fra bunden af kedlen holdt adskilt fra flyveasken fra filteret. Slaggen og bundasken bliver leveret tilbage til landmanden som gødnings-supplement, hvorimod flyveasken, på grund af for højt tungmetallindhold, enten må deponeres på et kontrolle-ret depot eller udnyttes til blanding med kunstgødning. Se nærmere under kapitel 11 "Restprodukter".

### Kedelydelse, dampdata og varmeakkumulering

Kedlerne er alle vandrørskedler med overbeholder og naturlig cirkulation i fordampersystemet. Af driftsøkonomiske årsager er det ønskeligt med en høj elproduktion. Dette forudsætter højt damptryk og damptempera-



foto: weiss a/s

*Der svejses på en vandrørskedel til et kraftvarmeværk. Rørene er forsynet med små langsgående finner så de kan svejses sammen til en gastæt væg der udgør side, top og bund i kedlen.*

er den vanskelig at fjerne under drift og vil hæmme varmeoverførslen fra røggassen til dampen i rørene, og i svære tilfælde kan den lukke så meget af for røggassens fri strømning, at undertrykket og dermed lasten på kedlen ikke kan holdes. På værkerne i Haslev, Slagelse og Rudkøbing er disse problemer søgt undgået ved at begrænse overhedertemperaturen til maks. 450 °C. Dette er i Haslev og Slagelse gjort ved at trække overhedersektionerne så langt tilbage i kedelsystemet, at røggastemperaturen er reduceret til ca. 650-700°C før kontakten med første overhedersektion. På Masnedø Kraftvarmeværk er damptemperaturen forsøgsvis forhøjet til 522 °C. Den højere temperatur øger som nævnt risikoen for større korrosion og slaggeproblemer. Overhederen og toppen af kedlen er der-

tur. For at kedlen kan modstå de høje tryk føres kedelvandet igennem vand/damprør, der udgør siderne (og bund og top) i kedlen. Fra overbeholderen, hvor vand og damp adskilles, føres dampen til overhederne, der f.eks. kan hænge enten som guirlander lodret ned fra loftet eller ligger i vandrette rørbundter i selvstændige overhedertræk efter fyrrummet. Efter overhedertrækket følger et træk med economiser og luftforvarmer, hvor fødevandet og forbrændingsluften opvarmes. På grund af halmaskens relativt høje indhold af alkalimetaller (kalium og natrium) og klor er røggassen, især ved højere temperaturer (over 450 °C) korroderende, og askepartiklerne kan som følge af lave askesmeltetemperaturer give anledning til slaggeproblemer i kedlen. Hvis slaggen bliver fast og klæbrig,

Andre brændsler:	Enhed	Masnedø	Grenå	Måbjerg	Slagelse
Affald	tons/år	-	-	150.000	20.000
Kul	tons/år	-	40.000	-	-
Gas	Nm <sup>3</sup> /år	-	-	4 mio.	-
Træflis	tons/år	8.000	-	25.000	-

*Tabel 8: Fire af værkerne er indrettet til kombinationsfyriing med andre brændsler.*

for konstrueret, så det er relativt nemt at udskifte evt. korroderede overhederrør.

På det kommende kraftvarmeværk i Maribo/Sakskøbing, der er planlagt idriftsat primo 2000, vil damptemperaturen blive udlagt til 542 °C. En række forsøg skal vise, hvor alvorlige korrosionsproblemerne vil være.

Dansk industris muligheder for at komme ind på udenlandske markeder med halmfyrede kraftvarmeværker, forudsætter høje elvirkningsgrader og dermed høje dampdata, op mod 580 °C, som på de nyeste kulstøvfyrede kraftværker. Ved så høje temperaturer vil det, ud over problemerne med korrosion og slaggebelægninger, yderligere være nødvendigt at udstyre anlægget med turbiner af en anden og dyrere kvalitet end hidtil anvendt på de beskrevne kraftvarmeværker.

### Grenå og Måbjerg

Kraftvarmeværkerne i Grenå og Måbjerg ved Holstebro ejes og drives af

elselskaberne I/S Midtkraft og I/S Vestkraft.

