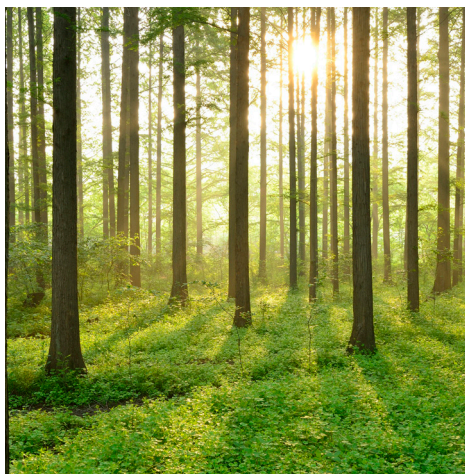


MILJÖVÄRDERING AV ENERGILÖSNINGAR I BYGGNADER ETAPP 2

RAPPORT 2017:409



Miljövärdering av energilösningar i byggnader etapp 2

Metod för konsekvensanalys

MARTIN HAGBERG

JENNY GODE

AMBJÖRN LÄTT

TOMAS EKVALL

IDA ADOLFSSON

FREDRIK MARTINSSON

ISBN 978-91-7673-409-4 | © ENERGIFORSK juni 2017

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Som ett led i omställningen av energisystemet måste såväl leverantörer av energieffektiva byggnader som leverantörer av energi till byggnaderna ha beslutsunderlag som visar konsekvenserna av olika kombinationer av energilösningar. Dagens miljöcertifieringssystem visar inte hur miljöpåverkan från byggnadens energianvändning varierar under året. Syftet med den metod som här har utvecklats är att hitta en lösning på detta problem.

Metoden beaktar att miljökonsekvenserna för energisystemet varierar över tid och därmed skiljer sig mellan de tillfällen en byggnad producerar och levererar egengenererad energi till el- eller fjärrvärmenätet och de tillfällen byggnaden kräver leverans av energi från näten. Med andra ord tar metoden hänsyn till hur produktionen och användningen av energi varierar under året istället för att som i gängse metoder göra beräkningen på årsbasis.

Projektet blickar framåt – hur energiåtgärder påverkar ett framtida system med fjärrvärme och elproduktion med hänsyn till hur marginalproduktionen ser ut över hela året. Energibesparing på årsbasis kan ge olika miljöpåverkan beroende på när under året besparingen sker. I metoden simuleras olika fjärrvärmenäts och elnäts marginalproduktion över tid och med hänsyn till utomhustemperatur vilket gör det möjligt att visa hur miljöpåverkan varierar.

För att genomföra projektet har det krävts en god samverkan mellan olika aktörer – forskare, representanter från näringsliv och myndigheter. Projektets syfte har varit att utveckla en metod. I förlängningen förväntas detta leda till att det utvecklas ett verktyg som kan nyttjas av beställare, projektutvecklare, konsulter och utredare i arbetet med att föreslå lämpliga energilösningar för byggnader. Ett verktyg i vilket man på ett så transparent sätt som möjligt kan bedöma konsekvenser av olika kombinationer av lösningar, i olika scenarier för energisystemets utveckling.

Arbetet har utförts av forskare vid IVL Svenska Miljöinstitutet och har finansierats av Fjärrsyn (fjärrvärmebranschen genom Energiforsk och Energimyndigheten), E2B2 (Energimyndigheten), Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) samt Stiftelsen IVL (SIVL). Rapporten är publicerad i Fjärrsyns och IVL:s rapportserier.

I projektets referensgrupp har följande personer deltagit: Jonas Gräslund, Skanska, Erik Dotzauer, Fortum Värme, Charlotta Abrahamsson, Göteborg Energi, Pontus Cerin, Energimyndigheten, Mats Fredriksson, E.ON, Anna Jarnehammar, IVL, Roland Jonsson, HSB, Johnny Kellner, oberoende konsult, Johan Lundén, Tekniska Verken Linköping, Hannes Schmied och Elsa Fahlén, NCC, Johan Tjernström, Akademiska hus, Mikael Gustafsson, Energieffektiviseringsföretagen, Annika Karlsson, Comfort, Fredrik Martinsson, Energiforsk samt Raziye Khodayari, Energiföretagen Sverige. Jonas Gräslund, Johnny Kellner och Hannes Schmied medverkade även i projektgruppen i den SBUF-finansierade delen av projektet.

Jonas Gräslund, Erik Dotzauer och Anna Jarnehammar

Sammanfattning

Det ställs allt högre krav på byggnaders energiprestanda och i takt med detta ökar efterfrågan på miljövärdering av byggnader och deras energilösningar. I detta projekt vidareutvecklas en metodik för värdering av byggnaders energianvändning ur miljösynpunkt (metodens grundversion utvecklades i "etapp 1" av projektet). Vi benämner metoden "Tidstegsmetoden".

Tidstegsmetoden avser att analysera miljökonsekvenserna av byggnaders energilösningar. Metoden ska visa på effekterna av olika val och kunna ge underlag till beslut vid planering av renovering och nybyggnation. Därför är utgångspunkten att analysera systemkonsekvenser av förändrad energianvändning.

Produktion av el-, fjärrvärme-, och fjärrkyla kan vara förknippade med stora skillnader i miljöpåverkan beroende på vilken tid som avses; t.ex., om det är sommar eller vinter, om det är nutid eller framtid. För att på ett representativt sätt kunna bedöma miljökonsekvensen av en förändrad energianvändning i en byggnad är därför tidsaspekten central. Den presenterade metoden hanterar därför två olika tidsdimensioner. Den ena avser den framtida utvecklingen av energisystemet – från nu och ca 20 år framåt i tiden. Den andra dimensionen är tidsupplösning över året, som avser att fånga variationer över säsonger, månader, dygn och timmar.

Med konsekvens- och tidsperspektivet i fokus, inkluderar tillvägagångssättet: beräkning av byggnadens energianvändning för aktuella energiåtgärder; bestämning av miljövärdesfaktorer för en förändrad användning av bränslen, fjärrvärme, fjärrkyla och el; och beräkning miljöpåverkan av de aktuella energiåtgärderna baserat på de beräknade förändringarna i energianvändning och de fastställda miljövärdesfaktorer. För att bättre täcka in de många osäkerheter som är förknippade med en framåtblickande analys kopplas beräkningarna till ett antal kontrasterande scenarieförutsättningar. Detta ger ett resultatsspann för miljöpåverkan av de studerade energilösningarna.

För att exemplifiera metoden presenteras i rapporten ett antal kvantitativa exempel. I dessa beräknas klimatpåverkan (utsläpp av CO_{2e}) av olika energieffektiviseringsåtgärder i ett flerfamiljshus byggt under miljonprogrammet. Den principiella beräkningsgången går också att applicera på andra miljöaspekter såväl som för andra typer av byggnader och energiåtgärder. I rapporten görs beräkningarna för tre olika typer av fjärrvärmenät, samt för olika kontrasterande scenarier, bland annat kopplat till elsystemets utveckling.

Sammantaget har projektet resulterat i en metod som länkar ihop tidsupplöst miljövärdering för fjärrvärme, fjärrkyla, och el med ett framåtblickande konsekvensperspektiv. Scenariangreppssättet bidrar till att hantera in en del av de osäkerheter som är förknippade med framtidsstudier. Den utvecklade metoden kan i fortsatt tillämpning bidra till miljömässigt mer välgrundade beslut vid renovering och nybyggnation av fastigheter.

Summary

Increasing requirements are being placed on the energy performance of buildings, and as a result, demand for environmental valuation of buildings and their energy installations increases. This project further develops a methodology for valuing buildings' energy use from an environmental point of view (the first version of the method was developed in "stage 1" of the project). We refer to the method as the "Time slice method".

The Time slice method is a method of analyzing the environmental impact of building energy solutions. The method should show the effects of different choices and provide basis for decision-making in planning of renovation and construction of buildings. Therefore, the starting point is to analyze the system consequences of changes in energy use.

Production of electricity, district heating and district cooling can be associated with major differences in environmental impact depending on time; e.g., whether it is summer or winter, whether it is today or in the future. Thus, to be able to assess the environmental impact of changed building energy use in a representative manner, the time aspect is central. The presented method therefore manages two different time dimensions. One concerns the future development of the energy system - from now and about 20 years into the future. The second dimension is time resolution throughout the year, which aims to capture variations over seasons, months, days and hours.

With the consequence and time perspective in focus, the approach includes: calculation of the building's energy use for the studied energy measures; determination of environmental impact factors for changes in use of fuels, district heating, district cooling and electricity; and calculation of environmental impact of the energy measures based on the estimated changes in energy use and established environmental factors. To better cover the many uncertainties associated with a forward-looking analysis, the calculations are linked to a number of contrasting scenario conditions. This gives a result interval for the environmental impact of the studied building energy solutions.

To exemplify the method, the report presents a number of quantitative examples. In these, the climate impact ($\text{CO}_{2\text{eq}}$ emissions) of various energy efficiency measures in a multi-family house built under the "million program" (a public housing program in Sweden in the 60's and 70's). The basic method can also be applied to other environmental aspects as well as to other types of buildings and energy measures. In the report, calculations are made for three different types of district heating networks, as well as for different contrasting scenarios, among other things linked to the development of the electricity system.

Overall, the project has resulted in an approach that link time-slice specific environmental valuations for district heating, district cooling and electricity with a forward-looking impact perspective. The scenario approach contributes to managing some of the uncertainties associated with future studies. The developed method can, in continuation, contribute to environmentally well-founded decisions in renovation and construction of buildings.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Syfte	8
1.2	Konsekvensanalys	9
1.3	Avgränsningar	10
1.4	Rapportens upplägg	10
2	Översikt av Tidstegsmetoden	12
3	Byggnadens energianvändning	15
3.1	Tillvägagångssätt	15
3.2	Exempel på beräkning av byggnadens energianvändning	16
3.2.1	Referensbyggnaden	16
3.2.2	Energiåtgärder	17
3.2.3	Energiberäkningar	17
4	Miljövärdering av fjärrvärme och fjärrkyla	20
4.1	Tillvägagångssätt	20
4.2	Kvantifierade exempel – fjärrvärme- och fjärrkylennät	22
4.2.1	Stort fjärrvärmenät	22
4.2.2	Medelstort fjärrvärmenät	23
4.2.3	Litet fjärrvärmenät	25
4.2.4	Fjärrkylennät	27
5	Miljövärdering av el	29
5.1	Tillvägagångssätt	29
5.1.1	Steg i analysen	29
5.1.2	Energisystemmodell	31
5.2	Kvantifierade exempel - elscenarier	31
5.2.1	Förutsättningar och övergripande utveckling	31
5.2.2	Konsekvens av förändrad efterfrågan	33
5.2.3	Klimatprestanda i de olika scenarierna	36
6	Miljövärdering av bränslen	38
6.1	Tillvägagångssätt	38
6.2	Avfall	38
6.2.1	Systemeffekter av avfallsimport	39
6.2.2	Scenarier för avfallsbaserad fjärrvärme	40
6.3	Systemeffekter av annan bränsleanvändning	42
7	Beräkning miljöpåverkan	44
7.1	Tillvägagångssätt	44
7.2	Kvantifierade exempel – fallstudier	44
8	Andra miljöparametrar	48
8.1	Primär- och sekundärenergi	48

8.2	Luftföroreningar	49
9	Diskussion	51
10	Slutsatser	54
Referenser		55
Bilaga A:	Ordlista	57
Bilaga B:	Bokförings- och konsekvensanalys	58
Bilaga C:	Emissionsfaktorer	62
Bilaga D:	Metodval och scenarier i litteraturen	63
Bilaga E:	Systemflexibilitetsindex	68
Bilaga F:	Tidstegsmetoden i beräkningsverktyg	72
Bilaga G:	Beräkningsstruktur för fjärrvärme och fjärrkyla	74

1 Inledning

Att välja miljömässigt gynnsamma energilösningar i byggnadsbeståndet kommer vara en viktig del i omställningen till ett mer hållbart energisystem. Bostads- och servicesektorn står i Sverige för ca 40 % av den svenska slutanvändningen av energi. Sektorns energianvändning är till ungefär 50 % el, 30 % fjärrvärme och 20 % bränslen såsom biobränslen och eldningsolja (Energimyndigheten, 2016a). Även om det svenska elsystemet är baserat på ungefär hälften förnybar energi och fjärrvärmesystemen i mycket stor utsträckning på förnybar och återvunnen energi, så kan energieffektivisering och smarta energilösningar i det svenska byggnadsbeståndet få stor betydelse. Energisystem och energimarknader är betydligt vidare än enbart det svenska eller lokala el- och/eller fjärrvärmesystemet. Genom energieffektivisering och energismart byggande möjliggörs exempelvis att energibärare kan användas i andra sektorer eller länder, att energi kan sparas till andra tidpunkter på dygnet eller året eller att dyra topplastbränslen kan undvikas. Konsekvenserna av en förändring i Sverige kan mycket väl inträffa i andra länder, och en värdering av förändrad energianvändning bör därför ha ett brett systemperspektiv.

Frågan om hur byggnaders energianvändning ska värderas har ökat i betydelse. Det beror till stor del på att direktiv, lagar och certifieringssystem ställer krav på byggnaders prestanda som därmed behöver värderas. Beroende på vilket ramverk som avses krävs värdering ur olika perspektiv, exempelvis miljö, energi och/eller resurser. Värderingen blir mer eller mindre verklighetsnära och detaljerad beroende på systemgränser samt upplösning avseende bland annat tid.

Med detta som bakgrund utvecklas en metodik i projektet *Miljövärdering av energilösningar i byggnader* (Gode et al., 2015). Metodiken kan användas för planering av byggnaders energilösningar och utgöra underlag för beslut. Metoden belyser miljökonsekvenserna som uppstår vid olika val av energilösningar. Metoden kan användas vid beslut av renovering, nybyggnation samt för byggnader med eller utan egen el- eller värmeproduktion. I Etapp 2 av projektet, vilket redovisas i denna rapport, vidareutvecklas metodiken och nya tillämpningar och implementeringsmöjligheter undersöks.

I Bilaga A ges en ordlista som beskriver ett antal termer och förkortningar som återkommer i rapporten.

1.1 SYFTE

Projektet har syftat till att vidareutveckla en metodik för värdering av byggnaders energianvändning ur resurs- och miljösynpunkt. Arbetet bygger vidare på metodikutvecklingen i etapp 1 av projektet *Miljövärdering av energilösningar i byggnader* (Gode et al., 2015).

Den potentiella nyttan med metoden är att den kan leda till förbättrade möjligheterna att ta miljömässigt fördelaktiga beslut vid val av energilösningar. Beslut som, i både tid och rum, tar bättre hänsyn till de miljömässiga konsekvenser av dessa val, än vad som många traditionella metoder för beräkning

av byggnaders miljöpåverkan resulterar i. Metoden studerar miljöeffekterna av att minska byggnadens energianvändning, byte energislag och att flytta energianvändning i tiden. Metoden syftar således till att kunna ge en bättre förståelse för de miljömässiga konsekvenserna av förändringar i en byggnads energianvändning, och praktiskt kunna användas för analys av miljökonsekvenser och åtgärdsval i bygg- och renoveringsprojekt.

Etapp 2 av projektet fokuserar på att:

- Vidareutveckla till en mer sammanhållen metod.
- Ta fram nya typer av fallstudier för att testa och exemplifiera metodens användbarhet.
- Vidareutveckla angreppssätt för miljövärdering av el och ta fram kvantitativa scenarier.
- Utveckla metod för fjärrkyla.
- Uppdatera miljövärdering av värme från avfall.
- Utredda inkludering av andra miljöaspekter än klimataspekter.

I etapp 2 har också ett arbete inletts med att utreda möjligheterna att implementera metoden i beräkningsverktyg (energisimuleringsprogram eller liknande) för att möjliggöra en enklare och bredare användning av metoden. Arbetet inkluderar även en, i jämförelse med etapp 1, utökad litteraturstudie kring liknande metoder och angreppssätt.

1.2 KONSEKVENSANALYS

Projektet fokuserar på att utveckla en metod som används för att beräkna miljökonsekvenser av att genomföra olika energiåtgärder i en byggnad. Metoden bygger på *konsekvensanalys* för att kunna ge relevant information om miljöeffekterna av ett specifikt beslut/åtgärdsval. Perspektivet ska inte förväxlas med *bokföringsanalys* som syftar till att fördela emissioner och/eller resursanvändning mellan olika system, men har mindre relevans när konsekvenser av ett val ska analyseras.

I en konsekvensanalys studeras effekter av att något förändras i ett system. I den här utvecklade metoden studeras vilka effekter som uppstår i energisystemet för olika val av energilösningar. Dessa effekter varierar beroende på vilken tidshorisont som studeras. Inom konsekvensanalysen brukar effekter delas in i kort sikt och lång sikt. Energilösningar har en lång livslängd vilket gör att den kommer påverka systemet på både kort – och lång sikt. Vi skiljer på drift- och byggmarginal. Driftmarginalen studerar vilka tekniker i det befintliga energisystemet som kommer att ändra sin produktion utifrån energilösningens energiförbrukning. Byggmarginalen studera vilka tekniker som byggs eller rivs på grund av förändringar under en längre tid.

Bokföringsanalys är ett annat sätt att miljövärdera energi än konsekvensanalysen. I en bokföringsanalys kartläggs resursanvändning och emissioner för ett system som hör till en aktör eller en funktion. Resultatet blir en miljöprofil för aktören eller funktionen som anger hur mycket miljöbelastning de ansvarar för. Bokföring är inte fokus för denna studie eftersom det inte avspeglar förväntade effekter av en

förändrad energianvändning, exempelvis orsakad av olika typer av energilösningar på byggnader. Bokföring tar normalt inte hänsyn till driftordning mellan olika anläggningar eller vid vilken tidpunkt de körs. Att använda bokföringsdata som underlag för analys av miljökonsekvenser av olika byggnadslösningar är vanligt förekommande, men riskerar att leda till felaktiga slutsatser.

Mer information om konsekvensanalys respektive bokföringsanalys ges i Bilaga B.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Projektet och metoden fångar inte alla aspekter av en byggnads miljöpåverkan. Bland annat tar metoden inte hänsyn till energianvändningen i byggfasen, alltså energin som krävs för att bygga eller renovera byggnaden eller de material som ingår i byggnaden. Istället fokuseras på energianvändningen under driften av byggnaden.

Metoden ska visa på effekter av olika energilösningar i byggnader som i många fall har en lång livslängd. Vi har i miljövärderingarna (framför allt kopplat till miljövärderingen av el) ansatt en tidsperiod på 20 år, motsvarande tidsperioden ca 2020-2040. Olika typer av byggnadslösningar kan självfallet ha både kortare och också betydligt längre livslängd än 20 år vilket man bör ha i åtanke vid tolkningen av resultaten.

Huvudfokus är att ta fram en metod samt ge förslag på vilken indata och vilka framtidsbeskrivningar som kan användas. I rapporten visas några exempel på resultat som kan erhållas genom att använda metoden. Dessa exempel är till för att visa på effekter av olika antaganden och ska inte ses som några generella sanningar. Scenarier för energisystemets framtida utveckling är osäkra, och uppdateringar och förbättringar av metoder och indata och därmed resultat är något som man måste räkna med.

Metodiken som beskrivs i denna rapport kan användas för att analysera många olika resurs- och miljöaspekter. I rapporten har vi valt att kvantifiera klimatpåverkan som exempel. Det är dock fullt möjligt att även analysera andra aspekter såsom resurseffektivitet, övergödning, försurning och biologisk mångfald. För att göra detta behövs tillgång till data såsom emissionsfaktorer och primärenergifaktorer, vilket beskrivs vidare i rapporten.

1.4 RAPPORTENS UPPLÄGG

Huvudrapporten, kapitel 2-9, beskriver och diskuterar den föreslagna metoden, dess utveckling, metodval och kvantitativa exempel. Rapportens bilagedel presenterar kompletterande information samt utredningar som gjorts under projektets gång vilka indirekt kopplar till metodutvecklingen.

I kapitel 2 ges en övergripande beskrivning av metoden och dess olika delar. I kapitel 3 beskrivs hur byggnadens energilösningar ska jämföras med en referensbyggnad. I detta kapitel presenteras även fallstudieexempel (byggnad och byggnadsåtgärder) som i senare del av rapporten miljövärderas med hjälp av

metoden. I kapitel 4, 5 och 6 ges en mer ingående beskrivning över hur miljövärderingen för fjärrvärme/fjärrkyla, el, respektive bränslen tas fram. Exempel på resultat för valda fallstudieexempel finns i kapitel 7. I kapitel 8 beskrivs hur andra miljöparametrar kan inkluderas i metoden och diskuterar möjligheter att introducera index för flexibilitet kopplat till byggnadslösningar. I kapitel 9 diskuteras resultat och metodval och i kapitel 10 ges slutsatser.

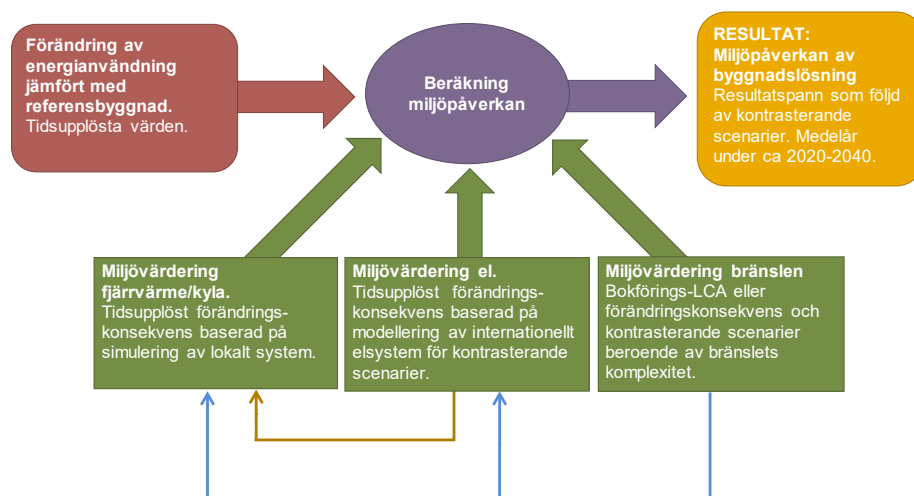
I Bilaga A finns en ordlista med förklaringar på termer som används i rapporten. Bilaga B beskriver skillnaderna mellan bokförings- och konsekvensanalys. Bilaga C redovisar emissionsfaktorer för CO₂ekvivalenter (CO_{2e}). Bilaga D redovisar en litteraturgenomgång. Bilaga E presenterar ett index för byggnadslösningars bidrag till flexibilitet i energisystemet, som har utretts inom projektet men som valdes bort från den huvudsakliga metoden. Bilaga F redovisar arbete kopplat till implementering av metoden i befintliga system/verktyg. Bilaga G ger kompletterande information om indatabehov och beräkningssteg kopplat till miljövärdering av fjärrvärme och fjärrkyla.

2 Översikt av Tidstegsmetoden

I detta projekt vidareutvecklas en metodik för värdering av byggnaders energianvändning ur resurs- och miljösynpunkt. Vi benämner metoden "Tidstegsmetoden" då en av de aspekter som särskiljer metoden är att den hanterar att byggnaders energirelaterade miljöpåverkan i många fall skiljer över årets säsonger, dagar och timmar och också kan förändras från nu till framtida år.

Tidstegsmetoden utgör en metod för att analysera miljökonsekvenserna av byggnaders energilösningar. Metoden ska visa på effekterna av olika val och ge underlag för planering av byggnaders energilösningar. Därför är utgångspunkten att analysera konsekvenser av förändrad energianvändning, alltså en jämförelse av olika energilösningar mot en referens. I miljövärderingstermer brukar detta kallas konsekvensanalys (i kontrast till bokföringsanalys). Energilösningar kan vara både lösningar för förbättrad energieffektivitet och för produktion av förnyelsebar el, värme eller kyla. Med metoden jämförs energiåtgärder för en byggnad mot en referensbyggnad utan åtgärderna installerade (för nybyggnation kan olika alternativ ställas mot varandra utan behov av att definiera en referensbyggnad).

TIDSUPPLÖST - FRAMÅTBlickande - KONSEKVENSPERSPEKTIV



Figur 2.1 Överblick av de olika principiella delarna av beräkningsgång. Utmärkande för metoden är dess fokus på tidsupplösning, framåtblickande och konsekvensperspektiv.

Inom många standarder och klassificeringar, t.ex. BREEAM (BREEAM-SE, 2013) och LEED (USGBC, 2013) analyseras byggnaders energiprestanda på årsbasis. Det innebär att energibesparande åtgärder och egenproducerad värme och el räknas av på årsbasis och miljövärderas lika oavsett när under året som användningen påverkas. Detta trots att exempelvis värmeproduktionen i svenska fjärrvärmesystem varierar över året, och på grund av klimatet är värmeunderlaget som lägst på sommaren och som högst på vintern. Produktionen över året är därmed kopplad till olika miljöpåverkan. Vid nybyggnation eller byte av energi-

lösning i befintlig byggnad förändras värmebehovet för fjärrvärmeproducenten vilket får konsekvenser för produktionen.

I Tidstegsmetoden har tiden ett framstående fokus. Metoden hanterar två olika tidsdimensioner. Det ena kallar vi dynamik och avser utvecklingen av el- och fjärrvärmesystemen över flera år – från nu och ca 20 år framåt i tiden. Det andra tidsbegreppet är tidsupplösning, vilket avser variationer över ett år, alltså över säsonger, månader och dygn.

Metoden består i principiellt av fem olika delar (Figur 2.1):

- Beräkning av tidsupplöst skillnad i byggnadens energianvändning från studerade energiåtgärder (kapitel 3). Byggnads- och åtgärdsspecifika data tas förslagsvis fram genom energiberäkningar med hjälp av energisimuleringsprogramvara.
- Bestämning av tidsupplösta miljövärden för en framtida förändrad användning av fjärrvärme och/eller fjärrkyla (kapitel 4). Aktiviten resulterar i faktorer (t.ex. emissionsfaktorer, det vill säga utsläpp per energienhet) för den förändrade miljöpåverkan som blir konsekvensen av en förändrad produktion i fjärrvärmesystem respektive fjärrkylesystem. Lokal data för det aktuella systemet bör användas.
- Bestämning av tidsupplösta miljövärden för en förändrad användning av el (kapitel 5). Aktiviten resulterar i faktorer (t.ex. emissionsfaktorer, det vill säga utsläpp per energienhet) för den förändrade miljöpåverkan som blir konsekvensen av en förändrad produktion i elsystemet. Givet att systemet kan förväntas förändras under kommande år används ett tydligt framåtblickande konsekvensperspektiv.
- Bestämning av miljövärden för bränslen (kapitel 6). Aktiviteten innebär i första hand sammanställning av miljödata från litteratur. I jämförelse med ovan nämnda energibärare (fjärrvärme, fjärrkyla och el) är komplexiteten för de flesta bränslen i detta sammanhang ofta låg. För avfallsförbränning finns det emellertid anledning att ansätta ett konsekvensperspektiv vid en förändrad bränsleanvändning, då en förändring kan ge upphov till olika miljökonsekvenser beroende på hur den alternativa hanteringen ser ut.
- Den sista delen i Tidstegsmetoden innebär att beräkna miljöpåverkan av de aktuella energiåtgärderna baserat på de beräknade förändringarna i energianvändning och fastställda miljövärdesfaktorerna för fjärrvärme, fjärrkyla, el och/eller bränslen (kapitel 7). Detta görs för olika scenarier för att undersöka robustheten i energilösningarnas miljöpåverkan utifrån olika förutsättningar och framtida utveckling.

