

RA 636

December 2022

## TEGRA-modellen – Netmodeller og netberegninger

Gennemgang af netmodeller og netberegninger anvendt i TEGRA



<b>Rapporten er udarbejdet af:</b>	Can Karatas Jasmin Mehmedalic Jonas B. B. Hansen	Green Power Denmark Green Power Denmark Green Power Denmark
------------------------------------	--	---

---

<b>Netteknisk rapport:</b>	RA636
<b>Klasse:</b>	1
<b>Rekvirent:</b>	Netudvalget og Teknikudvalget
<b>Dato for udgivelse:</b>	1. december 2022
<b>Sag:</b>	7525



---

**VERSIONSLOG**

Version / Dato	Opdatering	Initialer
V1.0 / 2022-12-01	Første udgivelse.	CKA JBH JME

## RESUME

Rapporten har til formål at dokumentere netmodeller og netberegninger i TEGRA-modellen.

Kapitel 1 giver et kort overblik over TEGRA og tilhørende dokumentation samt de forudsætninger, der skal være opfyldt, for at netberegningerne kan udføres.

Kapitel 2 gennemgår netmodeller for lav-, mellem- og højspændingsnet. For lav- og mellemspændingsnet benyttes faktiske net, mens der for højspænding benyttes et modelnet.

Kapitel 3 beskriver kort, hvordan simuleringsprofiler og -parametre bruges til at indstille netberegningen efter behov og generere input til netberegningerne.

Kapitel 4 beskriver selve udførelsen af netberegningen, som fortrinsvis udføres i DIGSI-LENT PowerFactory.

**INDHOLDSFORTEGNELSE**

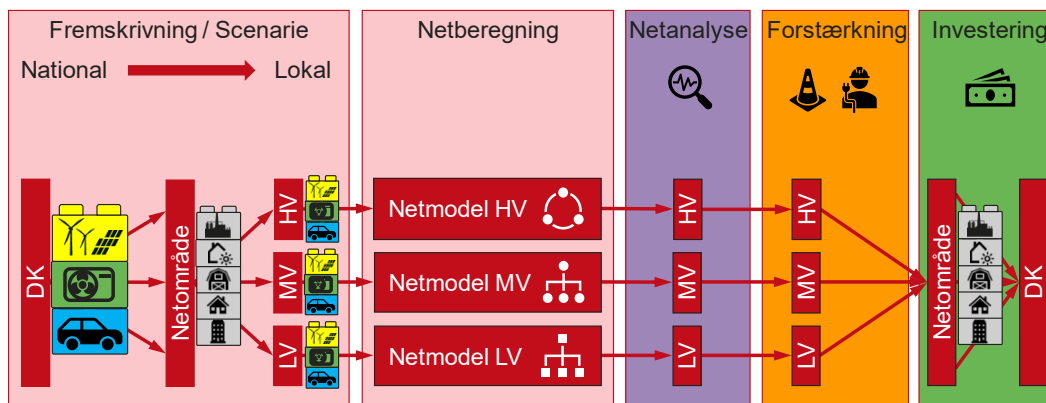
<b>Versionslog</b> .....	<b>5</b>
<b>Resume</b> .....	<b>6</b>
<b>Indholdsfortegnelse</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Indledning</b> .....	<b>8</b>
1.1. <i>Oversigt over TEGRA-modellen</i> .....	8
1.2. <i>Oversigt over TEGRA-dokumentation</i> .....	8
1.3. <i>Forudsætninger for denne rapport</i> .....	9
<b>2. Netmodeller</b> .....	<b>10</b>
2.1. <i>Lavspændingsnet</i> .....	11
2.2. <i>Mellemspændingsnet</i> .....	12
2.3. <i>Højspændingsnet</i> .....	13
<b>3. Simuleringsprofiler og parametre</b> .....	<b>16</b>
3.1. <i>Parametre</i> .....	16
3.2. <i>Simuleringsprofiler</i> .....	17
<b>4. Netberegninger</b> .....	<b>18</b>
4.1. <i>Input</i> .....	18
4.2. <i>Netberegning</i> .....	18
4.3. <i>Output</i> .....	18
<b>APPENDIKS 1. Standardparametre anvendt til netberegninger</b> .....	<b>19</b>

## 1. INDLEDNING

Denne rapport er en del af en serie, der dokumenterer TEGRA-modellens opbygning og anvendelse.

