



En analys av en vattenkraftstations uppvärmningsbehov

An analysis of the heat demand of a hydroelectric power station

Amanda Åström

Sammanfattning

Vid vattenkraftverket i Hammarforsen har man nyligen förnyat transformatorer. Tidigare var en av transformatorerna placerad i den södra stationsbyggnaden där värmeförlusterna användes för uppvärmning, men den är nu borttagen. Detta arbete har syftat till att undersöka hur stort uppvärmningsbehovet är för den södra stationsbyggnaden samt analysera hur värmen kan tillgodoses tillsammans med möjliga energieffektiviseringsåtgärder. Det här projektet är ett examensarbete i civilingenjörsprogrammet i energiteknik vid Umeå universitet. Arbetet har utförts under våren 2014 på uppdrag av Statkraft Sverige AB.

Byggnadens uppvärmningsbehov beräknades teoretiskt utifrån kända samband tillsammans med temperaturmätningar på plats. Två systemförslag analyserades gällande hur värmen kan tillgodoses, dessa är dels ett bergvärmesystem samt ett värmeåtervinningssystem från generatoren. Två energieffektiviseringsåtgärder analyserades också där det ena var att sänka temperaturen i maskinhallen och det andra var att isolera maskinhallen mot transformatorbyggnaden.

Resultatet gav att södra stationsbyggnaden har ett dimensionerande effektbehov på 117 kW och ett värmeenergibehov på 328 MWh/år.

En sänkning av maskinhallens temperatur från 18°C till 14°C ger att energibehovet minskar med 33 MWh/år. Isolering av maskinhall mot transformatorbyggnad ger en sänkning med 11 MWh/år. En kombination av de båda åtgärderna resulterar i en minskning med 46 MWh/år vilket motsvarar en ekonomisk besparing på ca 14 500 kr/år.

Med värmeåtervinning från generatoren fås den största energibesparingen på 197 MWh/år. Den årliga besparingen är ca 50 000 kr för bergvärmesystemet och 62 500 kr för återvinningssystemet. Den höga investeringskostnaden på 1 500 000 kr för värmeåtervinningssystemet gör dock att bergvärmepumpslösningen med en investeringskostnad på 1 204 000 kr är mindre kostsam enligt en livscykelkostnadsanalys. Värmeåtervinning från generatoren är ett intressant alternativ då en stor mängd värme finns att tillgå. Alternativet kan vara lönsamt i samband med en planerad renovering av generatorns kylsystem.

Abstract

At the hydroelectric plant in Hammarforsen the transformers have been renewed. One of the transformers was earlier placed inside the building on the south riverbank where the heat losses were used to heat the building. It is now removed why the heat is no longer accessible. This work had the aim to investigate the heat demand of the building on the south riverbank in Hammarforsen, together with an analysis of energy efficiency arrangements and systems to provide the heat demand. This project is the master thesis in the Master of Science Programme in Energy Engineering at Umeå University. The project was performed during spring 2014 on behalf of Statkraft Sverige AB.

The heat demand was theoretically calculated with known relations together with temperature measurements. Two heating systems were evaluated; geothermal heating by means of heat pumps and heat recovery from the generator. Also two energy efficiency arrangements were analyzed; these were lowering the temperature in the machine room and isolating the machine room from the transformer room.

The results show that the hydroelectric plant on the south river bank requires 117 kW heat and has an annual heat demand of 328 MWh.

The heat demand reduces by 33 MWh/year by lowering the temperature in the machine room. A reduction of 11 MWh/year is given when the machine room is isolated from the transformer room. The heat demand lowers by 46 MWh/year with a combination of the two arrangements, which is equal to an annual economic saving of 14 500 SEK.

Heat recovery from the generator gives the highest energy saving of 197 MWh/year. The annual economic saving connected to the geothermal heating system is calculated to 50 000 SEK and 62 500 SEK for the heat recovery system. The geothermal heating system with an investment cost of 1 204 000 SEK is less expensive according to a life cycle cost analysis because of the high investment cost of 1 500 000 SEK connected to the heat recovery system. Heat recovery from the generator is an interesting alternative because of the large amount of heat that is accessible. The alternative could be a solution when a planned renovation of the cooling system is valid.

Förord

Det här examensarbetet är ett avslutande arbete i civilingenjörsprogrammet i energiteknik vid Tekniska högskolan, Umeå universitet. Arbetet utfördes för Statkraft Sverige AB våren 2014 och omfattar 30 högskolepoäng.

Jag vill framföra ett varmt tack till min uppdragsgivare och handledare på Statkraft, Gabriel Waaranperä, för möjligheten att utföra det här projektet och den hjälp jag fått under arbetets gång. Jag vill även tacka Per Mikaelsson och Lars Jonsson på Statkraft som kommit med goda idéer och varit till stor hjälp. Ett varmt tack riktas även till personalen vid Hammarforsens kraftverk, Bertil Jonsson m.fl., som guidat mig vid platsbesök och med deras erfarenheter kommit med ovärderlig information.

Till Lotta Bertilsson, Angela Odelberg och Anders Bertilsson på Statkraft, Åsa Borg på Intab, Martin Lindfors på Skellefteå kraft, Sune Persson på Jämtkraft samt Niclas Lindberg och Anders Nilsson på IVT vill jag även rikta ett tack för att ni tagit er tid att svara på mina frågor. Tack även till min handledare vid Umeå universitet, Mohsen Soleimani-Mohseni, för den hjälp jag fått.

Slutligen vill jag tacka all personal på Statkraft i Sollefteå för det vänliga bemötandet och alla trevliga stunder.

