

100 kW_t SOLCELLSKRAFTVERK

Förstudie

Energisystem
Utveckling & Miljö

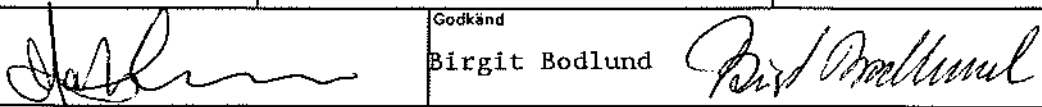
FUD

FORSKNING · UTVECKLING · DEMONSTRATION

Vattenfall

100 kW_t SOLCELLSKRAFTVERK

Förstudie

Från UL	Löpnummer U (S) 1989/39	Datum 1989-10-24	Kl-nr
Författare Mats Andersson		Teknikområde Energisystem	
Rapporter kan lånas från	Rapporter kan rekvireras från Vattenfall Älvkarlebylaboratoriet Dokumentationscentralen 810 71 ÄLVKARLEBY Tel: 026-881 00	Projektnummer 98353	
Vid/Utfärdare Mats Larsson	Godkänd Birgit Bodlund		
Sökord Solceller, elproduktion, solenergi	Antal textblad 30	Antal bilagsblad	
<input checked="" type="checkbox"/> Only summary in English <input type="checkbox"/> Whole report in English <input type="checkbox"/> It exists a brochure in Swedish/English <input type="checkbox"/> Other			

Rubrik

100 kW_t SOLCELLSKRAFTVERK
FÖRSTUDIE.

Sammanfattning

Denna förstudie beskriver ett 100 kW markplacerat solcellskraftverk där den av solcellerna producerade energin avses att växelriktas och transformeras upp till 20 kV för att sedan matas ut på Vattenfalls lokala distributionsnät. Någon bestämd lokalisering av anläggningen diskuteras ej men vid beräkningar av den förväntade energiproduktionen har instrålningsdata från Älvkarleby använts.

Rapporten behandlar de ingående delsystemen samt uppskattar kostnader och prestanda för den tänkta anläggningen. Då det finns ett flertal olika lösningar på de problem som måste behandlas vid en projektering har olika förslag på utförande medtagits liksom funderingar och argumentation runt frågeställningarna.

Under projektarbetet har några europeiska anläggningar liksom företag och institutioner verksamma inom solcellsområdet besökts. De erfarenheter och kontakter som därigenom har kunnat tillvaratas kommer att vara värdefulla vid en eventuell framtida projektering. Det mest betydande europeiska arbetet inom området utförs i Västtyskland där flera stora solcellsanläggningar redan är i drift eller under uppförande.

Den anläggning som föreslås har en maxeffekt på 106 kW (vid instrålningen 1000 W/m²) och celltemperaturen 25°C och den årliga energiproduktionen beräknas bli 91 MWh.

Kostnaden uppskattas till 5.2 milj Skr (1989) varav 2.8 miljoner hänför sig till solcellsmodulerna och resten till mer konventionell kringutrustning som stativ, montage, kablar, växelriktare och kontrollsystem.

Markbehovet uppskattas till 4400 m².

From UL	Serial number U (S) 1989/39	Date 1989-10-24	Cl. No.
Author Mats Andersson		Main area/Program area/Project area Energy Systems	
Reports can be borrowed from	Can be obtained from Vattenfall Älvkarlebylaboratoriet Dokumentationscentralen 810 71 ÄLVKARLEBY Tel: 026-881 00	Project No. 98353	
Vid/Attested	Approved Birgit Bodlund		
Search term Solar cells, electricity production, solar energy	No. of pages of text 30	No. of pages of appendix	
<input checked="" type="checkbox"/> Only summary in English	<input type="checkbox"/> Whole report in English	<input type="checkbox"/> There exists a brochure in Swedish/English	<input type="checkbox"/> Other

Title

100 kW_p solar cell power plant
Study.
Summary

In this study a 100 kW_p grid-connected solar power plant is described. The solar power plant is connected to the utility grid at the 20 kV level.

The climatic conditions assumed come from data gathered at Älvkarleby Laboratory. They are representative for the middle part of Sweden.

A detailed description of the components of the plant is given. Different designs are discussed and an estimation of costs and energy production is presented.

Visits to some recently built European photovoltaic plants have been part of the study. They are briefly described and useful contacts persons are identified.

The proposed plant has a maximal capacity of 106 kW (at standard test conditions (STC) i.e. an irradiance level of 1000 W/m² and a cell temperature of 25°C) and the yearly energy production is calculated to 91 MWh.

The total cost is estimated to 5.2 million SEK of which the solar cell modules stand for 2.8 million and the remaining 2.4 million cover more conventional equipment like support structures, cabling, inverter, control system and labour costs for installation.

The space needed for the plant is approximately 4400 m².

100 kW, SOLCELLSKRAFTVERK

FÖRSTUDIE

Mats Andersson
Institutet för Mikroelektronik
Box 1084
164 21 KISTA

Innehållsförteckning

1 ENGLISH SUMMARY	1
2 INLEDNING	2
3 ETT 100 kW, SOLCELLSKRAFTVERK	4
3.1 Anläggningsplats	4
3.2 Stativ och fundament	4
3.3 Solcellsgenerator	6
3.3.1 Modul	7
3.3.2 Panel	8
3.3.3 Block	11
3.3.4 Generator	12
3.4 DC kablage	14
3.4.1 Överföringskablar	14
3.4.2 Säkring och jordning	15
3.5 Växelriktare	16
3.6 AC kablage	18
3.6.1 Transformator	18
3.7 Manöverbyggnad	18
3.8 Kontrollsystem	18
3.9 Sammanställning över anläggningen	20
4 KOSTNADER	21
4.1 Solcellsmoduler	21
4.2 Växelriktare	21
4.3 Stativ och fundament	21
4.4 Kablage	22
4.4.1 DC kablage	22
4.4.2 AC kablage	22
4.5 Kontrollsystem	22
4.6 Övrigt	22
4.7 Sammanställning över kostnaderna	22
5 UPPHANDLING	23
5.1 Moduler	23
5.2 Växelriktare	23
6 ENERGIPRODUKTION	24
7 INTÄKTER	25
8 BESÖK VID EUROPEISKA SOLCELLSANLÄGGNINGAR	27
8.1 Loser 30 kW, i österrikiska alperna	27
8.2 Kobern-Gondorf 340 kW, i Västtyskland	28
9 REFERENSER	30

2 INLEDNING

Idag finns det i Sverige tre större solcellsanläggningar i drift, nämligen anläggningarna i Huvudsta - 2.1 kW, Älvkarleby - 1.2 kW, och Bullerö - 0.8 kW. Anläggningarna i Huvudsta och Älvkarleby är nätanslutna dvs de levererar AC-energi till elnätet via en växelriktare medan Bullerö-anläggningen är en sk "stand-alone" anläggning med energilagring i batterier. Dessa två anläggningstyper kan anses representativa för de två huvudklasserna av solcellssystem i storleksområdet från cirka 100 W, för strömförsörjning av fritidshus, båtar och husvagnar och uppåt till 5-10 kW, för strömförsörjning av bostadshus.