Tidstegsmetoden är en metod som kan appliceras för ett flertal miljöaspekter (t.ex. växthusgasutsläpp, luftföroreningar och resursanvändning). I de kvantitativa exempel som presenteras i rapporten fokuseras emellertid på utsläpp av växthusgaser (utsläpp av CO_{2e}). Detta är ett resultat av den dialog med företrädare för energi- och byggbranschen som fördes under projektets gång där kvantitativa exempel kring detta ansågs av mest relevans och intresse. Hur andra miljöaspekter kan diskuteras emellertid också i rapporten (kapitel 8).

De kvantitativa exemplen som presenteras är avsedda att vara relevanta men har inte ambitionen att vara heltäckande. De bör påpekas att exemplen är fallspecifika och ett resultat av specifika förutsättningar och antaganden. Beräknade värden för en (typ av) byggnad är inte nödvändigtvis representativa för en annan (typ av) byggnad och data genererade för ett visst fjärrvärmenät är inte representativt för ett annat. Vidare kan andra förutsättningar och antaganden kring t.ex. presenterade elscenarier generera andra resultat. Detta är ofrånkomligt i framåtblickande studier där ett stort antal parametrar är okända.

3 Byggnadens energianvändning

En förutsättning för att analysera miljöpåverkan av potentiella energiåtgärder i en byggnad är att beräkna deras påverkan på byggnadens effekt- och energibehov. En energiåtgärd kan innebära olika saker, t ex en energieffektiviseringsåtgärd eller installation av värmepanna eller solceller. I detta kapitel beskrivs ett tillvägagångssätt, som kan användas för nybyggnation såväl som för renoveringsprojekt. Tillvägagångssättet exemplifieras med beräkningsresultat för ett specifikt renoveringsprojekt och ett antal olika energiåtgärder.

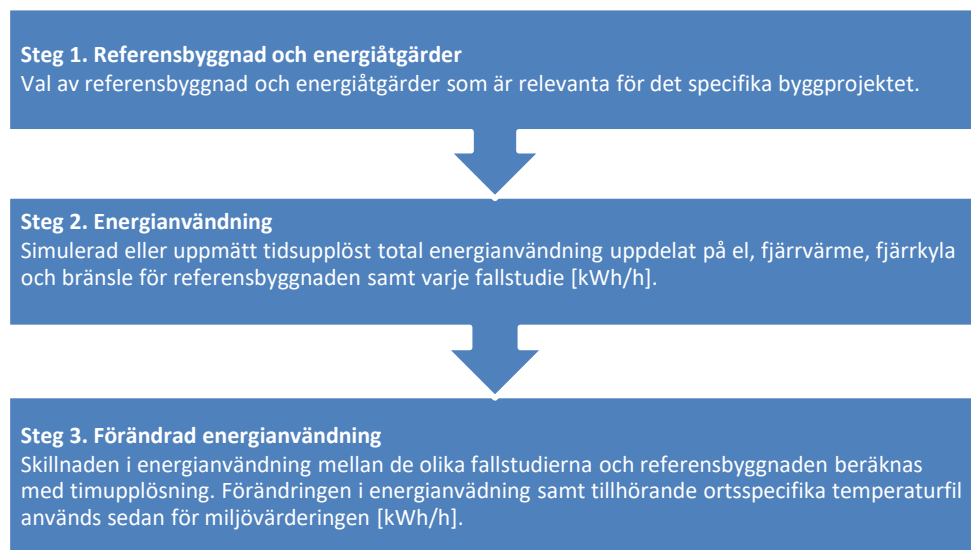
3.1 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT

Tillvägagångssättet för att beräkna byggnadens energianvändning bygger på metodiken som utvecklades i etapp 1 av projektet (Gode et al., 2015). Den generella beräkningsgången presenteras i Figur 3.1.

Beräkningarna inleds med att byggnaden som skall studeras samt vilka olika energiåtgärder som ska jämföras definieras. Byggnaden i sitt utförande utan de aktuella åtgärderna benämns här referensbyggnad. Beroende av typ av projekt, kan referensbyggnaden både vara en existerande byggnad, en byggnad i projekteringsstadium eller en byggnad med branschnormalt valt utförande.

För miljövärderingen krävs data i form av total energianvändning för byggnaden uppdelat på energibärare. Vi rekommenderar att ett simuleringsprogram med möjlighet till timupplösning används. Energianvändningen simuleras för referensbyggnaden såväl som för byggnaden med de aktuella energiåtgärderna. Den förändrade energianvändningen beräknas därefter som skillnaden mellan referensbyggnaden och byggnaden med respektive energiåtgärd på timbasis över året.

Vid energisimulering av byggnader används ortsspecifika klimatfiler (från t.ex. SMHI) för att beräkna vilken effekt som måste tillföras byggnaden i olika städer. Vid miljövärdering av byggnadens användning av fjärrvärme och fjärrkyla finns i metoden en koppling till temperatur (se också kapitel 4). Det är därför viktigt att se till att samma temperaturdata används vid energisimulering som vid miljövärderingen av energianvändning.



Figur 3.1. Tillvägagångssätt för att ta fram olika energiåtgärders påverkan på en byggnads energianvändning. Beräkningarna görs på timbasis.

3.2 EXEMPEL PÅ BERÄKNING AV BYGGNADENS ENERGIANVÄNDNING

I projektet har vi valt att testa metoden för ett renoveringsprojekt av ett flerbostadshus byggt inom ramen för miljonprogrammet. Avsikten är att visa hur metoden kan användas och exemplifiera hur olika energiåtgärder påverkar en byggnads energianvändning och effektbehov över året. Andra typer av såväl byggnader som energiåtgärder är emellertid möjliga att analysera med samma beräkningsgång (för fler exempel, se (Gode et al., 2015)).

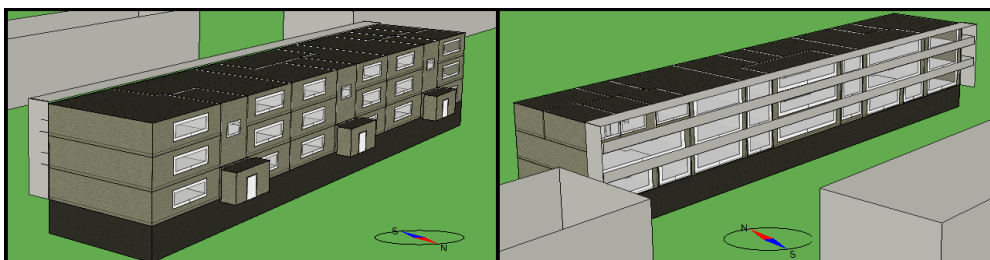
3.2.1 Referensbyggnaden

Referensbyggnaden är ett flerfamiljshus i ett bostadsområde i södra Sverige. Byggnadens timupplösta energibehov är här simulerat i energismuleringsprogrammet IDA ICE (Equa Solutions AB, 2016) och är validerat mot uppmätt energianvändning. Övergripande information om byggnaden ges i Tabell 3.1 nedan.

Tabell 3.1: Grundläggande information om referensbyggnaden

Uppgifter om flerfamiljshuset som valts som referensbyggnad	
Byggår	1969
Energi för uppvärmning	80 kWh/m ² A _{temp}
Energi för tappvarmvatten	30 kWh/m ² A _{temp}
Fastighetsel	11 kWh/m ² A _{temp}
A _{temp}	2525 m ²
U _{medel}	0,73 W/m ² ,K
Allmänt om byggnaden	Trevånings lamellhus med stomme i betong, bärande tvärgående väggar och längsgående utfackningsväggar. Balkonger längs hela södersidan. Frånluftsventilation med luftintag vid radiatorer.

Flerfamiljshuset består av tre våningsplan med hyresrätter samt ett källarplan och ligger i ett bostadsområde med ett 20-tal liknande byggnader. Omkringliggande byggnader har simulerats som skuggande skärmar. Området byggdes inom miljonprogrammet och har ett ganska eftersatt underhåll. En visualisering av byggnadsmodellen visas i Figur 3.2.



Figur 3.2: Visualisering över energisimuleringsmodell (framtagen i IDA ICE).

3.2.2 Energiåtgärder

Energiåtgärderna som valts inbegriper både tekniska installationer och förändring av byggnadens klimatskärm. Åtgärderna och åtgärdspaketen har under projektets gång diskuterats och tagits fram i samråd med representanter från byggbranschen inom projektets referensgrupp. Åtgärderna avser att representera tänkbara och relevanta val vid renovering av ett flerfamiljshus i miljonprogrammet. De är dock inte heltäckande och även andra åtgärder som inte här tas som exempel kan vara relevanta i sammanhanget. Tabell 3.2 är en sammanställning över hur de inkluderade åtgärderna har kombinerats i åtgärdspaket vilka sedan simulerats. Frånluftsvärmepump (FVP) används i exemplet både för rumsuppvärmning och för varmvatten.

Tabell 3.2: Översikt över hur olika energieffektiviseringsåtgärder kombinerats i åtgärdspaket. Åtgärdspaketen (FVP, FTX, KLI, FVP+KLI, FTX+KLI) energiberäknas och miljövärderas.

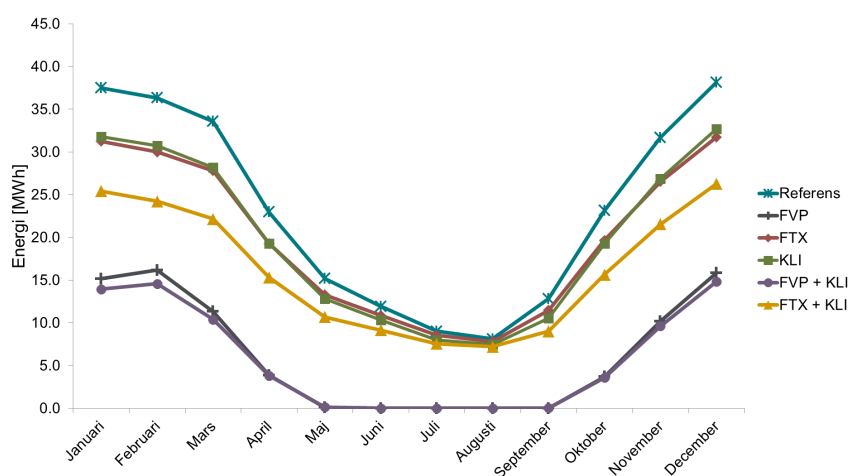
Åtgärder	FVP	FTX	KLI	FVP + KLI	FTX + KLI
Frånluftsvärmepump (FVP)	x			x	
Från- och tilluft med värmeåtervinning (FTX)		x			x
Klimatskåtsåtgärder: fönsterbyte och tilläggsisolering av vindsbjälklag (KLI)			x	x	x

3.2.3 Energiberäkningar

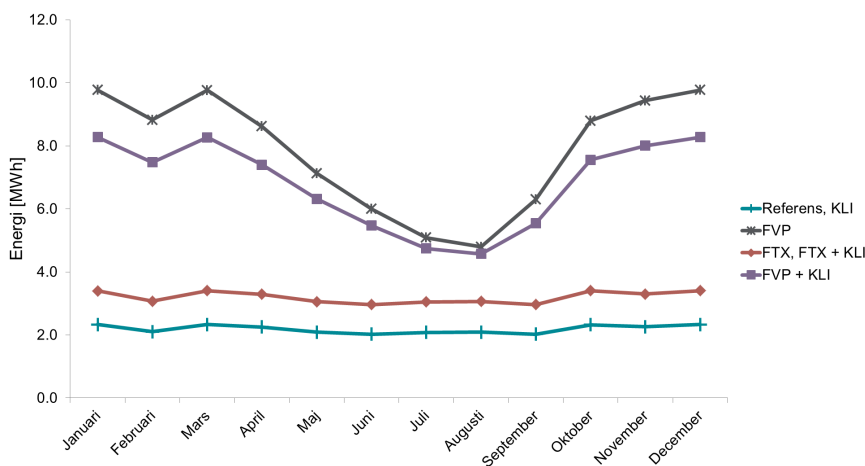
Det beräknade energibehovet för referensbyggnaden och de olika energiåtgärdspaketen (enligt Tabell 3.2) presenteras uppdelat på energibärare i Figur 3.3, 3.4 och 3.5. Beräkningarna görs på timbasis, men presenteras av grafiska skäl här på månads- och årsbasis. I Figur 3.3 och 3.4 visas resultaten som månadsmedelvärden för fjärrvärme respektive fastighetsel. I Figur 3.5 visas resultatet som årsvärden. I de fortsatta miljöpåverkansberäkningarna används resultat på timbasis.

Energiberäkningarna visar att alla studerade åtgärder ger en minskad fjärrvärmeanvändning. Störst fjärrvärmebesparing sker för alla åtgärder under vinterhalvåret (Figur 3.3). Frånluftsvärmepumpslösningen (FVP) ger även en förhållandevis stor minskning under sommaren. Avseendeanvändning av fastighetsel ger klimatskalsåtgärderna ingen skillnad mot referensbyggnaden, medan FTX och särskilt FVP ger en ökning (Figur 3.4).

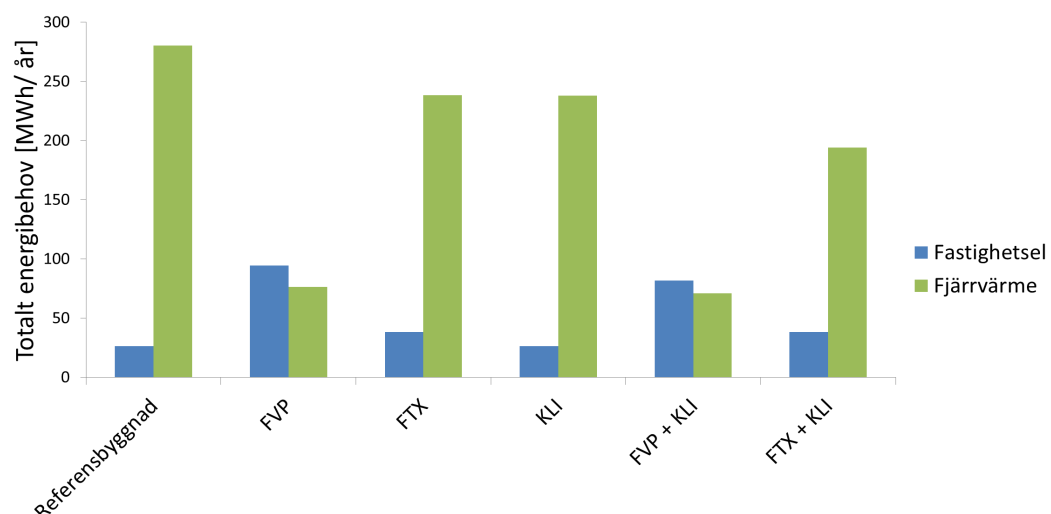
I de fortsatta miljöpåverkansberäkningarna (kapitel 7) är det den förändrade energianvändningen, d.v.s. differensen i energibehov mellan referensbyggnaden och de energiåtgärderna, som används.



Figur 3.3: Beräknat fjärrvärmebehov för referensbyggnaden och respektive åtgärds paket för ett normalår. Resultaten presenteras av grafiska skäl i figuren som månadsvärden, men beräkningarna sker på timbasis. (FVP, frånluftsvärmepump; FTX, från- och tilluft med värmeåtervinning; KLI, klimatskalsåtgärder)



Figur 3.4: Beräknat fastighetselbehov för referensbyggnaden och respektive åtgärds paket för ett normalår. Resultaten presenteras av grafiska skäl i figuren som månadsvärden, men beräkningarna sker på timbasis. (FVP, frånluftsvärmepump; FTX, från- och tilluft med värmeåtervinning; KLI, klimatskalsåtgärder)



Figur 3.5: Total årlig användning av fastighetsel och fjärrvärme för referensbyggnad och respektive åtgärds paket för ett normalår. (FVP, frånluftsvärmepump; FTX, från- och tilluft med värmeåtervinning; KLI, klimatskåtsåtgärder)

4 Miljövärdering av fjärrvärme och fjärrkyla

Miljövärdering av fjärrvärme och fjärrkyla är en av nyckeldelarna i metoden som togs fram i projektets första etapp. Vi har under projektets gång fått bekräftat att en tidsupplöst miljövärdering av dessa system är efterfrågat av såväl byggbranschen som energibranschen, och en viktig aspekt för en korrekt värdering av miljökonsekvenserna av en förändrad efterfrågan.

4.1 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT

Under projektets första etapp togs ett tillvägagångssätt fram för att bestämma konsekvensen av en förändrad efterfrågan i fjärrvärmesystem på ett tidsupplöst sätt (Gode et al., 2015). I denna etapp har vi förbättrat kopplingen till elanalysen (se också kapitel 5) samt även testat metoden för fjärrkylanät. Huvudsakligen har dock den huvudsakliga metoden från etapp 1 visat sig gångbar och inga betydande förändringar har därför gjorts.

Kortfattat syftar metoden till att beskriva ett systems marginalproduktion med hög tidsupplösning. Den tidsupplösta marginalproduktionen görs sedan om till en "marginalmix" för olika utomhustemperaturer. Grunden till att koppla till utomhustemperatur är att produktionen av fjärrvärme och fjärrkyla (effektbehovet) är mer korrelerad till temperatur än tid (t.ex. timma på året).

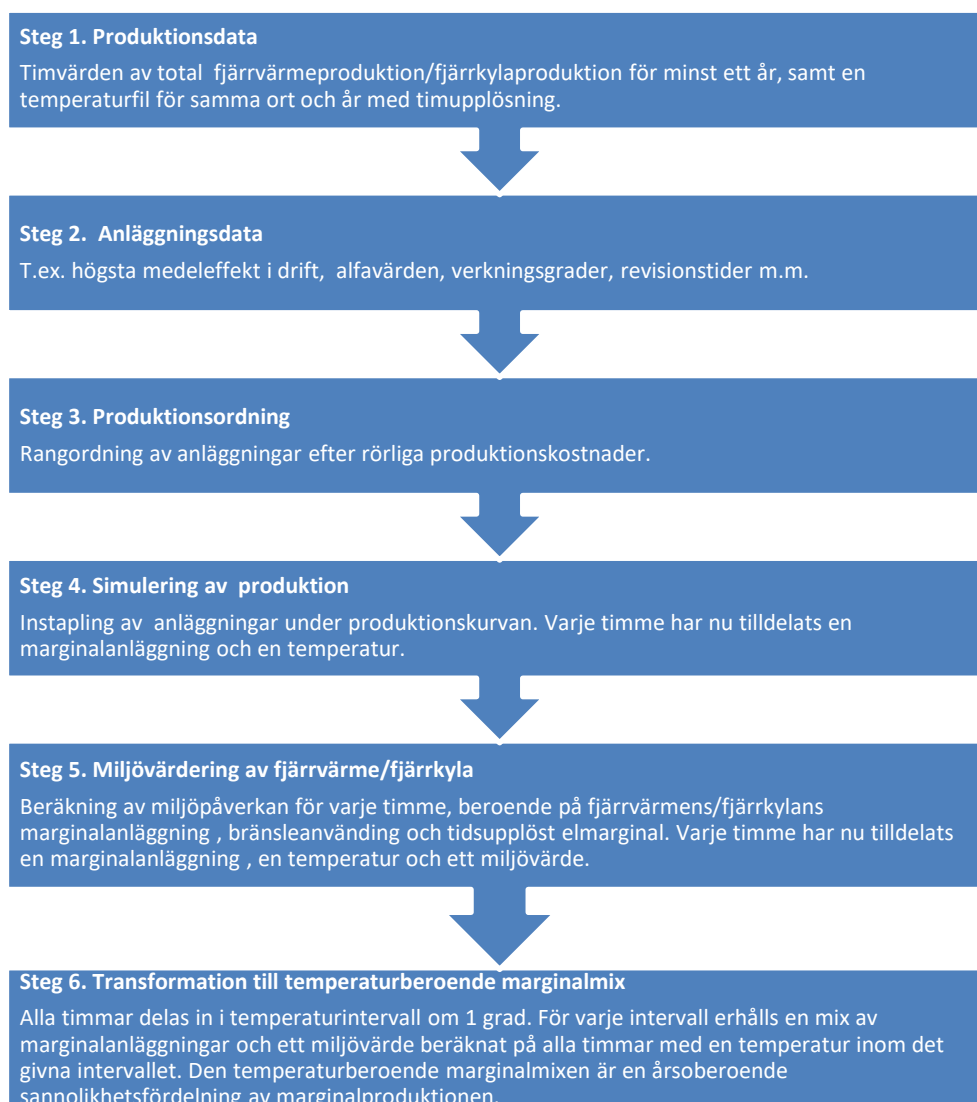
Stegen i metoden, som alltså kan användas på såväl fjärrvärme som fjärrkyla, presenteras i Figur 4.1 (se även Bilaga G). Steg 1 till 3 ger en systembeskrivning, medan steg 4 till 6 innebär systemmodellering och miljövärdering (Figur 4.1).

Metoden utgår ifrån att först analysera systemet och ta reda på vilken produktionsanläggning som ligger på marginalen för varje tidssteg. I projektet har vi valt att använda timupplösning. Marginalproduktionen tas fram genom att för varje timme se vad den totala produktionen i nätet är och vilka produktionsanläggningar som kan leverera effekt för att tillgodose behovet.

Den anläggning som hamnar högst upp i körordning, d.v.s. har högst rörlig kostnad den aktuella timmen, antas vara marginalproduktion för den timmen. Produktionskurvan bör här avse driften av anläggningarna, innan eventuella ackumulatortankar, och inte själva fjärrvärmelasten. Detta för att ge en mer rättvisande bild av hur marginalproduktionen varierar. Fjärrvärmebehovet kan variera ganska mycket under dygnet, p.g.a. exempelvis varmvattenanvändning, men man strävar efter att köra anläggningarna så jämnt som möjligt. Om det finns ackumulatortankar i systemet så kan fjärrvärmeproduktionen köra relativt jämnt även om lastprofilen varierar mycket över dygnet.

När varje timme under tidsperioden som analyseras har tilldelats en marginalproduktionsanläggning så kan ett miljövärde beräknas. Detta görs genom att ta hänsyn till miljövärden för bränslen (se också kapitel 6) och verkningsgrader för värmeverk, kraftvärmeverk, värmepumpar och kylmaskiner samt miljövärden för tidsupplöst marginalet (se också kapitel 5).

Transformationen från timme till temperatur sker genom att addera alla timmar inom ett visst temperaturintervall och beräkna fördelningen mellan olika marginalanläggningar och det totala miljövärdet för det givna temperaturintervallet (medelvärde av alla timmar inom intervallet). Här är det noga med geografisk position och tidsperiod för produktionen eftersom varje produktionstimme kommer att korreleras till den specifika utomhustemperaturen för samma timme. Den marginalmix som fås ut per temperaturintervall kan tolkas som en sannolikhetsfördelning för hur vanligt det kan antas vara att en viss anläggning ligger som marginalproduktion vid en viss temperatur.



Figur 4.1. Beskrivning av metod för att identifiera konsekvenser i ett fjärrvärme- eller fjärrkylesystem med timupplösning. Stegen beskrivs också ytterligare i Bilaga G.

I ovanstående metod simuleras en statisk körordning för systemets anläggningar. Nyinvesteringar i systemet optimeras inte som en följd av förändringar i systemets efterfrågan, utan olika system (med olika anläggningar eller nyinvesteringar) får, i

de fall det anses relevant, bestämmas utanför (exogent) från modellen. Detta angreppssätt har fördelen att förändringskonsekvensen är relativt enkel att ta fram, d.v.s. den utgörs av den produktionsanläggning som har högst rörlig produktionskostnad för varje tidssteg i dagens, eller ett antaget framtida, system.

Framtagandet av marginaldata kan naturligtvis förbättras ytterligare om det lokala energibolaget, i ett område där en byggnadslösning skall analyseras, själva gör analysen av marginalproduktion och ger som indata till Tidstegsmetoden. Trots det statiska angreppssättet, bör marginaldata som tas fram för ett lokalt nät i möjligaste mån inkludera framtida förändringar av fjärrvärmesystemet, som t.ex. planerade investeringar i nya anläggningar. Detta för att få ett framåtblickande perspektiv som är relevant för de byggnadsenergiåtgärder vars miljöpåverkan analyseras.

4.2 KVANTIFIERADE EXEMPEL – FJÄRRVÄRME- OCH FJÄRRKYLENÄT

För att exemplifiera hur olika typer av fjärrvärme- och fjärrkylennät kan ge olika utfall på en energiåtgärds miljöpåverkan så baserar vi våra fallstudier på olika typnät. I projektet har tre exempelnett för fjärrvärme tagits fram: ett stort nät (med kraftvärme), ett mellanstort nät (med kraftvärme) och litet nät (utan kraftvärme). Det lilla fjärrvärmenätet är helt biobaserat och de två större näten har inslag av fossila bränslen samt en stor andel avfallsförbränning. Exempelen är framtagna med inspiration av Stockholms, Linköpings respektive Kungsbackas fjärrvärmesystem. Det bör påpekas att ytterligare verk emellertid har tillkommit i dessa nät i jämförelse med den situation som har simulerats och resultaten är därför inte helt representativa för dagens situation. Förutom de tre fjärrvärmesystemen, exemplifieras metoden också för ett fjärrkylesystem.

Fjärrvärme- och fjärrkylesystemen presenteras på två sätt i kommande avsnitt, dels hur produktionen varierar över året samt vilka anläggningar som tillgodoser behovet och dels hur marginalproduktionen (marginalmixen) varierar med avseende på utomhustemperatur.