### 1.1. OVERSIGT OVER TEGRA-MODELLEN

Figur 1.1 viser de overordnede processer i TEGRA-modellen.



Figur 1.1 TEGRA – overblikdiagram.

### 1.2. OVERSIGT OVER TEGRA-DOKUMENTATION

RA635	TEGRA-modellen - Introduktion
RA619	Definition af netområder og arketyper i distributionsnettet
RA620	Analyseforudsætninger for distributionsnettet DEL 1: Metodebeskrivelse for fordeling af elbiler, varmepumper og solcelle-anlæg på netområder
RA623	Analyseforudsætninger for distributionsnettet DEL 2: Simuleringsprofiler
RA636	TEGRA-modellen – Netmodeller og netberegninger
RA637	TEGRA-modellen – Netanalyse
RA638	TEGRA-modellen – Forstærkning
RA639	TEGRA-modellen – Skalering
RA640	TEGRA-modellen – Merinvesteringer

Tabel 1.1 Oversigt over TEGRA-dokumentation.



### **1.3. FORUDSÆTNINGER FOR DENNE RAPPORT**

Processerne beskrevet i denne rapport forudsætter, at der er fastlagt:

- Analyseforudsætninger for forbrug og produktion, som er fordelt på netområder og arketyper og herefter fremskrevet i hhv. LV-, MV- og HV-net.
- Simuleringsprofiler for forskellige typer af forbrug og produktion.

## 2. NETMODELLER

Netmodelleringen er lavet med det formål at kunne foretage tekniske og økonomiske beregninger på landsplan. Der er fokuseret på at lave en modellering, som er både retvisende og modulær, og som samtidig sikrer beregningsmæssig effektivitet.

For at opnå dette formål kategoriseres elnettet i netområder og arketyper. Kategoriseringen sikrer, at TEGRA-modellen er modulær og agil. Inddelingen i netområder og arketyper gør det muligt, at:

- udarbejde mere nøjagtige fremskrivninger af forbrug og produktion
- analysere, hvordan forskellige områder og elnet påvirkes
- benytte forskellige dimensioneringskriterier afhængig af arketype
- udføre mere nøjagtige økonomiske beregninger.

Som en del af kategoriseringen opdeles netmodelleringen baseret på spændingsniveau. Netmodelleringen inddeles i lav-, mellem- og højspændingsnet.

Arketyperne, som benyttes i netmodelleringen, er defineret ud fra en række tekniske og økonomiske forhold. Arketyperne og deres definition er nærmere beskrevet i RA619.

Hvert spændingsniveau og hver arketype er modelleret for sig, således at både tekniske og økonomiske resultater kan relateres direkte til en arketype. Beregningsmæssigt giver opdelingen mulighed for at benytte fraktilbaserede profiler for forbrug og produktion, hvilket reducerer beregningstiden betragteligt, idet man kan nøjes med kun at regne på de timer af året, som har betydning for dimensioneringen af elnettet.

Hvis netmodelleringen ikke var opdelt på spændingsniveauer, ville det ikke være muligt at bruge fraktilbaserede profiler, da samtidigheden ikke ville være retvisende på alle spændingsniveauer.

Opdelingen på spændingsniveau forhindrer ikke brugen af stokastiske profiler – med stokastiske profiler vil beregninger blot tage længere tid, da der skal regnes på et helt år.