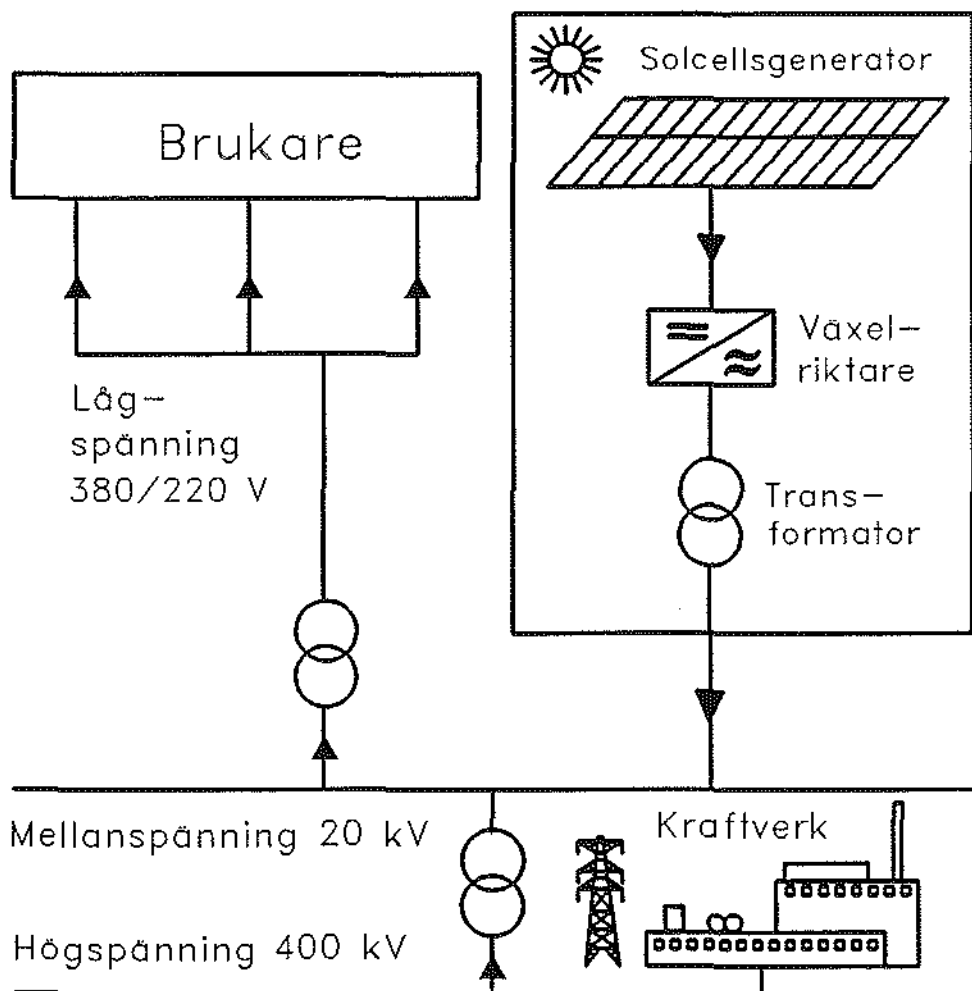
Nästa intressanta anläggningstyp är solcellskraftverket som även det överför den producerade energin till elnätet men som skiljer sig från den tidigare nämnda nätanslutna anläggningstypen framför allt när det gäller storlek och placering. Den naturligaste placeringen är på marken och storleken från några tiotal kW, och uppåt. Världens hittills största anläggning av den typen finns i USA och har toppeffekten 6 MW. Flera europeiska länder med aktiviteter inom solcellsområdet har idag anläggningar i drift med storleken 30-340 kW. Finland kommer under våren och sommaren 1989 att genomföra byggandet av ett solcellskraftverk med topp-effekten 30 kW. Figur 2.1 visar ett solkraftverks plats i det allmänna elnätet.

För att idag motivera ett uppförande av ett solcellskraftverk i Sverige är det nödvändigt att göra vissa antaganden när det gäller framtida insatser inom solcellsområdet. Ett sådant antagande är t ex att kostnadsreduktionen för solcellsmoduler följer de kurvor som presenterats av Carlson [1] med flera, vilket medför att Sverige bygger en eller flera större (> 1MW) anläggningar i början på 2000-talet. Genom att redan nu projektera och bygga ett mindre kraftverk kan följande fördelar erhållas:

Vattenfall såsom en stor kraftproducent blir förtrogen med solcellstekniken som en av flera möjliga framtida elproduktionsmetoder och erhåller ett bra underlag för framtida beslut.

Projektering, uppförande och drift av ett solcellskraftverk ger kompetensuppbyggnad inom flera områden genom att personer inom kraftindustrin får möjlighet att sätta sig in i de speciella frågor som rör solcellstekniken. Exempel på sådana frågor är hur elnormer och bestämmelser ska tillämpas på solcellsinstallationer samt byggnadstekniska frågor rörande montage av solcellsmoduler etc.

Stora solcellskraftverk byggs i block om mindre enheter där 100 kW utgör en realistisk storlek på ett sådant block. Det innebär att de erfarenheter som erhålls från projektering, uppförande och drift av ett solkraftverk med storleken 100 kW, mycket väl kan användas vid en eventuell framtida uppskalning till kraftverk i storleken flera MW.



Figur 2.1 Solcellskraftverkets plats i elnätet

3 ETT 100 kW, SOLCELLSKRAFTVERK

Ett solcellskraftverk består av följande delar: (1) anläggningsplats (mark för modulfältet, vägar, dränering etc), (2) stativ och fundament för montage av solcellsmoduler, (3) solcellsmoduler, (4) DC kablage, (5) växelriktare, (6) AC kablage och (7) kontrollsystem.

3.1 Anläggningsplats

De faktorer som påverkas av anläggningsplatsen och som har inverkan på anläggningens design, kostnad och prestanda är i första hand instrålningsförhållanden, markens beskaffenhet och närhet till lämplig utmatningspunkt på elnätet. Då någon bestämd anläggningsplats inte har diskuterats kan här enbart allmänna rekommendationer ges:

Närhet till elnätet - för att undvika långa ledningsdragningar för utmatning av den producerade AC-energin är det viktigt att anläggningsplatsen ligger i nära anslutning till elnätet (20 kV).

Goda instrålningsförhållanden - vid val av anläggningsplats ska eventuell skuggning från träd, byggnader mm undersökas.

Tillgänglighet - bra transportmöjligheter medför en lägre anläggningskostnad då annars även kostnader för vägar tillkommer.

Lättpreparerad mark - montage av solcellsmoduler står för en stor del av totalkostnaden vilket innebär att det är en stor fördel om montagearbetet kan utföras direkt på anläggningsplatsen utan förberedande markpreparering.

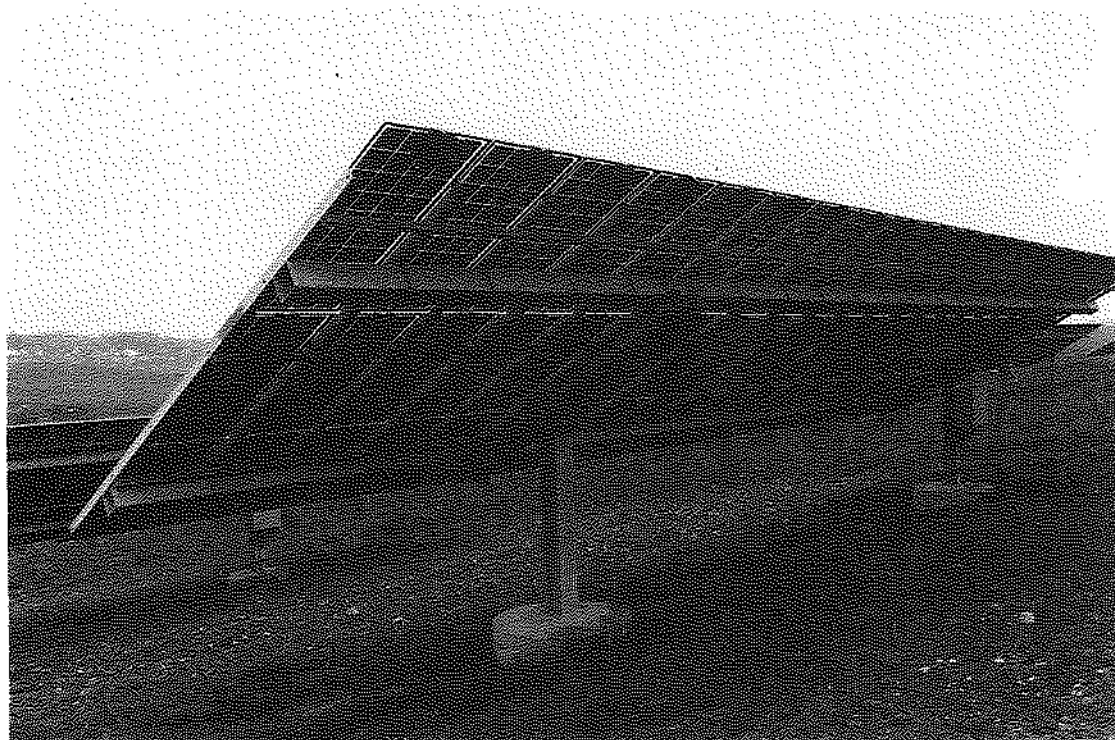
Övrigt som även ingår i anläggningsplatsen är diken, stängsel och eventuella byggnader för förvaring av reservdelar mm.

3.2 Stativ och fundament

Stativ och fundament för montering av solcellsmodulerna tillsammans med själva solcellsmodulerna och växelriktaren svarar för anläggningens huvudsakliga kostnader. Kostnaderna för moduler och växelriktare kan minimeras genom att man granskar den befintliga marknaden för produkterna och därefter väljer den billigaste lösningen. När det gäller monteringen av modulerna finns det däremot möjligheter att genom lokala lösningar genomföra betydande kostnadsreduktioner.