Sollefteå, maj 2014

Amanda Åström

Begreppsförklaring

Absolut temperatur	Temperatur angiven enligt Kelvinskalan. Förändringen i en absolut temperatur är oberoende av fysikaliska egenskaper hos ämnet.
Diskontering	Omräkning av ett värde till nuvärde.
Dygnsmedeltemperatur	Medelvärde av temperaturer över ett dygn.
Fluid	Vätska eller gas.
Förnybar	En naturresurs som förnyas snabbare än den förbrukas.
Gränstemperatur	Den temperatur ett värmesystem ska kunna täcka, några grader under den önskade inomhustemperaturen. Solinstrålning och internt genererad värme antas täcka de resterande graderna.
Klimatskal	En byggnads yttre konstruktion (väggar, tak och golv).
Köldbryggor	Områden i en konstruktion där värmegenomgången är förhöjd på grund av ökad värmeledning.
Monetär	Rörande pengar.
Nuvärde	Dagens värde av en viss kostnad eller utgift som utfaller framåt i tiden.
Normalårskorrigerig	En metod för att kunna göra en rättvis jämförelse av energianvändningen för olika perioder utan att variationer i utomhustemperaturen får för stor inverkan.
Normalårstemperatur	Medianvärdet under ett normalår.
Perimeter	Tvådimensionellt objekts omkrets.
Samhällsekonomi	Hur ett samhälle nyttjar sina resurser, inbegriper alla ekonomiska händelser i samhället.
Sugrör	Vattenväg efter turbinen som genom sugverkan ökar turbinens effekt.
Sugrörslucka	Lucka för att stänga vattenväg nedströms turbinen.
Transmissionsförlust	Värmeförlust genom en konstruktion.
Årsmedeltemperatur	Summan av dygnsmedeltemperaturer dividerat med antalet dygn.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Om Statkraft	1
1.2	Projektuppgiftens bakgrund	2
1.3	Syfte och mål	2
1.4	Avgränsningar	2
1.5	Metod	2
2	Vattenkraft och elproduktion	4
2.1	Vattenkraft i Sverige	6
2.2	Vattenkraftens miljöpåverkan	6
2.3	Effektivare elanvändning	7
3	Värmetransport	8
3.1	Konvektion	8
3.1.1	Värmeöverföringskoefficient vid naturlig konvektion	8
3.2	Konduktion	10
3.3	Strålning	11
4	Byggnaders uppvärmningsbehov	12
4.1	Transmissionsförluster	13
4.2	Ventilationsförluster och oavsiktligt luftläckage	14
4.3	Dimensionering av uppvärmningssystem	16
4.4	Värmegenomgångstal, U -värde	17
4.5	Köldbryggor	18
4.6	Normalårskorrigerering	20
5	Relativ fuktighet och kondens	21
6	Komfort och inomhusklimat	22
7	Värmeavgivning och värmeåtervinning från generator	23
8	Ekonomi	26
8.1	Payoff-metoden	26
8.2	Livscykelkostnadsanalys	26
9	Värmepump	28
9.1	Uteluftsvärmepump	29
9.2	Sjövattenvärmepump	29
9.3	Bergvärmepump	29
10	Värmeväxlare	30
11	Kraftverket i Hammarforsen	31

12	Genomförande	33
12.1	Datainsamling och mätutrustning	33
12.2	Avstängning av uppvärmningssystem	34
12.3	Beräkning av byggnadens uppvärmningsbehov	34
12.4	Beräkning av generatorns värmeavgivning	36
13	Teori gällande lösningsförslag	37
13.1	Åtgärdsförslag 1: Isolera maskinhall mot transformatorbyggnad	37
13.2	Åtgärdsförslag 2: Sänka inomhustemperaturen	37
13.3	Systemalternativ 1: Bergvärmepump	38
13.4	Systemalternativ 2: Värmeåtervinning från generator	39
14	Resultat	40
14.1	Södra stationsbyggnadens uppvärmningsbehov	40
14.2	Värmeförluster från generator G5	42
14.3	Analys av lösningsförslag	43
14.3.1	Åtgärdsförslag 1 och 2: Isolera maskinhall mot transformatorbyggnad samt sänka maskinhallens temperatur	43
14.3.2	Systemalternativ 1 och 2: Bergvärme och värmeåtervinning från generator	45
14.4	Sammanställning av lösningsförslag	47
15	Diskussion	50
15.1	Byggnadens uppvärmningsbehov	50
15.2	Åtgärdsförslag	50
15.3	Värmeförluster från generator	51
15.4	Systemalternativ	52
16	Slutsatser	53
16.1	Förslag till fortsatt arbete	54
17	Litteraturförteckning	55
	Bilaga 1 - Tabellerade värden	I
	Bilaga 2 - Dimensioner och beräkningar gällande stationsbyggnaden	III
	Bilaga 3 - Data från mätningar	V
	Bilaga 4 - Sammanställning över åtgärdsförslag och systemalternativ	VI

1 Inledning

I samband med att miljökonsekvenserna av vårt sätt att utvinna och förädla naturresurser blir allt mer kännbara är den förnybara energiproduktionen allt viktigare. Effektivare resursanvändning är en del i det förhållningssätt som börjar bli accepterat världen över. EU:s förnybartdirektiv säger att andelen förnybar energi inom EU ska motsvara 20 % av all energianvändning år 2020 där olika medlemsstater har sin bördefördelning, för Sverige gäller 49 %. I Sverige uppgick andelen till 48 % redan år 2011 och målet är nationellt satt till 50 %. De förnybara energikällor som främst nyttjas i Sverige är vatten, vind och biobränslen. För att långsikt hålla en stabil och hållbar energiproduktion krävs att producerande anläggningar kontinuerligt underhålls och anpassas [1].

Vattenkraften med sin förnybarhet och säkra produktion är en viktig del i den svenska infrastrukturen. Många av de vattenkraftverk som idag används är byggda under förra seklet. Då äldre kraftstationer undergår förändringar är det ett naturligt steg att undersöka möjliga effektiviseringar. I dessa typer av energiproducerande anläggningar finns alltid spillvärme som kan återvinnas i energisyrte. Genom värmeåtervinning minskar behovet av tillförd energi vilket ger ett mer hållbart och lönsamt arbetssätt.

I det här arbetet, på uppdrag av Statkraft Sverige AB, har uppvärmningsbehovet för den södra stationsbyggnaden i Hammarforsen analyserats tillsammans med en utredning av möjliga uppvärmningslösningar, där värmeåtervinning från generatoren är ett förslag. Det är ett led i ett redan påbörjat arbete där stationens transformatorer förnyats. I den södra stationsbyggnaden var transformatorn tidigare en del av byggnadens uppvärmning men i samband med att den bytts ut har den placerats utanför byggnaden och är därmed inte längre en värmetillgång.