Opdelingen af netmodelleringen gør dog også, at visse typer af tekniske beregninger ikke kan udføres i TEGRA-modellen. For eksempel kan TEGRA-modellen ikke bruges til at undersøge koordinering af spændingsregulering på tværs af spændingsniveauer, da dette ville kræve en sammenhængende netmodel, hvor alle spændingsniveauer er modelleret sammen.

Netmodelleringen er gennemført på baggrund af netdata indsamlet i 2019 fra tre store netselskaber i Danmark.

## 2.1. LAVSPÆNDINGSNET

Netmodellen for lavspændingsnettet består af en række faktiske 0,4 kV-net bestående af 10/0,4 kV-station (netstation) og 0,4 kV-radialer (udføringer). Både 10/0,4 kV-transformer og 0,4 kV-kabler er modelleret med netstruktur og relevante oplysninger om tilsluttet forbrug og produktion.

Lavspændingsnet er modelleret i DigSILENT PowerFactory. Samlet set er der på lavspænding modelleret 285 netstationer med 1222 udføringer. Tabel 2.1 viser et overblik over, hvordan disse er fordelt på arketyperne. Tabel 2.1 viser også et estimat af, hvor stor en andel af de danske lavspændingsnet, der udgøres af hver arketype.

Arketype	Antal netstationer i netmodel	Antal udføringer i netmodel	Arketypens estimerede andel af komponenter på landsplan
<b>Høj bebyggelse</b>	<b>78</b>	<b>393</b>	<b>5,7 %</b>
- Uden elvarme	78	393	5,7 %
- Med elvarme	0	0	0,1 %
- Med varmepumpe	0	0	0,0 %
<b>Lav bebyggelse</b>	<b>102</b>	<b>526</b>	<b>35,3 %</b>
- Uden elvarme	100	519	31,5 %
- Med elvarme	2	7	1,1 %
- Med varmepumpe	0	0	2,7 %
<b>Opland</b>	<b>95</b>	<b>253</b>	<b>44,7 %</b>
- Uden elvarme	68	187	35,1 %
- Med elvarme	27	66	3,0 %
- Med varmepumpe	0	0	6,7 %
<b>Sommerhus</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>5,1 %</b>
- Uden elvarme	3	10	1,0 %
- Med elvarme	7	40	3,4 %
- Med varmepumpe	0	0	0,8 %
<b>Alle</b>	<b>285</b>	<b>1222</b>	<b>90,8 %</b>

Tabel 2.1 Overblik over modellerede lavspændingsnet.

Som det fremgår af tabel 2.1, er de arketyper, som udgør de største dele af de danske lavspændingsnet, velrepræsenteret i netmodellen. Der er dog også visse typer af lavspændingsnet, som ikke er repræsenteret i netmodellen – net med varmepumpe og høj bebyggelse med elvarme. Disse udgør dog kun en begrænset mængde af den samlede komponentmasse og vil derfor ikke have den store indflydelse på økonomiske analyser.

Hvad angår net med varmepumpe, så er der tale om net, som er dimensioneret specifikt til individuelle varmepumper. Selvom disse statistisk bør eksistere i 2019, og der er en del komponenter på landsplan knyttet til forsyning af individuelle varmepumper, så er virkeligheden en lidt anden. I 2019 var der helt grundlæggende ikke lavspændingsnet, som var dimensioneret til varmepumper. Det skyldes primært, at varmepumperne var sporadisk fordelt i andre arketyper. Der var simpelthen ikke nogen områder (eller utroligt få tilfælde), hvor den primære opvarmning for alle husstande i området var varmepumper. Det lykkedes derfor ikke at finde netdata på arketyper med varmepumpe.

Hvad angår høj bebyggelse med elvarme, så er det en boligform, som er meget sjælden. Langt de fleste lejligheder opvarmes med fjernvarme (omkring 90 %), og den rest, der ikke benytter fjernvarme, er primært opvarmet med et centralt fyr. Andelen af lejligheder i Danmark, der er opvarmet med elvarme, er ca. 0,7 %. Det er derfor ikke lykkedes at finde netdata på denne arketype.