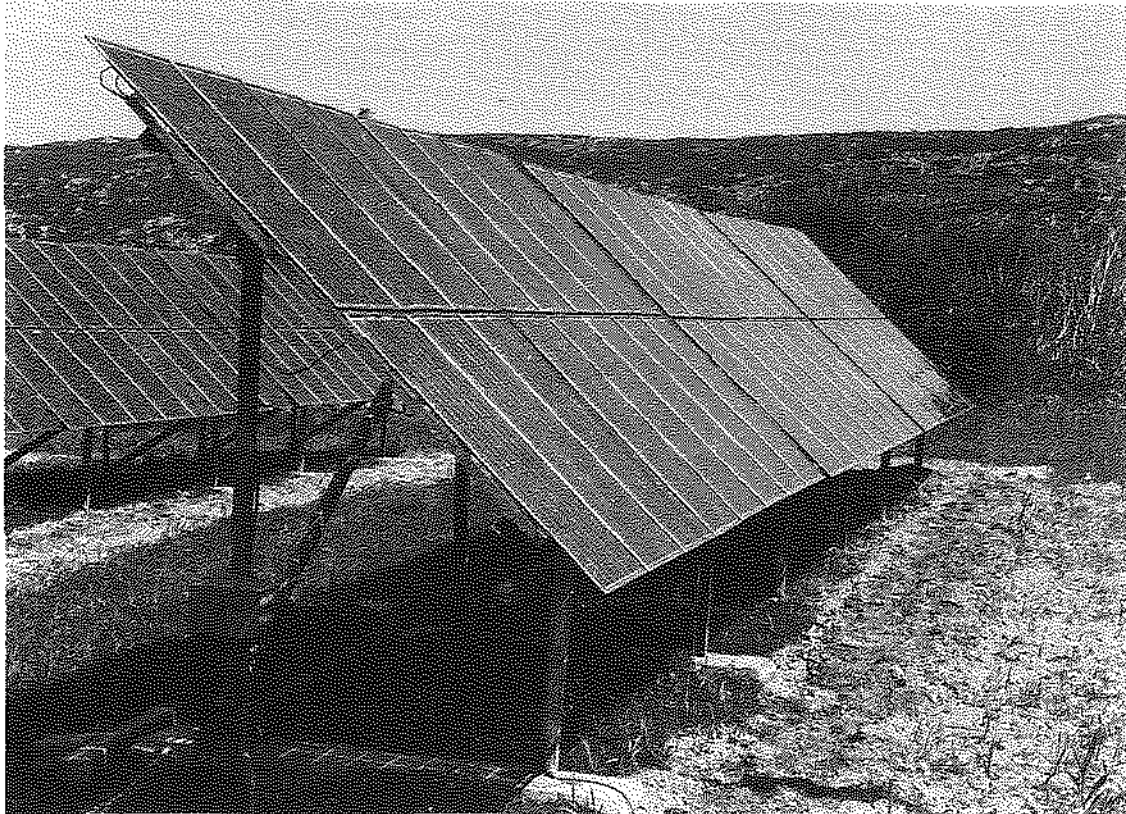
När man granskar befintliga anläggningar runt om i världen visar det sig att en mängd olika material och montagemetoder har använts. Trä och rostfritt stål förekommer men vanligast är galvaniserade stålprofiler. Fundamenten utgörs vanligtvis av betongelement som kan vara prefabricerade eller också gjuts på platsen.

Erfarenheter från EGs pilotanläggningar visar på kostnadsvariationer för stativ och fundament på mellan 250 till 700 kr/m² modulyta. Figuren 3.1 visar en lösning som använts i en tysk anläggning med toppeffekten 340 kW som togs i drift under 1988.



Figur 3.1 Kobern-Gondorf 340 kW, solcellskraftverk

Den stativlösning som föreslås i förstudien är baserad på det standardstativ som ingår i AEGs sortiment och som har modifierats för att passa till ARCO-modulerna. SIAB har gjort en kostnadsuppskattning och kommit fram till ett ungefärligt pris på 13 kkr för ett stativ och fundament som klarar 30 moduler. I kostnaden ingår då montage av moduler samt viss markpreparering. Lösning är relativt dyr men utgör en bra utgångspunkt för vidare arbete med kostnadsoptimeringar. Figur 3.2 visar AEGs stativ och bilden är tagen på den Västtyska ön Fehmarn i Östersjön där en anläggning med toppeffekten 140 kW är under uppförande.



Figur 3.2 Fehmarn 140 kW,

3.3 Solcellsgenerator

Det som i huvudsak bestämmer utförandet av modulfältet är systemspänningen dvs den DC-spänning som växelriktaren omvandlar till växelspanning. För att minimera de resistiva förlusterna i systemet (framför allt i kablar) är det önskvärt att arbeta med så höga spänningar som möjligt. Verkningsgraden vid omvandling från DC till AC ökar också med ökande DC-spänning. Det som utgör en övre begränsning är dels den maximala isolationsspänningen på de aktuella modulerna samt data för de på marknaden befintliga och lämpliga växelriktarna. Den i beskrivningen rekommenderade växelriktaren har arbetsspänningen 450-600 VDC med maximala spänningen (=solcellsgeneratorns tomgångsspänning) angiven till 750 VDC. De krav som ställs på moduler för att uppfylla test-procedurena upprättade av JPL och JRC, Ispra innebär att modulerna skall klara en spänning mellan de kortslutna polerna på modulen och dess ram motsvarande $2 \times$ systemspänning + 1000 VDC med en läckström $< 50 \mu\text{A}$. Detta krav är uppfyllt för en spänning på 3000 VDC för den i beskrivningen aktuella modulen.

Då en solcellsmoduls spänning varierar med celltemperaturen (cirka $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$) är det också nödvändigt att kontrollera att systemspänningen håller sig inom växelriktarens

spänningsfönster vid de under drift realistiska celltemperaturerna. Förutom vid de standardiserade testförhållandena (STC dvs instrålningen 1000 W/m^2 och celltemperaturen 25°C) anges därför spänningarna vid två ytterligare celltemperaturer nämligen 0 och 55°C . Vid beräkning av toppeffektens temperaturberoende har värdet $-0.42\%/^\circ\text{C}$ använts.

Enligt starkströmsföreskrifterna gäller hårdare bestämmelser för anläggningar med en systemspänning överstigande 1000 V vilket ytterligare motiverar att solcellskraftverkets systemspänning anges till max 750 V .

En viktig fråga i det här sammanhanget är säkerheten vid montage av modulfältet samt under drift av anläggningen. En möjlig lösning för att nedbringa risken med höga spänningar är att jorda mittpunkten på solcellsgeneratoren. På så sätt halveras spänningen ute i fältet samtidigt som växelriktaren fortfarande kan matas med full spänning.

3.3.1 Modul

Det finns idag i huvudsak tre olika modultyper på marknaden nämligen moduler där cellerna är tillverkade av mono- eller polykristallint kisel samt tunnfilmsmoduler där man använder sig av amorft kisel (a-Si) som aktivt material. Typiska värden på modulverkningsgraden för de tre olika typerna är $n_{\text{mono}}=12$, $n_{\text{poly}}=10$ och $n_{\text{a-Si}}=5\%$. I den här studien har enbart moduler med kristallina celler ansetts vara aktuella då de amorfa modulerna ännu inte kan garanteras tillräckligt lång livslängd och stabilitet. De amorfa modulernas låga verkningsgrad medför dessutom att kostnaderna för modulmontaget skulle öka avsevärt då en totalt dubbelt så stor aktiv cellyta krävs. En amorf modul finns dock med i sammanställningen nedan då priset kan vara intressant som en jämförelse.

Ett antal återförsäljare av moduler har kontaktats och de ungefärliga priser som gäller vid köp av 100 kW topp effekt är summerade i tabell 3.1.

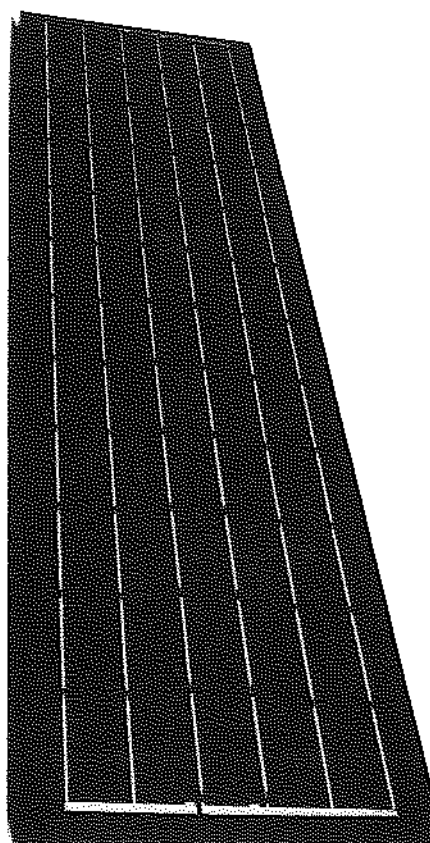
ARCO Solar G408	(amorft kisel)	3.90 USD/W _p
ARCO Solar M55	(monokisel)	4.20
KYOCERA LA441J59	(polykisel)	4.50
SOLAREX MSX-60	(polykisel)	4.35
SOLEC S-5233	(monokisel)	4.50

Tabell 3.1 Priser på moduler (våren 1989)

Det lägsta priset erhöles visserligen för den amorfa modulen men på grund av tidigare nämnda skäl har den uteslutits och ARCO-modulen M55 (figur 3.3) har valts för det fortsatta dimensioneringsarbetet. De viktigaste data för den aktuella modulen är summerade i tabell 3.2.