Rapporten är uppbyggd så att inledningsvis beskrivs projektuppgiften och problemställningen samt arbetets avgränsningar. Därefter presenteras generell teori gällande vattenkraft och värmetransport, samt systemspecifik teori för den aktuella uppgiften. Metodval presenteras och motiveras varefter arbetes resultat redovisas. Rapporten avslutas med en diskussion och en sammanställning av dragna slutsatser.

1.1 Om Statkraft

Statkraft är ett norskt energibolag vars historia börjar i samband med vattenkraftens utbyggnad. Som eget bolag grundades Statkraft 1992. Företaget är verksamt i över 20 länder och i Sverige bildades dotterbolaget Statkraft Sverige AB år 2005. Statkraft är Norges största och nordens tredje största energiproducent. Totala årsproduktionen uppgår till ca 60 TWh där 91 % kommer från förnybara källor. I Sverige ägs och drivs idag 55 vattenkraftverk i mellersta och södra Norrland samt i Götaland. År 2013 producerade Statkraft 6,4 TWh el i Sverige [2]. Förutom vattenkraft är Statkraft aktivt inom vindkraft, fjärrvärme och gaskraft [3]. Man driver tillsammans med Södra skogsägarna och SCA ett fyrtiotal vindkraftsprojekt i Sverige. Statkraft är ledande i Europa inom förnybar energi och arbetar mot att bli än mer miljövänlig och satsar stort på forskning och utveckling [4] [5] [6].

1.2 Projektuppgiftens bakgrund

Vid Hammarforsens vattenkraftstation i Indalsälven sker en revision av transformatorer. Äldre transformatorer har bytts ut och de nya har placerats samlade på ett och samma ställe. Tidigare var en av transformatorerna placerad i generator G5s stationsbyggnad på södra älvstranden där dess värmeförluster användes för uppvärmning. Transformatorns oljekylare värmden stationens inkommande luft men i och med att transformatorn nu är borttagen har man förlorat den värme som tidigare genererats. Nu vill man undersöka byggnadens uppvärmningsbehov för att kunna fastslå om det finns ett behov av ny värmekälla. Man vill även veta vilka möjliga uppvärmningslösningar som kan vara aktuella och om värmeåtervinning från generatoren är möjlig.

1.3 Syfte och mål

Syftet med arbetet var att underlätta framtida beslut om hur uppvärmningen av södra stationsbyggnaden i Hammarforsen ska tillgodoses. Ett sekundärt syfte är att studenten ska utföra och presentera ett självständigt arbete samt orientera sig i yrkeslivet.

De konkreta målen med projektet var:

- att kartlägga uppvärmningsbehovet i den södra stationsbyggnaden i Hammarforsens kraftstation
- undersöka generatorns värmeavgivning
- ge förslag på uppvärmningslösningar, där förslagen skulle ta hänsyn till; teknik, miljö, arbetsmiljö och ekonomi

1.4 Avgränsningar

Endast den aktuella byggnaden, där G5 är placerad, undersöks. Intill denna ligger den större kraftverksbyggnaden där fyra aggregat är placerade, de omfattas inte av det här arbetet. Vid kostnadskalkyler görs en förenklad LCC-analys där investerings-, underhålls- och energikostnader medtas, dock tas ingen hänsyn till transport-, produktionskostnader och likande. Eventuell värmeåtervinning från generatoren måste utföras på sådant sätt att dess funktion inte påverkas negativt.

1.5 Metod

Arbetet inleddes med en litteraturstudie för att öka kunskapen om ämnesområdet med fokus på byggnaders uppvärmningsbehov och generatorers värmeförluster. Tidigt gjordes även ett studiebesök på kraftverket för att skapa en bild över hur byggnaden var konstruerad. Under förstudien togs även ritningar och annan relevant information fram internt på Statkraft. I samråd med handledare gjordes en uppskattning av södra stationsbyggnadens uppvärmningsbehov utifrån teoretiska kalkyler där transmissionsförluster och ventilationsförluster beräknades med hjälp av teknisk dokumentation och kvalificerade antaganden. En numerisk simulering av byggnadens termodynamik ansågs för avancerat och tidskrävande. För att undersöka byggnaden närmre gjordes temperatur- och luftfuktighetsmätningar. Mer information om datainsamling finns under kapitlet *Genomförande*.

Generatorns värmeförluster beräknades teroretiskt utifrån kända samband och med data från produktion samt med schablonvärden som togs fram i samtal med generatorkunnig personal. I samråd med handledare beslöts att inga explicita mätningar på generatören skulle göras.

Förslag på hur byggnadens värmebehov kan tillgodoses togs fram genom studier av andra vattenkraftstationers lösningar samt konventionella uppvärmningsvarianter. Innan en fullständig analys av förslagen gjordes diskuterades de tillsammans med handledare och annan stationsrelaterad personal för att i ett tidigt skede kunna utesluta orimliga lösningar. Kunniga inom ämnesområdena kontaktades för att på ett så korrekt sätt som möjligt inhämta den information som behövdes.

2 Vattenkraft och elproduktion

Över hela världen behövs elenergi för att driva allt från industrier till hushåll. De energikällor som globalt sett står för den största elproduktionen är kol och naturgas. På tredje plats kommer vattenkraft som stod för drygt 16 % av världens elförsörjning 2011, dock är det den största förnybara källan [7].

Vattenkraft är möjlig tack vare solen. När solen värmer jorden förångas hav, sjöar och vattendrag. Ångan transporteras till följd av lufttryckskillnader och faller ner som nederbörd på en högre belägen plats. Den lägesenergi vattnet får i och med denna höjdförflyttning kan omvandlas till elektrisk energi i ett vattenkraftverk. Den nyttiga effekt som kan utvinnas bestäms av höjddifferensen, $z_2 - z_1$ [m], mängden vatten, $\dot{m}$ [kg/s], och kraftstationens verkningsgrad, η :

$$P = \eta \cdot \dot{m} \cdot g \cdot (z_2 - z_1) \quad (1)$$

Där g [m/s²] är gravitationskonstanten. Index 2 och 1 anger höjd före respektive efter kraftstationen [8].