Grenåværket blev idriftsat i 1992 og anlægget i Måbjerg i 1993. Begge værker er beregnet for fyring med kombinationer af halm og andet brændsel.

#### Kraftvarmeværket i Grenå

Kraftvarmeværket i Grenå er kul- og halmfyret, og det skal foruden elproduktionen sammen med et kommunalt affaldsforbrændingsanlæg og spildvarme fra den nærliggende industri, dække 90% af fjernvarmeforbruget i Grenå samt 90% af procesdampforbruget på virksomheden Danisco Paper. Fra 1997 er industri-dampsystemet udvidet til også at dække procesdampforbruget på Danisco Distillers. Som det foreløbig eneste biomassefyrede kraftvarmeproducerende anlæg i Danmark benyttes i Grenå en kedel af cirkulerende fluid bed-typen.

#### Fluid Bed

En fluid bed-kedel består af et cylindrisk lodretstående forbrændings-

kammer, hvor de faste partikler, bestående af brændsel og et fluidiseringsmedie, f.eks. sand, gennemblæses med luft, hvorved blandingen (bedden) fluidiseres og dermed opnår egenskaber som en væske.

En fordel ved fluid bed-kedlen er, at den er velegnet til fyring med blandingsbrændsler.

Fluid bed-princippet findes i mange varianter men i grove træk er der tale om to hovedtyper:

- Boblende Fluid Bed (BFB)
- Cirkulerende Fluid Bed (CFB)

Kedlen i Grenå er af cirkulerende fluid bed-typen. Fra selve fluid bed-sektionen cirkulerer den varme røggas sammen med de faste partikler over i en udskiller-cyklon, hvor faststofpartiklerne skilles fra og recirkuleres i fluid bedden. Røggassen føres fra cyklonen over i et rørtræk, hvor economiser og luftforvarmer er placeret. Mellem cyklonafgang og economiserparten passerer røggassen 2 rørsektioner, der sammen med et rørbundt i selve bedden udgør overhøderen. Overhøderen er i 1996 udvi-



Måbjergværket. Til venstre ses akkumuleringsstanken på 5.000 m<sup>3</sup>. Halmageret er den lave bygning til højre. Yderst til højre ses det udendørs flislager.

det med en sektion placeret i askere-cirkulationssystemet.

**Håndterings -og indfyrrings-systemet**

I kraftvarmeværket i Grenå bliver halmen, som på de øvrige værker, leveret som storballer. Med en årlig leverance på 55.000 tons halm har man fundet det nødvendigt at automatisere vejning og måling af vandindholdet ved afleveringen på værket. En automatisk kran er forsynet med gribecløer, der løfter 12 baller ad gangen af lastvognen. Ved hjælp af mikrobølger, der sendes gennem ballerne fra den ene gribeklo til den anden, og ved hjælp af en vejecelle mellem gribecløer og kran bliver det gennemsnitlige vandindhold og vægten målt og registreret i en computer.

Fra lageret hentes ballerne med kran til 4 halmlinier. Halmen oprives ved et relativt lavt energiforbrug på 1,8 kWh pr. indfyret MWh. Den revne halm transporteres via celledsluser til 2 indfyrringsystemer. Via indfyrringsystemerne blæses halmen til askerecirkulationssystemet, hvorfra det føres med ind i bedden. Kullene tilføres efter forudgående knusning til maks. 8 mm kornstørrelse, enten via stokersnegle i bunden af kedlen eller gennem celledsluser til askerecirkulationssystemet.