Det skal herudover også nævnes, at de resterende ca. 9 % af assetmassen, som ikke er repræsenteret i lavspændingsmodellerne, er industri. Der er her hovedsageligt tale om netstationer, da industrikunder i lavspændingsnettet typisk er tilsluttet direkte i netstationen (tilslutningsniveau B-lav) og ikke deler netstation med andre kunder.

### 2.2. MELLEMSPÆNDINGSNET

Netmodellen for mellemspændingsnettet består af en række faktiske 10 kV-net bestående af HV-station (hovedstation) og 10 kV-radialer (radialer). 10 kV-kabler er modelleret med netstruktur og relevante oplysninger om tilsluttet forbrug og produktion. HV/MV-transformerne er modelleret, men ikke med det fulde forbrug og produktion, da det kun er udvalgte 10 kV-radialer, som er modelleret. Den primære modellering af hovedstationer ligger i modellen for højspændingsnettet.

Mellemspændingsnet er modelleret i DigSILENT PowerFactory. Samlet set er der på mellemspænding modelleret 174 radialer. Tabel 2.2 viser et overblik over, hvordan disse er fordelt på arketyperne. Tabel 2.2 viser også et estimat af, hvor stor en andel af de danske mellemspændingsnet der udgøres af hver arketype.

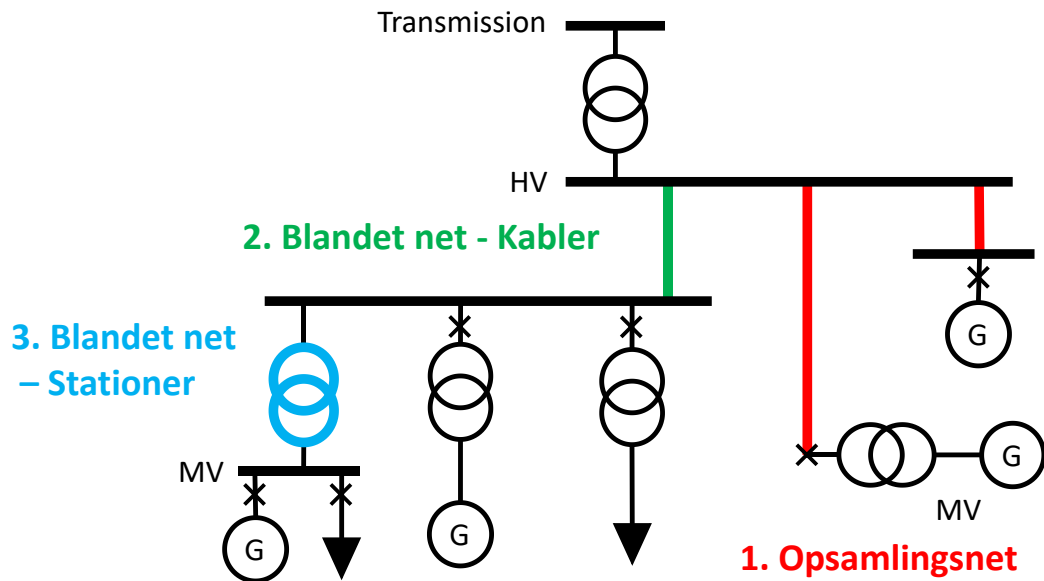
Arketype	Antal radialer i netmodel	Arketypens estimerede andel af komponenter på landsplan
<b>Høj energitæthed</b>	<b>101</b>	<b>38,6 %</b>
- Blandet net	56	23,9 %
- Blandet net med fjernvarmeværk	6	6,9 %
- Industri	29	5,8 %
- Produktion	10	1,9 %
<b>Lav energitæthed</b>	<b>73</b>	<b>61,4 %</b>
- Blandet net	46	43,6 %
- Blandet net med fjernvarmeværk	5	5,5 %
- Industri	14	6,1 %
- Produktion	8	6,1 %
<b>Alle</b>	<b>174</b>	<b>100 %</b>

Tabel 2.2 Overblik over modellerede mellemspændingsnet.