MODULDATA	STC	Tcell=0°C	Tcell=55°C
Fabrikat: ARCO SOLAR Typ: M55			
Toppeffekt	55.0 W	60.8 W	48.1 W
U_t	17.4 V	19.6 V	14.8 V
I_t	3.2 A		
U_{oc}	21.7 V	24.4 V	18.4 V
I_{sc}	3.5 A		
Mått: 1.29x0.33 m Vikt: 5.7 kg			

Tabell 3.2 Data för ARCO-modulen M55



Figur 3.3 ARCO modul typ M55

3.3.2 Panel

(Figur 3.4 a,b samt tabell 3.3)

Med panel avses här det antal seriekopplade moduler som behövs för att erhålla den önskade systemspänningen. Systemspänningen har valts till 522 VDC vilket motsvarar

30 seriekopplade moduler. Därigenom kommer spänningsvariationerna att hålla sig inom de 450-600 V som gäller för den aktuella växelriktaren samtidigt som tomgångsspänningen inte överstiger 750 V som anges som maximal spänning.

Modulerna som är försedda med separata kopplingsdosor för + och - polerna seriekopplas med enkelledare med arean 2.5 mm^2 . Varje kopplingsdosa är försedd med en diod parallellt över halva cellantalet vilket medför att några ytterligare shuntioder inte behövs i anläggningen. Anledningen till att två dioder per modul behövs är att 20 celler är det maximala antalet som kan tillåtas få avge sin effekt i en cell vid en eventuell skuggning för att undvika sk "hot-spots".

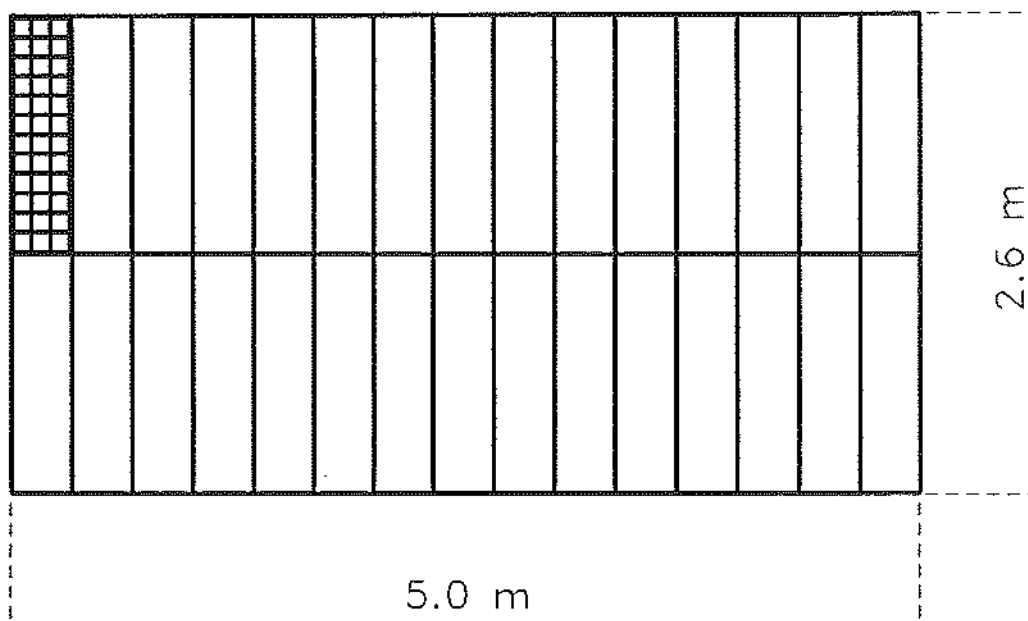
De 30 modulerna monteras i två rader på ett för varje panel separat stativ.

För att farlig spänning i utsatta delar ska kunna förebyggas är det viktigt att modulernas metallramar liksom stativ mm är skyddsjordat. Ramarna förenas metalliskt med en jordledare mellan varje modul och förbinds på ett antal ställen inom panelen med metallstativet. Varje panel är dessutom förenad med ett jordtag via en blank jordledare.

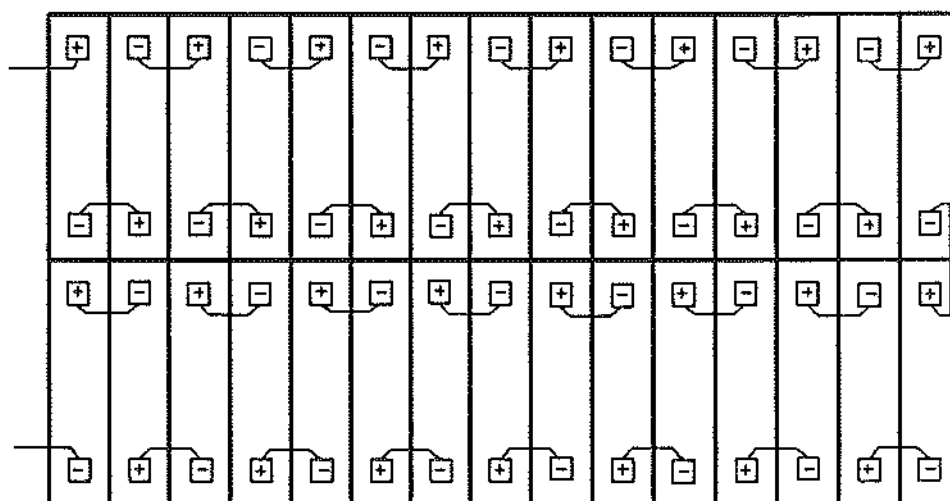
Den av de 30 seriekopplade modulerna som ger den lägsta strömmen kommer att bestämma strömmen ut från panelen. Det innebär att det är bra om modulerna inom varje panel är matchade med avseende på kortslutningsströmmen. Mer om detta i avsnittet som berör upphandling av anläggningen.

PANELDATA	STC	T _{cell} =0°C	T _{cell} =55°C
Antal moduler i serie	30 st		
Toppeffekt	1.7 kW	1.8 kW	1.4 kW
U _t	522.0 V	587.3 V	443.7 V
I _t	3.2 A		
U _{oc}	651.0 V	732.4 V	553.4 V
I _{sc}	3.5 A		
Mått: 5.0x2.6 m			

Tabell 3.3 Data för panelen



Figur 3.4a Panel bestående av 30 st seriekopplade moduler



Figur 3.4b Panel sedd från baksidan

Kommentar: En nackdel med att seriekoppla samtliga 30 moduler på varje stativ är att vid en skuggning av moduler i nedre raden kommer hela panelen (de 30 modulerna) sluta leverera energi. Därför är det lämpligt att för de bakre panelraderna i fältet, koppla de 15 övre modulerna per panel i serie med de övre modulerna på stativet intill. På samma sätt görs för de nedre modulerna.

3.3.3 Block

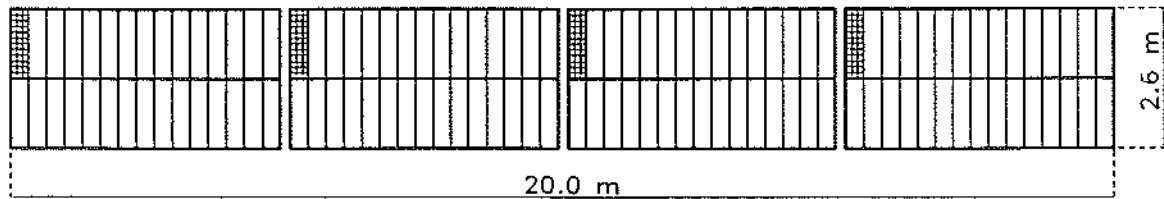
(Figur 3.5 och 3.6 samt tabell 3.4)

Genom att parallellkoppla fyra paneler erhålles ett block som kommer att utgöra en rad i den kompletta solcellsgeneratoren. Från varje panel dras en tvåledare med arean 2.5 mm^2 och ihopkopplingen utförs i en kopplingslåda som är placerad i ena änden av blocket. I kopplingslådan placeras blockeringsdioder som ansluts en i serie med varje panel. Dessa dioder förhindrar strömmar bakvägen genom en panel i händelse av att en kortslutning inträffar i någon modul eller i ledningsdragningen. Genom att blockeringsdioderna placeras inom blocket kan diodstorleken hållas nere i och med att den maximala strömmen från varje panel endast är cirka 3 A. I den för panelerna gemensamma anslutningspunkten är en ventilavledare ansluten både från + och - pol till jord. Dessa skyddar modulerna mot överspänningar och bör därför vara placerade ute i fältet, så nära modulerna som möjligt.