**Øvrige data**

Kedlen i Grenå er udlagt til fyring med kul og halm i et blandingsforhold med 50% halm på energibasis. Kedlen producerer ved 100% last 104 tons damp pr. time ved 505 °C og 92 bar. Heraf udtages mellem 37 og 77 tons damp pr. time ved 210 °C og 8,3 bar til procesdamp til virksom-

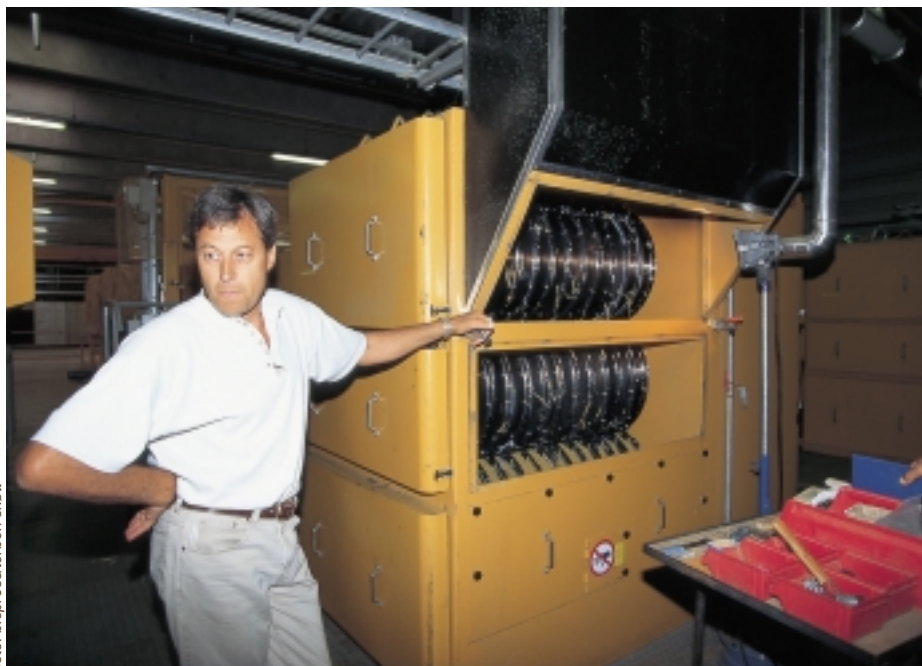


foto: biopress/forben skøtt

*Driftslederen på Grenå Kraftvarmeværk står ved en halmoprøver der er åbnet for inspektion.*

hederne Danisco Paper og Danisco Distillers. Foruden 55.000 tons halm forbruges årligt ca. 40.000 tons kul. Kullageret svarer til 20 døgn forbrug ved 100% ren kulfyring og halmlageret til 4,2 døgn forbrug ved 50/50% brændselsmiks. Anlægget er som de øvrige kraftvarmeanlæg udstyret med varmeakkumuleringstank, og som på værkerne i Slagelse og Masnedø renses røggassen for faststofpartikler i et elektrofilter.

**Kraftvarmeværket i Måbjerg**

I Måbjerg tæt ved Holstebro har i/s Vestkraft opført et kraftvarmeværk der fyres med affald, halm, flis og naturgas. Anlægget er opdelt i 3 kedellinier, 2 for affald og 1 for halm og flis.

Alle 3 kedler er forsynet med separat naturgasfyret overheder der

hæver damptemperaturen fra 410 °C til 520 °C ved et tryk på 67 bar. Halmen indfyres som hele storballer i 6 stk. cigarbrændere, monteret 3 og 3 overfor hinanden. Flisen kastes med et pneumatisk indfødningssystem ind over en vibrationsrist, hvor uforbrændt halm og flis udbrænder. Røggassen fra halm/flis kedlen renses i et posefilter, og for affaldskedlernes vedkommende suppleres røggasrensningen med et vådrengesystem til nedbringelse af klorbrinte-, fluorbrinte- og svovlilteemissionen. Vådrensesystemet medfører samtidig en vis udskillelse af tungmetaller fra flyveasken.

Halm/flis kedlen kan køre fuldlast på enten halm eller flis eller kombinationer af halm og flis. Kedlens kapacitet er 12 tons halm pr. time.