4.2.1 Stort fjärrvärmenät

Produktionen för vårt exempel av ett stort fjärrvärmesystem har simulerats i enlighet med metodstegen (Figur 4.1) och åskådliggörs i Figur 4.2. I figuren visas hur fjärrvärmeproduktionen varierar över året och hur olika produktionsanläggningar kommer in vid olika effektbehov och tider. Produktionen domineras av kraftvärme från avfall, fossila bränslen och biobränslen samt en stor andel värmepumpar.

Som framgår av Figur 4.2 varierar produktionen mycket över året, både över säsong och över kortare tidssteg. Detta är till stor del en ren konsekvens av värmebehovets temperaturberoende. Det finns också beteenderelaterade variationer, t.ex. dygnsvariationer med effekttoppar för tappvarmvattenbehov.

Som tidigare beskrivits delas marginalproduktionen i temperaturintervall. Genom transformationen från tid till temperatur görs ett slags normalårskorrigerig av fjärrvärmenätets marginalproduktion. Det är fördelaktigt om flera års (förslagsvis

minst två års) underlag finns tillgängligt för att få en representativ bild av den temperaturindelade marginalmixen.

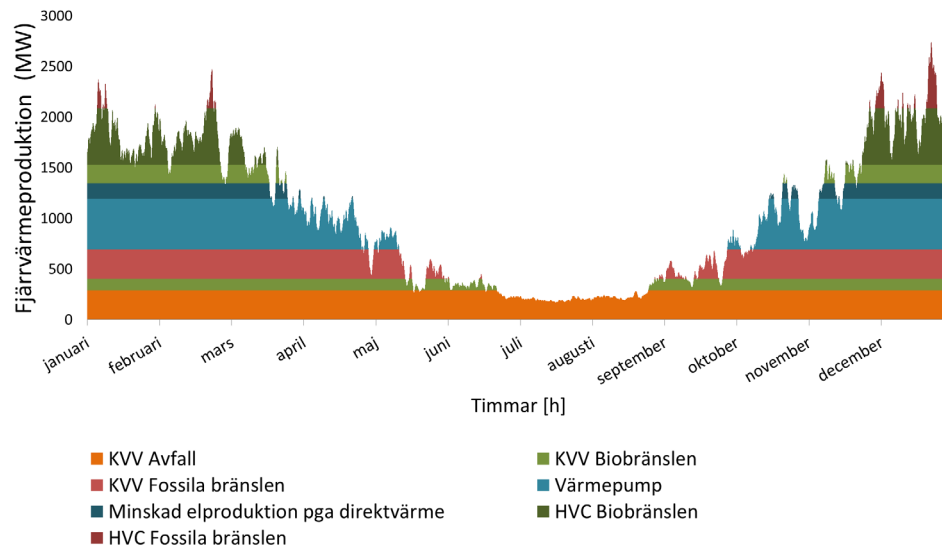
Figur 4.3 visar den resulterande temperaturindelade marginalmixen för det stora fjärrvärmenätet samt dess klimatpåverkan för kombinationen av tre olika elscenarier och tre olika avfallsscenarier. Underlag för elscenarier och avfallsscenarier beskrivs i avsnitt 5.2 respektive avsnitt 6.2. Marginalproduktionsmixen visualiseras som staplar, där en stapel representerar en sannolik produktionsmarginalmix för en viss utomhustemperatur. Produktionens miljövärden (klimatpåverkan), som är en följd av produktionsmarginalmixen, visualiseras som linjer (nedan kallat "emissionsvektor") som funktion av temperaturen.

I Figur 4.3 ses nio olika kombinationer av scenarier för kontrasterande miljövärden för el och avfall, vilka spänner upp ett utfallsrum av fjärrvärmens klimatpåverkan givet de antaganden som gjorts för dessa energibärare. Utfallet är specifikt för detta fjärrvärmenät och bland annat beroende av egenskaper som verkningsgrader och alfavärden för anläggningarna. Miljöpåverkan (emissionsvektorn) för fjärrvärmenätet beror dels av vilken anläggning som körs på marginalen och hur el och olika bränslen miljövärderas. För låga temperaturer kan det noteras att emissionsvektorn sammanfaller för alla scenariokombinationer, vilket beror på att mixen av anläggningar (hetvattenpanna fossilt/biobränsle) inte påverkas av värderingen av el och avfall.

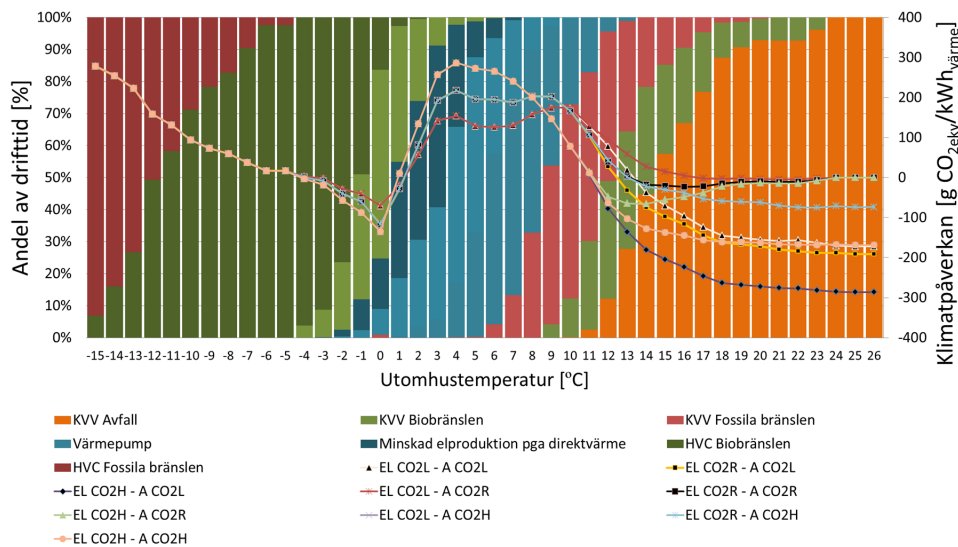
4.2.2 Medelstort fjärrvärmenät

I Figur 4.4 åskådliggörs hur fjärrvärmeproduktionen över året för vårt exempel på ett medelstort fjärrvärmenät. Produktionen domineras av kraftvärme från avfall, biobränslen och fossila bränslen. I Figur 4.5 ses den resulterande temperaturindelade marginalmixen samt dess klimatpåverkan för kombinationen av tre olika elscenarier och tre olika avfallsscenarier (för underlag för elscenarier och avfallsscenarier, avsnitt 5.2 respektive 6.2).

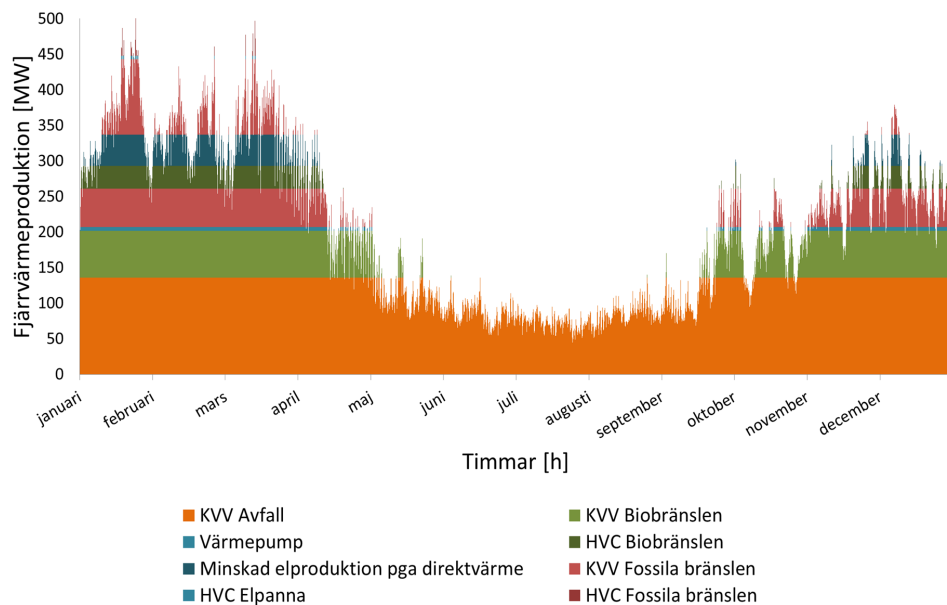
Till skillnad från det stora fjärrvärmenätet (Figur 4.3) så sammanfaller aldrig alla emissionsfaktorer för det medelstora nätet (Figur 4.5). Detta beror på att mixen av anläggningar är el- eller avfallsberoende under hela temperaturintervallet. I grafen kan ses att vid en utomhustemperatur på 8 °C, när avfallskraftvärme kommer in så förgrenar sig emissionsvektorerna från tre till nio, eftersom miljövärderingen av avfall ger upphov till ytterligare osäkerheter och ett större utfallsrum.



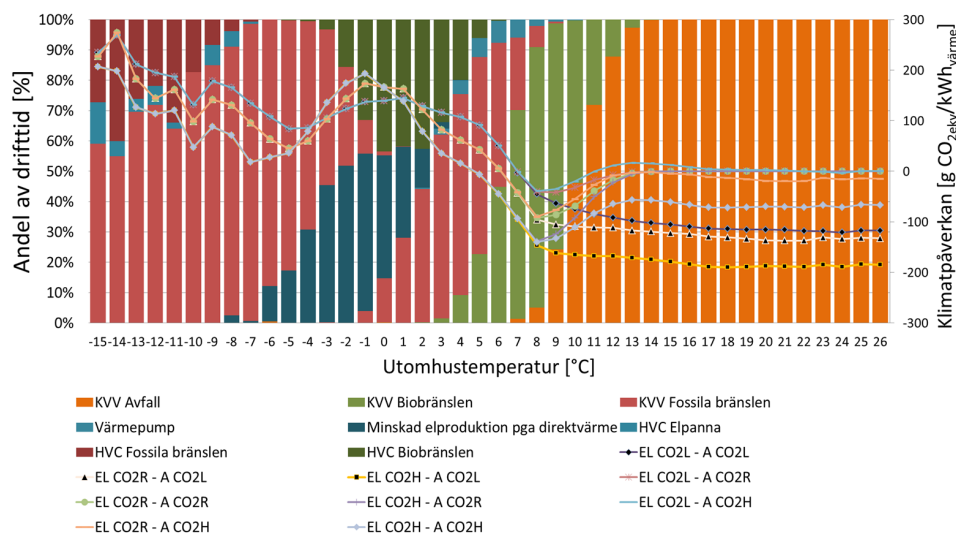
Figur 4.2: Simulerad fjärrvärmeproduktion (8760 timmar) för stort typnät enligt metodsteg 1-4 i Figur 4.1. (KVV, kraftvärme; HVC, hetvattencentral)



Figur 4.3: Temperaturindeldad marginalmix (vänster Y-axel) för stort nät samt fjärrvärmenätets emissionsvektor (höger Y-axel) för tre elscenarier och tre avfallsscenarier. Staplarna anger en fördelning för hur en trolig marginalmix ser ut vid en viss utomhustemperatur. Emissionsvektorn anger CO_{2e}-emissionerna som är kopplad till samma marginalmix och utomhustemperatur. Grafen är framtagen i enlighet med metodsteg 5-6 i Figur 4.1. Scenariobeteckningar: L – Låg, R – Referens, H – Hög, A – Avfall (för vidare scenaroförklaring, se avsnitt 5.2 och 6.2).



Figur 4.4: Simulerad fjärrvärmeproduktion (8760 timmar) för medelstort typnät enligt metodsteg 1-4 i Figur 4.1. (KVV, kraftvärme; HVC, hetvattencentral)



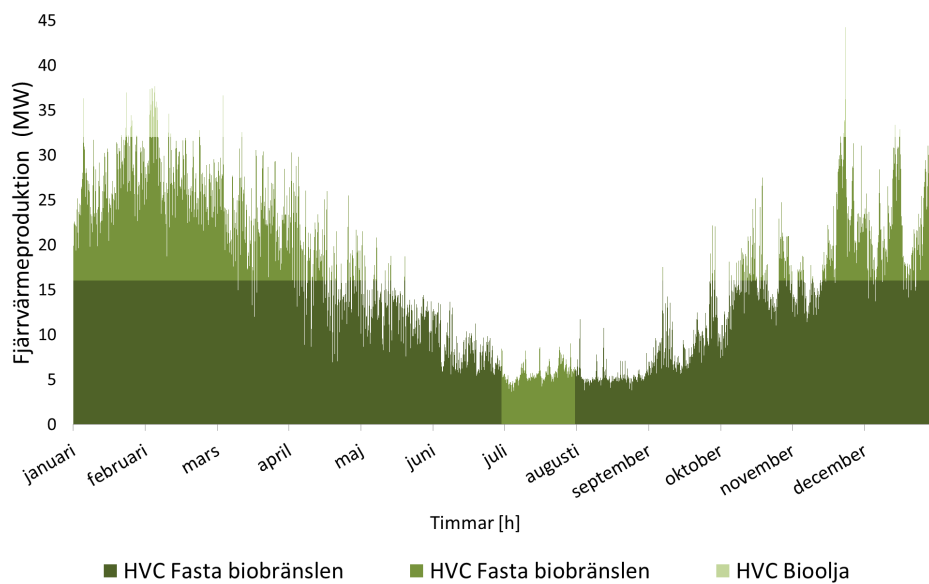
Figur 4.5: Temperaturindeldad marginalmix (vänster Y-axel) för medelstort nät samt fjärrvärmenätets emissionsvektor (höger Y-axel) för tre elscenarier och tre avfallsscenarier. Staplarna anger en fördelning för hur en trolig marginalmix ser ut vid en viss utomhustemperatur. Emissionsvektorn anger CO_{2e} -emissionerna som är kopplad till samma marginalmix och utomhustemperatur. Grafen är framtagen i enlighet med metodsteg 5-6 i Figur 4.1. Scenariobeteckningar: L – Låg, R – Referens, H – Hög, A – Avfall (för vidare scenaroförklaring, se avsnitt 5.2 och 6.2).

4.2.3 Litet fjärrvärmenät

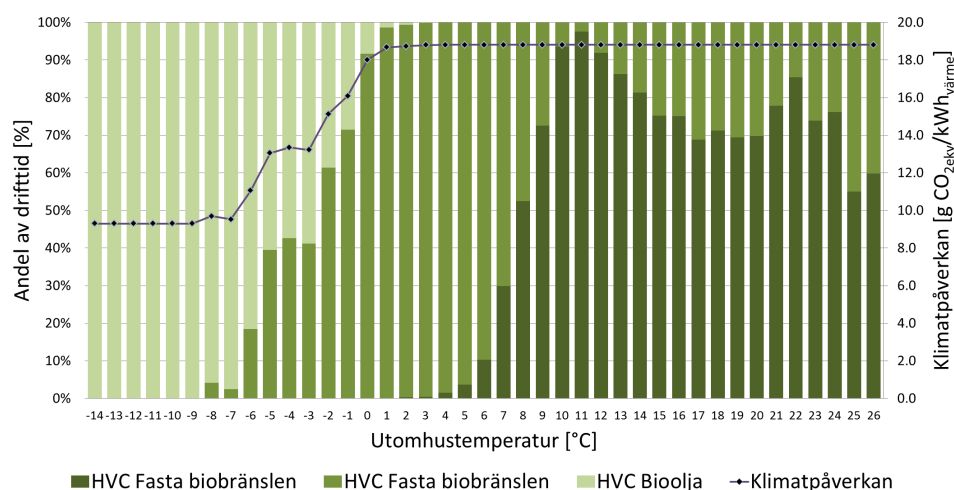
I Figur 4.6 åskådliggör fjärrvärmeproduktionen för vårt exempel på ett litet fjärrvärmesystem. Produktionen består uteslutande av biobaserade bränslen och det finns ingen kraftvärme eller värmepumpar i anläggningsparken, vilket gör det till ett mindre komplext nät att simulera och miljövärdera än de båda större typnäten.

I Figur 4.7 visualiseras den resulterande temperaturindelade marginalmixen samt dess klimatpåverkan. I detta nät finns varken kraftvärme, värmepumpar eller avfallsförbränning, vilket gör scenarioanalysen för el och avfall, som gjorts i de andra två näten inte behöver göras här.

I Figur 4.7 ses att emissionsvektorn visar lägre miljövärden för lägre temperaturer. Det är inte helt intuitivt men det betyder att det dyraste bränslet har lägre miljöpåverkan än det billigare.



Figur 4.6: Simulerad fjärrvärmeproduktion (8760 timmar) för litet typnät enligt metodsteg 1-4 i Figur 4.1. (HVC, hetvattencentral)



Figur 4.7: Temperaturindeldad marginalmix (vänster Y-axel) för litet nät samt fjärrvärmenätets emissionsvektor (höger Y-axel). Staplarna anger en fördelning för hur en trolig marginalmix ser ut vid en viss utomhustemperatur. Emissionsvektorn anger CO_{2e}-emissionerna som är kopplad till samma marginalmix och utomhustemperatur. Grafen är framtagen i enlighet med metodsteg 5-6 i Figur 4.1.

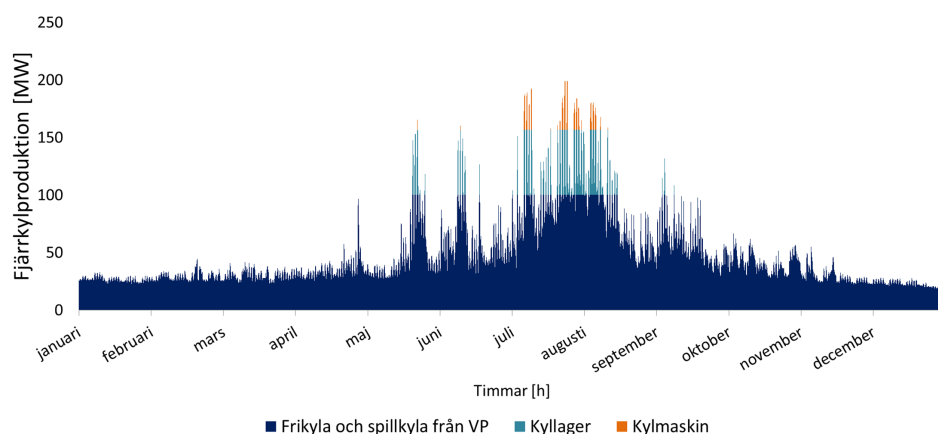
4.2.4 Fjärrkylenät

Samma metodik som används för fjärrvärme kan också användas för fjärrkyla. I enlighet med de beskrivna metodstegen (Figur 4.1) har produktionen för ett fjärrkylenät simulerats. Nätet kan betecknas som stort, då det baseras på data från Stockholms fjärrkylenät. I Figur 4.8 åskådliggörs hur produktionen av fjärrkyla varierar över året och hur olika produktionsanläggningar kommer in vid olika effektbehov och tider. Produktionen består till stor del av spillkyla från värmepumpar och frikyla från sjövattnet i kombination med kyllager samt en mindre del från kylmaskin på sensommaren.

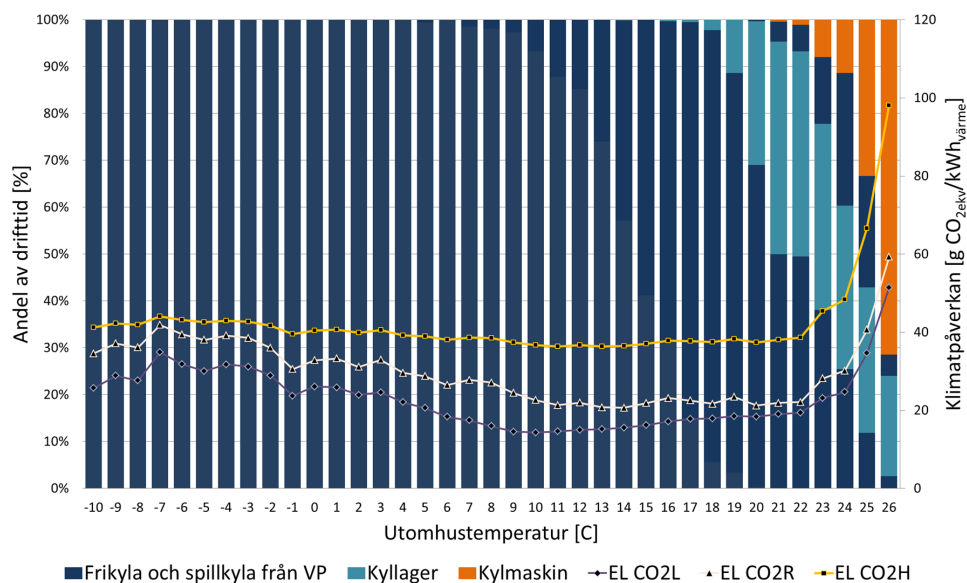
Liksom för fjärrvärme, så varierar produktionskurvan en hel del över året, både över säsong och över kortare tidssteg. I detta fall är emellertid produktionen som störst på sommaren och som lägst på vintern. Variationen är till stor del en konsekvens av kylbehovets temperaturberoende. Det finns också beteenderelaterade variationer, t.ex. dygnsvariationer med effekttoppar för exempelvis kylning av kontor.

I Figur 4.9 visas den resulterande temperaturindelade marginalmixen samt dess klimatpåverkan. På motsvarande sätt som för tidigare presenterade fjärrvärmesystem, ses i Figur 4.9 fjärrkylenätets marginalproduktionsmix som andel av drifttid för olika temperaturer (stapeldiagrammet) och dels produktionens miljövärden (vektorer) givet olika scenarier för el (avfallsscenarier visas inte här eftersom det inte finns något avfallsberoende i produktionen).

Även om spillkyla kan anses vara resursmässigt "gratis" (om all miljöpåverkan allokeras på fjärrvärmesystemet) så tillkommer behov av el för distribution, därav ett miljövärde över noll även för spillkyla. Miljövärdet stiger med temperaturen beroende av att produktionen blir mer elintensiv med kylmaskin vid topplast.



Figur 4.8: Simulerad fjärrkylproduktion (8760 timmar) enligt metodsteg 1-4 i Figur 4.1.



Figur 4.9: Temperaturindelat marginalmix (vänster Y-axel) för fjärrkylenät emissionsvektorer (höger Y-axel) för tre elscenarier. Staplarna anger en fördelning för hur en trolig marginalmix ser ut vid en viss utomhustemperatur. Emissionsvektorn anger CO_{2e}-emissionerna som är kopplad till samma marginalmix och utomhustemperatur. Grafen är framtagen i enlighet med metodsteg 5-6 i Figur 4.1. Scenariobeteckningar: L – Låg, H – Hög (för vidare scenaroförklaring, se avsnitt 5.2).

5 Miljövärdering av el

I detta kapitel beskriver vi tillvägagångssättet för miljövärdering av el. Metoden exemplifieras genom framtagande av kvantitativa scenarier för konsekvensen i elsystemet av en förändrad efterfrågan (nedan förenklat benämnt som "elmarginal"), vilka sedan används som del av analysen av miljövärdering av energiåtgärder i byggnader

5.1 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT

En energilösning kan påverka byggnadens efterfrågan på el. Detta påverkar elsystemets utsläpp av olika miljö- och klimatpåverkande ämnen och dess resursanvändning. Den marginalproduktion som påverkas i elsystemet är ur ett kortsiktigt perspektiv i regel den tillgängliga elproduktion som har högst rörlig produktionskostnad. Från ett långsiktigt dynamiskt perspektiv kan emellertid en förändrad elanvändning också påverka vilken typ av investeringar i ny produktion som sker i systemet. Vi skiljer därför på driftmarginal (en förändrad elanvändning påverkar driften av befintliga anläggningar) och byggmarginal (en förändrad elanvändning påverkar installerad kapacitet i systemet). Konsekvensen av en förändrad elanvändning kan i många fall vara komplex och en kombination av kort- och långsiktiga konsekvenser.

Inom projektet använder vi en långsiktig tidsperiod på 20 år (2020-2040). Detta för att hantera att många energiåtgärder i byggnader har en lång livslängd. Under denna tidshorisont är det troligt att dagens elsystem kommer att förändras. Det kan finnas flera drivkrafter och skäl för detta, viktiga sådana är energi- och klimatpolitiken och ambitionen att sänka utsläpp av växthusgaser och öka andelen förnybar produktion.

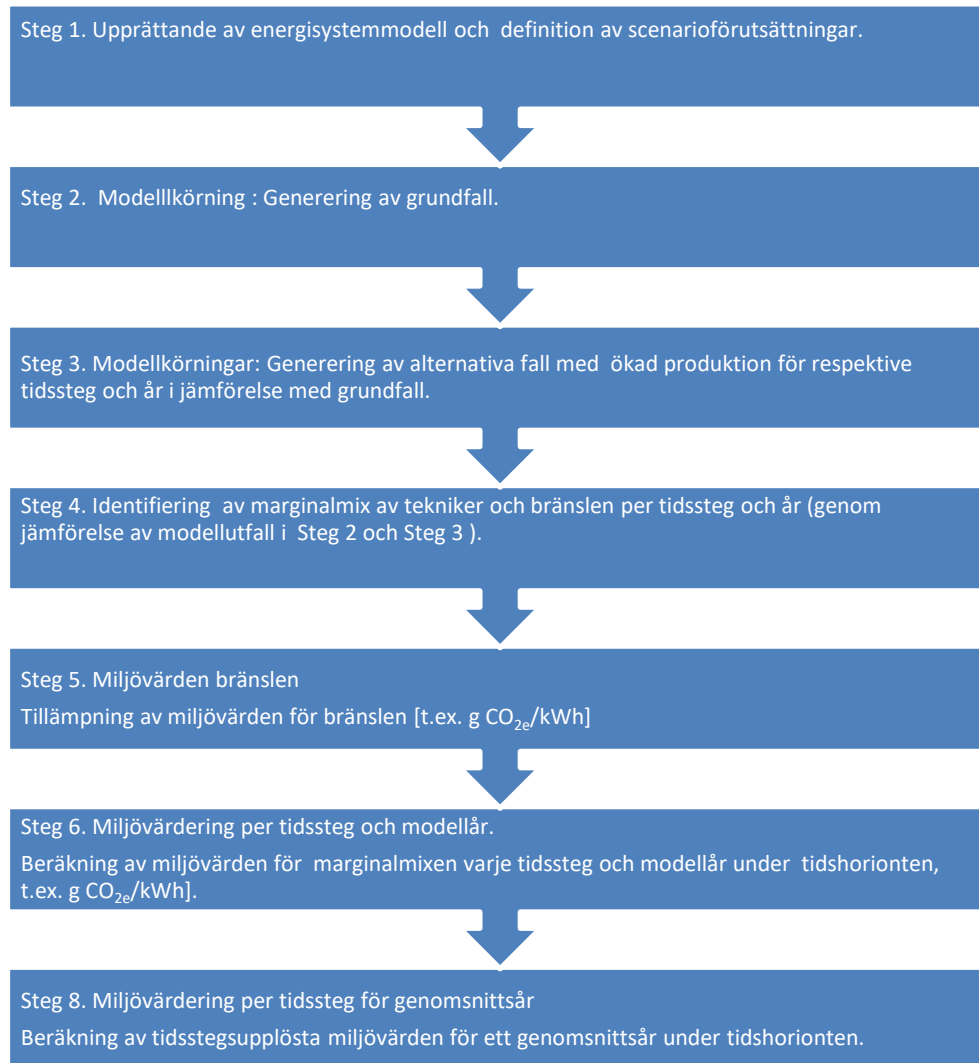
För analys av möjliga framtida utvecklingsvägar för elsystemet och påverkan på marginalelproduktionen i en svensk kontext, är inte ett nationellt perspektiv tillräckligt då det svenska elsystemet är tätt sammankopplat med våra grannländer. Det bör tas hänsyn till att det svenska elsystemet är integrerat med övriga Norden och Europa.