Som det fremgår af tabel 2.2, er de arketyper, som udgør de største dele af de danske mellemspændingsnet, velrepræsenteret i netmodellen. Nogle af de arketyper, som udgør mindre dele af de danske mellemspændingsnet, har en begrænset repræsentation i netmodellen. Dette øger usikkerheden i de tekniske analyser af disse arketyper, men har ikke stor indflydelse på de økonomiske analyser, da disse arketyper kun udgør en mindre andel af de danske mellemspændingsnet.

### 2.3. HØJSPÆNDINGSNET

Netmodellen for højspændingsnet er et kunstigt modelnet, som gør det muligt at regne på belastningen af HV-kabel eller luftledning (HV-kabler) og HV-stationer (hovedstationer). Modellen er en gennemsnitsmodel, hvor forbrug og produktion er indsat som vist i Figur 2.1.



Figur 2.1 Modelnet for højspændingsnet.

Denne modellering er valgt af flere årsager. Den primære begrundelse for valget er den store variation i opbygningen af højspændingsnet, som gør det svært at generalisere dem, ligesom det er gjort for lav- og mellemspændingsnet. Hvis netmodellen for højspændingsnet skulle opbygges efter samme princip som de lavere spændingsniveauer, hvor en tilpas stor mængde af faktiske net modelleres, ville det reelt kræve, at modellen bestod af alt højspændingsnet i Danmark.

Gennemsnitsmodellen er gældende for begge arketyper – forbrugsnet og produktionsnet. For hver arketype fordeles forbrug og produktion på de viste placeringer, hvorpå belastningen af den gennemsnitlige linje og station beregnes. Arketyperne "Forbrugsnet" vil være præget af, at der er meget forbrug tilsluttet til hovedstation og højspændingskabel og meget lidt produktion. Arketyperne "Produktionsnet" vil have mindre forbrug og markant mere produktion tilsluttet.

Opsamlingsnet er højspændingsnet, hvor der udelukkende er tilsluttet produktion. Der skelnes her ikke på, om produktionen er tilsluttet direkte på HV-niveau eller på MV-siden af en hovedstation, som kun er opstillet til opsamling af produktionen. Direkte tilslutning på HV vurderes at være det mest sandsynlige, da løsningen med MV-tilslutning i udgangspunktet kun vil være relevant, hvis der laves et fælles tilslutningssted for flere mindre produktionsanlæg, som ligger geografisk tæt på hinanden. Da det vurderes usandsynligt med tilslutning på MV-siden af en hovedstation for rene opsamlingsnet på højspændingsniveau, er det fravalgt at modellere HV/MV-transformere i opsamlingsnet.

Hvad angår blandede net, så er der både forbrug og produktion i disse. Både forbrug og produktion kan være tilsluttet direkte til højspændingsnettet eller under en hovedstation. Forbrug og produktion tilsluttet direkte til højspændingsnettet (tilslutningsniveau A-høj) vil kun belaste HV-kabler, mens forbrug og produktion tilsluttet til lav- og mellemspændingsnettet (tilslutningsniveau C, B-lav, B-høj og A-lav) vil belaste både hovedstationer og HV-kabler.

### 3. SIMULERINGSPROFILER OG PARAMETRE

Generering af simuleringsprofiler er den første reelle del af en TEGRA-simulering. Indledningsvis vælges, hvilke net der skal regnes på (LV, MV, HV) samt de nedslagsår, der ønskes simuleret.

På baggrund af det valgte scenarie, samt en række parametre for netberegningen, genereres profiler for forbrug og produktion i alle valgte net for alle valgte nedslagsår.