Emission	Enhed	Rudkøbing	Haslev	Slagelse	Grenå	Aabenraa	Måbjerg	Masnedø	Maribo/Sakskøbing
CO	volumen % tør røggas	0,2 ved 12% CO <sub>2</sub>	0,05 ved 10% O <sub>2</sub>	0,2 ved 12% CO <sub>2</sub>	Ingen	Ingen	0,05 ved 10% O <sub>2</sub> <sup>2)</sup>	0,05 ved 10% O <sub>2</sub>	0,05 ved 10% O <sub>2</sub>
Støv	mg/Nm <sup>3</sup>	50	50	50	50	50	40	40	40
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	350	340	340	160	400	Ingen	200	400
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	Ingen	300	300	280	2.000 <sup>1)</sup>	Ingen	Ingen	Ingen

*Tabel 9: Maksimale emissioner fra de 7 decentrale kraftvarmeværker og kraftværket i Aabenraa. Tallene er fra de enkelte værkers miljøgodkendelser.*

1): Under drift er emissionen 100-200 mg SO<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>.

2): Omregnet fra 650 mg/Nm<sup>3</sup>.

Yderligere data fremgår af tabel 6, 7, 8 og 9.

### Miljøkrav

I Miljøministeriets vejledning nr. 6/1990 om "Begrænsning af luftforurening fra virksomheder"/ref. 42/, foreslås der for halmfyrede anlæg større end 1 MW indfyret, vejledende grænseværdier for støv og CO på henholdsvis 40 mg/Nm<sup>3</sup> og 0,05 % CO (volumen % ved 10% O<sub>2</sub> i røggassen). For de her beskrevne kraftvarmeanlæg er der dog i de respektive miljøgodkendelser stillet individuelle krav, se tabel 9.

### Anlægs- og driftsudgifter

Anlægsudgifterne til de decentrale biomassefyrede kraftvarmeværker er relativt højere end for konventionelle kulfyrede kraftværker målt i millioner kr. pr. installeret MW<sub>el</sub>-kapacitet. For de syv værker varierer den specifikke anlægsinvestering mellem ca. 21 og 30 mio. kr. pr. MW<sub>el</sub>. Anlægsomkostninger, som de fremgår af tabel 7, er pristalsreguleret til 1995-niveau, så de er sammenlignelige. De relativt høje anlægspriser er først og fremmest afhængige af anlæggets størrelse, (jo mindre anlæg, jo højere specifikke anlægspriser). Ved teknologiudvikling af en bestemt anlægsty-

pe vil den specifikke pris falde for nye anlæg sammenlignet med ældre anlæg på samme størrelse. Den specifikke pris skal opfattes som retningssigende, idet der er variation i, hvor meget anlægsomkostningerne omfatter i tabel 7. Ved sammenligning med andre typer kraftvarmeværker bør det oplyses, at i tabel 7 er nettoeffekten brugt ved beregning af den specifikke pris og ikke bruttoeffekten. Bruttototal inkluderer eget forbrug på værket. Anlæggenes status som forsøgs- og demonstrationsanlæg er også medvirkende til forøgede anlægsomkostninger, hvilket er med til at gøre prisbilledet uklart.

Halmens volumetriske brændværdi er en faktor 10-15 gange lavere end kuls, og samtidig med at halm er fysisk vanskeligere at håndtere, bidrager især omkostninger til lager, håndtering og fyringssystemerne til værkernes høje specifikke anlægspriser. Med en halmpris på ca. 45 øre pr. kg eller ca. 11 øre pr. kWh er halmen tre gange dyrere end kul, når kul bruges til elproduktion, se figur 1, kapitel 1.

### Halm på kraftværker

Det danske folketing pålagde i 1993 de danske elværker at bruge 1,2 mio. tons halm (senere er det beslut-

tet, at 0,2 mio. tons kan erstattes af træ- eller pileflis) og 0,2 mio. tons træflis, som brændsel på de centrale kraftværker senest i 2000, som et led i den energipolitiske målsætning for CO<sub>2</sub>-reduktion.