5.1.1 Steg i analysen

Inom projektet har vi utvecklat ett tillvägagångssätt för att generera tidsupplösta miljövärden för el som kan användas för bedömning av energiåtgärder i byggnader. Figur 5.1 åskådliggör stegen i tillvägagångssättet.

För att analysera hur marginalproduktionen i elsystemet kan se ut och utvecklas under den aktuella tidsperioden (2020-2040) använder vi oss av kvantitativ energisystemmodellering. Detta görs för olika scenarieförutsättningar för att täcka in en del av de många osäkerheter som är förknippade med den framtida utvecklingen av elsystemet. Givet de förutsättningar som definieras, används en energisystemmodell som beskriver elproduktionssystemet för att generera den kostnadsoptimala utvecklingen av elsystemet under den studerade perioden. Det

finns olika typer av modeller/modellverktyg som skulle kunna användas för dessa steg i analysen (modellen som här används beskrivs i avsnitt 5.1.2).



Figur 5.1. Beskrivning av steg för tidsupplöst miljövärdering av el.

För ett definierat scenario, körs dels ett grundfall och dels ett antal alternativa fall. I ett alternativt fall ändras efterfrågan i ett specifikt tidssteg (exempelvis vinternatt eller sommarlag). Det påverkar hur mycket elenergi som produceras under just detta tidssteg. Det kan dessutom påverka på vilket sätt elenergin produceras under andra tidssteg. Produktionen i det alternativa fallet jämförs sedan med produktionen i grundfallet – skillnaden utgör marginalproduktionen under de 20 modellerade åren.

Teknikerna i modellen kopplas till miljövärden (exempelvis i enheten kg CO_{2e}/MWh). På så sätt beräknas hur ändrad elanvändning under ett visst tidssteg påverkar elsystemets miljöpåverkan. Elanvändning miljövärderas på detta sätt för vart och ett av tidsstegen för varje år som finns representerat i modellen för den

aktuella tidsperioden. Dessa resultat räknas om till tidsupplösta medelvärden för ett genomsnittligt år för den aktuella tidsperioden (2020-2040), vilket blir indata till analysen av byggnadsåtgärdernas påverkan.

5.1.2 Energisystemmodell

Modellen som i detta projekt används vid exemplifieringen av tillvägagångssättet och framställande av kvantifierade scenarier är en kostnadsminimerande, dynamisk, partiell jämviktsmodell. Givet förutsättningarna, optimerar modellen drift och investeringar i systemet under den aktuella tidsperioden. Modellen är formulerad som ett så kallat linjärprogrammeringsproblem och uppställt i Microsoft Excel, men löses med hjälp av en extern lösare (då Excels inbyggda alternativ inte räcker till i detta fall). Modellens grundläggande principer är likartad med väl etablerade energisystemmodeller som t.ex. MARKAL och TIMES.

Modellen representerar det nordiska elsystemet som en region samt import/export med övriga Europa. Import och export hanteras i hög grad genom scenarioförutsättningarna. Modellen har fyra stycken modellår (2014, 2020, 2030, 2040) som i sin tur har en årlig tidsupplösning med 6 tidssteg: 3 säsonger (vinter, vår/höst, sommar) samt dag/natt-uppdelning. Konsekvensen av en förändrad elanvändning i Sverige antas i modellen mötas av en förändrad elproduktion inom det nordiska systemet eller en förändrad import till det nordiska systemet från övriga Europa. Modellen inkluderar beskrivning av ett 50-tal olika elproduktionstekniker i det nordiska systemet. Eventuella nettoförändringar av import av el från övriga Europa antas, baserat på antaget omvärldsscenario (se avsnitt 5.2.1), utgöras av kol och/eller naturgasbaserade elproduktionstekniker. En modell är per definition en förenkling av verkligheten. I den här beskrivna modellen är antal tidssteg per år, antal modellår, geografisk representation/upplösning och teknikbeskrivning exempel på områden som kan vidareutvecklas.

Energisystemmodellens indata (exempelvis kostnader, tekniska egenskaper för elproduktionstekniker och tillgängliga installerade kapaciteter) baseras i hög utsträckning på Nordisk Energiforsknings och International Energy Agency's (IEA) projekt *Nordic Energy Technology Perspectives 2016* (NETP) (Nordic Energy Research och IEA, 2016).

5.2 KVANTIFIERADE EXEMPEL - ELSCEARIER

I följande avsnitt presenteras tre elscenarier vilka har tagits fram med hjälp av tillvägagångssättet och modellen som presenterats. Scenarierna utgör exempel på tänkbara utvecklingar av elmarginalen och använts i studiens fallstudier. Scenarierna kan användas även i andra fallstudier, men det är givetvis fullt möjligt att också använda andra scenarier i andra tillämpningar av Tidstegsmetoden.

5.2.1 Förutsättningar och övergripande utveckling

För att spänna upp ett relevant utfallsrum för hur elmarginalen kan komma att utvecklas i framtiden utvecklas här tre kontrasterande scenarier. Scenarierna är utformade så att de representerar olika utvecklingsvägar för elmarginalen, som i

olika grad är baserade på fossilkraft respektive förnybar kraft. Därmed har de också olika nivåer av utsläpp av växthusgaser och representerar tre olika nivåer för elproduktionsmarginalens "klimattyngd", från klimattungt till klimatsnålt.

För att generera kontrasterande scenarier för elmarginalens utveckling utgår vi från ett grundscenario som ger den övergripande utvecklingen av det Europeiska elsystemet från idag till 2040. Vi vill att grundscenariot skall vara väl förankrat, både från ett metodmässigt och spridningsmässigt perspektiv. Vi har därför för vårt grundscenario återigen valt att utgå ifrån Nordisk Energiforsknings och IEAs "NETP 2016"-projekt (i likhet med större delen av energisystemmodellens indata), och mer specifikt dess "Carbon Neutral Scenario" (CNS) (Nordic Energy Research och IEA, 2016). I detta scenario presenteras utvecklingen av det nordiska och Europeiska elsystemet under förutsättningar som också är kompatibla med IEAs globala 2 graders-scenario.¹

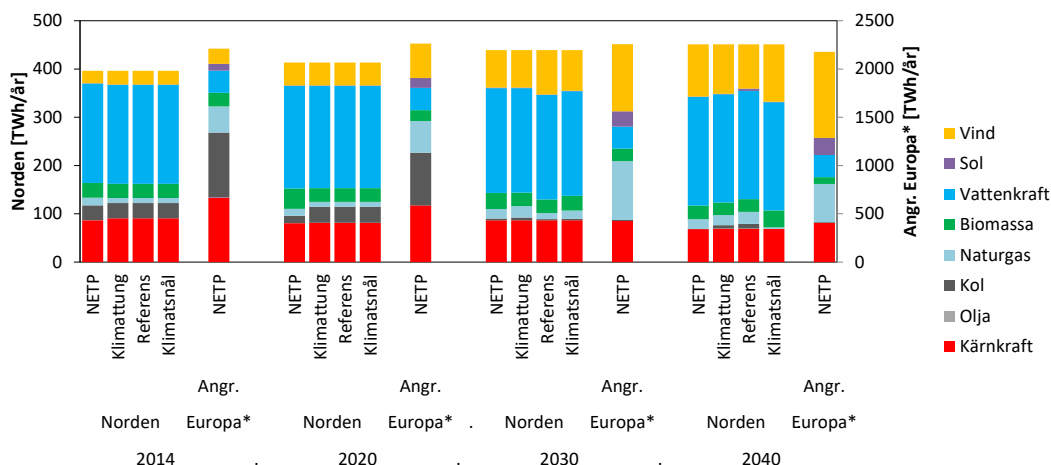
I NETP's CNS-scenario (Nordic Energy Research och IEA, 2016) fasas den svenska kärnkraften ut till år 2050. På en nordisk nivå är dock den totala installerade kapaciteten av kärnkraft år 2030 kvar på samma nivå som 2014. Samtidigt som Sverige börjar avveckla sin kärnkraft, bygger nämligen Finland nya kärnkraftsreaktorer och tar dem i drift. Intermittent kraftproduktion, särskilt vindkraft, byggs ut i stor skala i Sverige och övriga Europa. Norden blir en stor nettoexportör av el. Netto-exporten till övriga Europa uppnår nästan 70 TWh år 2040 (Nordic Energy Research och IEA, 2016).

Utifrån detta grundscenario gör vi mindre variationer i de antagna scenarioförutsättningarna för att generera skillnader i systemets marginalproduktion, men knappt påverkar den övergripande utvecklingen och produktionsmixen i elsystemet. Det kan alltså noteras att en viss produktionsmix inte per definition hänger samman med en viss produktionsmarginal. Elscenarierna kvantifieras med den modell som beskrevs i avsnitt 5.1.2. Scenarioförutsättningarna skiljer på några punkter vilket får viktiga konsekvenser för marginalproduktionen:

- I vårt *klimattunga* scenario antas investeringar i förnybar kraftproduktion ske tack vare politiska styrmedel vilka kvoterar in teknikerna i syfte att uppfylla politiska mål. Kostnadseffektiviteten för ny förnybar kraftproduktion utöver det som krävs för att uppfylla ett givet effektmål är låg.
- I vårt scenario med en "mellannivå" i klimattyngd, vi benämner här scenariot *referens*, antas investeringar i förnybar kraftproduktion ske på egen kraft med stöd av en ökande CO₂-kostnad under perioden.
- I vårt *klimatsnåla* scenario antas investeringar i förnybar kraftproduktion ske på egen kraft med stöd av en kostnad för CO₂-utsläpp, som under perioden ökar kraftigare än i referensscenariot. År 2040 antas det nordiska elsystemet i det närmaste helt ha fasat ut fossila bränslen.

¹ Det finns givetvis även andra el- och energiscenarier tillgängliga i litteraturen, detta diskuteras vidare i Bilaga D.

Utvecklingen av elproduktionen i Norden och i "angränsande" europeiska länder² för NETPs CNS-scenario ges i Figur 5.2. Figur 5.2 visar också modellutfallet för den övergripande utvecklingen av den nordiska elproduktionen för "Klimattung", "Referens" samt "Klimatsnål", vilka som förutsatt i hög grad följer utveckling i NETP-scenariot (utvecklingen i övriga europeiska länder antas helt följa utvecklingen i NETP scenariot).



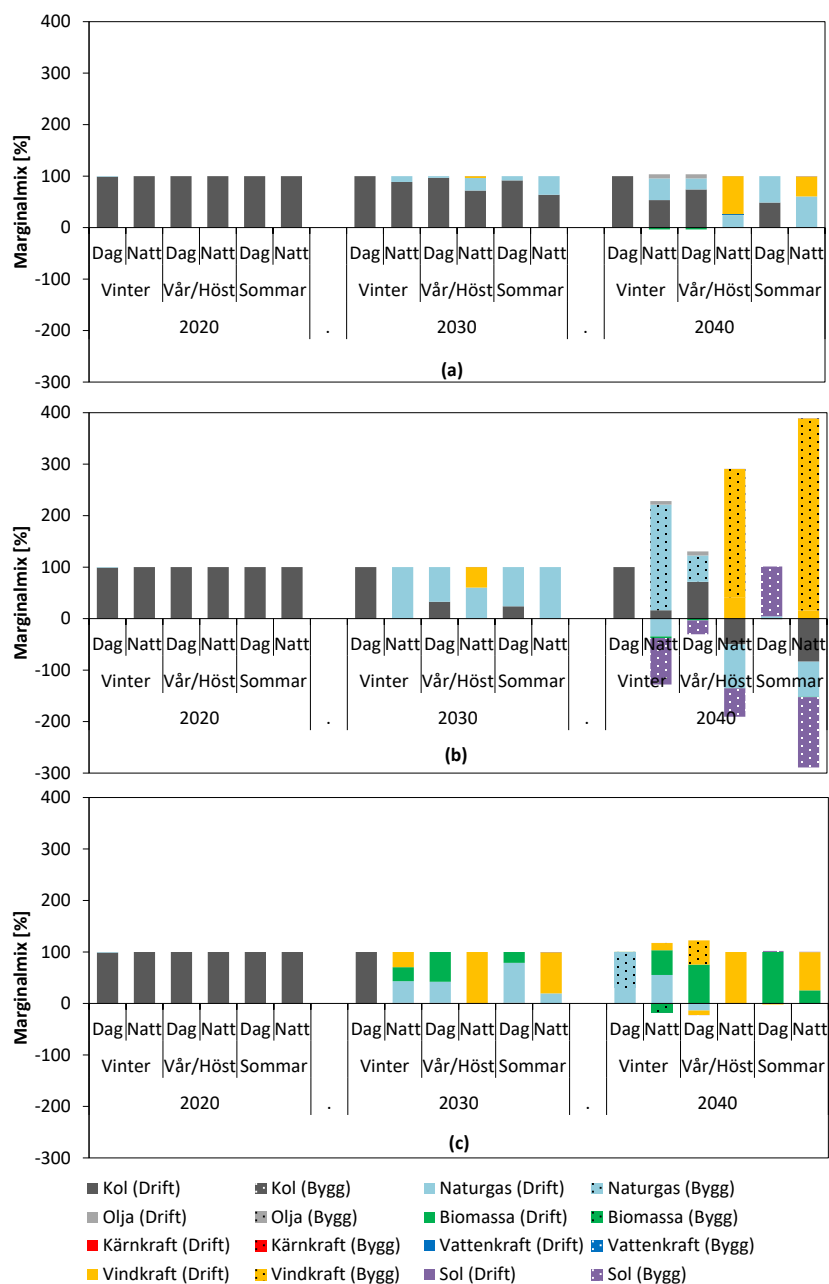
Figur 5.2. Utveckling av elproduktion under studerad tidsperiod för scenario "Klimattung", "Referens", och "Klimatsnål" samt för IEAs och NER's CNS-scenario från NETP 2016-projektet. Elproduktion i Norden utläses på vänster y-axel, elproduktion "angränsande" Europa utläses på höger y-axel (*för definition av "Angr. Europa", se fotnot 2). NETP-scenario hämtad från (Nordic Energy Research och IEA, 2016).

5.2.2 Konsekvens av förändrad efterfrågan

Genom att följa beskrivet tillvägagångssättet identifieras mixen av marginalproduktionstekniker för respektive scenario, tidssteg och modellår. Marginalmixen presenteras i Figur 5.3 som procent av storleken på förändringen i efterfrågan. Figuren åskådliggör för varje tidssteg den totala effekten på årsbasis av en förändrad efterfrågan i respektive tidssteg.

Figuren definierad som förändring vid ökad efterfrågan, vilket betyder att positiva staplar innebär en ökad produktion vid en ökad efterfrågan, och att negativa staplar innebär en minskad produktion vid en ökad efterfrågan. I figuren skiljs på drift- och byggmarginal. Positiv byggmarginal innebär att modellen väljer att investera i ytterligare produktionskapacitet vid en ökad efterfrågan, och negativ byggmarginal innebär att modellen väljer att investera i mindre produktionskapacitet vid en ökad efterfrågan i jämförelse med grundfallet (d.v.s. utebliven investering).

² "Angränsande" får här tolkas brett och inbegriper Tyskland, Estland, Lettland, Litauen, Polen, Nederländerna, Belgien, Luxemburg, Frankrike, Italien, Schweiz, Österrike, Tjeckien och Storbritannien.

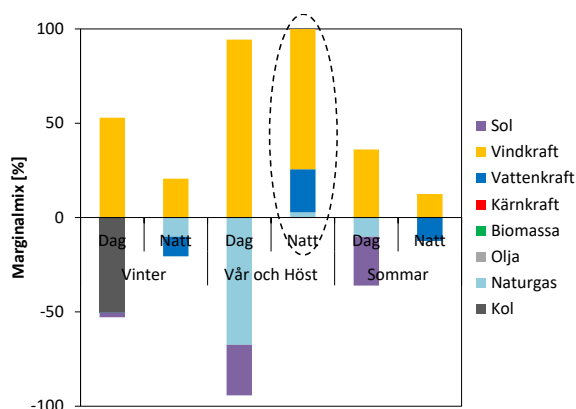


Figur 5.3. Marginalproduktionsmix för scenario (a) "Klimattung", (b) "Referens" och (c) "Klimatsnål". Definierad som ökad produktion på årsbasis som följd av en ökad efterfrågan i ett visst tidssteg. Negativa värden avser minskad produktion vid ökad efterfrågan. Storlek på ökad efterfrågan motsvarar 100 % i figuren.

De marginella systemeffekterna är ibland komplicerade. När installerad kapacitet påverkas (d.v.s. vid en byggmarginal) är ofta effekterna inte begränsade bara till det tidssteg för vilken efterfrågan ändras. En förändrad efterfrågan under en viss del av året som ger upphov till nybyggnation, och därmed en högre installerad kapacitet i en viss teknik, möjliggör att en ökad kapacitet också kan utnyttjas också under andra delar av året. Detta kan i sin tur resultera i att annan produktion kan ersättas. Detta ses i Figur 5.3 som positiva staplar som sträcker sig över "100 %" (d.v.s. ökningen i produktion är större än ökningen i efterfrågan) kombinerat med

negativa staplar (d.v.s. minskning av ersatt produktion). Nettoförändringen är dock alltid (+) 100 %, det vill säga lika stor som förändringen i efterfrågan.

Hur effekterna mellan tidsstegen kan se ut exemplifieras i Figur 5.4, som visar systemeffekterna över tidssteg vid en ökad efterfrågan för tidssteget "vår/höst-natt", år 2040, för referensscenariot. I detta fall ses en hur en ökad efterfrågan ger upphov till en nybyggd vindkraft vilket ger effekt över alla tidssteg (effekten på årsbasis för samma, d.v.s. summan av förändringarna per tidssteg, framgår av Figur 5.3b).³



Figur 5.4. Systemeffekter över samtliga tidssteg som följd av en ökad efterfrågan för tidssteget vår/höst-natt (inringat i figur), år 2040, i referensscenariot. 100 % i figuren motsvarar storleken på den ökade efterfrågan under vår/höst-natt. Negativa värden avser minskad produktion vid ökad efterfrågan.

De tre kontrasterande elscenarierna skiljer sig framför allt åt i fråga om i vilken takt och i vilken utsträckning elmarginalen, sett över tidsperioden, går från att vara kolbaserad, till att vara naturgasbaserad, till att vara baserad på förnybar energi. I det kortare perspektivet är modellens marginalproduktion kolbaserad för samtliga tidssteg i alla tre scenarier, d.v.s. det är ingen skillnad över året. Kolbaserad produktion är här det tillgängliga alternativ som har lägst rörlig kostnad, och eventuell kapacitetsbrist i vissa tidssteg regleras i hög utsträckning genom förändrad produktion av vattenkraften. I det längre perspektivet antas vattenkraften, på grund av ökad andel intermittent kraft i systemet, få svårare att reglera mellan tidsstegen, och elmarginalen blir i högre grad olika mellan tidsstegen (se också (Gode et al., 2015)). Ytterligare lagringsmöjligheter i elsystemet, t.ex. dygnslager, kan emellertid bidra till att minska skillnaderna mellan tidsstegen.

Utvecklingen av elmarginalen för de tre scenarierna beskrivs nedan:

- I det *klimattunga scenariot* (Figur 5.3a) förekommer bara driftmarginal (d.v.s. ingen byggmarginal). Den exogent bestämda utbyggnaden av förnybar kraft (som sker genom "inkvotering") bidrar till att befintlig kapacitet är tillräcklig för att möta efterfrågeförändringar. Marginalmixen består i början av den modellerade tidsperioden av kolbaserad elproduktion för att mot den senare

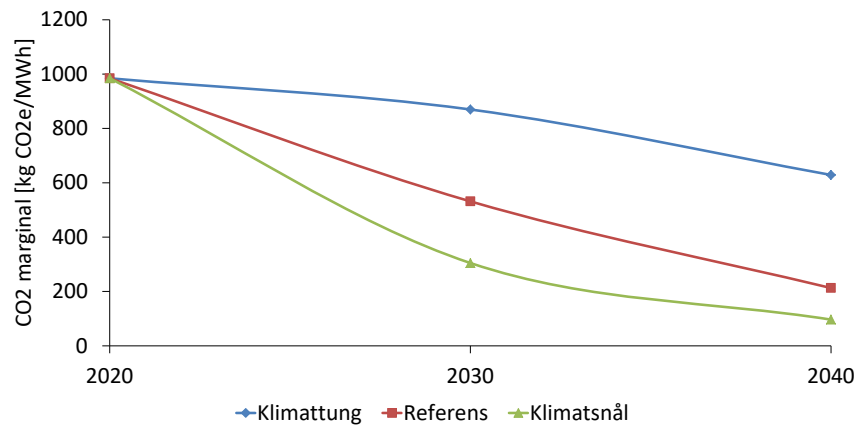
³ Angående vindkraftens produktion kan det noteras att tidsstegen är olika långa samt att det dessutom blåser olika mycket under olika delar av året. En viss kapacitet vindkraft som kommer därför ge olika produktion i de olika tidsstegen.

delen av perioden till allt större del övergå till naturgasbaserad produktion. Befintlig naturgasbaserad elproduktion har under senare delen av tidsperioden lägre kostnad än befintlig kolbaserad elproduktion. Begränsningar i kapacitet gör emellertid ändå att kolbaserad produktion förekommer som marginalproduktion under vissa tidssteg under hela tidsperioden. Som följd av vindkraftsutbyggnaden, finns i slutet av tidsperioden för vissa tidssteg ett visst överskott av vindkraftsel, som därmed används vid en ökad efterfrågan i dessa tidssteg.

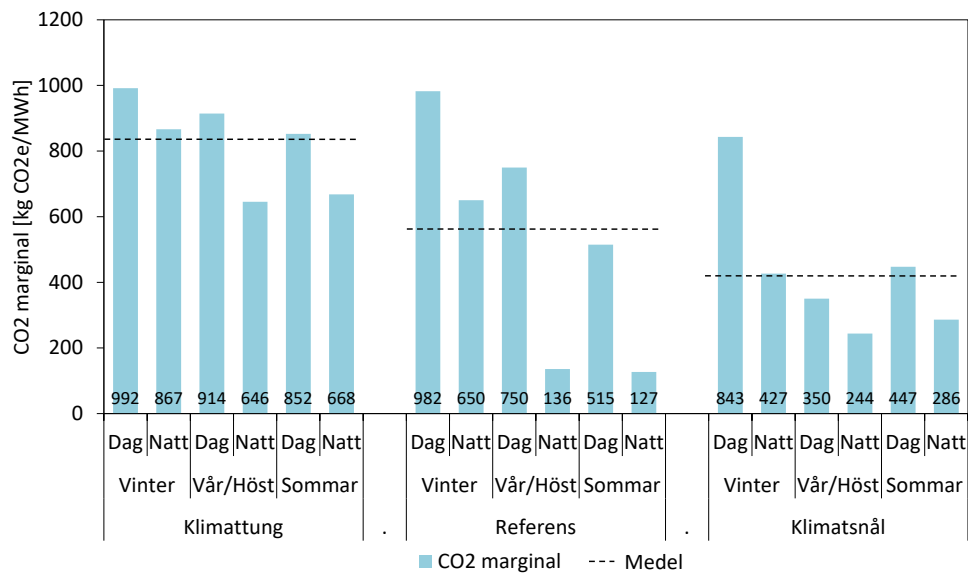
- I *referensscenariot* (Figur 5.3b) driver en stigande CO₂-kostnad på en något snabbare utbyggnad av förnybar kraft (framför allt vindkraft) i jämförelse med det klimattunga scenariot. Detta möjliggör att tillgänglig naturgasbaserad produktion för de flesta tidssteg är tillräcklig för att möta en ökad efterfrågan redan från mitten av tidsperioden (och hamnar därför som driftsmarginal). Med undantag för solkraft under sommar-dag i slutet av tidsperioden, blir CO₂-kostnaden aldrig så högt inom scenariot att en ökad efterfrågan motiverar nybyggnation av förnybar kraft som bara har möjlighet att vara i drift under en mindre del av året. En ökning av efterfrågan under låglastperioder (andra än sommar-dag) under slutet av tidsperioden motiverar dock nybyggnation av vindkraft då det finns utrymme att köra denna installerade kapacitet också under höglastperioder. En sådan investering i vindkraft tränger undan investeringar i solkraft. Under höglastperioderna ersätter den nybyggda vindkraften dessutom elproduktion från existerande kol- och naturgaskraft (Figur 5.3b och 5.4). En ökad efterfrågan under en viss låglastperiod kan alltså leda till ökad vindkraftproduktion under hela året och därmed till minskad användning av andra kraftslag.
- Det *klimatsnåla scenariot* (Figur 5.3c) karakteriseras av en snabbt stigande CO₂-kostnad samt av en utbyggnad av förnybar kraft (framför allt vindkraft och biobränslebaserad kraft) som är dimensionerad för att också i hög utsträckning ge fossilfri produktion under perioder med hög last (vintern). Den förnybara kraften har därmed en hög installerad effekt. Detta innebär att en ökad efterfrågan under delar av året med lägre last kan mötas med en ökad produktion från redan befintliga anläggningar (från grundfallet). Därmed ges inte skäl till ytterligare nybyggnation under låglasttid; vi ser under den delen av året bara effekter på driftmarginalen. Vid slutet av tidsperioden, skiljer sig detta scenario mot ovanstående också genom att den höga CO₂-kostnaden vid en ökad efterfrågan under vinter-dag (topp-last) motiverar en utbyggnad av naturgasbaserad elproduktion, istället för att låta befintlig kolbaserad kapacitet möta den ökade efterfrågan som i övriga två scenarier.