För att öka mängden energi finns en dämning framför kraftverket, ett vattenmagasin. Det finns både fasta dammar och utskovsdammar. En fast dam har som syfte att enbart dämma upp vattenmassan medan man vid en utskovsdamm även kan avbörda vatten. I älvsystemet byggs större dammar där man genom produktionsplanering kan reglera innehåll och höjd för att planera och optimera produktionen för flera kraftverk i samma älv [9].

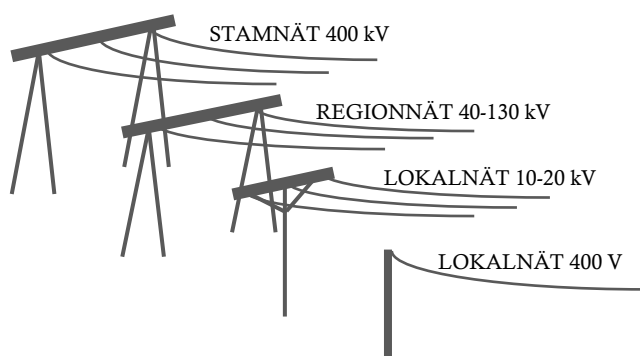
Kraftverket är i grova drag uppbyggt av turbin, generator och transformator. Turbinens uppgift är att omvandla vattnets rörelse- och lägesenergi till mekanisk energi. Hur vattnet leds genom stationen varierar och beror på omgivningens struktur och hur stationen är uppbyggd. När vattnet träffar turbinen sätts den i rotation varvid rörelseenergin förmedlas vidare till en generator. Den del av turbinen som sätts i rotation kallas löphjul, hur det är utformat varierar mellan olika typer. Reaktionsturbiner kallas turbiner där bladen utsätts för ett tryck från vattnet som minskar varefter vattnet passerar. Löphjulet är försett med ledskenor som reglerar inloppsvinkeln. Mängden vatten som når turbinen styrs med hjälp ledskenorna. Vid intaget finns luckor som kan stängas vid behov, exempelvis vid arbete på aggregatet. Dessa kan vara uppvärmda under vintern för att minska risken att is ansamlas och täpper igen intaget. Ett problem som uppstår främst i södra Sverige är så kallad kravis. Kravis bildas under kalla och klara nätter då vattentemperaturen sjunker snabbt. Små ispartiklar bildas, vilka lätt fastnar mot kalla objekt i vattnet och mot varandra vilket gör att en issörja snabbt bildas. Den kan sedan färdas mot intag och täppa igen vattenflödet inom loppet av några timmar, om isen kommer ner i inloppet kan även turbinen ta skada [10] [8] [11].

Generatorn omvandlar turbinens mekaniska energi till elektrisk energi. En generator är i grova drag uppbyggd av en stator och en rotor. Rotorn, som består av en kopparlindning, förmedlar den rotation som turbinen får via vattnet genom en axel som sammanbinder

turbin och generator. Statorn är stillastående och är försedd med spår där statorlindningen är placerad. Rotorn magnetiseras genom att elektromagneterna på rotorn, så kallade rotorpoler, spänningssätts [12]. När de magnetiska polerna skär stators lindningar induceras en växelström som kan levereras ut på elnätet. Generatoren är försedd med ett bärlager som tar upp de axiella krafterna, och för att hålla den roterande axeln centrerad samt ta upp de radiella krafterna finns ett eller flera styrlager. När rotorns kopparspiral skär magnetfältet induceras en ström enligt Faradays lag, som sedan kan föras ut på elnätet [13] [14].

En transformator omvandlar spänning mellan två system med samma frekvens. Den är uppbyggd av spolar, två eller fler, som är lindade kring en järnkärna. Den primära spolen är kopplad mot en växelström som skapar ett ständigt varierande växelströmsflöde i järnkärnan, vilket gör att en spänning induceras över lindningarna. Spänningsnivån beror av antalet varv spolen är uppbyggd av. Energiuttaget sker vid sekundärlindningen. I det fall då spänningen ska höjas är sekundärspolen lindad fler varv än primärspolen och då spänningen ska sänkas gäller det omvända [13].

Distributionen av el ut till användare sker över långa sträckor och vid en hög effekt. Förlusterna i en kraftledning är omvänt proportionell mot kvadraten av spänningen. En effektiv överföring i elnätet utan stora förluster kräver därför hög spänning [15]. I Sverige är elnätet uppdelat i stamnät, regionnät och lokalnät. Den statliga affärsverksamheten och myndigheten Svenska Kraftnät (SvK) ansvarar för stamnätet som består av ca 15 000 km högspänningsledningar. Via regionnätet överförs el mellan stamnätet och lokalnätet. Majoriteten av regionnätet ägs av E.ON Elnät Sverige, Vattenfall Eldistribution och Fortum Distribution. Figur 1 visar en principskiss över hur Sveriges elnät är uppbyggt.



Figur 1 Elnätet i Sverige, från elproducent till förbrukare. (Figur: Amanda Åström)

Som visas i Figur 1 är spänningen i stamnätet 400 kV. För att anpassas till brukare transformeras spänningen ner. Regionnätet förser ofta tyngre elkrävande industrier direkt, exempelvis smältverk och pappersbruk. Hushåll och mindre industrier är kopplade till lokalnätet. När elen når våra hem har den transformerats ner till 230 V [16] [17].

2.1 Vattenkraft i Sverige

Resan mot dagens vattenkraftproduktion började redan 1882 då det första verket togs i drift i Rydal. Under 40- och 50-talet utvecklades den svenska basindustrin varför en säker elproduktion var nödvändig. De flesta vattenkraftverk är byggda under den perioden. Fram till idag har det byggts ca 1800 kraftverk som tillsammans står för närmare hälften av Sveriges elförsörjning (48 % år 2012) [1]. Ett normalår ligger den totala elproduktionen på ca 145 TWh i Sverige, varav 65 TWh kommer från vattenkraft. Vattenkraften har haft och har fortfarande stor betydelse för den Svenska elmarknaden då den kan regleras efter behov och uppfyller samtidigt ett basbehov [18] [19].