Elsammenslutningerne ELSAM og ELKRAFT iværksatte på denne baggrund en lang række aktiviteter for at belyse problemer ved fyring af meget store mængder halm på kraftværker. Væsentlige spørgsmål i den sammenhæng var bl.a.:

- Højtemperaturkorrosion af overhedere ved høje damptemperaturer
- Industriel anvendelse af blandingsaske ved samfyring af halm og kul
- Røggasrensning ved kombinationsfyring af halm og kul
- Ressourceopgørelser og halmforsyningsikkerhed
- Omkostninger

Der arbejdes med flere overordnede løsningskoncepter:

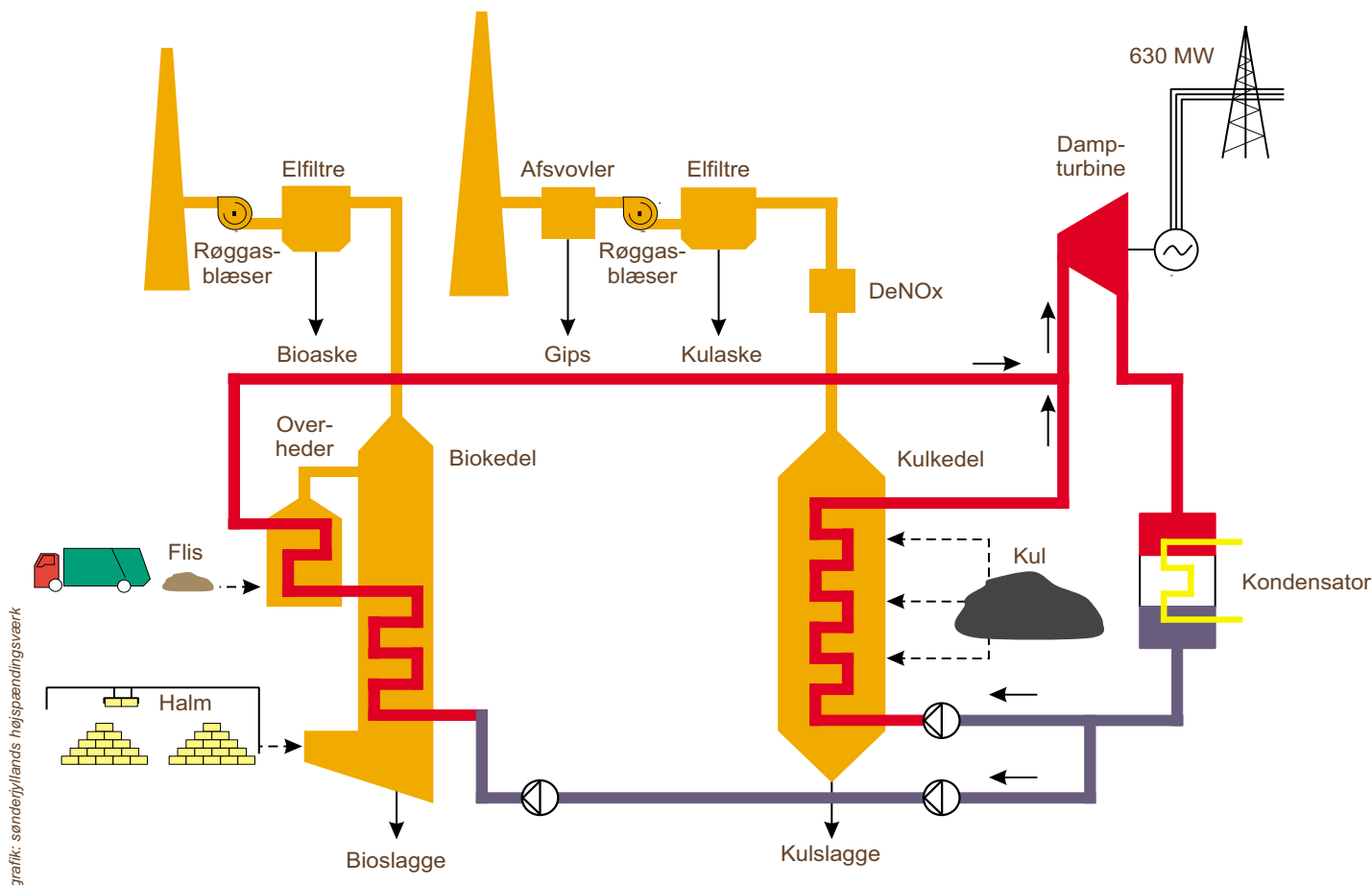
1. Separat fyring: Halmen fyres i en separat biomassekedel, der leverer damp til den kulfyrede kedels dampkredsløb.
2. Kombinationsfyring: Halm og kul fyres sammen i kraftværkskedlen.
3. Forkoblet forgasser. Halm forgasses, og gassen afbrændes i en kedel, der kan være bygget til kombineret halmgas og kulstøvsfyring. Dette koncept er endnu på udviklingsstadiet.