5.2.3 Klimatprestanda i de olika scenarierna

När marginalmixen är bestämd faller också miljövärden för elmarginalmixen ut genom användning av relevanta bränsle- och teknikvärden i modellen. I detta fall rör det sig om CO_{2e}-faktorer för bränslen (se Bilaga C) som kombineras med elmarginalmixen för att ge CO_{2e}-faktorer för elmarginalen. Figur 5.5 visar hur årsmedelvärdet för marginalelens klimatpåverkan förändras från år 2020 till år 2040. Figur 5.6 visar hur elanvändningens klimatpåverkan varierar över året under ett genomsnittligt år.



Figur 5.5. Årsvisa medelvärden för elens CO₂e -marginal för respektive scenario



Figur 5.6. CO₂e emissionsfaktorer för marginalet per tidssteg över tidsperioden (2020-2040) som helhet för respektive elscenario. Streckade linjer avser medelvärdet på elmarginalens klimatpåverkan beräknad över alla tidssteg och hela tidsperioden 2020-2040.

6 Miljövärdering av bränslen

6.1 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT

I detta projekt fokuserar vi på effekterna i ett systemperspektiv av förändrad efterfrågan på fjärrvärme och elenergi. Effekterna kan inkludera förändrad användning av flera olika bränslen. Beräkningarna inkluderar då de utsläpp av växthusgaser som sker under dessa bränslens livscykel. I de flesta fall hanteras detta med en rättfram metod: utsläppsdata samlas in för de olika processerna och transportererna i bränslekedjan och summeras till en totalsiffra. Sådana beräkningar har gjorts många gånger förut och vi kan använda oss av deras resultat (se Bilaga C). För energiutvinning ur avfall bedöms systemeffekterna vara mer komplicerade och kräva en egen utredning, se avsnitt 6.2. En diskussion kring möjliga systemeffekter för övriga bränslen ges i avsnitt 6.3.

6.2 AVFALL

Vid avfallsförbränning i Sverige utvinns fjärrvärme och ofta även elenergi. Energiutvinning ur avfall har höga fasta kostnader; eftersom avfall kräver avancerad teknik för både förbränning och rökgasrening är investeringskostnaderna högre än för andra bränslen. Däremot är den rörliga kostnaden för energiutvinning ur avfall mycket låg, för att inte säga negativ, eftersom anläggningen får betalt för att ta emot det brännbara avfallet. Därför är anläggningar för avfallsförbränning baslastanläggningar som används så stor del av året som möjligt. Oftast påverkas inte heller avfallsförbränning av en förändrad efterfrågan på el eller värme. Det är mest kostnadseffektivt att drivas dessa anläggningar fullt året om, utom då de behöver stängas för underhåll. I vissa fjärrvärmenät kan avfall dock stå för en såpass stor del av den totala värmeproduktionen att det inte finns efterfrågan på all värme från avfall under sommaren. I de fjärrvärmenäten påverkar ett förändrat värmebehov på sommaren hur mycket värme från avfall det finns avsättning för.

Systemeffekterna av en förändrad avsättning för avfallsbaserad värme varierar från plats till plats. I vissa fjärrvärmenät används förbränningsanläggningen fullt ut även då det inte finns avsättning för all värme. En förändrad efterfrågan på värme påverkar då bara hur mycket av värmen från anläggningen som kylv bort. Detta får ingen effekt alls på utsläppen av växthusgaser.

I andra fjärrvärmenät kan en minskad avsättning på avfallsbaserad värme till att mindre avfall eldas totalt sett under året (t.ex. genom en minskad import). Detta påverkar förstås utsläppen av växthusgaser från förbränningsanläggningen.

En ändring i mängden eldat avfall får även systemeffekter i andra delar av avfallssystemet. Dessa effekter kan vara viktigare för klimatet än utsläppen från själva förbränningsanläggningen. Men de är osäkra.

I analysen av systemeffekterna i avfallssystemet står några saker klart. Det finns kapacitet att utvinna energi ur mer än det brännbara avfall som genereras inom landet. Svenska anläggningar för avfallsförbränning tar därför emot avfall från

andra länder för att kapaciteten ska utnyttjas så mycket som möjligt. Av de nära 5,8 miljoner ton avfall som förbrändes med utvinning av fjärrvärme under 2015 var 1,3 miljoner ton importerat för energiutvinning (Avfall Sverige, 2016). Det kallas avfallsimport trots att anläggningarna tar betalt för att ta emot det brännbara avfallet; mindre missvisande hade kanske varit att kalla det export av avfallbehandlingstjänster.

Trots överkapaciteten i de svenska förbränningsanläggningarna fortsätter byggnationen av nya anläggningar (Avfall Sverige, 2012a, PROFU, 2013). Det kan förklaras med att det är god ekonomi i att utvinna energi ur avfall i Sverige. Energin i avfallet utnyttjas effektivt eftersom värmen kan användas i fjärrvärmenät. Avfallets konkurrensförmåga jämfört med fossila bränslen förstärks också i Sverige tack vare de svenska skatterna på fossila bränslen.

En annan sak som står klar är att det inte är tillåtet att deponera brännbart avfall i Sverige. Om minskad värmeefterfrågan bidrar till minskad förbränning av avfall i Sverige, kommer det därför inte att leda till att deponeringen ökar i Sverige. Istället är det framför allt importen av brännbart avfall som minskar. Flera tidigare rapporter pekar på att import av avfall är på marginalen för avfallsförbränningsanläggningar i Sverige och att det kommer att gälla även fortsatt (Avfall Sverige, 2012b); (Gode et al., 2013). Svårigheten ligger i att bedöma hur en ändrad import av avfall till Sverige påverkar avfallssystemen utanför landets gränser. En viss hjälp i detta har vi av en nyligen publicerad rapport från IVL och Avfall Sverige (Fråne et al., 2016).

6.2.1 Systemeffekter av avfallsimport

Sverige importerar stora mängder brännbart avfall från Norge och Storbritannien. Mindre mängder importeras från Irland, Nederländerna, Finland och andra länder (Naturvårdsverket, 2015). Fråne et al. (2016) undersökte hur denna handel med avfall påverkar avfallssystemen i Sverige, Norge, Storbritannien och Irland.

Exporten av avfall från Norge ökade kraftigt då de införde ett förbud mot deponering av biologiskt avfall år 2009. Möjligheten att exportera detta avfall till Sverige har i åtminstone något fall påverkat utbyggnad av infrastruktur för biologisk behandling av matavfall. Det kan också ha påverkat utbyggnaden av förbränningsanläggningar i Norge. Norge har dessutom möjlighet att exportera avfall för förbränning till andra länder.

Det avfall som exporteras från Storbritannien är till stora delar rester från sorteringsanläggningar (så kallade Material Recovery Facilities; MRF) eller från mekanisk-biologisk behandling (Mechanical Biological Treatment; MBT). Det mesta av detta skickas till Nederländerna för energiutvinning, och bara en mindre del till Sverige. Alternativet att deponera avfallet i det egna landet finns men är dyrt på grund av höga deponiskatter. Möjligheten att skicka resterna till energiutvinning i Sverige bidrar till att hålla nere avfallskostnaderna för MRF- och MBT-anläggningar. De svenska förbränningsanläggningarna sätter dock inte sina mottagningsavgifter lägre än vad de behöver för att kunna konkurrera med annan avfallsbehandling. Effekten på MRF- och MBT-anläggningarnas ekonomi är därför så liten att Fråne et al. (2016) bedömer att den knappast påverkar vare sig hur

mycket sådana anläggningar som byggs eller hur de drivs. Exporten till Sverige påverkar därför i första hand hur mycket som deponeras inom Storbritannien och hur mycket som exporteras till andra länder för förbränning där.

I Europa som helhet är kapaciteten för förbränning betydligt mindre än tillgången på brännbart avfall. Stora mängder brännbart avfall deponeras fortfarande, även om det avfall som deponeras i allt högre grad först går igenom en MBT eller annan förbehandling. Om en minskad import av avfall till Sverige gör att ursprungsländerna istället exporterar avfallet till förbränning i andra europeiska länder, leder det sannolikt till att mer avfall behöver deponeras någonstans i Europa.

Generellt bedömer Fråne et al. (2016) att den svenska avfallsimporten bidrar till att hålla nere kostnaderna för avfallsbehandling utanför Sveriges gränser. Det gör i teorin att materialåtervinning och annan avfallsbehandling får svårare att konkurrera. Eftersom de svenska anläggningarna förhandlar sig fram till mottagningsavgifter som ligger strax under kostnaden för annan avfallsbehandling blir denna effekt dock mycket liten.

EU har som målsättning att kraftigt minska deponeringen, och kapaciteten för energiutvinning och annan avfallsbehandling byggs därför ut kraftigt i Europa. Detta skulle på sikt kunna leda till att det finns en överkapacitet för förbränning i Europa som helhet. Då uppstår konkurrens om det brännbara avfallet och förbränningsanläggningarna får en sämre förhandlingsposition. I det läget kan en minskad energiutvinning från avfall i Sverige slå igenom på marginalen som ökade mottagningsavgifter i Europa. Det kan leda till ökad materialåtervinning, exempelvis genom ökad utsorteringsgrad i MRF-anläggningar eller genom ökade investeringar i infrastruktur för källsortering. Men ökade mottagningsavgifter kan också leda till ökade investeringar i energiutvinning och/eller biologisk behandling, eller till ökad deponering i de länder där det är tillåtet.

6.2.2 Scenarier för avfallsbaserad fjärrvärme

Som framgår ovan kan ett minskat behov av avfallsbaserad fjärrvärme ha många olika slags systemeffekter och därför påverka klimatet på många olika sätt. De faktiska konsekvenserna är sannolikt en blandning av flera av dessa:

- Mer värme från avfallsförbränning kyls bort.
- Mindre avfall importeras för energiutvinning, vilket leder till ökad deponering av obehandlat restavfall i ursprungsländerna eller på annat håll i Europa.
- Mindre avfall importeras för energiutvinning, vilket leder till ökad deponering av MBT- och MRF-rester i ursprungsländerna eller på annat håll i Europa.
- Mindre avfall importeras för energiutvinning, vilket leder till ökad förbränning i andra länder.
- Mindre avfall importeras för energiutvinning, vilket leder till ökad biologisk behandling i andra länder.
- Mindre avfall importeras för energiutvinning, vilket på sikt kan bidra till ökad materialåtervinning.

Osäkerheten är stor i vilken eller vilka av dessa effekter som dominerar. Vi använder tre scenarier för att belysa hur denna osäkerhet slår igenom i

beräkningen av klimatpåverkan: ett scenario där avfallsbaserad värme påverkar klimatet positivt, ett scenario där klimatet påverkas negativt och ett referensscenario i mitten. Scenarierna bör vara skilda utan att vara orimliga. De bör också vara enkla nog att kommunicera och förstå. Därför har vi valt tre renodlade scenarier med bara ett slags effekt i varje:

- Referensscenario: minskat behov av avfallsbaserad värme leder till att mer värme kylv bort.
- Klimattungt scenario: minskat behov av avfallsbaserad värme leder till minskad värmeproduktion från avfall i Sverige, till minskad avfallsimport och till att mer avfall förbränns med elutvinning i ett annat europeiskt land. Elverkningsgraden antas vara 30 procent. Elenergin antas ersätta el producerad från naturgas.
- Klimatsnålt scenario: minskat behov av avfallsbaserad värme leder till minskad värmeproduktion från avfall i Sverige. Minskningen i avfallsimport leder i detta scenario till att deponeringen av obehandlat restavfall ökar i ett annat europeiskt land. Deponeringen antas ske i en modern välutformad deponi, där 70 % av den metan som bildas under en hundraårsperiod tas tillvara som deponigas. Den deponigas som utvinns antas användas för produktion av el (25 %) och värme (75 %) med 80 % verkningsgrad. Av resterande metangas oxideras 10 % i deponitäckningen.

Vi beräknar klimatpåverkan i dessa scenarier med WAMPS (Waste Management Planning System), en LCA-modell för avfallshantering (<https://wamps.ivl.se/prod/>) som utvecklats av IVL. Vid beräkningarna inkluderas inte insamling av avfall eller andra lokala transporter. Internationella transporter antas ske med lastbil (ca 3 * 30 m³ per ekipage) som kör 3000 km per enkelresa. Resultatet av beräkningarna visas i Tabell 6.1.

Resultaten är känsliga för antaganden om vilken produktion av el och värme som ersätts vid förbränning av avfall och deponigas utanför Sverige. Dessa antaganden överensstämmer inte helt med den metod som utvecklats i detta projekt. Resultatet för den klimatsnåla avfallsvärmen är också mycket känsligt för antagandet om hur mycket av metanet i deponin som fångas upp. Resultaten kan användas i vår metod som scenarier, det vill säga som exempel på vilken konsekvens användningen av avfallsbaserad värme kan få om det leder till minskad avfallsförbränning eller minskad deponering utomlands. De bör dock inte användas som uppskattningar på vilken konsekvens användningen av avfallsbaserad värme faktiskt får om det leder till minskad avfallsförbränning eller minskad deponering utomlands.

Tabell 6.1. Tabellen visar resultatet för användning i Sverige av en ökad mängd värme från avfall i de tre scenarierna där användningen påverkar hur mycket värme som kylv bort, hur mycket avfall som används för elproduktion i andra länder, respektive hur mycket avfall som deponeras. Scenarierna i tabellen har olika systemgräns: referensscenariot avser klimatpåverkan av en ökad mängd avfallsvärme i Sverige motsvarande 1 MWh; för det klimattunga och det klimatsnåla scenariot avser värdena klimatpåverkan av de uppströms effekterna men den totala klimatpåverkan beror av vilken typ av användning som sker i Sverige, d.v.s. värmeproduktion eller kraftvärmeproduktion och, i det senare fallet, vilket elscenario som används.

	Referensscenario: minskad bortkylning	Klimattungt scenario: minskad elproduktion	Klimatsnålt scenario: minskad deponering
Klimatpåverkan (kg CO _{2e} /MWh_värme)	0	-	-
Klimatpåverkan (kg CO _{2e} /MWh_avfall)	-	71	-46

6.3 SYSTEMEFFEKTER AV ANNAN BRÄNSLEANVÄNDNING

Användningen av andra bränslen än avfall kan egentligen också få breda systemeffekter. Om energilösningen i en byggnad minskar behovet av biobränsle är det inte säkert att användningen av biobränsle minskar. Det bränsle som vi inte behöver kanske istället används någon annanstans i energisystemet. Där är chansen stor att det åtminstone delvis skulle ersätta fossila bränslen.

Om energilösningen i en byggnad minskar behovet av olja, kol och naturgas, är risken stor att dessa bränslen ändå inte blir kvar i jorden i längden. De är en värdefull resurs som kan utvinna senare för att användas som bränsle eller råvara i andra delar av ekonomin. Effekten av att vi idag minskar användningen av fossila bränslen kan därför bli att utvinning och användning av fossila bränslen skjuts på framtiden, snarare än att de totalt sett minskar.

Den potentiella alternativa användningen av biobränsle och fossila bränslen ingår dock inte i våra beräkningar, främst för att osäkerheterna och antalet variationer i scenarioförutsättningar annars riskerar att bli ohanterliga. Det är osäkert till hur stor del dessa bränslen kommer att användas. Det är mycket osäkert till vad den alternativa användningen är och vad, om något, som de i så fall kommer att ersätta. En konsekvensanalys inkluderar främst de konsekvenser som är förutsebara. Några möjliga men ovissa konsekvenser kan också inkluderas i konsekvensbedömningen med hjälp av scenarioanalys.

För att scenarierna ska bli användbara behöver de också kunna kommuniceras. Ju fler ovissa faktorer som ingår i scenarierna desto svårare är de att kommunicera och förstå. Därför kan konsekvensanalysen bara inkludera ett begränsat antal ovissa faktorer. Vår metod inkluderar scenarier för elproduktion och scenarier för avfallens alternativa öde. Vi bedömer att scenarierna blir överskådliga om vi dessutom inkluderar den alternativa användningen av fossila bränslen och biobränslen. Därför begränsar vi metoden till att inkludera själva livscykeln för dessa bränslen.

En annan orsak till att exkludera den alternativa användningen av vanliga bränslen är att den inte brukar ingå i en vanlig livscykelanalys. Den alternativa användningen sker i en annan del av ekonomin och därför i en annan livscykel än den byggnad vi studerar.

Med detta sagt innebär avgränsningen i vår metodik ändå en begränsning och felkälla. Att spara biobränsle kan ha större betydelse för klimatet än vad våra beräkningar anger, eftersom åtminstone en del av det sparade biobränslet ofta lär ersätta fossilt bränsle någon annanstans i energisystemet. Att spara fossila bränslen kan, å andra sidan, ha mindre betydelse för klimatet än vad våra resultat indikerar, eftersom de fossila bränslen vi sparar kan komma att användas senare i andra delar av ekonomin.

7 Beräkning miljöpåverkan

Den sista delen i Tidstegsmetoden innebär att beräkna miljöpåverkan av de studerade energiåtgärderna, i detta fall energieffektiviseringsåtgärder i ett flerbostadshus (se kapitel 3), baserat på de beräknade förändringarna i energianvändning och fastställda miljövärdesfaktorerna för fjärrvärme, fjärrkyla (se kapitel 4), el (se kapitel 5) och/eller bränslen (kapitel 6). Detta görs för olika scenarier för att få en bild av robustheten i energilösningarnas miljöpåverkan utifrån olika förutsättningar och framtida utveckling.

7.1 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT

För att beräkna skillnaden i miljöpåverkan mellan olika energiåtgärder så multipliceras skillnaden i energibehov mellan referensbyggnaden och de olika fallstudierna med emissionsfaktorerna för olika energibärare (fjärrvärme, fjärrkyla, el och/eller bränslen). Detta görs i våra beräkningar med en timupplösning över året.

Elmarginalen är i våra framtagna elscenarier och uppdelad i sex tidsperioder över året, dels tre säsonger (vår/höst, sommar och vinter) och dels dag och natt. Denna anpassas nu till timupplösning genom att varje timme under året blir tilldelad en av de sex nivåerna för miljövärden för elmarginalen. (Denna process är också nödvändig i ett tidigare steg för att tillhandahålla fjärrvärme- och fjärrkyla-analysen med timupplöst data.)

Miljövärdena för fjärrvärme- och fjärrkyla är i detta läge uttryckt per temperaturintervall. Transformationen från timme till temperatur skedde genom att addera alla timmar inom ett visst temperaturintervall och beräkna fördelningen mellan olika marginalanläggningar och det genomsnittliga miljövärdet för det givna temperaturintervallet (medelvärde av alla timmars miljövärde inom intervallet). När en byggnads energilösning ska miljövärderas så används samma temperaturfil i energisimuleringen av byggnaden som för miljövärderingen för fjärrvärme/fjärrkyla. Miljövärderingen av byggnadsenergi blir på så vis ortsspecifik.

Skillnaden i elbehov miljövärderas timvis genom att hämta emissionsfaktorn för el för den specifika timmen. Skillnaden i fjärrvärme- och fjärrkylabehov miljövärderas timvis genom att hämta emissionsfaktorn för det temperaturintervall inom vilket den specifika timmens temperatur faller inom.

7.2 KVANTIFIERADE EXEMPEL – FALLSTUDIER

I detta avsnitt presenteras resultaten för miljövärdering, med avseende på klimatpåverkan, för studiens fallstudie vilken omfattar ett antal olika möjliga renoveringsåtgärder i ett flerfamiljshus byggt under miljonprogrammet. Sammanfattningsvis omfattas resultaten av:

- 5 åtgärdspaket för energieffektivisering (Tabell 3.2).
- 3 typnät för fjärrvärme (avsnitt 4.2)

- 3 elscenarier (avsnitt 5.2)
- 3 avfallsscenarier (avsnitt 6.2.2)

Scenariokombinationerna för el och avfall kan sammanfattas i Tabell 7.1 nedan.

Tidstegmetoden avser att avspejla perioden 2020-2040. För elscenarierna har detta åstadkommit genom att ett medelår har beräknats för perioden. För fjärrvärmenäten har i detta fall ingen utveckling antagits och beräkningarna har gjorts för ett år. Detta är förstås en förenkling som, i en fortsatt tillämpning, för ett specifikt beräkningsfall som kopplar till ett visst fjärrvärme- eller fjärrkylennät, kan hanteras annorlunda i den mån framtida planer eller scenarior för det aktuella systemet finns etablerade.

Tabell 7.1 . Scenariokombinationer för elmarginal och avfallsmarginal. (förkortningar: L=låg, R=referens, H=hög, A=avfall)

Scenariomatrix	Avfall Klimatsnål	Avfall Referens	Avfall Klimattung
EL Klimatsnål	EL CO2L – A CO2L	EL CO2L – A CO2R	EL CO2L – A CO2R
EL Referens	EL CO2R – A CO2L	EL CO2R – A CO2R	EL CO2R – A CO2H
EL Klimattung	EL CO2H – A CO2L	EL CO2H – A CO2R	EL CO2H – A CO2H

I Figur 7.1 visas den totala klimatpåverkan för en förändrad energianvändning för hela byggnaden under ett år för en specifik scenariokombination (referensscenario för el och avfall) och för det stora fjärrvärmenätet. Klimatpåverkan är uppdelat per energibärare, d.v.s. på utsläpp från el och från fjärrvärme. Positiva värden innebär en ökad klimatpåverkan och negativa värden en minskad miljöpåverkan.

I Figur 7.1 blir det tydligt att, med studerade förutsättningar, har en förändrad elanvändning betydligt större effekt på klimatpåverkan än en förändrad fjärrvärmeanvändning (jämför gärna med Figur 3.5). Med ett marginalperspektiv för fjärrvärme och el så ökar den totala miljöpåverkan, med givna förutsättningar, för alla åtgärds paket utom för KLI (fönsterbyte, isolering vind) där elförbrukningen inte påverkas.

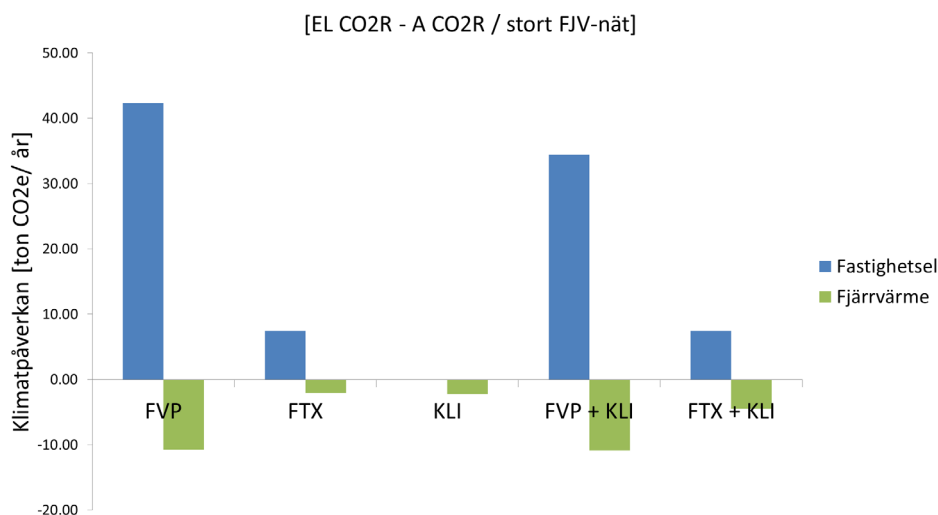
Figur 7.2 visas den samlade klimatpåverkan för både el och fjärrvärme för alla kombinationer av scenarieförutsättningar (för miljövärdering av marginalet och marginalavfall) för det stora fjärrvärmenätet. Figur 7.3 och 7.4 presenterar motsvarande resultat för det medelstora respektive det lilla fjärrvärmenätet. Figurerna visar det utfallsrum som scenarierna spänner upp för de olika åtgärds paketen och ger på så sätt en uppskattning av osäkerheterna kopplat till åtgärdernas miljöpåverkan.

Jämför vi utfallet i mellan de olika typnäten (Figur 7.2-7.4) så ser vi att spridningen för de testad näten är likartad för en specifik åtgärd. Även i absoluta tal skiljer det inte så mycket mellan de tre typnäten. Andra fjärrvärmesystem, t.ex. med högre fossilandel, skulle emellertid kunna ge större skillnader.

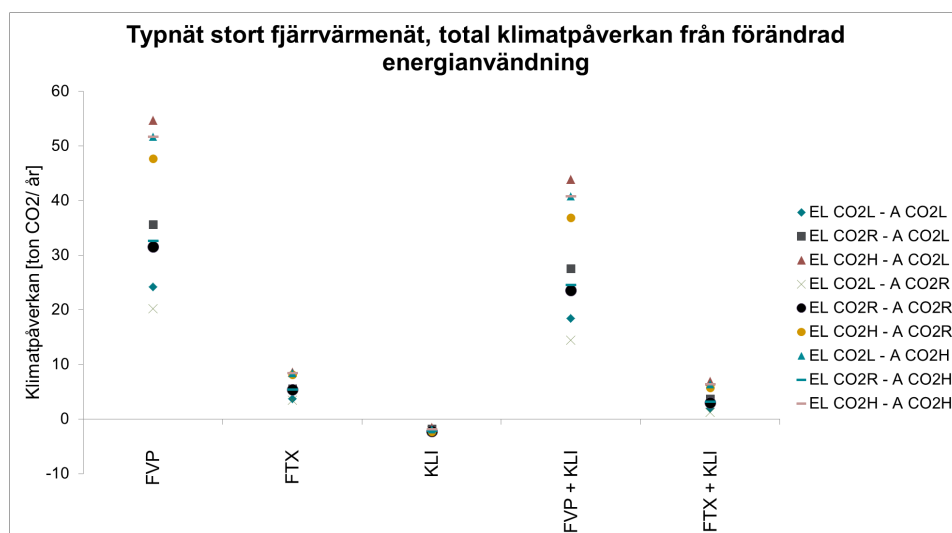
Miljövärderingen av marginalet kan sägas bli dimensionerande för utfallet. Val av avfallsscenario spelar och in, men ger inte lika stor spridning som elscenarierna. I Figur 7.2 och 7.3 kan det urskönjas att avfallsscenarierna bildar små grupperingar om tre runt de tre elscenarierna. Den ökade miljöpåverkan på grund av ökat

elbehov är generellt större än vinsten av minskat fjärrvärmebehov för de studerade fallen.