2.2 Vattenkraftens miljöpåverkan

Vattenkraft är som tidigare nämnt ett förnybart energislag. Ur ett resursperspektiv är det ett av de mest effektiva och miljövänliga sätt att utvinna energi. I samband med att miljömedvetenheten ökar har man insett att ur ett ekologiskt perspektiv finns vissa faktorer gällande vattenkraft som behöver ses över för att långsiktigt hålla en stabil energiproduktion parallellt med ett dynamiskt ekosystem. Vattenkraftverk orsakar uppdämningar i älvsystem som inte är naturliga vilket gör att vattenklevande djurs habitat förändras. Vid många äldre kraftverk uppstår dessutom en torrlagd fåra där viktiga födoresurser försvinner. Problematiken med att kvantifiera miljöpåverkan från vattenkraften är att miljönytta är svårt att definiera. Man kan visa på att en population ökar i och med en viss åtgärd men vad är nyttan i ett större perspektiv? Idag mäts det mesta i monetära termer, där miljönytta har svårt att ta plats.

Forskningsprogrammet "Vattenkraft - miljöeffekter, åtgärder och kostnader i nu reglerade vatten" har arbetat med åtgärder i koppling till vattenkraft med fokus på miljöförbättring. Man har tagit fram verktyg för analys av samhällsekonomi för olika miljöförbättringsåtgärder tillsammans med fallstudier i Emån och Ljusnan. Energimyndigheten, Fiskeriverket, Naturvårdsverket och vattenkraftproducenterna via Elforsk har alla varit finansiellt delaktiga i det tvärvetenskapliga projektet. Två typer av populationsmodeller togs fram för långsiktig analys av hur fiskpopulationer påverkas av fiskvägar och rivningar av dammar. Den ena lite enklare med ett fåtal parametrar medan den andra behandlar mer komplicerade fall. Även portfiskevärden hanteras i ett framarbetet Excel-verktyg. Fallstudierna visade att det inte var ekonomiskt lönsamt med de åtgärdsförslag man analyserat. Detta visar på svårigheterna i att definiera miljönytta i monetära termer [20].

Att energieffektivisera elkraftsproduktion är lönsamt både för ekonomin och miljön. En effektiv vattenkraft hushåller på resurser samtidigt som användningen av andra energislag med högre klimatpåverkan kan minskas då mer vattenkraft kan nyttjas. Vattenkraft är miljömässigt bättre än många andra typer av energislag. I

Tabell 1 nedan finns en sammanställning över koldioxidekvivalenter för olika energislag. Värdena gäller för svensk elproduktion med kompensering för distributionsförluster i elnätet samt import och export [21].

Tabell 1 Koldioxidekvivalenter för olika energislag [21].

Energislag	gCO ₂ /kWh el
Vattenkraft	4,5
Vindkraft	13,2
Kärnkraft	3,5
Kondenskraft	654,0
Kraftvärme el	242,0
Mottryck	
• bio och torv	105,0
• olja	582,0
• gas	425,0
• kol och koks	768,0
Gasturbiner	474,0

Att vindkraft har en högre koldioxidekvivalent än vattenkraft och kärnkraft beror på att värdena är beräknade för en total klimatpåverkan från vaggan till graven. Markberedning och konstruktion m.m. är inräknat vilket gör att andra parametrar än endast utsläpp vid produktion inverkar. De totala koldioxidutsläppen från elproduktionen i Sverige var ca 4,1 miljoner ton år 2010 [22].

2.3 Effektivare elanvändning

För att nå ett hållbart samhälle är energieffektivisering en viktig parameter. Ett led i det är att förbruka den högkvalitativa elenergin på ett mer effektivt sätt. Den totala energianvändningen har varit konstant under de senaste årtiondena i Sverige. Däremot har elförbrukningen ökat avsevärt sedan sjuttioalet. Mest tydlig är ökningen i bostads- och servicesektorn. Cajsa Bartusch har i sin avhandling [23] sammanställt forskning gällande elanvändning och beteende hos elkonsumenter inom bostadssektorn. Bartusch skriver:

Att åstadkomma ökad energieffektivisering och förbrukningsflexibilitet i den svenska elmarknadens bostadssektor är ett nödvändigt led i realiseringen av de nationella och europeiska miljömålen.

Studien visar att skillnaden i elförbrukning mellan olika enfamiljshushåll inte enbart kan förklaras utifrån det fysiska husets egenskaper utan förbrukarens beteende har även stor inverkan. Elektricitet är abstrakt varför återkoppling är viktig för att synliggöra förbrukningen. Den siffra som presenteras på elräkningen säger inte mycket om förbrukningsbeteendet. Enligt studien fann man att återkoppling på den individuella elförbrukningen är ett effektivt instrument för ökad energieffektivisering, där besparingar på 1,1 till drygt 20 % kan göras [23].

3 Värmetransport

Enligt termodynamikens andra lag sker värmetransport endast spontant i en riktning, från en varmare till en kallare källa. För att värme ska transporteras krävs alltså ett utbyte mellan ett varmt och ett kallt medium. Det kan ske via konvektion, konduktion och strålning, där temperaturdifferensen är drivande. Nedan förklaras dessa begrepp mer ingående.