Scenariet fremskriver udviklingen i forbrug og produktion på årsbasis og inkluderer en række teknologiske antagelser, fx typen af opladning. Nyt forbrug og produktion fordeles ud i nettene baseret på de metoder, som er beskrevet i RA620.

Herefter benyttes en række parametre for netberegningen til at forberede den specifikke netberegning. Parametrene for netberegningen specificerer:

- Hvilke tidspunkter på året der skal regnes på.
  - o Vinter/Sommer
  - o Weekend/Hverdag.
- Hvilke fraktiler der skal anvendes.
  - o Skal der regnes på gennemsnitlig belastning fra forbrug og produktion, dimensionerende belastning, eller noget helt tredje?
- Effektfaktoren for de forskellige typer af forbrug.

På baggrund af fremskrivning og parametrene for netberegningen anvendes simuleringsprofiler fra RA623 sammen med information om det enkelte net til at generere profiler for forbrug og produktion for det specifikke net. Her tages blandt andet hensyn til, at der regnes med de korrekte samtidigheder i det enkelte net.

#### 3.1. PARAMETRE

Parametre for netberegningen kan anvendes til at specificere tekniske detaljer om selve netberegningen. Det specificeres fx, hvilke perioder af året der er interessante for netberegningen, såvel som hvilke fraktiler der skal benyttes for forbrug og produktion.

Tabel A1.1 i Appendiks 1 viser de typiske indstillinger for parametrene. Som standard er parametrene indstillet til at analysere det dimensionerende forbrug og produktion. Der regnes på både weekend og hverdage for både sommer og vinter.

Sommer er indstillet til at producere en tilstand med maksimal produktion og minimalt forbrug. Dette sikres ved at indstille produktionen til at benytte en høj fraktil, mens forbrug indstilles til at benytte en lav fraktil.



Vinter er indstillet til at producere en tilstand med minimal produktion og maksimalt forbrug. Dette sikres ved at indstille produktionen til at benytte en lav fraktil, mens forbruget indstilles til at benytte en høj fraktil.

På denne måde sikres det, at der i netberegningen regnes på de to tilstande, som er vigtigst for dimensionering af elnettet.

Alle parametrene kan indstilles efter behov. Der kan således også foretages analyser på andre tilstande – fx gennemsnitlig belastning fra forbrug og produktion.

### 3.2. SIMULERINGSPROFILER

Simuleringsprofilerne fortæller, hvordan forbrug og produktion ændrer sig hen over et døgn for forskellige tidspunkter på året. Simuleringsprofilerne og deres udarbejdelse er nærmere beskrevet i RA623.

#### 3.2.1. Simuleringsdage

Simuleringsprofilerne er inddelt i fire tidspunkter på året:

1. Sommer (hverdag)
2. Sommer (weekend)
3. Vinter (hverdag)
4. Vinter (weekend)

#### 3.2.2. Fraktiler

En fraktil er et statistisk begreb, som i grove træk udtrykker sandsynligheden for, at en værdi er lavere end  $X$ . Tag en almindelig terning med seks sider som eksempel. Der er lige stor sandsynlighed ( $1/6$ ) for, at et terningekast vil ende på hver af de seks værdier på terningen.

Hvis vi skal lave en 50 %-fraktil for terningen, vil fraktilen have en værdi på 3, fordi der er 50 % chance for, at et terningekast vil ende på 3 eller derunder.

På samme måde vil 100 %-fraktilen for terningen have en værdi på 6, da der er 100 % sandsynlighed for, at et terningekast vil ende på 6 eller derunder.

Der er kun  $1/6$  chance for, at et terningekast vil ende på 1, og værdien 1 vil derfor svare til 16,67 %-fraktilen (altså  $1/6$ ).