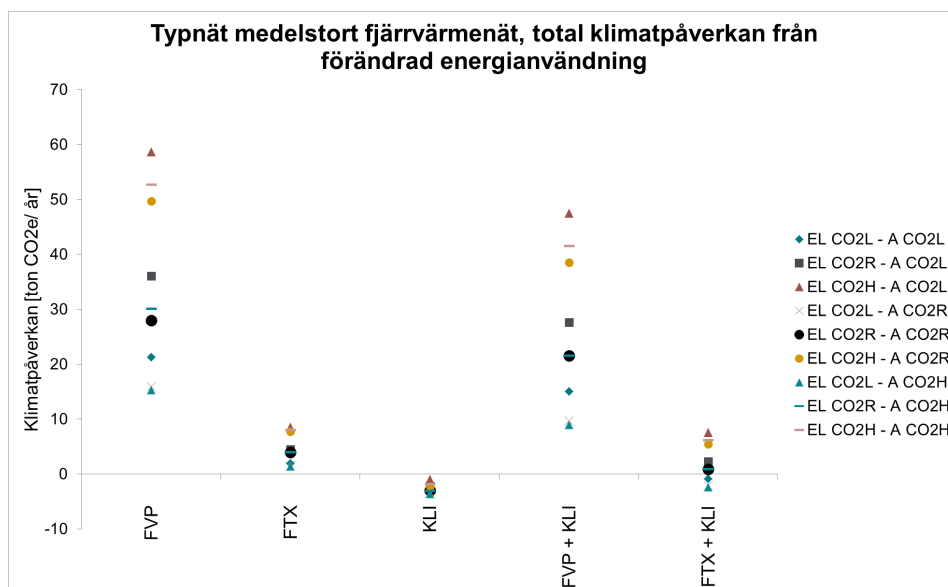
En liten spridning, eller ett litet utfallsrum för de olika scenarierna innebär ett mindre beroende av externa parametrar och osäkerheter som val av elmarginal och avfallsmarginal.



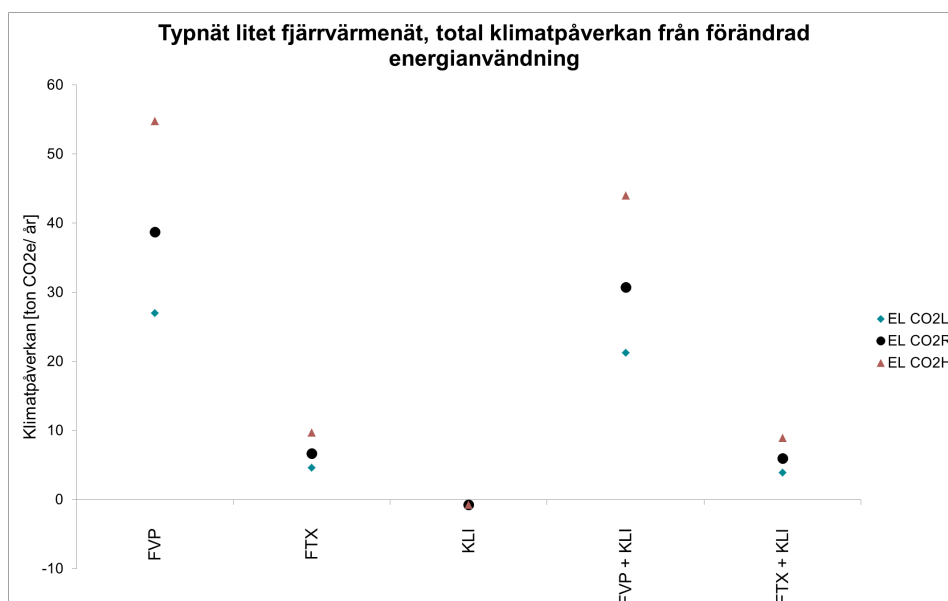
Figur 7.1: Exempel på klimatpåverkan för olika åtgärdspaket, med referensscenario för el och avfall för typnätet "stort fjärrvärmenät". Klimatpåverkan avser hela byggnadens förändrade energianvändning under ett år (jämför också med Figur 3.5 som visar hur energianvändningen ändras för åtgärdspaketen).



Figur 7.2: Total årlig klimatpåverkan av förändrad energianvändning för fem olika åtgärdspaket för energieffektiv renovering av ett flerbostadshus byggt inom miljonprogrammet. Typnät "stort fjärrvärmenät". Scenariobeteckningar: L – Låg, R – Referens, H – Hög, A – Avfall, EL-Elektricitet (för vidare scenarioförklaring, se avsnitt 5.2 och 6.2).



Figur 7.3: Total årlig klimatpåverkan av förändrad energianvändning för fem olika åtgärds paket för energieffektiv renovering av ett flerbostadshus byggt inom miljonprogrammet. Typnät "medelstort fjärrvärmenät". Scenariobeteckningar: L – Låg, R – Referens, H – Hög, A – Avfall, EL-Elektricitet (för vidare scenaroförklaring, se avsnitt 5.2 och 6.2).



Figur 7.4: Total årlig klimatpåverkan av förändrad energianvändning för fem olika åtgärds paket för energieffektiv renovering av ett flerbostadshus byggt inom miljonprogrammet. Typnät "litet fjärrvärmenät". Scenariobeteckningar: L – Låg, R – Referens, H – Hög, A – Avfall, EL-Elektricitet (för vidare scenaroförklaring, se avsnitt 5.2 och 6.2).

8 Andra miljöparametrar

De kvantitativa exemplen som tagits fram inom detta projekt fokuserar på beräkning av klimatpåverkan. Att fokusera på klimatpåverkan är ett resultat av diskussioner med branschens aktörer i projektets dialogmöten som visade att detta är den centrala miljöparametern av intresse för aktörerna. En fullständig bedömning av en energilösning kan dock behöva inkludera även andra viktiga miljö- eller hållbarhetsparametrar. I detta avsnitt diskuteras hinder och möjligheten för att utvidga metodiken till att inkludera användningen av energiresurser och ett urval andra miljöparametrar.

8.1 PRIMÄR- OCH SEKUNDÄRENERGI

Primärenergi är energi som människor inte omvandlat till annan form av energi. Primärenergikällor inkluderar bränslen som utvinns ur marken, som råolja och stenkol. Även sol och vind kan räknas som primärenergikällor. Primärenergin i 1 kWh eldningsolja är den mängd energi som utvunnits ur naturen för att producera eldningsoljan. Det inkluderar både energin i det färdiga bränslet, men också all energi som använts för att utvinna, transportera och raffinera oljan.

Beräkningen av primärenergi innehåller subjektiva metodval. Eldningsolja produceras exempelvis tillsammans med många andra produkter i ett raffinaderi. Det är inte självklart hur mycket av raffinaderiets energianvändning som ska räknas till just eldningsoljan. Valet av beräkningsmetod blir här subjektivt, vilket betyder att det kan variera mellan olika beräkningar.

För fossila bränslen har de subjektiva metodvalen ingen avgörande betydelse i beräkningen, då det mesta av primärenergin finns i själva bränslet. För andra energibärare kan de subjektiva metodvalen vara betydligt större. Primärenergin i el från kärnkraftverk definieras ofta som den värme som kärnbränslet utvecklar i reaktorn. Det är dock bara några procent av den energi som teoretiskt kan utvinnas ur uranet. Om primärenergin istället definieras som den fysikaliska energin i uranet blir mängden primärenergi i kärnkraftsel plötsligt många gånger större.

För sol-, vind- och vattenkraft räknar man ofta den elenergi som genereras i anläggningarna som primärenergin. Energin i sol och vind kan dock, som sagt, också räknas som primärenergi. Då blir mängden primärenergi i elenergin flera gånger större. Primärenergin i vattenkraftsel blir betydligt större om man definierar primärenergin som den potentiella energin i vattnet vid kraftverket.

Energin i spillvärme, avfall och restprodukter från skogsindustrin räknas ofta som "gratis" i en primärenergiberäkning. Beräkningen inkluderar då bara primärenergin i den hjälpenergi som behövs för att hantera och transportera värmen eller bränslet. Om energin i dessa energibärare istället skulle inkluderas i beräkningarna skulle mängden primärenergi bli många gånger större.

Eftersom alla dessa metodval är subjektiva finns det inte en objektivt korrekt metod att beräkna primärenergin. Ett sätt att hantera detta hinder är att söka konsensus kring vilka metodval som ska gälla. Sådana konsensusprocesser har

genomförts, exempelvis i Värmemarknadskommittén (VMK) (Värmemarknadskommittén, 2016) som inkluderade Fastighetsägarna, HSB, Hyresgästföreningen, Riksbyggen, SABO och Energiföretagen Sverige. Detta är ett exempel på en källa som kan användas i Tidstegsmetoden om den utvidgas till att inkludera primärenergi.

Om resultaten från VMK 2016 används kan det vara viktigt att påpeka att VMK i nästan alla fall ovan valde den metod som ger lägst resultat i primärenergiberäkningen. När en energilösning värderas med siffror från VMK kommer det därför i många fall att se ut som att den har relativt liten betydelse för primärenergiförbrukningen.

Sekundär energi är energi som omvandlats av människan. Det inkluderar energin i raffinerade bränslen och i elektricitet. Energin i bränslen och el kan lätt mätas, vilket skulle kunna göra beräkningen av behovet av sekundär ekonomi mer objektiv än en beräkning av primärenergi. Det finns dock viktiga metodval även i beräkningen av sekundärenergi, exempelvis när energin omvandlas flera gånger innan den når slutanvändaren. Det kanske tydligaste exemplet är el som produceras från raffinerade bränslen. Om beräkningen inkluderar det bränsle som används i kraftverket blir mängden sekundärenergi betydligt högre, jämfört med om beräkningen istället inkluderar den elenergi som produceras i kraftverket. Valet mellan dessa två beräkningsmetoder är subjektivt.

8.2 LUFTFÖRORENINGAR

Kärnan i klimatberäkningar i energisystemet är utsläpp av koldioxid från förbränning av fossila bränslen. Dessa utsläpp beror nästan helt på kolinnehållet i de bränslen som eldas och kan därför enkelt beräknas med god noggrannhet så snart mängden fossila bränslen är känt. För andra föroreningar beror emissionerna inte bara på bränslet utan också på förbränningsförhållanden och rökgasreningsteknik. Osäkerheten i utsläppssiffrorna kan vara mycket stor, om det inte finns kontinuerliga mätdata från de förbränningsanläggningar som faktiskt påverkas av den energilösning som studeras. Det är ett av skälen till att miljövärdering ibland begränsas till att bara inkludera klimatpåverkan.

Luftföroreningar som SO_2 , NO_x , m.m. kan förstås inkluderas i en miljövärdering om det finns mätdata från de anläggningar som påverkas av energilösningen. Sådana mätdata kommer dock ofta att saknas, om inte annat så för de framtida kraftverk vars byggnation påverkas av en ändrad elanvändning.

När mätdata saknas kan schablondata användas istället. Det har gjorts livscykelanalyser på många energibärare och dessa LCA-resultat kan användas som källor till schablondata. Siffrorna ger dock bara en grov uppskattning av hur den studerade energilösningen faktiskt påverkar utsläppen. LCA-baserade schablondata finns i Miljöfaktaboken (Gode et al., 2011) för emissioner till luft av SO_2 , NO_x , organiska föroreningar och partiklar samt för emissioner till vatten av kväve och fosfor.

De schablonsiffror som finns tillgängliga kan ge en grov uppskattning av hur en energilösning påverkar vissa slags miljöpåverkan utöver klimat: försurning,

övergödning och bildandet av marknära ozon. Effekten på människors hälsa är dock ännu svårare att bedöma, eftersom så många olika föroreningar bidrar till hälsoeffekter. Får många av dessa föroreningar finns inte ens schablondata.

9 Diskussion

Grundprincipen för Tidstegsmetoden är att identifiera konsekvenser i el-, fjärrvärme och fjärrkylanät av förändrad efterfrågan till följd av energitåtgärder i byggnader (även en förändring av byggnadens bränsleanvändning kan inkluderas vilket emellertid i de flesta fall är en rättfram procedur). När i tiden energianvändningen sker är en viktig del i metoden.

Dagens energisystem kan förväntas utvecklas över tid, men exakt hur utvecklingen kommer att se ut är förstås omöjligt att fastställa idag. Osäkerheten hanterar vi i metoden med hjälp av olika scenarier. Scenarierna bör vara utformade så att de tillsammans täcker in ett förhållandevis brett utfallsrum, men som ändå är relevant och inom rimlighetens gränser. På så sätt ger de tillsammans ett resultat som kan visa på ett rimligt spann för miljöpåverkan för en byggnadslösning som studeras.

Utvecklingen i elsystemet är beroende av beslut från en mängd olika aktörer. Den sammantagna spridning som framtidens tänkbara elsystem och tillhörande marginaltekniker kan komma att få är därmed stor. På liknande sätt ges scenarier som kopplar till avfallsförbränningens climateffekter inom projektet. Som diskuterats i rapporten, finns också kopplat till en förändrad avfallsförbränning ett antal olika potentiella systemeffekter.

Då elsystemet är sammankopplat mellan länder, kan en förändrad elanvändning i Sverige mycket väl leda till konsekvenser utanför landets gränser. För att beräkna marginaleffekten har vi i detta projekt utformat en dynamisk optimeringsmodell som fångar både kortsiktiga förändringar i driften av befintliga anläggningar och långsiktiga förändringar av den installerade effekten för olika produktionstekniker. Det finns både fördelar och nackdelar av att använda en energisystemmodell av detta slag. Fördelarna är att modellen kan ge insikter om samband och effekter som är svåra att fånga upp med en kvalitativ analys samt kvantifiering av dessa. Att utveckla optimeringsmodeller är tidskrävande och optimeringsmodellen i detta projekt är förhållandevis enkel. En vidareutveckling skulle exempelvis kunna omfatta fler tidssteg, fler modellår, och en högre geografisk upplösning. Effekten av en sådan modellutveckling på resultaten är svår att bedöma på förhand.

Projektets elanalys visar på att de tidsupplösta effekterna i elsystemet är känsliga för olika scenarioförutsättningar. Resultat kan bli förhållandevis olika även vid små förändringar av förutsättningarna. Särskilt när en förändrad elproduktion leder till en förändring i systemets installerade kapacitet (byggmarginal) kan CO_{2e}-effekten bli stor, och ibland oväntad. Som visades genom de tre presenterade elscenarierna kan likartad utveckling av elsystemet gällande den totala elproduktionsmixen innebära stora skillnader i systemets elmarginal. Exempelvis visar resultaten att vilken typ av styrmedel som ligger bakom systemets utveckling är av stor betydelse för vilka tekniker som utgör marginalproduktionen.

I kontrast till elsystemet så är fjärrvärmesystemen lokala i sin karaktär. I projektets diskussioner med aktörer i energibranschen framkom att möjligheterna för fjärrvärmebolag att, som indata till Tidstegsmetoden, leverera flera olika

framtidsscenarier för lokala fjärrvärmenät är begränsad. Lokalpolitiska miljömål, lokala förutsättningar, resurser för produktionsprognos samt entydighet mot kunder var några av de aspekter som lyftes fram för att belysa utmaningen med detta. För fjärrvärmenäten varierar det beroende på bland annat varje enskilt fjärrvärmebolags befintliga produktionsanläggningar, uppskattningar om framtida värmeunderlag, framtida investeringsplaner, styrmedel och liknande. Fjärrvärmesystemens framtida utveckling bör därför hanteras för varje enskilt fjärrvärmenät, utifrån de lokala förutsättningarna och möjligheterna till att framställa scenarier.

En energilösningens klimatpåverkan beror bland annat på de styrmedel som reglerar och påverkar energisystemet. Handeln med utsläppsrätter är ett tydligt exempel på detta. Minskad efterfrågan på el eller fjärrvärme som leder till reducerade utsläpp från el- eller fjärrvärmeproduktion innebär att utsläppen tillåts öka i någon annan anläggning som ingår i utsläppshandeln. I det korta perspektivet leder minskad användning av el och fjärrvärme alltså inte till någon reduktion av de globala koldioxidutsläppen, under förutsättning att det inte finns ett överskott på utsläppsrätter. Utsläppshandeln används därför ibland för att hävda att det ur klimatsynpunkt inte spelar någon roll om vi minskar eller ökar användningen av el och fjärrvärme.

Åtgärder "under" ett utsläppstak påverkar både priset på utsläppsrätter, utvecklingen av ny teknik och möjligheten att nå ambitiösa mål i framtiden. Åtgärder som minskar användningen av fossila bränslen för el- och fjärrvärmeproduktion kan möjliggöra en minskning av utsläppstaket på längre sikt. Minskade utsläpp från energisystemet frigör utsläppsrätter för industrin. I kontrast kan undvikande av åtgärder leda till högre utsläppsrättspriser och därmed risk för utsläppsläckage utanför handelssystemet. Att anta att vår användning av el och fjärrvärme inte spelar någon roll är en förenkling av verkligheten som kan bli en barriär till att införa effektiva energilösningar. En analys av dessa effekter är mycket komplicerad och osäker.

För fjärrvärme tas i Tidstegsmetoden fram en marginalmix för temperaturintervall baserad på utomhustemperaturen. Länken till temperatur valdes för att fjärrvärme-produktionen bedömdes i högre grad variera kopplat till temperaturen än av tidpunkten på dygnet. När värmebehovet ökar eller minskar så sker inte en momentan förändring i fjärrvärmeproduktionen utan det finns en tröghet i systemet genom exempelvis fjärrvärmeledning, byggnaders värmetröghet, eventuella ackumulatorer och liknande. Detta innebär att olika produktionsanläggningar kommer att påverkas vid samma temperatur. I enlighet med metodutveckling i etapp 1 av projektet (Gode et al., 2015), resulterar angreppssättet i en marginalmix som kan tolkas som en form av sannolikhetsfördelning för hur vanligt det kan vara att en viss teknik påverkas vid en viss temperatur.

Det kan vara viktigt att påpeka att de marginaleffekter som bestäms i energisystemet som en följd av en förändrad energianvändning bara är representativt i ett visst intervall. Sker stora förändringar i efterfrågan kommer de marginalscenarier som presenterats inte längre vara representativa (och i praktiken behöva uppdateras). Ett exempel kan vara att fjärrvärmemarginalen under vissa förutsättningar (bland annat höga utomhustemperatur, och avfallskraftvärme på

marginalen) redovisade negativa CO₂-utsläpp vid en ökad värmeefterfrågan (se avsnitt 4.2). Detta kan tolkas som att det under dessa förutsättningar är bättre ur ett klimatperspektiv ju mer värme som används. På grund av kapacitetsbegränsningar i den aktuella marginalproduktionsanläggningen kommer ju emellertid en större ökning av värmeefterfrågan leda till att andra anläggningar (med högre driftskostnad) tas i drift och därmed förändras även egenskaperna för marginalproduktionen.

Huvudfokus i detta projekt har inte varit att utvärdera olika energilösningar i byggnader, utan att istället vidareutveckla en metod för att möjliggöra sådana analyser. Som exemplifiering av metoden har emellertid klimateffekten av ett antal olika byggnadslösningar beräknats. Detta har gjorts för ett flerfamiljshus byggt under miljonprogrammet, och för tre olika tänkta fjärrvärmenät. Med ett begränsat antal nät som underlag, är det vanskligt att dra generella slutsatser kring vilka energilösningar är bäst ur klimatsynpunkt. Fjärrvärmesystemen i Sverige är olika, och bedömningar av energilösningars påverkan bör i möjligaste mån därför göras för de lokala förutsättningarna. Metoden kan även användas för byggnader som inte är fjärrvärmeanslutna. Beroende på vad som utgör uppvärmning i referensfallet, så kan naturligtvis utfallet för olika tekniklösningar falla väldigt olika ut.

För att understödja och underlätta en bredare praktisk användning av Tidstegsmetoden kan ett fortsatt arbete implementera metoden i ett praktiskt användbart verktyg. En möjlighet är som ett tillägg i något befintligt energisimuleringsprogram och en annan möjlighet är ett nyutvecklat separat verktyg. I ett verktyg kommer mycket av de beräkningar som beskrivits i hög utsträckning att automatiseras. Ett stort antal kombinationer av förutsättningar som genererar ett stort antal beräkningar, som vid en manuell beräkningsgång snabbt blir betungande, blir i en automatiserad process naturligtvis betydligt lättare.

10 Slutsatser

Projektet syftar till att vidareutveckla och exemplifiera en metod som kan användas för att beräkna konsekvenser ur miljöperspektiv av olika energilösningar i byggnader (grundversionen av metoden utvecklades i etapp 1 av projektet (Gode et al., 2015)). Projektets arbete har resulterat i en metod med ett tidsupplöst, framåtblickande och konsekvensorienterat perspektiv. I jämförelse med etapp 1 av projektet så har arbetet i etapp 2 resulterat i:

- En mer sammanhållen metod med bättre synkning mellan metodens olika delar. Framför allt gällande länkning mellan miljövärdering för fjärrvärme, el och avfall.
- Exemplifiering av metod genom nya typer av fallstudier. I etapp 1 togs metoden fram med fokus på effekten av småskalig egenproduktion av el/och värme i byggnader. Etapp 2 har visat att metoden är tillämpbar också på helt andra typer av åtgärder, och beräkningar har gjorts för energieffektiviseringsåtgärder i miljonprogramshus
- Etapp 2 har visat att utvecklad fjärrvärmemetod fungerar väl även för fjärrkyla.
- Ett kvantitativt angreppssätt har utvecklats för miljövärdering av el genom kvantitativ energisystemmodellering.
- El- och avfallscenarier har uppdaterats genom fördjupad analys.
- Arbetet har konstaterat att metoden kan tillämpas för andra miljöaspekter än klimat, såsom resursanvändning och luftföroreningar, men också att intresset är lågt för detta från flera aktörer i branschen.

I en fortsatt tillämpning kan utvecklat tillvägagångssätt bidra till miljömässigt mer välgrundade beslut vid renovering och nybyggnation av fastigheter. Metodiken är redan nu tillämpbar, men en vidare användning av metoden kan understödjas och underlättas av utveckling av ett användarvänligt verktyg.

Referenser

- AVFALL SVERIGE 2012a. Assessment of increased trade of combustible waste in the European Union. *RAPPORT F2012:4*. Avfall Sverige: Malmö.
- AVFALL SVERIGE 2012b. Kapacitetsutredning 2011. Tillgång och efterfrågan på avfallsbehandling till år 2020. *F2012:03*. Avfall Sverige: Malmö.
- AVFALL SVERIGE 2016. Svensk avfallshantering 2016. Avfall Sverige: Malmö.
- BREEAM-SE 2013. BREEAM-SE Svensk manual för nybyggnad och ombyggnad.
- COLLINGE, W. O., LANDIS, A. E., JONES, A. K., SCHAEFER, L. A. & BILEC, M. M. 2012. Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18 (3), 538:552.
- EKVALL, T. & WEIDEMA, BO P. 2004. System Boundaries and Input Data in Consequential Life Cycle Inventory Analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(3):161-171.
- ELFORSK Datum okänt. Miljövärdering av elanvändning. Broschyr sammanställd av EME Analys på uppdrag av Elforsk. Elforsk: Stockholm.
- ENERGIMYNDIGHETEN 2016a. Energiläget i siffror 2016. Eskilstuna.
- ENERGIMYNDIGHETEN 2016b. Fyra framtider Energisystemet efter 2020. *ET 2016:04*. Energimyndigheten: Eskilstuna.
- ENERGIMYNDIGHETEN 2017. Scenarier över Sveriges energisystem 2016. *ER 2017:06*. Energimyndigheten: Eskilstuna.
- EQUA SOLUTIONS AB 2016. IDA ICE. 4.7. 4.7 ed.
- ERLANDSSON, M., EKVALL, T., LINDFORS, L.-G. & JELSE, K. 2014a. Robust LCA: Typologi över LCA-metodik – två kompletterande systemsyner. *IVL rapport B2122*. IVL Svenska Miljöinstitutet: Stockholm.
- ERLANDSSON, M., IVERFELT, Å., ÖBERG, M., ANDERSSON, R., ELIASSON, M. & GYLLENRAM, R. 2014b. Robust användning av LCA – policysammanfattning. *IVL rapport C25*. IVL Svenska Miljöinstitutet: Stockholm.
- ERLANDSSON, M., LINDFORS, L.-G. & JELSE, K. 2013. Robust LCA: Metodval för robust miljöjämförelse med livscykelanalys (LCA) – introduktion för nyfikna. *IVL rapport B2121*. IVL Svenska Miljöinstitutet: Stockholm.
- ERLANDSSON, M. & SANDBERG, E. 2011. Resursindex för Energi - Konsekvensanalys för byggnader med fjärrvärme. *2011:7*. Svensk Fjärrvärme: Stockholm.
- FRÅNE, A., YOUHANAN, L., EKVALL, T. & JENSEN, C. 2016. Avfallsimport och materialåtervinning. *IVL-rapport B2266*. IVL Svenska Miljöinstitutet: Stockholm.
- GODE, J., FREDÉN, J., ADOLFSSON, I. & EKVALL, T. 2013. Värdering av fjärrvärmens resurseffektivitet och miljöpåverkan – Metodfrågor. *2013:3*. Svensk Fjärrvärme: Stockholm.
- GODE, J., LÄTT, A., EKVALL, T., MARTINSSON, F., ADOLFSSON, I. & LINDBLOM, J. 2015. Miljövärdering av energilösningar i byggnader - Metod för konsekvensanalys. *B 2240*. IVL Svenska Miljöinstitutet: Stockholm.