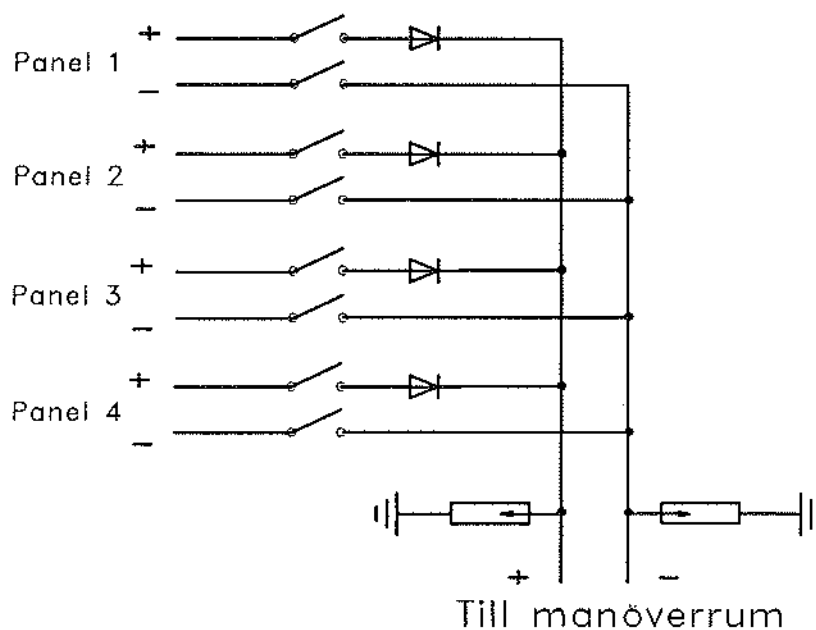
För att möjliggöra arbete inom blocket är varje panel försedd med en tvåpolig mekanisk elkopplare. På så sätt kan felsökning och modulbyte utföras under drift.

BLOCKDATA	STC	Tcell=0°C	Tcell=55°C
Antal paneler i parallell	4 st		
Antal moduler	120 st		
Toppeffekt	6.6 kW	7.3 kW	5.8 kW
U_t	522.0 V	587.3 V	443.7 V
I_t	12.7 A		
U_{oc}	651.0 V	732.4 V	553.4 V
I_{sc}	14.0 A		
Mått: 20.0x2.6 m			

Tabell 3.4 Data för blocket



Figur 3.5 Block bestående av 4 st parallellkopplade paneler



Figur 3.6 Principschema för kopplingslåda

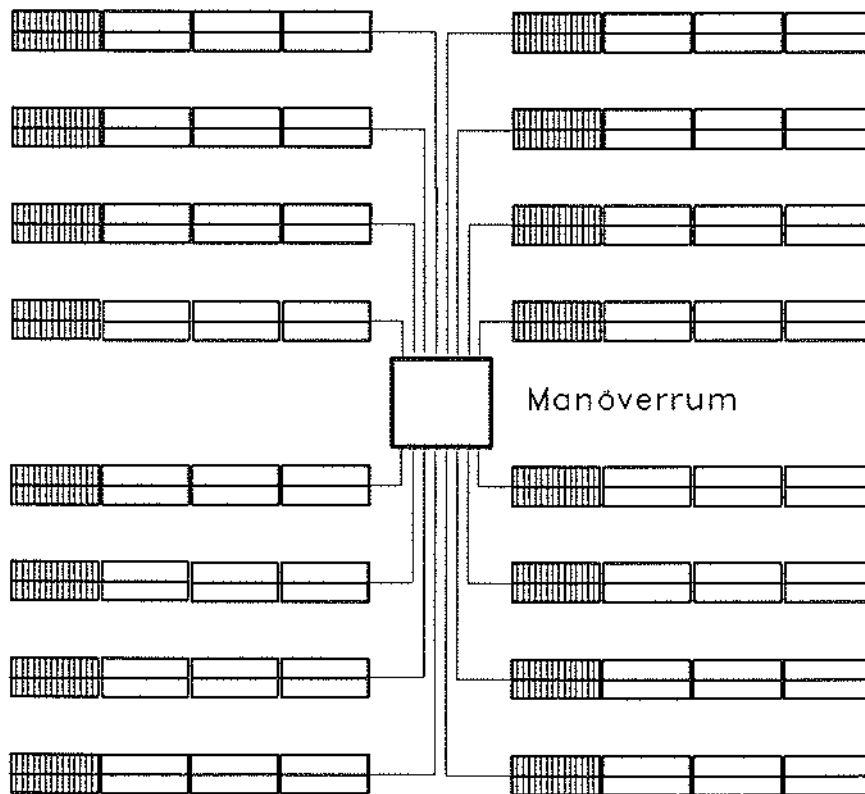
3.3.4 Generator

(Figur 3.7 och 3.8 samt tabell 3.5)

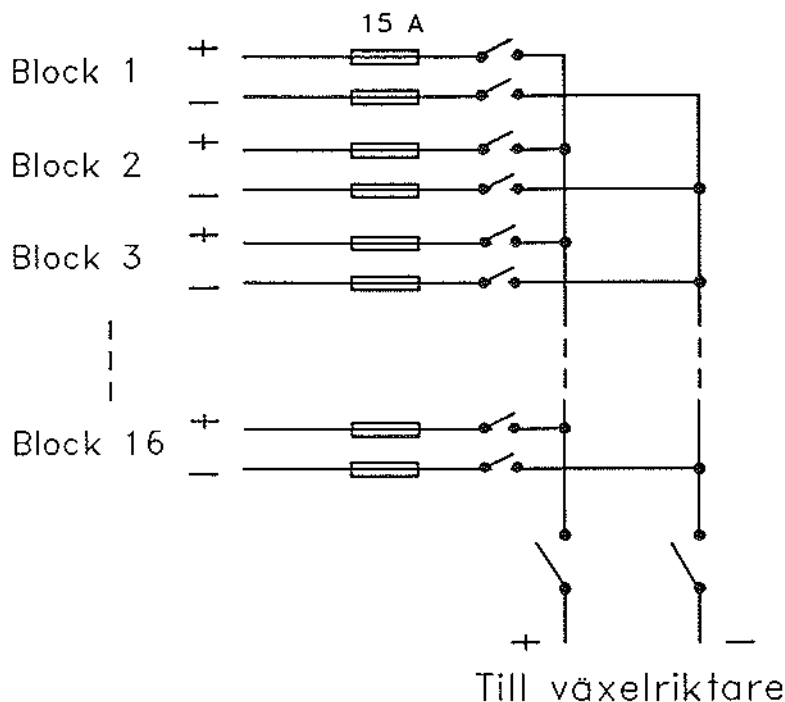
Den kompletta solcellsgeneratorm består av 16 st block som vart och ett är anslutet via en kabel (tvåledare 6 mm^2) till ett kopplingssskåp i manöverbyggnaden som är centralt placerad i modulfältet för att minimera ledningsdragningen. Varje block är tvåpoligt fränskiljbart och försett med en 15 A säkring i serie med både + och - pol. Hela generatorm är dessutom fränkopplingsbar via en elektronisk elkopplare från manöverrummet. För att förhindra oavsiktlig inkoppling av generatorm vid servicearbete i anläggningen ingår även en låsbar fränskiljare.

GENERATORDATA	STC	T _{cell} =0°C	T _{cell} =55°C
Antal block i parallell	16 st		
Antal moduler	1920 st		
Toppeffekt	105.6 kW	116.7 kW	92.3 kW
U _t	522.0 V	587.3 V	443.7 V
I _t	202.9 A		
U _{oc}	651.0 V	732.4 V	553.4 V
I _{sc}	224.0 A		
Mått: 55x80 m			

Tabell 3.5 Data för generatom



Figur 3.7 Generatom



Figur 3.8 Principschema för kopplingskåp i manöverrum

Lutningsvinkeln på panelerna har valts till 45 grader vilket förväntas ge det största utbytet under året. En annan viktig designfråga är vilket avstånd det ska vara mellan raderna i generatorm för att inte förlusterna på grund av skuggning ska bli för stora. I den här studien har den frågan inte analyserats närmare men tidigare beräkningar har visat att med ett radavstånd som är lika med dubbla radhöjden kommer energibortfallet per år, från en skuggad rad, att bli cirka 10%. En ökning av radavståndet ger därefter endast mindre tillskott. Med radhöjden 3.6 m bör därför avståndet väljas till cirka 8 m. För att helt undvika skuggning under vintermånaderna krävs radavstånd på över 20 m vilket antagligen är orealistiskt med tanke på det stora markbehov som det ger upphov till.

3.4 DC kablage

Förutom kablar för överföring av den producerade energin ingår även all kopplingsutrustning samt komponenter för åskskydd och jordning.

3.4.1 Överföringskablar

Vid val av kabelareor är det de resistiva förlusterna samt kabelkostnader som blir vägledande. I tabell 3.6 är resistansen som funktion av area angivna för enkelledare av koppar vid 20°C.