Ved separat fyring undgås problemer med højtemperaturkorrosion, fordi damptemperaturen i biomassekedlen holdes under et kritisk niveau. Industriel anvendelse af aske fra kulkedlen er ikke et problem, fordi de to kedlers asker ikke blandes. Ulempen ved separat fyring er først og fremmest høje anlægsomkostninger. Ved kombinationsfyring skal der findes løsninger på problemerne med højtemperaturkorrosion og den industrielle anvendelse af blandingsaskerne. På kraftværker, der er udstyret med afsvovnings- og kvælstofreduktionsanlæg (deNO<sub>x</sub>-anlæg), giver halmaskeens indhold af alkalimetallerne (kalium og natrium) og klor anledning til driftsproblemer. En væsentlig fordel



foto: sønderjyllands højspændingsværk

3 af 4 halmlinier på Enstedværket. Storballerne hentes via et transportbånd på halmlageret og fordeles til de 4 linier via en tværgående vogn.



Figur 22: Principdiagram af Enstedværkets biokedel på 40 MW<sub>el</sub> og kulkedel på 630 MW<sub>el</sub>. Biokedlen erstatter brugen af 80.000 tons kul/år og dermed reduceres CO<sub>2</sub>-udslippet til atmosfæren med 192.000 tons/år.

ved kombinationsfyring er lave anlægsomkostninger.

Interessen for en forkoblet for-gasser skyldes dels lave anlægsomkostninger samt muligheden for lavt indhold af alkali og klor i gassen. I ELSAM-regi er der foreløbigt etableret halmfyring på et kraftværk. Sønderjyllands Højspændingsværk har i efteråret 1997 på Enstedværket idriftsat af en separat biomassekedel, der kører parallelt med Enstedværkets kulstøvfyrede blok 3. På Studstrupværket har Midtkraft fra 1995 kørt forsøg med kombinationsfyring af halm og kulstøv på en 150 MW<sub>el</sub> stor kraftværkskedel.

På Sjælland har ELKRAFT planlagt at fyre med halm på Avedøreværket i en separat biomassekedel.

### Enstedværket

Biomassekedlen på Enstedværket er sammensat af to kedler, en halmfyret, der producerer damp ved 470°C, og en flisfyret kedel, der overheder dampen fra halmkedlen til 542 °C.

Den overhedede damp føres til Enstedværkets kulfyrede blok 3's højtryksdampsystem (210 bar). Med et årligt estimeret forbrug på 120.000 tons halm og 30.000 tons flis, svarende til en indfyret effekt på 95,2 MJ/s, yder biomassekedlen 88 MW termisk heraf 39,7 MW<sub>el</sub> (ca. 6,6% af blok 3's totale elproduktion). Biomassekedlen er altså væsentligt større end de største af de decentrale biomassefyrede kraftvarmeanlæg. Netto-elvirkningsgrad er 40%. Årsvirkningsgraden forventes at være lidt lavere p.g.a. samkørslen med blok 3 samt p.g.a. varierende lastforhold. Biomassekedlen er planlagt at skulle køre 6.000 fuldlasttimer om året. Med en lagerkapacitet på kun 1.008 baller, svarende til ca. 1 døgn forbrug, vil der som gennemsnit skulle leveres 914 storballer pr. døgn, svarende til 4 vognlæs i timen i 9,5 timer pr. døgn.