3.1 Konvektion

Konvektion är värmetransport mellan ett fast medium och en fluid i rörelser. Det är en kombinerad effekt av ledning och fluidrörelser. Ju högre hastighet fluiden har desto större blir värmeutbytet. Värmeavgivningen bestäms med hjälp av värmeöverföringskoefficienten, h . Det är en parameter som inte är specifik för fluiden utan är experimentellt framtagen och beror på, förutom fluidens egenskaper, ytans geometri och fluidens rörelse bland annat. Den konvektiva värmeöverföringen ges av ekvation (2):

$$\dot{Q}_{konv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_o) \quad (2)$$

$\dot{Q}_{konv}$ – konvektiv värmeöverföring	[W]
h – värmeöverföringskoefficient	[W/(m ² · K)]
A – värmeavgivande ytans area	[m ²]
T_s – yttemperatur	[°C]
T_o – fluidens temperatur en bit från ytan	[°C]

Konvektion kan delas upp i naturlig och påtvingad. Naturlig konvektion innebär att fluidens rörelse orsakas av lyftkraften som uppstår då densiteten förändras i och med en temperaturförändring. Påtvingad konvektion innebär att en yttre påverkan, såsom fläktar, vindar och pumpar, sätter fluiden i rörelse. Även värmetransport som innefattar fasförändring anses vara av konvektivt slag. Vid kokning stiger ångbubblor genom fluiden, alltså fås en rörelse under fasförändringsprocessen. [24]

3.1.1 Värmeöverföringskoefficient vid naturlig konvektion

Värmeöverföringskoefficienten, h , vid naturlig konvektion beräknas enligt:

$$h = \frac{k}{L_c} \cdot Nu \quad (3)$$

k – termisk konduktivitet	[W/(m · K)]
-----------------------------	-------------

L_C – karakteristisk längd [m]

Nu – Nusselts tal dimensionslös

Den termiska konduktiviteten, k , gäller för fluiden närmast ytan. Den temperatur fluidsikt har kallas filmtemperatur, T_f , och är medelvärde mellan ytans och omgivningens temperatur:

$$T_f = \frac{T_s + T_o}{2} \quad (4)$$

Den karakteristiska längden, L_C , definieras olika beroende på ytans geometri. För en vertikal yta gäller höjden. En horisontell yta som antingen har varma sidan uppåt eller nedåt har en karakteristisk längd som är ytans area dividerat med dess perimeter. En vertikal cylinder kan approximeras som en vertikal yta om diametern är tillräckligt stor. Följande kriterium måste uppfyllas:

$$D \geq \frac{35 \cdot L_C}{Gr^{1/4}} \quad (5)$$

Där Gr är Grashofs tal, vilket är ett dimensionslöst tal som beskriver flödesregimen:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_C^3}{\nu^2} \quad (6)$$

β – volymetriska expansionskoefficienten, $\frac{1}{T_f}$ [1/K]

ν – kinematiska viskositeten [m^2/s]

Nusselts tal, Nu , beror också på geometrin samt Rayleighs tal, $Ra = Gr \cdot Pr$, då Pr är Prandtls tal. Termiska konduktiviteten, k , kinematiska viskositeten, ν , och Prandtls tal, Pr , gäller alla vid filmtemperatur och atmosfärstryck och finns tabellerade, se källa [25]. För en vertikal yta gäller:

$$Nu = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{(1 + (0,492/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right]^2 \quad (7)$$

För en horisontell yta med varma sidan uppåt gäller:

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3} \quad (8)$$

Med termiska konduktiviteten, karakteristiska längden och Nusselts tal kända kan således värmeöverföringskoefficienten till följd av naturlig konvektion beräknas enligt ekvation (3) [25].

3.2 Konduktion

Konduktion, som även kallas ledning, är värmetransport genom ett medium till följd av interaktioner mellan partiklar med olika hög energi. Det kan ske i såväl gaser som vätskor och solida material. I gaser och vätskor sker konduktion via kollisioner av molekyler som rör sig slumpmässigt. I fasta material handlar det om en kombination av molekyllära vibrationer och energitransport via fria elektroner. Konduktiv värmeöverföring ges av:

$$\dot{Q}_{konduktion} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (9)$$

$\dot{Q}_{konduktion}$ – konduktiv värmeöverföring [W]

k – värmekonduktivitet [W/(m · K)]

A – värmeöverförande ytans area [m²]

ΔT – temperaturskillnad [°C]

Δx – materialets tjocklek [m]

Den värmeavgivande ytan är normal mot värmeöverföringens riktning och ΔT är differensen mellan den varma och den kalla sidans temperatur som åtskiljs av materialets tjocklek Δx . Värmekonduktiviteten är ett mått på materialets förmåga att leda värme. Exempel på material med god värmeledningsförmåga, och således hög värmekonduktivitet, är koppar, medan gummi och trä är material som har lägre värden. Olika materials värmekonduktivitet finns tabellerade i *Bilaga 1 - Tabellerade värden* [24].

3.3 Strålning

Strålning är värmeutbyte i form av elektromagnetiska vågor vilka orsakas av förändringar i elektronkonfigurationen, elektronernas placering, runt atomer och molekyler. Det krävs inget mellanliggande medium för att det ska ske, alltså kan strålningsvärme även avges i vacuum. I värmetransportsammanhang talar man om värmestrålning vilket skiljer sig från andra typer av elektromagnetisk strålning såsom mikrovågor och röntgenstrålning m.m. Värmeöverföring via strålning uttrycks som:

$$\dot{Q}_{strålning} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad (10)$$

$\dot{Q}_{strålning}$ – värmeöverföring via strålning [W]

ε – ytans emissivitet

σ – Stefan-Boltzmanns konstant, $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m² · K⁴)]

A – värmeavgivande ytans area [m²]

T_s – yttemperatur [°C]

Emissiviteten ligger mellan 0-1 och är ett mått på ytans förmåga att avge strålning. Värdet anger hur ytan kan efterliknas vid en svart kropp vars emissivitet är 1. En svart kropp definieras som en yta som avger maximal strålning $\dot{Q}_{strålning,max} = \varepsilon \sigma A T_s^4$. Att beräkna strålningsutbytet mellan olika objekt är komplicerat då bland annat ytornas egenskaper och hur de är orienterade relativt varandra inverkar. Ett användbart specialfall för en yta som är omsluten av en mycket större yta med temperaturen, $T_{om,yta}$, ger värmestrålningsutbytet:

$$\dot{Q}_{strålning} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{om,yta}^4) \quad (11)$$

Väggar, tak och golv har inte nödvändigtvis samma temperatur som luften, men som approximation kan antagandet göras att $T_{om,yta} = T_o$ [24].