A(mm ²)	R(ohm/100m)
2.5	0.69
4.0	0.43
6.0	0.29
10.0	0.17
16.0	0.11
25.0	0.07

Tabell 3.6 Resistansen för 100 m kopparledare

Vid seriekoppling av moduler till paneler och vidare för bildande av block bör enkelledare med arean 2.5 mm² användas. Den totala kabellängden per block blir cirka 140 m och vid maximal effekt (strömmen 3.2 A) innebär det en total resistiv förlust på 160 W för de 16 blocken vilket motsvarar 0.16% av den totala effekten från modulerna.

Från vart och ett av de 16 blocken dras tvåledare med arean 6 mm² till manöverbyggnaden. Kablarna förlägges i ledningsränna eller kabelkanal i marken. Den totala kabellängden blir cirka 400 m vilket ger en förlust på 400 W (0.40%) vid den maximala strömmen 12.7 A.

Det innebär att den totala förlusten i kablar kommer att uppgå till cirka 0.6% av 100 kW. Sedan tillkommer även förluster i kopplingsplintar, elkopplare och säkringar.

3.4.2 Säkring och jordning

I ett solcellskraftverk uppstår speciella problem vad det beträffar skydd mot skadlig spänning och ström på grund av att solcellerna ej går att göra spänningslösa så länge de är belysta och att de upprätthåller en enbart av instrålningen begränsad ström vid kortslutning. Denna ström kan, vid en eventuell kortslutning i anläggningen, vara lägre än strömmen vid normal drift vilket medför att säkringar enbart kan användas för att bryta strömmar som uppkommer när en del i en generator oavsiktligt matas av övriga delar.

I denna anläggning har säkringar placerats i serie med varje block. Om en kortslutning uppkommer inom ett block (samtidigt som blockeringsdioden i den aktuella strömkretsen är trasig) eller i kabeln mellan block och kopplings-skåp i manöverbyggnaden, kommer övriga block i generatorm att bli kortslutna. Kortslutningsströmmen kan, vid hög instrålning, uppgå till ca 200 A vilket medför fara för brand i anläggningen. En sådan situation förhindras genom att säkringar ingår.

I anläggningen föreslås enbart en skyddsjordning av modulramar, stativ och övriga metalliska delar som normalt inte är strömförande. En sådan lösning förutsätter att anläggningen är inhängnad och att enbart kunnig personal med kunskap om systemet tillåts vistas i närheten av modulfältet. Konsekvensen blir då att ett enkelt jordfel dvs kortslutning mellan en av polerna på en modul och dess ram, inte omdelbart kan detekteras. Om ytterligare ett jordfel uppstår kommer strömmen från det aktuella blocket att sjunka då ett antal moduler blir förbikopplade genom kortslutningen. För att en sådan situationen ska kunna upptäckas föreslås att samtliga blockströmmar registreras. Genom att införa ett larm som aktiveras om strömmen från ett block avviker exempelvis med mer än 10% från de övriga kan ett dubbelt jordfel upptäckas och därmed åtgärdas. En metod som används i vissa anläggningar är impedansmätning mellan respektive generatorpol och jord. I normala fall ska impedansen vara lika men om ett jordfel inträffar uppstår en avvikelse som automatiskt kan registreras och aktivera ett larm. På så sätt kan redan ett enkelt jordfel upptäckas.

För de normalt spänningsförande delarna gäller att kopplingsdosor och dylikt ska vara av god kvalitet och att allt installationsarbete är korrekt utfört.

En alternativ lösning som också gör det möjligt att upptäcka ett enkelt jordfel erhålls om en gemensam jordning av en av generatorms poler införs. Jordningen utförs i anslutning till växelriktarens ingång via en anordning för indikering av jordfelsströmmar. Ett jordfel ute i anläggningen ger då en sluten strömkrets genom jord som får aktivera ett larm.

3.5 Växelriktare

Växelriktaren, som omvandlar den av solcellsmodulerna producerade likströmmen till växelström, utgör förutom solcellsmodulerna den centrala delen i anläggningen.

En växelriktare avsedd för att ingå i en solcellsanläggning skiljer sig inte på något betydande sätt gentemot traditionella växelriktare förutom när det gäller regleringen. I en solcellsanläggning måste växelriktaren kunna bedömma när det finns energi tillgänglig att omvandla och dessutom krävs, för att solcellsgeneratorm skall producera maximal energi, att likspänningen kan varieras genom att en maximal effektföljare ingår (MPPT). Den ser till att solcellerna hela tiden arbetar så nära sin maxpunkt som möjligt. Skulle strömmen från solcellerna vid något tillfälle överstiga växelriktarens maximala tillåtna värde regleras strömmen ned genom att effektföljaren flyttar arbetspunkten mot högre spänning.

Då den instrålade solenergin i Sverige har visat sig till stor del härröra från nivåer under 500 W/m^2 [2], är det viktigt att växelriktaren har hög verkningsgrad inte bara vid full effekt utan även vid delast. Det innebär även att det kan vara olämpligt att välja en växelriktare som klarar av de allra högsta effektnivåerna som anläggningen endast kommer att producera ett fåtal timmar per år.

Förutom hög verkningsgrad är den totala harmoniska distorsionen (THD) ett viktigt kvalitativt mått på en växelriktares prestanda. Harmonisk distorsion kan sägas utgöra ett mått på kvaliteten hos den av växelriktaren skapade vågformen. Höga värden orsakar uppvärmning av induktiva element och störningar på kommunikationssystem (telenät mm).

Det finns ett flertal företag runt om i världen som kan leverera växelriktare till solcellskraftverk. Antalet stora solcellsanläggningar som byggs är dock fortfarande litet och exempelvis AEG och Siemens säger sig inte vara så intresserade av att endast leverera växelriktaren till en anläggning. I Sverige finns idag ingen tillverkare som kan eller är intresserad av att leverera en växelriktare till en 100 kW-anläggning.

En förfrågan på växelriktare skickades i februari ut till sju företag i Europa och USA varvid tre inkom med prisuppgifter. Det är dock svårt att göra en jämförelse mellan fabriken då det inte framgår exakt vad som ingår i priset. Vid en eventuell projektering är det lämpligt att diskutera alternativen mer i detalj med tillverkarna. I tabell 3.7 har de tre företagens erbjudanden listats. Helionetics och Omnion Power har tillsammans levererat flertalet av växelriktarna till de amerikanska nätanslutna systemen. Tyvärr uppgav Omnion endast priser för enheter med effekten 10 kW och 1 MW och då prisskillnaden som synes är mycket stor vid de två effekterna är det svårt att uppskatta kostnaden för en växelriktare med effekten 100 kW.

I tabell 3.8 är data för en Helionetics växelriktare listade. De värden som är angivna för inspanning och verkningsgrad har använts vid design av modulfältet samt vid energiberäkningarna.

HELIONETICS,INC (USA)	0.95 USD/W	(100 kW)
OMNION POWER (USA)	0.45	(1 MW)
	2.00	(10 kW)
SUN POWER (Västtyskland)	1.80	(100 kW)

Tabell 3.7 Priser på växelriktare (våren 1989)

Fabrikat	Helionetics
Typ	Model 61663
Effekt	100 kW DC
Spänning in	450-600 VDC
Maximal spänning (U_{oc})	750 VDC
Spänning ut	380 VAC trefas
Frekvens	50 Hz
Effektfaktor	0.99-1.00
Distorsion	< 3% THD
Verkningsgrad	94% (50-100% last)

Tabell 3.8 Data för Helionetics växelriktare

3.6 AC kablage

För att den av solcellerna producerade energin skall kunna matas ut på elnätet krävs förutom en växelriktare även en del annan utrustning. För nätkommuterade växelriktare där omvandlingen är beroende av nätet och dess frekvens kan ett kondensatorbatteri vara nödvändigt för att kompensera för den reaktiva effekt som växelriktaren förbrukar. Självkommuterade växelriktare däremot kräver ingen sådan utrustning. För in- och urkoppling av systemet på nätet krävs även en del styr- och reglerutrustning.

3.6.1 Transformator

Den från växelriktaren avgivna energin har spänningen 380 V och ska därefter transformeras upp till 20 kV innan den kan matas ut på elnätet. Då den aktuella effekten är relativt liten ingår transformatorn som en del av växelriktaren.

3.7 Manöverbyggnad

Anläggningen är tänkt att fungera helt automatiskt dvs när solinstrålningen är tillräckligt hög kopplas växelriktaren in och energin matas ut på elnätet. Anläggningen kommer då i huvudsak att vara obemannad och därför krävs enbart en mindre manöverbyggnad som kan köpas som en färdig enhet med standardmått. Enheten kan levereras färdig med ställverksskåp och om så önskas även med valfri inredning för t ex personalutrymmen med WC, dusch och pentry.

3.8 Kontrollsystem

För övervakning av anläggningen behövs någon form av kontrollsystem. Ett sådant kan utföras på en mängd olika sätt från enbart en indikering av att anläggningen producerar energi, till avancerad driftövervakning med hjälp av ett datasystem som producerar drift- och larmrapporter. I denna förstudie har endast några viktigare delar medtagits.