Halmkedlen er udstyret med 4 halm-linier. Anlægget kan dog køre 100% last på kun 3 linier. Hver halm-

linie består af en brandsluse, kæde-transportører, halmpriver, brandspjæld og en indfyringskanal. Halmpriveren er som på Masnedøværket, udformet som to sammenkoblede, koniske lodrette snegle, som halmballen presses frem imod. Fra halmpriveren doseres den revne halm via brandspjæld ned i stokersneglen, der presser halmen som en prop gennem indfyringskanalen og ind på risten. Flis kedlen er forsynet med to trykluftdrevne spjæld, der indkaster flisen på en rist. Dosering af flisen foregår med et snegledoseringsapparat fra en mellemsilo.

Røggassen renses i elektrofiltre. For at kunne anvende bundasken og slaggen fra biomassekedlen til gødning, holdes flyveasken fra filtrene (der indeholder hovedparten af tungmetallerne i asken) separeret fra bundasken.

De totale anlægsomkostninger for biomasseanlægget på Enstedværket er ca. 400 mio. kr. (1995-priser). Prisen dækker kedel, brænd-



selslager og dampledning til blok 3's turbine. Der er genanvendt kedelbygning og elektrofilter. Projektet blev besluttet i januar 1995, og kommerciel drift blev igangsat primo 1998.

### Studstrupværket

Før det blev besluttet at etablere kombinationsfyring af halm og kul på Studstrupværket, gennemførte Midt-kraft i perioden 1992-1994 forsøg på to ældre kraftværksblokke, en kulstøvs fyret på 125 MW<sub>el</sub> og et ristefyret stokeranlæg på 70 MW<sub>el</sub>. Formålet med forsøgene var at undersøge de kendte problematiske spørgsmål i forbindelse med halmfyring på kraftværker, herunder:

- Håndtering og indfyring af halm i en kraftværkskedel, der samtidig fyres med kul
- Konsekvenser for kedelydelsen og røggasemissionerne
- Korrosion af overhederne og slaggeproblemer
- Blandingsaskeproblematikken
- Halmens indflydelse på røggasrensningssystemerne

Resultaterne af forsøgene førte til, at der i 1996/97 gennemførtes et 2 årigt demonstrationsprojekt med kombineret halm/kulfyring på Studstrupværkets 150 MW<sub>el</sub> kulstøvfyrede kraftværksblok (blok 1).

Studstrupanlægget er dimensioneret til en maksimal halmandel på 20% af den samlede indfyrede energi. Der er etableret halm-lager med plads til 1.100 storballer samt i alt fire halm-linier, der hver består af en halm-opriver og en hammermølle, der knu-



foto: sønderjyllands højspændingsværk

*Aflæsning af halm fra lastbil på Enstedværket. Kranen løfter 12 baller ad gangen. Samtidig vejes ballerne og vandindholdet måles via mikrobølgeudstyr monteret i gribeklørerne.*

ser de oprevne halmstrå. Halmen blæses sammen med kulstøvet i fire kombinationsbrændere ind i fyrrummet.

Kedlen er udlagt til en ydelse på 500 tons damp pr. time ved et damptryk på 143 bar og en overhedertemperatur på 540 °C. Anlægsomkostninger forbundet med etablering af lager, håndtering og indfyringssystemer beløber sig til ca. 90 mio. kr.

### Avedøreværket

I forbindelse med opførelse af en ny kraftværksblok (blok 2) på Avedøreværket vil der blive etableret et biomasseanlæg med en kapacitet på 150.000 tons biomasse pr. år, hvoraf

hovedparten vil være halm. Med udgangspunkt i erfaringer fra Masnedø-anlægget er der planlagt en separat halm/flis kedel, der kan producere damp ved 300 bar og 580 °C. Dampen føres til hovedkedlens damp-turbinesystem. Hvis den høje damp-temperatur ikke kan opnås uden for store korrosionsproblemer, vil der blive etableret mulighed for, at en del af overhedningen foregår i en naturgasfyret overheder. Med det planlagte anlægskoncept og den høje damp-temperatur forventes en elvirkningsgrad på biomassedelen på 43%. Anlægget er planlagt til idriftsættelse ultimo 2001.