4 Byggnaders uppvärmningsbehov

Värmetransporten genom en byggnads klimatskal sker genom transmission, P_t , ventilation, P_v , och luftläckage, P_l . Uppvärmning sker via värmesystemet, P_{vs} , solinstrålning, P_s och internt genererad värme, P_i . För att uppvärmningen ska täcka värmeförlusterna gäller följande effektbalans:

$$P_t + P_v + P_l = P_{vs} + P_s + P_i \quad (12)$$

Den internt genererade värmen tillsammans med solinstrålningen brukar betecknas med det gemensamma begreppet gratisvärme, P_g . Den totala temperatur som önskas internt, T_i , fås genom att låta värmesystemet värma byggnaden till en gränstemperatur, T_g , varefter solinstrålning och internt genererad värme står för de resterande graderna. Det effektbehov, P , som krävs för att motverka värmeförlusterna genom klimatskalet beräknas enligt:

$$P = Q \cdot \Delta T \quad (13)$$

Q – specifik värmeförlustfaktor [W/K]

ΔT – temperaturdifferens mellan inomhus- och utomhusluft [°C]

Den specifika värmeförlustfaktorn beror av klimatskalets och luftomsättningens värmeförluster, se kapitel *Transmissionsförluster* och *Ventilationsförluster och oavsiktligt luftläckage* nedan. Byggnadens energibehov är summan av effektbehovet per timme. En metod för att beräkna det är med hjälp av gradtimmar:

$$E = Q_{tot} \cdot G_t \quad (14)$$

E – byggnadens energibehov [Wh/år]

Q_{tot} – total specifik värmeförlustfaktor [W/K]

G_t – gradtimmar [°Ch/år]

Gradtimmar är ett mått på hur många grader värmesystemet måste värma byggnaden samt under hur många timmar. Differensen mellan gränstemperaturen, T_g , och utomhustemperaturen, T_{ute} , summeras för varje timme, vilket ger antalet gradtimmar:

$$G_t = \sum_{i=timmar}^{8760} (T_g - T_{ute}) \cdot \Delta t \quad (15)$$

Värden på gradtimmar finns tabellerade för olika gränstemperaturer och normalårstemperaturer. Normalårstemperaturen är inte årsmedeltemperaturen på platsen utan medianvärdet över ett år. Alltså varierar energibehovet både beroende på vart i landet byggnaden befinner sig och på inomhusklimatet [26].

4.1 Transmissionsförluster

Genom klimatskalet sker värmeförluster, så kallade transmissionsförluster. De varierar beroende på konstruktionsmaterial och utformning. Den specifika värmeförlustfaktorn för transmission, Q_t [W/K] kan grovt beskrivas som:

$$Q_t = \sum U \cdot A \quad (16)$$

Där $\sum U$ [W/(m² · K)] är värmegenomgångskoefficienten för klimatskalet och A [m²] är dess area. För en övergripande beskrivning av värmeförlustfaktorn används den så kallade genomsnittliga värmegenomgångskoefficienten, U_m , som beräknas genom att summera köldbryggor och värmegenomgångstal för varje konstruktionsmaterial inklusive dörrar och fönster:

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_{korr,i} A_i + \sum_{k=1}^m \Psi_k l_k + \sum_{j=1}^p X_j}{A_{om}} \quad (17)$$

U_m – genomsnittlig värmegenomgångskoefficient [W/(m² · K)]

A_{om} – omslutande area mot inomhusluft [m²]

$U_{korr,i}$ – korrigerad värmegenomgångskoefficient för byggnadsdel i [W/(m² · K)]

A_i – area av byggnadsdel i mot inomhusluft [m²]

Ψ_k – värmegenomgångstal för linjär köldbrygga [W/(m · K)]

l_k – linjära köldbryggand längd [m]

X_j – värmegenomgångstal för punktformig köldbrygga [W/K]

Korrigeringar av U -värdet, $U_{korr,i}$, behandlar dels mindre köldbryggor till följd av fästansordningar, isoleringsutförande innefattande springor och spalter samt väderpåverkan. Köldbryggor uppstår bland annat i hörn och vid fönster där isoleringen är sämre och därmed värmegenomgången större. Värmetransporten sker i tre dimensioner vid dessa områden varför beräkningarna blir komplicerade, se kapitel *Köldbryggor* för mer information [26] [27].

4.2 Ventilationsförluster och oavsiktligt luftläckage

För att hålla ett bra inomhusklimat med god luftkvalitet krävs att luften i byggnaden omsätts. Via ventilationen och det oavsiktliga luftläckaget går värme förlorad i och med att varm luft går ut och inkommande luft måste värmas till önskad inomhustemperatur. Ventilationens förlustfaktor, Q_{vent} [W/K], beräknas enligt:

$$Q_{vent} = \rho \cdot c_p \cdot q_v \quad (18)$$

ρ – luftens densitet [kg/m³]

c_p – specifika värmekapaciteten hos luften [kJ/(kg · K)]

q_v – ventilationsflödet [m³/s]

Förutom ventilationen sker ett oavsiktligt luftläckage på grund av otätheter i byggnadens konstruktion. Värmeförlustfaktorn för oavsiktligt luftläckage, Q_{ol} , beräknas på samma sätt som för ventilationen där ventilationsflödet ersätts med läckageflödet, q_{ol} . Luftläckaget är ofta svårt att bestämma eftersom det sker okontrollerat. Om hålets geometri, genom vilket luften transporteras, är känd kan en uppskattning av flödet göras. Den termiska drivkraften till följd av den varma luftens utvidgning kan uttryckas som lufttrycksdifferensen, Δp [Pa]:

$$\Delta p = \rho_0 \cdot g \cdot T_0 \cdot \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_i} \right) \cdot z \quad (19)$$

ρ_0 – luftens densitet vid 0°C, 1,293 [kg/m³]

g – tyngdaccelerationen 9,81 [m/s²]

T_0 – absolut temperatur vid 0°C, 273 [K]

T_u – absolut temperatur inne [K]

T_i – absolut temperatur ute [K]

z – höjd från nollnivå $[m]$

Nollnivån är det läge i höjddled där lufttrycket är samma inomhus och utomhus. Ett förenklat uttryck för tryckdifferensen som gäller för normala temperaturer lyder:

$$\Delta p = 0,043 \cdot \Delta T \cdot z \quad (20)$$

Luftflödet genom spalter och hål i tunna skivor, där skivans tjocklek är ungefär lika stor som tvärmåttet hos hålet, kan beräknas enligt:

$$q_{sh} = A \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (21)$$

q_{sh} – luftflödet genom spalter och hål i tunn skiva $[m^3/s]$

A – arean av hålet $[m^2]$

γ – avbördningsfaktor

ρ – luftens densitet $[kg/m^3]$

För enklare uppskattningar av luftflöden kan en förenkling av ekvation (21) användas där $\gamma = 0,65$ och $\rho = 1,2$:

$$q_{sh} = 0,8 \cdot A \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (22)$$

Med detta flöde känt kan värmeförlustfaktorn orsakad av luftläckage beräknas [27] [24].