I manöverrummet kan strömmen från samtliga de 16 blocken avläsas och växelriktaren är försedd med driftindikeringar och visarinstrument för ström, spänning och effekt (DC och AC). I övrigt ingår larmindikering vid avvikelser i någon av blockströmmarna vilket indikerar att ett dubbelt jordfel har uppstått eller att ett antal moduler är trasiga på annat sätt och därför inte avger någon effekt. Eftersom anläggningen är tänkt att operera obemannad krävs överföring av vissa viktigare larm till någon plats i närheten där driftpersonal finns tillgänglig.

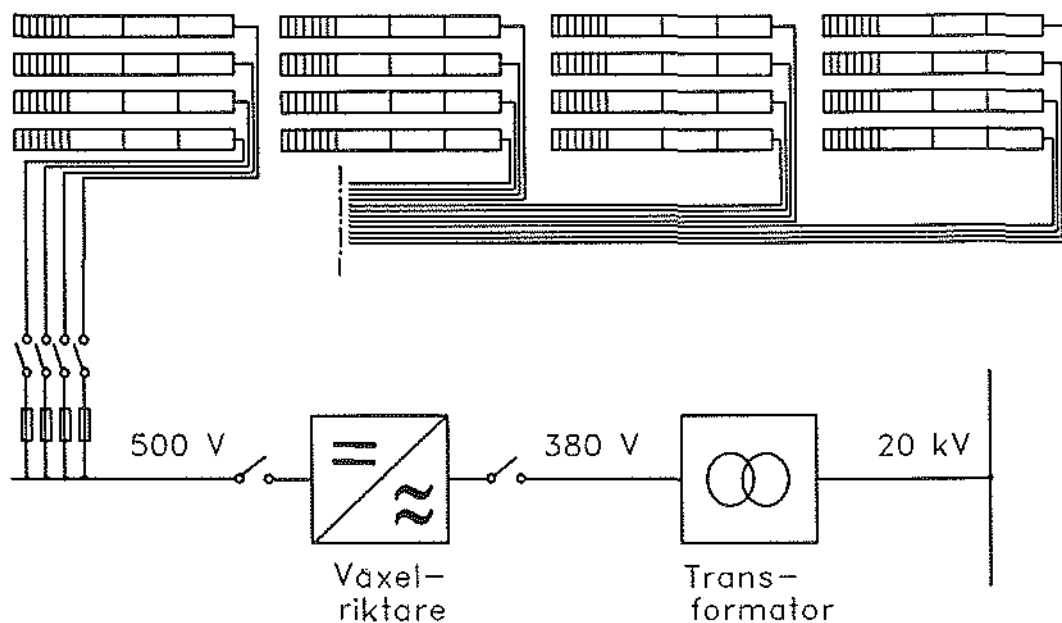
Något system för mätdatainsamling är inte nödvändigt för driften och har därför inte behandlats i förstudien. En eller flera pyranometrar kan dock anses som nödvändiga för att bedömma anläggningens momentana prestanda.

3.9 Sammanställning över anläggningen

Tabell 3.9 samt enlinjeschemat i figur 3.9 ger en beskrivning av anläggningens tänkta uppbyggnad och de anläggningsdata som förstudien resulterat i.

Toppeffekt	106 kW DC 99 kW AC
Årlig energiproduktion	101 MWh DC 91 MWh AC
Systemspänning	522 V DC
Distributionsspänning	20 kV AC
Modulyta	819 m ²
Ytbehov (modulfält)	4400 m ²

Tabell 3.9 Anläggningsdata för 100 kW_p solcellskraftverk



Figur 3.9 Enlinjeschema för anläggningen

4 KOSTNADER

Omvandling mellan USD och SEK har utförts med en antagen växelkurs om 6.25 SEK per USD.

4.1 Solcellsmoduler

Ett antal förfrågningar på priser gjordes till representanter för de större modultillverkarna. De prisindikationer som erhöles varierade från 3.90 USD/W, vid köp av 20 kW, amorfa moduler från ARCO till 4.50 för 100 kW, monokristallina moduler från SOLEC. Vid diskussioner med representanter från AEG och Siemens säger man att det är omöjligt för en europeisk tillverkare att sälja för priser runt 4 USD/W, och att de "verkliga priserna" egentligen är mycket högre. Klart är att det är mycket svårt att få en korrekt bild av prissituationen.

I denna studie har priset 4.2 USD använts vilket ger den totala kostnaden 2.8 milj SEK för de 1920 modulerna av typ M55 från ARCO Solar.

4.2 Växelriktare

Även när det gällde växelriktare har priser från ett antal företag samlats in. Här varierar priserna betydligt mer än när det gäller solcellsmoduler vilket bland annat beror på att det är svårt att direkt jämföra två olika växelriktare då det inte framgår tydligt i anbuden vad som ingår. Det pris som använts är 0.95 USD/W vilket ger en total kostnad av cirka 0.6 milj SEK för en 100 kW växelriktare. Priset inkluderar då även en transformator för upptransformering från 0.4 till 20 kV.

4.3 Stativ och fundament

När det gäller att uppskatta kostnaderna för montage av modulfältet är det betydligt svårare än för moduler och växelriktare. Stativen kan utformas på en mängd olika sätt och därmed till varierande kostnader. Det stativ som presenteras här bygger på AEGs standardlösning som används bland annat i en anläggning på ön Fehmarn i Östersjön och SIAB har räknat på en liknande lösning.

Ett stativ för en panel (30 st moduler) har måtten 5.0x2.6 meter. Till varje sådant stativ går det åt cirka 310 kg galvaniserat järn till en kostnad av 15-20 kr/kg inkl montering ==> 4.6-6.2 kkr.

Till varje stativ behövs betongfundament och för att klara vindlasten även en längsgående betongbalk. Det innebär att det åtgår 1.6 m³ till en kostnad av 3000 kr/m³ ==> 4.8 kkr.

För montage av modulerna beräknas åtgå 8 mantimmar till kostnaden 250 kr/timme ==> 2.0 kkr.

Tillkommer gör visst markberedningsarbete vilket ger en slutlig ungefärlig totalkostnad

per panel om 13 kkr och för hela fältet 0.83 milj kronor.

4.4 Kablage

4.4.1 DC kablage

Förutom kablar för seriekoppling av moduler och för anslutning av blocken till manöverrummet ingår en mängd komponenter såsom elkopplare, dioder, säkringar, ventilavledare, kopplingslådor, jordlina mm. Kostnaden för detta har uppskattats till 300 kkr inkl arbete.

4.4.2 AC kablage

Kostnaden för AC kablaget dvs den utrustning som behövs för anslutning av systemet till elnätet (20 kV) uppskattas till 250 kkr inkl arbete.

4.5 Kontrollsystem

Kontrollsystemet kan utformas på många olika sätt och kostnaden kommer därmed att kunna variera inom vida gränser. Här förutsätts att det utformas på ett enkelt sätt och kostnaden uppskattas till 200 kkr.

4.6 Övrigt

Förutom den utrustning som redan nämnts tillkommer en del övrigt såsom manöverbyggnad inkl inredning, lokalt kraftuttag (220 V) mm till ungefärlig kostnad 200 kkr. Kostnad för projektering har inte medtagits.

4.7 Sammanställning över kostnaderna

Totalt har kostnaden för anläggningen uppskattats till 5.2 miljoner SEK och i tabell 4.1 har de olika posterna sammanställts.

Solcellsmoduler	2.80 milj SEK
Stativ och fundament inkl markberedning och montage	0.83
DC-kablage	0.30
Växelriktare inkl trafo	0.60
AC-kablage	0.25
Kontrollsystem	0.20
Övrigt	0.20

Tabell 4.1 Kostnadsuppdelning

5 UPPHANDLING

Vid en upphandling av den anläggning som beskrivits i förstudien kommer de olika systemdelarna att köpas från olika leverantörer. Den största kostnaden hamnar på solcellsmodulerna och erfarenheter från andra anläggningar visar att det är möjligt att påverka leverantören till att leverera den högsta kvaliteten ur produktionen. När det gäller växelriktaren är det viktigt att leverantören har fullständig information om solcellsgeneratoren dvs storlek på spänningar och strömmar samt de krav som ställs för utmatning av energin på elnätet.

5.1 Modular

Erfarenheter från redan uppförda anläggningar har visat att väl genomtänkta krav gentemot leverantören av moduler kan ge en klart högre prestanda på den slutliga solcellsgeneratoren än vad fallet blir om modulerna köps utan särskilda specifikationer.