I parametrene for netberegningen (Tabel A1.1) indstilles, hvilke fraktiler der skal anvendes til at generere profiler for forbrug og produktion. Ved at hæve eller sænke fraktilparametrene stiger eller falder forbrugs- og produktionsværdierne.

## 4. NETBEREGNINGER

### 4.1. INPUT

Som input benyttes profiler for hver enkelt forbrugstilslutning og produktionstilslutning i hvert enkelt net. Hver tilslutning kan dække over én eller flere kunder – fx vil en tilslutning i netmodellerne for mellemspændingsnet typisk være en netstation. I det tilfælde vil profilen være en aggregeret profil for alt det forbrug og produktion, som er tilsluttet under den pågældende netstation.

### 4.2. NETBEREGNING

Selve netberegningen består for lav- og mellemspændingsnet af en serie af loadflow-beregninger. Til at udføre loadflow-beregningerne benyttes DlgSILENT PowerFactory. Idet der skal foretages loadflow for hver enkelt time af de valgte simuleringsdage, benyttes quasi-dynamisk simulering.

Quasi-dynamiske simuleringer bruges til at foretage tidsafhængige analyser af komplekse systemer, som tager højde for, at fx forbrug og produktion varierer i løbet af en dag og ift. sæson. En quasi-dynamisk simulering består af en sammenhængende serie af loadflow-beregninger over en kortere eller længere periode (typisk en dag til et år). Denne type simulering egner sig særlig godt til at simulere timeværdier over en række dage.

Netberegningerne gennemføres separat for hvert enkelt net. For hvert net regnes de valgte simuleringsdage for hvert nedslagsår.

For højspændingnettet beregnes direkte, hvordan belastningen af den gennemsnitlige linje og hovedstation er for de valgte simuleringsdage i hvert nedslagsår. Denne beregning udføres i Python.

### 4.3. OUTPUT

Outputtet fra netberegningerne for lav- og mellemspændingsnet er strømme, spændinger, effekter, tab for alle knudepunkter og komponenter i nettene. Disse værdier eksporteres til CSV-filer til videre behandling.

Netberegning af højspænding resulterer i effekter for hhv. linjer og stationer i hver arke-type.

**APPENDIKS 1. STANDARDPARAMETRE ANVENDT TIL NETBEREGNINGER**

Parameter	LV-værdi	MV-værdi	HV-værdi
Antal simulerede hverdage (sommer)	1	1	1
Antal simulerede weekenddage (sommer)	1	1	1
Antal simulerede hverdage (vinter)	1	1	1
Antal simulerede weekenddage (vinter)	1	1	1
Effektfaktor (husstand)	1.0	1.0	1.0
Effektfaktor (erhverv)	1.0	1.0	1.0
Effektfaktor (industri)	1.0	1.0	1.0
Sommerfraktil (husstand)	1	1	1
Vinterfraktil (husstand)	99	99	99
Sommerfraktil (erhverv og industri)	1	1	1
Vinterfraktil (erhverv og industri)	99	99	99
Sommerfraktil (elbil (husstand))	1	1	1
Vinterfraktil (elbil (husstand))	99	99	99
Sommerfraktil (elbil (hurtigoplader))	50	50	50
Vinterfraktil (elbil (hurtigoplader))	99	99	99
Sommerfraktil (elbil (lynoplader))	50	50	50
Vinterfraktil (elbil (lynoplader))	99	99	99
Sommerfraktil (varmepumpe (husstand))	1	1	1
Vinterfraktil (varmepumpe (husstand))	99	99	99
Sommerfraktil (varmepumpe (stor))	1	1	1
Vinterfraktil (varmepumpe (stor))	99	99	99
Sommerfraktil (VE-produktion)	95	95	95
Vinterfraktil (VE-produktion)	5	5	5
Sommerfraktil (CHP-produktion)	5	5	5
Vinterfraktil (CHP-produktion)	5	5	5

**Tablel A1.1 Standardparametre anvendt til netberegninger.**