- GODE, J., MARTINSSON, F., HAGBERG, L., ÖMAN, A., HÖGLUND, J. & PALM, D. 2011. Miljöfaktaboken 2011 Uppskattade emissionsfaktorer för bränslen, el, värme och transporter. A08-833. Värmeforsk: Stockholm.
- IEA 2016. Energy Technology Perspectives 2016. Paris: OECD/IEA.
- IPCC 2012. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press.
- LÖNNBERG, J. & BLADH, J. 2016. Relative balancing contribution of hydropower plants and rivers Revision 2. VRD-R19:2015-Rev2. VATTENFALL R&D: Stockholm.
- MATTSSON, N., UNGER, T. & EKVALL, T. 2003. *Effects of perturbations in a dynamic system – The case of Nordic power production*. In Unger, T.: *Common energy and climate strategies for the Nordic countries – A model analysis*. Doktorsavhandling, Chalmers Tekniska Högskola.
- NATURVÅRDSVERKET. 2015. *Importen av avfall till Sverige ökar* [Online]. Naturvårdsverket. Available: <http://www.naturvardsverket.se/Nyheter-och-pressmeddelanden/Pressarkiv/Nyheter-och-pressmeddelanden-2015/Importen-av-avfall-till-Sverige-okar/> [Accessed].
- NORDIC ENERGY RESEARCH & IEA 2016. Nordic Energy Technology Perspectives 2016 - Cities, flexibility and pathways to carbon-neutrality. OECD, IEA, Nordic Energy Research: Paris.
- PEUPORTIER, B. & ROUX, C. 2015. Moving towards CLCA to model electricity consumption in buildings. *EcoSD Annal Workshop*, 51-58.
- PROFU 2013. Tio perspektiv på framtida avfallsbehandling. Rapport från forskningsprojektet "Perspektiv på framtida avfallsbehandling. PROFU.
- ROUX, C. & PEUPORTIER, B. 2014. *Considering temporal variation in the life cycle assessment of buildings, application to electricity consumption and production*, World SB14 Barcelona.
- ROUX, C., SCHALBART, P. & PEUPORTIER, B. 2015. Accounting for temporal variation of electricity production and consumption in the LCA of an energy-efficient house. *Journal of Cleaner Production*, 113, 532-540.
- SKÖLDBERG, H. & UNGER, T. 2008. Effekter av förändrad elanvändning/elproduktion modellberäkningar. 08:30. Elforsk: Stockholm.
- SKÖLDBERG, H., UNGER, T. & OLOFSSON, M. 2006. Marginalel och miljövärdering av el. 06:52. Elforsk: Stockholm.
- SVENSKA KRAFTNÄT 2015. Anpassning av elsystemet med en stor mängd förnybar elproduktion. Svenska kraftnät: Stockholm.
- USGBC 2013. LEED v4 User guide. US Green Building Council.
- WEIDEMA, BO P., EKVALL, T. & G, R. 2009. Guidelines for Consequential and Hybrid LCA. Deliverable D18 of work package 5 of the CALCAS project.
- VÄRMEMARKNADSKOMMITTÉN 2016. Överenskommelse i värmemarknadskommittén 2016, om synen på bokförda miljövärden för fastigheter uppvärmda med fjärrvärme med värden för 2016. In: VÄRMEMARKNADSKOMMITTÉN (ed.). Värmemarknadskommittén: Stockholm.

Bilaga A: Ordlista

I tabellen nedan beskrivs termer och förkortningar som återkommer i rapporten. Beskrivningen är den innebörd som rapportförfattarna använder sig av i denna studie.

Term	Beskrivning
Bokföring	Miljövärderingsmetod som används när utvärdering ska göras av enskilda produkter. Det innebär en fördelning av resursanvändning och emissioner för ett system som hör till en aktör eller en funktion. Resultatet blir en miljöprofil för aktören eller funktionen. Summan av alla produkters resursanvändning och emissioner inom ett system ska motsvara det systemets totala resursanvändning och emissioner.
CO2-ekvivalenter (CO2e)	Gemensam enhet för att jämföra olika växthusgasers påverkan på klimatet.
Dynamisk	Med dynamisk avses i denna rapport förändring över längre tidshorisonter, exempelvis energisystemets successiva förändring från idag och över åren till ett framtida energisystem om ca 20 år.
Förändringskonsekvens	Vi använder detta begrepp i rapporten för att beskriva konsekvensen av en förändring i energianvändning och/eller -produktion. Effekten av en förändrad energianvändning. Förändrad elanvändning och/eller -produktion leder till förändringskonsekvenser i elsystemet och förändrad fjärrvärmeanvändning och/eller -produktion orsakar förändringskonsekvenser i fjärrvärmesystemet.
GWP	GWP = Global Warming Potential. Avser omräkningsfaktor för att kunna jämföra olika växthusgasers bidrag till växthuseffekten. Anges i CO2ekvivalenter.
Konsekvensanalys	Konsekvensanalys ger information om effekterna av ett specifikt beslut, eller information om hur en beslutsfattare kan påverka miljön. Det inkluderar indirekta effekter av en förändring eller ett beslut på andra system.
LCA-perspektiv	LCA står för livscykelanalys, som beskriver en produkts miljöpåverkan "från vaggan till graven". Med LCA-perspektiv på ett bränsle inkluderas därmed all miljöpåverkan från utvinning av bränslet, via förädling och distribution, till omvandling och slutanvändning.
MBT	MBT = Mechanical-Biological Treatment. Mekanisk-biologisk behandling av avfall.
Primärenergi	Primärenergi är en teknisk term för energi som inte har omvandlats till annan form av energi. Beräkningar av primärenergi behövs för att kunna göra mer rättvisande jämförelser mellan olika energislag.
Primärenergifaktor	I detta sammanhang avser begreppet en omräkningsfaktor för att beräkna hur mycket primärenergi som krävs för att få fram en enhet energi i den form som används för ett slutligt ändamål. Exempel: primärenergifaktorer för fjärrvärme kan ha enheten MJinsatt energi/MJvärme eller kWhinsatt energi/kWhvärme.
RDF	RDF = Refused Derived Fuels, dvs. sorterat, torkat och finfördelat avfall.
Tidsupplöst miljökonsekvens	Här avses skillnader i miljökonsekvenser på grund av kortsiktiga förändringar i energisystemet som skiljer sig över exempelvis dygnets timmar och mellan månader och årstider.
Växthusgas	Gemensamt namn för de olika gaser som bidrar till förstärkt växthuseffekt. De vanligaste är koldioxid (CO ₂), kvävedioxid (N ₂ O) och metan (CH ₄).

Bilaga B: Bokförings- och konsekvensanalys

Behov av att analysera miljöeffekterna av energianvändning är vanligt förekommande. Resultatet av en sådan analys är beroende av vilket angreppssätt som används för att beräkna miljöeffekterna. Resultatet kan variera väsentligt beroende på vilken metod som används och vilka antaganden som görs.

I detta avsnitt ger vi en kort introduktion till miljövärdering av energi och förklarar kortfattat några viktiga begrepp. Vi motiverar också varför vi i projektet utgår från det som inom LCA-metodik benämns konsekvensanalys.

TVÅ GRUNDLÄGGANDE SYNSÄTT

Bokföring respektive *konsekvensanalys* utgör två grundläggande typer av miljövärdering av energi. Det som skiljer dem åt är om analysen avser en fördelning av utsläpp mellan olika aktörer (bokföring) eller en beräkning av miljöeffekterna av förändrad energianvändning (konsekvensanalys). I livscykel-analysmetodik är dessa vedertagna synsätt och benämns bokförings-LCA respektive konsekvens-LCA (se exempelvis (Erlandsson et al., 2014a, Erlandsson et al., 2014b, Erlandsson et al., 2013, Ekvall och Weidema, 2004, Weidema et al., 2009)). Erlandsson et al. (2013, 2014a-b) har genomfört en studie med målet att ta fram en robust metodik och typologi för LCA för byggsektorn. En huvudslutsats från studien, är just att det finns de två grundläggande synsätten inom LCA – bokförings-LCA och konsekvens-LCA.

I litteraturen används även andra begrepp än bokföring och konsekvensanalys. Exempelvis sammanfattar Elforsk (Elforsk, Datum okänt) i en broschyr fem olika synsätt på miljövärdering av el och Sköldberg et al. (Sköldberg et al., 2006) identifierar åtta olika miljövärderingsprinciper. Samtliga dessa kan dock delas in i antingen bokföring eller konsekvensanalys, se Tabell B.1 och Tabell B.2. Det finns ingen motsägelse mellan dessa fem respektive åtta betraktelsesätten och de två grundläggande typerna av miljövärdering. Bokföring och konsekvensanalys är bredare begrepp som omfattar fler än ett betraktelsesätt i tabellerna nedan.

Tabell B.1. Olika betraktelsesätt för miljövärdering av el och dess koppling till bokföring- respektive konsekvensanalys. Källa: Elforsk (Elforsk, Datum okänt)

Betraktelsesätt enligt Elforsk	Bokföring eller konsekvensanalys
Ögonblicksbild – marginalet	Konsekvensanalys
Tillbakablickande perspektiv	Bokföring (notera dock att en historisk analys av en förändring är en konsekvensanalys)
Framåtblickande perspektiv	Konsekvensanalys (notera dock att en bedömning av en framtida miljöprofil ur fördelningsperspektiv är en bokföring)
EU:s handelssystem för utsläppsrätter	Konsekvensanalys
Konsumentstyrkt (produktionsspecifik el)	Bokföring

Tabell B.2. Olika betraktelsesätt för miljövärdering av el och hur de hänger samman med bokföring och konsekvensanalys. Källa: (Sköldbberg et al., 2006)

Betraktelsesätt enligt Sköldbberg et al. (2006)	Bokföring eller konsekvensanalys
Marginalel – kort eller lång sikt	Konsekvensanalys
Dynamisk störningseffekt	Konsekvensanalys
Medelel	Bokföring
Scenariobunden värdering	Bokföring eller konsekvensanalys (i detta fall väljer användaren själv vilken elproduktionsteknik som antas användas/förändras så beroende på syftet med studien blir det antingen bokföring eller konsekvensanalys)
Avtalsrelaterat (produktionsspecifikt el)	Bokföring
Styrmedelsbaserat	Konsekvensanalys
Historiskt betingad värdering	Bokföring
Ideologiskt betingad värdering	Bokföring

BOKFÖRING – FÖRDELNING AV ANSVAR FÖR EMISSIONER OCH RESURSANVÄNDNING

I en **bokföring** kartläggs resursanvändning och emissioner för ett system som hör till en aktör eller en funktion. Resultatet blir en miljöprofil för aktören eller funktionen som anger hur mycket miljöbelastning de ansvarar för. Bokföring är inte fokus för denna studie eftersom det inte avspeglar förväntade effekter av en förändrad energianvändning, exempelvis orsakad av olika typer av energilösningar på byggnader. Bokföring tar normalt inte hänsyn till driftordning mellan olika anläggningar eller vid vilken tidpunkt de körs.

Eftersom bokföring handlar om en fördelning av ansvar för bland annat utsläpp bör metoden innebära att emissionerna från olika miljöprofiler är adderbara: summan av miljöprofilerna från alla aktörer eller alla funktioner i världen bör vara lika med världens samlade miljöbelastning. Varje system ansvarar för miljöbelastningen för utvinning, transport, förädling och slutlig användning av elenergi och andra energibärare i proportion till hur mycket av den energibäraren som förbrukas i systemet.

Kravet på adderbarhet gör att genomsnittliga data (medelenergi) för produktion av energibäraren används för att beräkna hur mycket miljöbelastning som ska knytas till förbrukningen av varje MJ eller kWh. Problemet kan vara att bestämma var gränserna för energisystemet går. I en miljöbedömning av fjärrvärme på en viss plats är systemet uppenbart det lokala fjärrvärmesystemet. För el är systemgränsen inte lika uppenbar. Traditionellt har elförsörjning varit en nationell fråga. För många människor är det därför fortfarande naturligt att använda nationella genomsnittsdata. Efter etableringen av den nordiska elbörsen uppfattar många elsystemet som nordiskt. Det är ett exempel på en organisatorisk systemgräns. Det finns också ett EU-direktiv med mål om en gemensam europeisk elmarknad och bestämmelser om att flaskhalsar i överföringen mellan länder ska byggas bort. I detta perspektiv är EU en annan organisatorisk systemgräns. En ytterligare möjlighet är att utgå från den el som kunden har kontrakterat med sin elleverantör

(ursprungsmärkning av el). För att kravet om adderbarhet ska vara uppfyllt behövs ett tillförlitligt system för avräkning av produktionsspecifik el från den totala elproduktionsmixen. Återstoden, alltså det som inte säljs produktionsspecifikt, kallas residualmix.

Med undantag för systemet för ursprungsmärkning av el påverkar styrmedel inte miljövärdering vid bokföringsstudier med historiskt perspektiv då statistiken redan är känd. En bokföring för en framtidssituation behöver dock ta hänsyn till hur framtida energisystemet kan utvecklas och då kan styrmedel givetvis påverka.

KONSEKVENSANALYS – ANALYS AV EFFEKTER AV FÖRÄNDRING

En **konsekvensanalys** ger information om miljöeffekterna av ett specifikt beslut, eller information om hur en beslutsfattare kan påverka miljön. Konsekvensanalys är utgångspunkten i detta projekt. Skälet till detta är att projektet fokuserar på att ta fram en metod för att beräkna miljöeffekter av att installera eller inte installera olika energilösningar i en byggnad. Energilösningar kan vara både lösningar för energieffektivitet och för produktion av förnyelsebar energi. Metoden ska visa på effekterna av olika val och ge underlag för planering av byggnaders energilösningar. Förutsättningen är alltså att analysera konsekvenser av förändrad energianvändning.

Konsekvensanalyser tillämpas då en konstaterad förändring i energianvändning ska analyseras eller där underlag för beslut om förändring ska tas fram. Det kan både avse en analys av en historisk händelse eller en analys av en framtida förändring.

Konsekvensanalyser beaktar effekter av förändringar, exempelvis vad en förändrad elanvändning innebär för dagens och framtidens elsystem. Detta projekt har analyserat olika konsekvenser (så kallade förändringskonsekvenser). Vi skiljer på kortsiktiga och långsiktiga effekter. Kortsiktiga effekter beskrivs ofta med begreppet "driftmarginal" medan "byggmarginalen" beskriver förändringens påverkan på utbyggnad och nedläggning av anläggningar. Kombinationen av dessa kallas ibland komplex marginal (Mattsson et al., 2003), dynamisk förändringskonsekvens eller dynamisk störningseffekt (Sköldberg och Unger, 2008). Driftmarginalen i energisystemet består av de anläggningar vars nyttjandegrad påverkas av en ändrad energianvändning. Byggmarginalen består av de anläggningar vars produktionskapacitet påverkas av en ändrad energianvändning. Produktionskapaciteten kan påverkas genom investeringar i nya, genom om- och tillbyggnad av existerande, och genom rivning eller stängning av gamla anläggningar. Det som avses med byggmarginal i detta projekt är alltså betydligt bredare än vad begreppet låter påskina. En ändring i produktionskapaciteten tar tid: från några enstaka år för byggandet av vindkraft eller stängning av gamla kraftverk, till ett decennium eller mer för byggandet av nya kärnkraftverk. En förändrad energianvändning får därför först effekter på utnyttjandet av existerande anläggningar och så småningom eventuellt effekter på produktionskapaciteten.

Den faktiska förändringskonsekvensen, det vill säga de anläggningar som faktiskt påverkas av en ändrad energianvändning, är svår att identifiera. De effekter vi

identifierar i en miljöbedömning är därför mer eller mindre välgrundade antaganden. De kan vara baserade på kvalitativa och mentala modeller eller på kvantitativa datormodeller. I båda fallen är modellerna en förenkling av verkligheten. Förändringskonsekvenserna framåt i tiden är alltid osäkra. Byggmarginalen är i regel mer osäker än driftmarginalen. Vi använder scenarioanalys för att hantera denna osäkerhet.

Det finns styrmedel som har betydelse för konsekvensanalyser och som påverkar resultatet av miljöbedömningen. Det gäller exempelvis utsläppshandeln för koldioxid som genom ett pris på utsläppsrätter påverkar såväl energipriser och därmed efterfrågan som marginalteknologier och energimixar. Även elcertifikatsystemet och andra styrmedel för förnybar energi är relevanta genom att ambition och utformning av styrmedlen påverkar hur framtidens elsystem ser ut.

Bilaga C: Emissionsfaktorer

Tabell C.1 visar emissionsfaktorer för växthusgaser som använts i beräkningarna.

Tabell C.1. Emissionsfaktorer för växthusgaser i livscykelperspektiv. Om inte annat anges är källan Miljöfaktaboken 2011 (Gode et al., 2011).

Teknik/energislut/bränsle	Enhet/värde	Källor och kommentarer
BRÄNSLEN:	g CO ₂ ekvivalenter/kWh _{bränsle}	
Stenkol	385	
EO1	291	
EO2	301	
EO3-5	301	
Naturgas	247	
Övrigt fossilt	301	
Industriell spillvärme	12	Avser hjälpenergi för pumpning
Avfall	-46 till 71	Scenarioberoende, se avsnitt 6.2.2
Primära trädbränslen	37	
Sekundära trädbränslen	16	
RT-flis	11	
Pellets, briketter och pulver	19	
Bioolja	9	
Tallbeckolja	9	
Övriga biobränslen	37	
Torv	433	
ELPRODUKTIONSTEKNIKER:	g CO ₂ ekvivalenter/kWh _{el}	
Vindkraft	4	
Sol	39-84	(IPCC, 2012)

Bilaga D: Metodval och scenarier i litteraturen

I detta kapitel presenteras en litteraturgenomgång som dels har tittat på metoder som liknar Tidstegsmetoden i den vetenskapliga litteraturen och dels redovisar några av de olika energiscenarier som finns tillgänglig i litteraturen. Litteraturstudie har utgjort vägledning i en del av metodval som gjorts i utvecklingen av Tidstegsmetoden.

METODER I LITTERATUREN

Statiskt och dynamiskt angreppssätt

Traditionella livscykelanalyser (LCA) av byggnader har tidigare i hög utsträckning haft ett statiskt angreppssätt. Årsmedelvärden har i regel använts för hela byggnadens livslängd och energibehovet i byggnaden antas vara konstant. Ofta väljs ett historiskt år för att ta fram emissionsfaktorer som används i studien. På detta sätt tas ingen hänsyn till att en byggnads funktion kan ändras under livstiden och att energiförbrukningen kan ändras genom renoveringar. För att kunna hantera förändringar som sker under en byggnads livstid kan en dynamisk LCA-metod användas.

Collinge et al. (Collinge et al., 2012) jämför statisk LCA (traditionell LCA) med dynamisk LCA. I studien studeras en byggnad som är byggd 1971 och antas ha en livslängd på 75 år. Den dynamiska LCA-studien består av att byggnadens livslängd delas in i fyra faser: konstruktion, första brukningsfas, renovering och framtida brukningsfas. Den statiska analysen består endast av konstruktionsfasen och första brukarfas. Den dynamiska analysen är även tidsuppdelad per månad och elanvändningen antas öka med tiden. Analysen visar att val av statiskt eller dynamiskt angreppssätt har betydelse för resultaten. För det studerade fallet blir byggnadens miljöpåverkan mindre med det dynamiska perspektivet för de flesta miljöpåverkanskategorier, med undantag av den icke-förnybar energianvändning som visar en ökning. En orsak till att den icke-förnybara energianvändningen ökar är att elanvändningen antas öka samtidigt som elproduktionen är fossil under hela tidsperioden. Författarna drar slutsatsen att ett dynamiskt angreppssätt kan förbättra användbarheten och relevansen av LCA-resultat i bedömning av byggnaders prestanda (Collinge et al., 2012).

Roux et al. (Roux et al., 2015) har gjort en liknande studie som Collinge et al. (2012). Det som skiljer studierna åt är att Collinge et al. (2012) studerar hela byggnadens livscykel medan Roux et al. (2015) endast tittade på en byggnads elanvändning under ett specifikt år. Byggnaden som Roux et al. (2015) studerar är ett bostadshus med solceller som, om det blir ett överskott, säljer el till nätet. Studien går ut på att jämföra miljöpåvekan från elanvändningen om årliga eller timbaserade faktorer används. Byggnaden står i Frankrike och det är det franska elsystemet har därför använts som bas för beräkningarna. För vissa påverkanaskategorier är det en stor skillnad mellan den årliga faktorn och den lägsta samt högsta timbaserade faktorn. I klimatpåverkanaskategorin (GWP, global warming potential) är den högsta timfaktorn på 198 % av årsmedelvärdet medan

den lägsta timfaktorn är endast 37 % av årsmedelvärdet. Även vissa andra kategorier visade en stor variation mellan högsta och lägsta timfaktorn, t.ex. försurningspåverkanskategorin (AP, acidification potential). För AP, redovisas den högsta timfaktorn vara 190 % av medelvärdet, medan den lägsta är 47 % av medelvärdet.

Resultatet i studien redovisas efter olika typer av elanvändning så som tappvarmvatten, uppvärmning och kyla med mera (Roux et al., 2015). Skillnaden i utfall mellan användning av årliga värden och timvärden kan vara upp till 40 % för GWP och AP, när det totala elbehovet studeras. För tappvarmvatten (TVV) ses en minskning med 12 % för timvärden jämfört med årsvärden beroende på att eluppvärmningen av TVV sker under "off-peak".

Roux et al. poängterar att emissionsfaktorerna från denna studie inte kan användas i "buildings design tools" för att faktorerna för elproduktionen gäller för år 2013. Just detta år producerade vattenkraften 12 % högre än normalt. Användandet av bara ett år gör att det är svårt att dra generella slutsatser.

Metod som kopplar samman byggnadens energianvändning med energisystemet

Roux and Peuportier (Roux och Peuportier, 2014) har tagit fram en metod som kopplar elproduktion med en specifik elanvändning i en byggnad, inklusive elanvändning för uppvärmning, tappvarmvatten med mera. I studien görs en jämförelse mellan att använda årliga och timbaserade faktorer. Första steget i metoden är att representera skillnader i elproduktion över säsong, vecka, och dygnet. En Fourier-analys används här för att hitta frekvenser för de olika variationerna som sker i elproduktionen. Fourier-analysen tar hänsyn till både elproduktion och utomhustemperatur. Utomhustemperatur tas med för att en stor del av Frankrikes elbehov utgörs av uppvärmning av byggnader. Förutom den lokala elproduktionen i Frankrike tas även import från andra länder in i beräkningen. Ungefär 6 % av totala elbehovet utgörs av import från Tyskland, Schweiz, Spanien, Italien, Storbritannien och Belgien.

Fourieranalysen ger i studien olika produktionsmixer, vilka kopplas ihop med olika typer av elanvändningen i en byggnad. Metoden testas på ett enfamiljshus som är av lågenergityp. Huset har både solceller och solpaneler. Elen som solcellerna producerar kan säljas till elnätet, vilket görs när det finns ett överskott av el. Den sålda elen antas ersätta befintlig elproduktion för timmen som elen såldes.

Analysen består i att jämföra denna beräkningsmetod med en årlig beräkning, det vill säga en traditionell LCA. Resultatet visar att det är en skillnad i miljöpåvekan mellan metoderna. Användandet av en timupplösning istället för årsmedel ger i detta fall en ökning i miljöpåverkan från termisk elproduktion medan miljöpåverkan från kärnkraft minskar (primärenergibehov och radioaktivt avfall)

Att gå ifrån bokföringanalys till konsekvensanalys

Peuportier and Roux utvecklar i en senare studie (Peuportier och Roux, 2015) sitt arbete genom att ta fram en metod för att studera marginella effekter av att

implementera olika tekniker till en byggnad. På grund av att många tekniker som t.ex. värmepumpar och solceller (PV) har en lång livslängd, kommer dessa tekniker påverka elproduktionen på både kort och lång sikt. Författarna föreslår en metod som består av fyra steg för att kunna ta hänsyn till korta och långsiktiga effekter:

- Insamling av timbaserad elproduktion för landet.
- Allokering av olika variationer i elproduktionen med elanvändningen (t.ex. uppvärmning är säsongsberoende medan TVV är baslast).
- Besvara frågan: Hur kan byggnaden påverka produktionsmixen? För att kunna vara på denna fråga krävs det att marginalteknikerna är definierade.
- Utformning av elscenarier på mellan och lång sikt som tar hänsyn till investeringar i ny kapacitet.

I studien fokuserar författarna på de första två stegen i metoden och börjar även titta på det tredje steget. I det tredje steget tar de fram en metod för att hitta vilka tekniker som ligger på marginalen. Det två första stegen har samma tillvägagångssätt som tidigare arbete av samma författare. Tillvägagångssättet för att hitta den kortsiktiga marginalmixen består av två steg:

- För varje timme: Ta fram vilken teknik som är högst upp i körordningen. Det vill säga vilken teknik som har den dyraste driftkostnaden för den specifika timmen.
- 5 % eller 10 % av körordningen: Ta fram marginaltekniker som utgör 5 eller 10 % av totala elproduktionen för varje timme.

Marginalmixarna för de år som författarna studerar består till en stor del av kol och olja. Resterande produktion är kärnkraft. Kärnkraften står för ungefär 20 % när marginalen utgörs av 5 % av totala elproduktionen medan kärnkraftsandelen ökar till ca 40 % när 10 % av totala elproduktionen antas utgöras av marginalmixen.

Marginalmixarna jämförs med en annan studie som har tagit fram den franska marginalmixen. Den andra marginalmixen ska ses som en referens och mixen är framtagen med hjälp av ett simuleringsprogram. Jämförelsen mellan referens marginalmixen och författarnas två marginalmixar visar att marginalmixen som står för 5 % av totala elproduktionen liknar mest referens marginalmixen.

Nästa steg i modellen är att studera långsiktiga marginaltekniker. För att kunna göra det behövs tre frågor besvaras:

- Hur kommer utvecklingen av den installerad kapacitet se ut? Vilka typer av kapacitet kommer att installeras respektive läggas ned? Vad krävs för att dessa kapaciteter ska läggas ner eller installeras?
- Hur kommer utvecklingen av behovet för olika tekniker se ut?
- Vilka trender kommer att påverka den specifika byggnaden (renoveringstoppar med mera)?

Studiens marginalmixar tar inte hänsyn till import. I Frankrike importeras 6 % av totala elbehovet. Importens tas inte med på grund av att det är svårt att uppskatta import i körordningen. Det beror på att importpriset variera mycket. En fördel

med denna metod är att den är enkel. Dock medför det att alla underliggande mekanismer inte tas hänsyn till.

EXEMPEL PÅ ENERGISCENARIER

Det finns en stor mängd studier som för olika geografiska nivåer (t.ex. nationellt, regionalt, globalt) presenterar framtidsscenarier för energisystemets utveckling. Scenarierna har olika utgångspunkter och syfte och tas fram på olika sätt. Ofta ligger en kvantitativ energisystemmodellering som grund, i andra fall handlar det om mer kvalitativt framtagna scenarier. Nedan nämns ett axplock av de många studier som finns på området, med särskilt fokus på det svenska perspektivet.

I arbetet inom Tidstegen-projektet har en utgångspunkt för framtagandet av elmarginalscenarierna varit att utgå från ett etablerat energiscenario. Detta scenario bör vara framställt med en väl förankrad metodik, vara publicerat och ha en spridning och kunna anses ha en förhållandevis bred acceptans. Eftersom Tidstegen-metoden avser att ta hänsyn till konsekvenser i elproduktion av en förändrad efterfrågan, konsekvenser som kan ske också utanför Sveriges gränser, var ett krav att scenariot bör ha ett internationellt perspektiv och inte bara presentera en utveckling för Sveriges energisystem. Dessutom behövdes en god datatillgång från scenariot, som möjliggör en replikering av resultaten i den modell som vi har använt oss av i elmarginalanalysen.