Produktionen av moduler har ett visst utfall med en typisk "Gaussfördelning" när det gäller de enskilda modulernas toppeffekt. Samtliga moduler mäts upp på fabriken och sorteras i ett antal olika grupper. Vid köp av en så stor kvantitet som 100 kW innebär är det möjligt att begära exempelvis att medelvärdet på toppeffekten för den totala leveransen ska vara högre eller lika med det i databladet angivna värdet på toppeffekten för en enda modul. Ett annat krav är att spridningen mellan de olika modulerna får uppgå till maximalt $\pm 5\%$ samt att modulerna ska levereras med en märkning som visar till vilken grupp respektive modul tillhör. En lämplig uppdelning kan då vara enligt följande där varje modul inom en grupp får en särskild färgmarkering på ramen:

Grupp A) $95\% < P \leq 98\%$

Grupp B) $98\% < P \leq 102\%$

Grupp C) $102\% < P \leq 105\%$

Fördelen med en sådan uppdelning är den att det på ett enkelt sätt möjliggör en matchning av modulerna vid montage. Vid ihopkoppling av modulerna till paneler är det lämpligt att välja modulerna ur samma grupp eftersom strömmen vid seriekoppling begränsas av den sämsta modulen i kedjan.

Andra viktiga frågor rör säkerhet och elnormer. Klarar modulen av de aktuella spänningar som valts ? osv.

5.2 Växelriktare

När det gäller upphandlingen av växelriktare är det många frågor som måste beaktas. Förutom rent tekniska data när det gäller spänningar, strömmar etc är det viktigt att växelriktaren med kringutrustning uppfyller svenska elnormer och att energin som ska matas ut på elnätet uppfyller de krav som ställs av Vattenfall när det gäller reaktiv effekt, distorsion etc.

6 ENERGIPRODUKTION

För att kunna uppskatta anläggningens förväntade energiproduktion har beräkningar gjorts baserade på verkliga instrålningsdata och modeller för moduler och växelriktare. De instrålningsdata som har använts har uppmätts av Vattenfall i Älvkarleby och gäller år 1985. Förutom global instrålning mot 45 graders lutning har även utomhustemperaturen använts för beräkning av förväntad celltemperatur.

I tabell 6.1 presenteras resultaten från beräkningarna. Ingen hänsyn har tagits till skuggeffekter men förluster på grund av resistiva förluster och "mismatching" har satts till 5% vilket är relativt högt.

MÅNAD	INSTRÅLNING	DC-ENERGI	AC-ENERGI
Januari	11.8 kWh/m ²	1.1 MWh	0.9 MWh
Februari	49.8	4.9	4.4
Mars	66.6	6.0	5.4
April	140.1	13.3	12.3
Maj	163.2	14.8	13.6
Juni	158.8	14.1	12.9
Juli	161.8	14.2	13.0
Augusti	129.4	11.5	10.4
September	111.0	10.2	9.3
Oktober	77.5	7.2	6.1
November	22.0	2.0	1.8
December	13.9	1.4	1.2
ÅRET	1105.9 kWh/m ²	100.7 MWh	91.3 MWh

Tabell 6.1 Instrålningsdata för 1985 och förväntad energiproduktion

7 INTÄKTER

Produktionskostnaden för elenergi är beroende på vilken kraftkälla som svarar för produktionen. Energin producerad med vattenkraft kostar mindre än kärnkraftsproducerad el som i sin tur är billigare än el från kondenskraftverk osv. Ett ungefärligt marginellt kraftvärde för vidare resonemang kan enligt uppgift från Vattenfall (E. Hakkarainen) anges till 10-11 öre/kWh (1989). Med en årlig energiproduktion på cirka 90 MWh innebär det att solcellsanläggningen svarar för en intäkt på 9-10 kkr per år.

Om man använder de skattade kraftvärden som anges i tabell 7.1 för år 2010 kan motsvarande intäkt beräknas till cirka 25 kkr. Med 6% realränta och avskrivningstiden 30 år räcker detta till att föränta en investering på 344 kkr.

Vinter (v.45-12)	mån-fre kl 6-22 övrig tid	34 öre/kWh 27
Vår (v.13-16)	mån-fre kl 6-22 övrig tid	31 27
Sommar (v.17-36)	mån-fre kl 6-22 övrig tid	24 22
Höst (v.37-44)	mån-fre kl 6-22 övrig tid	31 27

Tabell 7.1 Skattade marginella kraftvärden år 2010, prisnivå 1987
($r=4\%$, $K=167$) (källa: E. Hakkarainen, Vattenfall)

I USA har energidepartementet vid olika tidpunkter utfört framtidsbedömningar när det gäller priser på solcellsmoduler och övriga anläggningsdelar. För tiden kring år 2000 har DOE satt målen som redovisas i tabell 7.2. En sammanvägning av värdena i tabellen leder till en anläggningskostnad på 0.6-1.0 USD/W, vilket i sin tur motsvarar en kostnad på 375-625 kkr för 100 kW,. Som synes står kostnaden i god överensstämmelse med resultatet i räkneexemplet ovan för år 2010.

Det bör dock påpekas att det antagligen kommer att krävas betydligt större anläggningar (flera MW) för att DOEs prismål ska kunna uppfyllas.

Modulverkningsgrad	15-20%
Modulkostnad	45-80 USD/m ²
Ytrelaterade kostnader	50 USD/m ²
Effektrelaterade kostnader	150 USD/kW
Livslängd	30 år

Tabell 7.2 DOE mål för olika komponenter i en solcellsanläggning gällande tiden kring sekelskiftet [1]

8 BESÖK VID EUROPEISKA SOLCELLSANLÄGGNINGAR

Under arbetet med förstudien har ett antal solcellsanläggningar besökts för att på så sätt samla in kunskap och erfarenheter.

8.1 Loser 30 kW, i österrikiska alperna

På 1.550 m höjd över havet, på alptoppen Loser i Altaussee inte långt från Salzburg har den lokala kraftdistributören Oberösterreichische Kraftwerke AG (OKA) uppfört en solcellsanläggning med toppeffekten 30 kW. Anläggningen invigdes den 2 juni 1989 och jag besökte den i mitten på februari i år.

Systemet som är nätanslutet består av tre parallella solcellsgeneratorer med moduler från ARCO, SIEMENS och KYOCERA. De tre generatorerna har var och en toppeffekten 10 kW och är anslutna till tre separata växelriktare från Sun Power i Västtyskland. Bilden i figur 8.1 visar en del av de totalt 598 modulerna. Altaussee är en skidort och växelriktarna är placerade i en separat liten byggnad i anslutning till en av linbanorna på Loser.

Genom att bygga en solcellsanläggning på så hög höjd erhålls mycket bra instrålningsförhållanden och OKA planerar inom de närmaste åren att uppföra ytterligare en liknande anläggning med toppeffekten 100 kW.

Kontaktperson på OKA:

Heinrich Wilk
Oberösterreichische Kraftwerke AG
EBI, Postfach 298
A-4021 Linz
ÖSTERRIKE Tel. 00943-732593



Figur 8.1 Loser 30 kW_i

8.2 Kobern-Gondorf 340 kW_i i Västtyskland

Den 19 april besökte jag ett solcellskraftverk i Kobern-Gondorf som ligger vid floden Mosel i närheten av staden Koblenz. Anläggningen har toppeffekten 340 kW och är därmed den idag största solcellsanläggningen i Europa.

Ansvarig för systemet är den lokala kraftdistributören Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG (RWE) som har sitt huvudkontor i Essen. Kraftverket invigdes den 17 oktober 1988.

Anläggningen består av flera separata modulfält och en mängd olika växelriktare. De tre största fälten har vardera ett toppeffekten 100 kW och är uppbyggda med moduler från AEG, SOLAREX (polykristallina celler) och HOXAN (monokristallina celler). Fem mindre fält består av moduler från AEG (mono), amorfa moduler från ARCO, SOVONICS och CHRONAR samt moduler från MOBIL SOLAR (bandkisel).

De tre största fälten är anslutna till en gemensam DC-buss till vilken tre växelriktare är kopplade. AEG har levererat en nät- och en självkommuterad växelriktare och den tredje som är nätkommuterad har levererats av SMA i Kassel. Fälten kan operera helt separat från varandra men kan även kopplas till enbart en av de tre växelriktarna. På bilden i figur 8.2 ser man delar av modulfält A och B.



Figur 8.2 Kobern-Gondorf 340 kW,

Anläggningen i Kobern-Gondorf utgör en tredjedel av de totalt 1 MW, som RWE planerar att bygga. Del två är under planering och kommer att byggas i brunkolsdistriktet.

Kontaktperson på RWE:

Ulrich Beyer
Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG
Postfach 103165
D-4300 Essen 1
VÄSTTYSKLAND Tel. 00949-2011853211

9 REFERENSER

1. Low-Cost Power From Thin-Film Photovoltaics
David E. Carlson, presenterat på "Electricity-konferensen"
i Göteborg, maj 1989.
2. Performance Comparison Between Two Grid-connected
PV-Plants
Mats Andersson, Christer Brunström och Jonas Hedström,
EG-konferensen i Sevilla, oktober 1986.