Med ovanstående kriterier i åtanke föll valet, som tidigare redovisats (se avsnitt 5.2.1), på ett scenario från Nordisk Energiforsknings (NER) och International Energy Agency's (IEA) projekt Nordic Energy Technology Perspectives, NETP (Nordic Energy Research och IEA, 2016). NETP-rapportens scenarier kan betecknas som normativa i den mening att de studerar hur ett visst klimatmål kan uppnås på ett kostnadseffektivt sätt. I NETP finns det ett huvudscenario och två varianter av huvudscenariot. Ena varianterna studerar effekterna av att avveckla kärnkraften tidigare än planerat och den andra varianten studera effekterna av att en högre flexibilitet i elsystemet (Nordic Energy Research och IEA, 2016).

NETP-projektet har ett fokus på utvecklingen i de nordiska länderna, men med hänsyn tagen (t.ex. gällande elhandel) till utvecklingen i övriga Europa och den globala utvecklingen i stort. Modelleringen som ligger till grund för framställandet av scenarierna har gjorts med IEA's så kallade ETP-modellen, vilket är en applikation av TIMES-modellen, samt med den så kallade Balmorel-modellen. NETP är en nordisk version av IEA's återkommande studie (vartannat år) Energy Technology Perspectives (ETP) vilken presenterar scenarier för energisystemet framtida utveckling på global nivå med fokus på hur klimatmål kan uppnås (IEA, 2016).

Exempel på scenarier framtagna på nationell nivå inkluderar de långsiktiga scenarier som Energimyndigheten tar fram vartannat år som utgör underlag till Sveriges rapportering till Europeiska kommissionen (Energimyndigheten, 2017). Tidshorisonten för rapporteringen av Sveriges klimatutsläpp till Europeiska kommissionen är år 2035 men scenarierna som presenteras i Energimyndighetens senaste rapport har en tidshorisont till år 2050. Utöver de tre scenarier som krävs till rapportering till Europeiska kommissionen finns i Energimyndighetens rapport

fem ytterligare scenarier i vilka bland annat ytterligare känslighetsanalys av bränslepris och priser för utsläppsrätter inkluderats. Priserna i rapporteringen till Europeiska kommissionen anses i rapporten vara relativt höga och detta har en stor påverkan på resultatet. För att kunna använda detta resultat i andra sammanhang tog Energimyndigheten fram fler scenarier där priser på fossila bränslen är lägre än i scenarierna som rapporteras till Europeiska kommissionen. Utgångspunkten i alla scenarier är att utgå ifrån dagens klimatpolitik och styrmedel. På så sätt kan långsiktiga scenarier ses som en konsekvensanalys av dagens klimatpolitik.

Rapporten Fyra framtider (Energimyndigheten, 2016b) är ett ytterligare exempel scenarioanalys från Energimyndigheten. Fyra framtider har ett annat tillvägagångssätt än ovan presenterat arbete. Fyra Framtider presenterar explorativa scenarier för fyra möjliga framtidsbilder beroende på synen på energi.

Scenarierna i Fyra framtider (Energimyndigheten, 2016b) benämns Forte, Legato, Espresso och Vivace. I Forte är det energi som driver tillväxt och framgång i samhället. Därför utgår energipolitiken till att säkerställa tillgångar på energi med låga och stabila energipriser. I Legato ses energin som en global begränsad resurs. Det leder till en jämn och rättvis resursfördelning på en global nivå. Ekologisk hållbarhet och globalrättvisa är fokusområdena för energipolitiken. I Espresso är energi ett uttrycksmedel. Viljan att kunna tillgodo se sitt eget behov genom inköp av tjänster och ökad egenproduktion hos energianvändarna ökar. Energipolitiken fokuserar på att undanröja hinder för egen energiproduktion, handel med tjänster och nya energimarknader. I det sista scenariot, Vivace, ses energi som viktig komponent för att ha en tillväxt på klimatets villkor. Sverige vill ha en ledande roll inom utveckling av klimatlösningar och miljöteknik så att ett hållbart globalt energisystem kan uppnås. Därför fokuserar energipolitiken på klimatsmart forskning och innovation, demonstration och kommersialisering.

Bilaga E: Systemflexibilitetsindex

Att utvärdera konsekvenser av olika energilösningar kan vara relevant att göra utifrån andra parametrar än rena miljöparametrar. En sådan parameter kan vara vilken grad olika energilösningar kan bidra till flexibilitet i energisystemet. Nedan beskrivs ett "systemflexibilitetsindex" som har utvecklats inom projektet. Indexet tittar på hur väl en energilösning korrelerar mot den icke-planerbara kraften i elsystemet. I samråd med projektets referensgrupp beslutades att tillsvidare utelämna indexet från Tidstegsmetoden, då det ansågs ligga utanför metodens huvudsakliga fokus. Nedan redogörs emellertid projektets resultat inom detta område, vilket kan komma att vidareutvecklas i ett fortsatt arbete.

Det inom projektet utvecklade systemflexibilitetsindexet visar på hur väl en energilösning korrelerar mot den icke-planerbara kraften i elsystemet. Genom att ha en stark korrelation underlättas arbetet att ha ett elsystem i balans. Detta index tittar på energilösningens elanvändning. Ett liknande index finns för fjärrvärme i rapporten Resursindex (Erlandsson och Sandberg, 2011). Detta index heter Energiindex. Energiindex tittar på sambandet mellan en byggnads värmelast och värmeproducentens produktionssystem. Detta sker genom att bestämma sambandet mellan andel värmeenergi från baslastproduktion (i relation till hela värmebehovet) och hur denna andel varierar med baslastens utnyttjandetid.

Elsystemet måste vara i balans mellan elproduktion och elanvändning i varje sekund. Idag finns det olika komponenter som ser till att elsystemet är i balans. Olika komponenter används för att kunna balansera i olika tidshorisonter. I en kort tidshorisont, sekunder, reglerar vattenkraften men i ett långt tidsperspektiv, säsong, kan kärnkraften ses om en regleringskraft. Det gör kärnkraften genom att ha revision av anläggningar när elbehovet är som lägst.

Under de senaste åren och i framtiden kommer andelen av icke-planerbar kraft, t.ex. vindkraft och solkraft, att öka. Det ger en större osäkerhet i planeringen av att balansera elsystemet. På grund av att osäkerheten ökar kommer fler och nya sätt att balansera elsystemet att behövas. En komponent som inte är fullt utvecklad men som Svenska kraftnät anser är viktig, är flexibilitetsmekanismer (Svenska kraftnät, 2015). Flexibilitetsmekanismer är ett brett begrepp som syftar till att produktion, förbrukning, elnät och lager ändrar sin förbrukning eller sitt behov så att elnät hamnar i balans. Det kan betyda ett hushåll flyttar sin förbrukning från perioder med effektbrist till perioder med effektöverskott.

Wråke et al (Nordic Energy Research och IEA, 2016) lyfter också fram att det flexibilitetsmekanismer kommer bli viktigt i framtiden, speciellt när en stor del av elproduktionen kommer vara vindkraft.

Hushållens möjlighet att flytta sin förbrukning över tid lyfts fram som en balans- och reglerresurs med en stor utvecklingspotential. I en rapport från Elforsk, utförd av Sweco, anges potentialen för effektreduktioner från hushållen till minst 2 000 MW. I ett nuvarande regeringsuppdrag utreder Energimarknadsinspektionen olika aktörers incitament att öka efterfrågeflexibiliteten. Utredningen ska föreslå

åtgärder som kan underlätta och påskynda utvecklingen mot större effektivitet på elmarknaden.

Inom detta projekt har vi vidareutvecklat ett index som studerar hur väl en byggnads elförbrukning kommer att kunna reglera icke-planerbarkraft för tre olika tidshorisonter. Metoden bygger på en rapport av Vattenfall (Lönnberg och Bladh, 2016) som studerar det relativa reglerbidrag från vattenkraftverk för tre olika tidshorisonter. Tidshorisonterna är dygn, månad och säsong.

Grundtanken i Vattenfalls rapport (Lönnberg och Bladh, 2016) är att studera hur väl produktionen från ett vattenkraftverk korrelerar till residual-lasten. Residual-lasten är elbehovet minus den icke-planerbara produktionen. På så sätt fås en uppfattning om hur väl vattenkraftsverkets produktion reglerar den icke-planerbara produktionen. Det gör vattenkraftverket genom att producera när den icke-planerbara kraften inte producerar och vice versa.

Ett sätt för en byggnad att hjälpa elsystemet att vara i balans är att förbruka el när det finns mycket icke-planerbar kraft i systemet och minska sin förbrukning när det är lite icke-planerbar kraft i systemet. På så sätt frigörs planerbar kraft vilket underlättar planeringsarbetet. Utifrån detta har metoden presenterad av Vattenfall metod modifierats. Den i detta projekt föreslagna modifieringen består i att byggnadens elförbrukning ska antikorrelera med residual-lasten samt att metoden inte tar hänsyn energimängden för byggnaden och lasten. Denna modifierade metoden kallas här för "systemfleksibilitetsindex".

Systemfleksibilitetsindexet ger en uppfattning hur väl en vald energilösning för en byggnad kommer bidra till att reglera elsystemet för tre tidshorisonter. Med reglering i detta fall menas att byggnaden använder el när det finns stora mängder icke-planerbar kraft i systemet och minskar sin förbrukning när andelen är liten. Indexet beskriver inte hur de valda teknikerna kan flytta last från en timme till en annan. Det kommer troligtvis vara allt viktigare i framtiden att det finns system och lösningar som kan flytta sin last mellan timmar.

Systemfleksibilitetsindexet fås fram med hjälp av ekvationerna nedan. Den så kallade korrelationskoefficienten (Pearsons produktmomentkorrelationskoefficient) mellan residual-lasten och nettoköpt el har använts vilket är den vanliga vid bedömning av hur samvarierande två variabler är. I vårt fall definieras lasten som ett negativt tal och en positiv korrelationskoefficient är det bättre än en negativ, samma förhållande som i Vattenfall-rapporten (Lönnberg och Bladh, 2016).

$$\rho = \frac{\text{cov}(P_{\text{res}}, P_{\text{netload}})}{\sigma P_{\text{res}} \sigma P_{\text{load}}}$$

Där ρ är det relativa reglerbidraget, $\text{cov}(P_{\text{res}}, P_{\text{netload}})$ är kovariansen mellan P_{res} residuallasten och P_{netload} nettolasten, köpt el, från nätet. σP_{res} och σP_{load} är standardavvikelsen.

Residual-lasten (P_{res}) är det som blir över när lasten (total elanvändning per tidsenhet) har tillgotts av den variabla förnybara energin. Det som återstår är det elbehov som måste tillgodoses av "planerbar kraft" (P_{plan}).

$$P_{res} = P_{load} - P_{vind} - P_{sol}$$

Där P_{load} är elförbrukningen och P_{vind} och P_{sol} är produktion från variabel förnybara energikällor vind och sol. P_{res} är residual-lasten, vilket är ekvivalent med behovet av kraft från planerbara kraftslag som termisk kraft och stor del av vattenkraften.

$$\sum_{k=1}^N P_{plan} = P_{res}$$

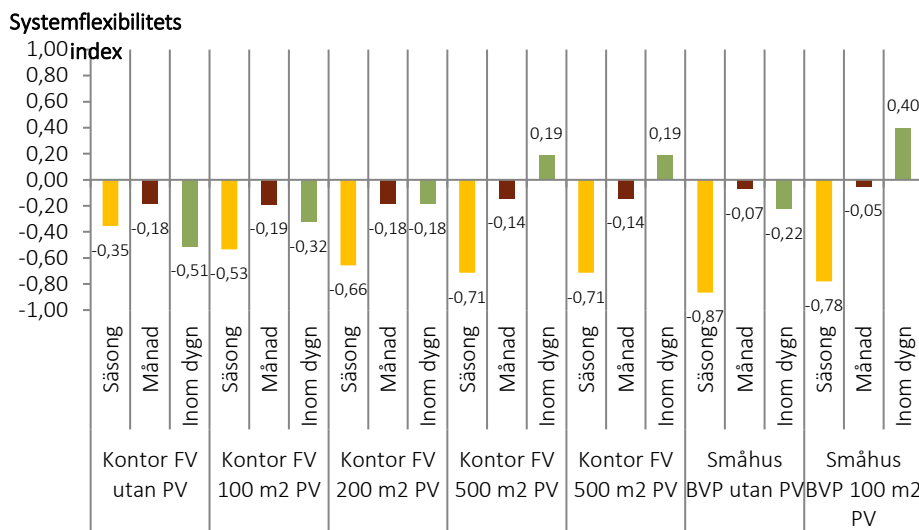
Där P_{plan} är produktionen i ett planerbart kraftverk k och N är totala antalet planerbara kraftverk medan P_{res} är residual-lasten.

I Vattenfalls rapport (Lönnberg och Bladh, 2016) används tre olika tidshorisonter för att kvantifiera det relativa reglerbidraget. Dessa är inom dygnet, månad och säsong.

- Med "inom dygnet" avses korrelationen mellan timvärden (elanvändning och residuallast) inom ett dygn och att man sen tar medelvärde av alla dessa dygn. Totalt blir det medelvärde av 365 värden per år.
- Med "månad" avses korrelationen mellan 28 dygnsmedelvärden (elanvändning och residuallast) som förskuts ett dygn i taget. Totalt blir det medelvärde av 365 korrelationskoefficienter per år.
- Med "säsong" avses korrelationen mellan 52 veckomedelvärden. Alltså endast 1 korrelationskoefficient per år.

I Figur E.1 presenteras exempel på systemflexibilitetsindexet för olika energilösningar för småhus och för kontor. Resultatet för månad och för dygn är ett årsmedelvärde. Ett positivt värde i figuren innebär att byggnadens elförbrukning har en positiv korrelation till icke planerbar produktion, vilket innebär att planerbar kraft frigörs. Ett negativt värde innebär att byggnaden har en hög förbrukning av el när andelen icke-planerbar kraft i systemet är lågt. Detta innebär att andelen planerbar kraft måste öka.

För majoriteten av fallen och tidshorisonterna bidrar byggnaden inte till att frigöra planerbar kraft. Det är främst tider som de olika fallen har sin förbrukning som den icke planerbara kraften är som lägst. Det är svårt att säga vilken tidshorison som är och kommer att vara viktigast för elsystemet. Genom att underlätta att hålla elnätet i balans under dygnet kommer mer vattenkraft att frigörs, på grund av att det är främst vattenkraften som bidrar till reglering under denna tidshorison. Behovet att kunna reglera mellan säsonger kommer troligen bli mer viktigt i framtiden med tanke på avvecklingen av kärnkraften.



Figur E.1 Exempel på systemflexibilitetsindex. Positiva värden innebär att byggnadens elförbrukning har en positiv korrelation till icke planerbar produktion, vilket innebär att planerbar kraft frigörs. Ett negativ värde innebär att byggnaden har en hög förbrukning av el när andelen icke planerbar kraft i systemet är lågt, vilket ger ett högt behov av planerbar kraft. (FV, fjärrvärme; PV, solceller; BVP, bergvärmepump)

Systemflexibilitetsindexet ger en indikation på vilket sätt ens valda energilösning kommer att bidra till balanseringen av elsystemet. I planering och projektering av energilösningar är det även viktigt att fundera på om det är möjligt att installera system och tekniker som kan flytta last mellan timmar. I en rapport från Svenska kraftnät (Svenska kraftnät, 2015) lyft det fram att i framtiden kommer det bli allt svårare att ha ett elsystem i balans på en regional nivå, främst i elprisområde SE3. SE3 är Sveriges tredje elprisregion och där ligger bland annat Stockholm och Göteborg. Anledningen till att SE3 är mer utsatt än andra elprisregioner är för att elförbrukning är hög samtidigt som kärnkraft ska läggas ned i regionen. Detta gör att SE3 kommer bli mer beroende av el från norra Sverige vilket kan begränsas av överföringsbegränsningar mellan elprisregionerna.

Bilaga F: Tidstegsmetoden i beräkningsverktyg

En gemensam slutsats från projektets första etapp var att det finns fördelar och större möjlighet för genomslag för metoden om den kan implementeras i redan etablerade verktyg (energisimuleringsprogram). Detta projekt har påbörjat en utredning hur vad som kan krävas för att detta skall kunna genomföras.

Arbetet har genomförts i form av intervjuer med företag inom energisimuleringsbranschen, samt i dialog med byggherrar, energibolag, sakkunniga inom programvaruutveckling. Nedan redovisas kort en del insikter i detta arbete.

DISKUSSION MED PROGRAMVARUUTVECKLARE

Möten har genomförts med Per Sahlin på programvarubolaget EQUA, som utvecklar energisimuleringsprogrammet IDA ICE, samt med Niklas Uddenäs på programvarubolaget Strusoft, som utvecklar energisimuleringsprogrammet VIP Energy. Syftet med mötena var att diskutera och undersöka om det föreligger möjlighet till implementering av Tidstegsmetoden i energisimuleringsprogram för byggnader.

I diskussion med EQUA framhölls vikten av att det tidigt i processen blir tydligt vem kunden är och vilka incitament som finns om man ska ta fram ett nytt verktyg, eller någon form av efterbehandling av resultat från ett befintligt verktyg, som t.ex. IDA. På något sätt måste någon betala för produkten eller tjänsten. Ett problemexempel är om man ska optimera på områdesnivå, då är det inte självklart vem som ska betala eller efterfråga resultaten.

Idag har EQUA redan databashantering utanför själva programmen där kunder, mot betalning, själva kan lägga in produkter med egna specifikationer. Detta utan att EQUA hanterar data, utan bara erbjuder kopplingen till deras programvaror. Något liknande koncept med fristående databas kan man tänka sig för också för miljövärdering. Generellt gäller att affärsmodellen är viktig för att projektet ska kunna leva vidare och inte vara beroende av anslagspengar.

En risk ligger i att den svenska marknaden är för liten även om det blir spridning, att man måste ut på den europeiska marknaden och få upp volymen för att finansieringen ska gå ihop. Dock krävs att man börjar på den svenska marknaden då intresset är mycket större för dessa frågor än i många andra länder, t.ex. Tyskland. En annan utmaning ligger i att kunderna måste få förståelse, incitament och drivkraft för att det ska få en spridning.

EQUA har implementerat flera olika certifieringssystem redan, bland annat Miljöbyggnad, som har fått stor spridning i Sverige. Det finns fördelar med att gå in i ett system som Miljöbyggnad, men det finns och stora utmaningar. Tidstegen och Miljöbyggnad har två vitt skilda syften och användningsområden inom LCA där Miljöbyggnad utgår från bokföringsperspektivet med energimix och årsdata som grund för miljövärdering, medan Tidstegen utgår från ett konsekvensanalysperspektiv med tidsupplöst marginaldata som grund för miljövärdering.

Vad gäller möjlighet för implementering av en utökad miljövärderingsfunktion i IDA ICE så ses det som klart genomförbart om det gäller efterbehandling av data, d.v.s. att emissionsfaktorer multipliceras med energibehov för olika tidssteg. Mer arbete krävs om miljövärderingen ska ha en optimerande funktion, alltså att användningen till viss del styrs av tillgång och olika signaler, såsom tariffer eller CO₂.

Strusofts VIP-Energy har den största marknadsandelen i Sverige för energisimulering av byggnader där energikonsulter står för majoriteten av kunder. De främsta behoven från kunderna är framförallt kostnadseffektivitet men också att beräkningsproceduren är snabb. VIP-Energy levererar bland annat en resultatfil med timvärden för behov av el, värme och kyla. Det finns ingen teknisk begränsning i programmet som skulle hindra en sammanlänkning med ett verktyg för tidsupplöst miljövärdering av energianvändning i byggnader.

Hindret, eller utmaningen, som Strusoft ser är att kunderna måste efterfråga en applikation för miljövärdering för att det ska implementeras i praktiken. Det finns en risk att den kundgrupp som i stor utsträckning använder VIP-Energy inte har ekonomiskt utrymme att efterfråga en extra miljövärderingstjänst om det skulle innebära extra kostnader, eftersom projekten ofta är prispressade. De framhäver dock att de är öppna för vidareutveckling av programmet mot denna typ av tjänst och att det ligger i deras intresse att erbjuda det deras kunder efterfrågar.

DISKUSSION MED REFERENSGRUPPEN

Flera i projektets referensgrupp har varit drivande i att arbeta fram ett enkelt verktyg som kan användas av byggherrar vid projektering eller vid renovering som bygger på resultat från projektet. Detta har gjorts utanför ramen för detta projekt vilket visar på att det finns en efterfrågan och ett driv att omsätta forskningsresultat i praktiken.

Representanter från energibolagen i referensgruppen har också uttryckt ett behov av att räkna miljövärdering på ett annat sätt än med bokföringsmetodik eftersom det inte ger en representativ bild av hur energisystemet påverkas av förändrad energianvändning i byggnad. De ser också fördelarna med att i framtiden leverera tidsupplöst marginalproduktion till verktyget för att ge en ännu bättre bild av fjärrvärmesystemens miljöpåverkan.

Bilaga G: Beräkningsstruktur för fjärrvärme och fjärrkyla

Tabellstrukturerna nedan avser att förtydliga beräkningsgången för miljövärderingen av fjärrvärme och fjärrkyla, som tidigare beskrivits i kapitel 4, samt de uppgifter som behövs som indata och/eller ska beräknas.

Tabellstrukturerna exemplifieras för ett fjärrvärmesystem med 5 stycken anläggningar, men samma procedur gäller även med annat antal anläggningar i systemet såväl som för fjärrkylesystem.

Den slutliga tabellen "Miljövärden fjärrvärme per utomhustemperatur" (under steg 6) är i sin tur indata för beräkning av byggnadsenergilösningarnas miljöpåverkan.

Vilken aktör som i en praktisk tillämpning av metoden tar fram data och utför vilka steg i beräkningarna kan variera. Minimnivå av indata som krävs från energibolag utgörs av steg 1 och 2. För en förbättrad förankring är det emellertid önskvärt att fler steg utförs av, eller i samråd med, energibolagen.

För ett framtida beräkningsverktyg för Tidstegsmetoden är olika nivå av verktygsindata möjlig beroende på utformning av verktyget. Flera lösningar är tänkbara, allt från en enkel tillämpning, där den slutgiltiga tabellen "Miljövärden fjärrvärme per utomhustemperatur" utgör indata i verktyget (medan underliggande beräkningar görs utanför verktyget), till ett verktyg där också fjärrvärme/fjärrkyla-simuleringen inkluderas (d.v.s. steg 3 till steg 6 inkluderas i verktyget) och endast steg 1 och steg 2 utgör indata.

Steg 1. Produktionsdata

Indata från energibolag

Produktionsdata i 20XX
Ort XX

Timma	Utomhustemp. [grader C]	Total produktion [MWh]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
... osv tom 8760		

Steg 2. Anläggningsdata

Indata från energibolag

	Bränsle [-]	Effekt [MWvärme]	Effekt [MWvärme RGK]	Effekt [MWel]	Verkningsgrad [%]	Alfavärde (el/värme) [kvot]	Rörlig D&U (exkl. energikostnader) [kr/MWh]	Revisionsstider [timmar under året]
Anläggning 1								
Anläggning 2								
Anläggning 3								
Anläggning 4								
Anläggning 5								

Steg 3. Produktionsordning

Indata från energibolag eller baserat på beräkning av rörliga produktionskostnader utifrån antagna energikostnader och sortering från låg till hög

	Produktions- kostnad [kr/MWh]	Produktions- ordning [1, 2, 3, 4 eller 5]
Anläggning 1		
Anläggning 2		
Anläggning 3		
Anläggning 4		
Anläggning 5		

Steg 4. Simulering av produktion

Indata från energibolag eller beräkning genom att kombinera produktionskurva (steg 1), med effektdata (steg 2), och produktionsordning (steg 3)

Timma	Marginal- anläggning [Anläggning 1,2,3,4 eller 5]
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
... osv tom 8760	

Steg 5. Miljövärdering av fjärrvärme

Beräkning utifrån föregående steg och indata från miljövärdering av el och bränslen

	Från steg 1	Från steg 4	Från steg 2	Alfavärde (el/värme)	Bränsle	Från andra delar av Tidstegsmetod		
	Utomhustemp.	Marginal- anläggning	Verkningsgrad			Miljövärden Bränslen	Miljövärden EI	Miljövärden fjärrvärme
Timma	[grader C]	[Anläggning 1- 5]	[%]	[kvot]	[]	[tex kg CO ₂ e per MWh]	[tex kg CO ₂ e per MWh]	[tex kg CO ₂ e per MWh]
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
... osv tom 8760								

**Steg 6. Transformation av temperaturberoende marginalmix**

Beräkning utifrån föregående steg

Sorterad utomhustemp.	Marginalmix, andel av tid en viss anläggning utgör marginalanläggning						Miljövärden fjärrvärme per utomhustemperatur
[grader C]	Anläggning 1 [0-100%]	Anläggning 2 [0-100%]	Anläggning 3 [0-100%]	Anläggning 4 [0-100%]	Anläggning 5 [0-100%]	Summa	[tex kg CO ₂ e per MWh]
-15						100%	
-14						100%	
-13						100%	
-12						100%	
-11						100%	
-10						100%	
-9						100%	
-8						100%	
-7						100%	
-6						100%	
-5						100%	
-4						100%	
-3						100%	
-2						100%	
-1						100%	
0						100%	
1						100%	
2						100%	
3						100%	
4						100%	
5						100%	
6						100%	
7						100%	
8						100%	
9						100%	
10						100%	
11						100%	
12						100%	
13						100%	
14						100%	
15						100%	
16						100%	
17						100%	
18						100%	
19						100%	
20						100%	

MILJÖVÄRDERING AV ENERGI- LÖSNINGAR I BYGGNADER ETAPP 2

Att välja miljömässigt gynnsamma energilösningar i byggnadsbeståndet kommer vara en viktig del i omställningen till ett mer hållbart energisystem. Här har en metod utvecklats som värderar byggnaders energianvändning ur miljösynpunkt genom att analysera miljökonsekvenserna av en byggnads energilösningar.

Metoden, kallad tidstegsmetoden, visar effekten av olika val och ger underlag för beslut i planering av renovering och nybyggnation. För att på ett representativt sätt kunna bedöma miljökonsekvensen av en förändrad energianvändning är tidsaspekten central. Produktion av el, fjärrvärme och fjärrkyla kan vara förknippade med stora skillnader i miljöpåverkan beroende på vilken tid som avses, exempelvis om det är sommar eller vinter, nutid eller framtid. Den här metoden hanterar därför två olika tidsdimensioner. Den ena avser den framtida utvecklingen av energisystemet – från nu och cirka 20 år framåt i tiden. Den andra dimensionen är tidsupplösning över året, vilket fångar variationer över säsonger, månader, dygn och timmar.

Rapporten innehåller också resultat från fallstudier där klimatpåverkan av olika energieffektiviseringsåtgärder i ett flerfamiljshus byggt under miljonprogrammet beräknas med metoden.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se