4.3 Dimensionering av uppvärmningssystem

För att tillgodose den önskade inomhustemperaturen dimensioneras uppvärmningssystemet för transmissionsförluster, ventilationsförluster och värmeförluster till följd av luftläckage vid den dimensionerande vinterutetemperaturen, $DVUT$. Det är inte den kallaste temperaturen på platsen utan medeltemperaturen under minst ett dygn som bestäms genom att analysera byggnadens värmetröghet och placering. Äldre byggregler använder dimensionerande utetemperatur, DUT , som har samma syfte som $DVUT$ men definieras annorlunda. Den effekt som värmesystemet bör dimensioneras efter bestäms genom att multiplicera den totala förlustfaktorn med differensen mellan den dimensionerande inomhus- och utomhustemperaturen. Då det maximala effektbehovet sker under en vinternatt behöver inte solinstålning och internt genererad värme inkluderas. Således ska värmesystemet dimensioneras för:

$$P_{dim} = Q_{tot} \cdot (DIT - DVUT) \quad (23)$$

Den totala förlustfaktorn, Q_{tot} [W/K], fås genom att summera varje värmeförlustfaktor:

$$Q_{tot} = Q_t + Q_{vent} + Q_{ol} \quad (24)$$

Om ventilationen är försedd med värmeåtervinning multipliceras dess specifika värmeförlustfaktor med $(1 - \eta)$ där η är temperaturverkningsgraden för värmeåtervinningen.

För att värmesystemet inte ska vara överdimensionerat, vilket det skulle bli om det dimensionerades för den absolut kallaste temperaturen på platsen, används som ovan nämnt den dimensionerande utomhustemperaturen. Värden på $DVUT$ finns tabellerade för olika platser i Sverige samt för olika tidskonstanter. Tidskonstanten, τ_b [s], representerar byggnadens värmetröghet och beräknas genom att dividera byggnadens värmekapacitet med dess specifika värmeförlust enligt följande:

$$\tau_b = \frac{\sum m_j \cdot c_j}{Q_{tot}} \cdot \frac{1}{3600} \quad (25)$$

m_j – konstruktionsskiktets massa [kg]

c_j – konstruktionsskiktets specifika värmekapacitet [$J/(kg \cdot K)$]

Tidskonstanten är alltså ett mått på byggnadens värmetröghet och beskriver hur snabbt konstruktionen reagerar på en temperaturförändring. För moderna hus är tidskonstanten oftast mindre än fem dygn, medan den för äldre hus kan vara så kort som 28 – 80 timmar [26].

4.4 Värme genomgångstal, U -värde

Värme flödet genom ett byggnadssegment är en kombination av konvektion, strålning och konduktion. Det beskrivs generellt med ett värme genomgångstal, det så kallade U -värdet som definieras som inversen av det totala värme övergångsmotståndet i byggnadens konstruktion:

$$U = \frac{1}{R_i + \sum_{m=1}^n R_m + R_u} \quad (26)$$

U – värme genomgångstal $[W/(m^2 \cdot K)]$

R_i – värme övergångsmotstånd på insidan $[(m^2 \cdot K)/W]$

R_u – värme övergångsmotstånd på utsidan $[(m^2 \cdot K)/W]$

R_m – värme övergångsmotstånd för varje konstruktionsmaterial m $[(m^2 \cdot K)/W]$

n – antalet konstruktionslager

Värme övergångsmotståndet beräknas olika för om konstruktionsskikt är parallella eller i serie. För parallella skikt gäller:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (27)$$

Medan värme övergångsmotståndet för konstruktionslager i serie beräknas enligt:

$$R_{tot} = R_1 + R_2 \quad (28)$$

Det värme övergångsmotstånd eller termiska resistans som representeras av konduktion genom ett material är kvoten mellan konstruktionsskiktets tjocklek och dess värmekonduktivitet:

$$R_k = \frac{d}{\lambda} \quad (29)$$

d – materialets tjocklek $[m]$

λ – värmekonduktiviteten hos materialet $[W/(m \cdot K)]$

Värmekonduktiviteten för olika material finns tabellerade i *Bilaga 1 - Tabellerade värden*. Värmeövergångsmotståndet till följd av konvektion och strålning beskrivs som:

$$R_{sk} = \frac{1}{\alpha_s + \alpha_k} \quad (30)$$

α_s – värmeövergångskoefficient vid ytan med avseende på strålning $[W/(m^2 \cdot K)]$

α_k – värmeövergångskoefficient vid ytan med avseende på konvektion $[W/(m^2 \cdot K)]$

Konvektion och strålning sker vid ytan och representerar R_i och R_u i ekvation (26). För praktisk tillämpning används medelvärden för dessa motstånd där utsidans värmeöverföringsmotstånd, R_u , sätts till $0,04 (m^2 \cdot K)/W$ och insidans värmeöverföringsmotstånd sätts till $0,13 (m^2 \cdot K)/W$ för väggar, $0,17 (m^2 \cdot K)/W$ för golv i kontakt med stabilt luftskikt och $0,10 (m^2 \cdot K)/W$ för golv och tak i kontakt med instabilt luftskikt [27] [28].

4.5 Köldbryggor

I klimatskalet finns områden med ökad värmeledning, så kallade köldbryggor. Då det ofta sker i flera dimensioner kan de vara komplexa och effekten kan vara avgörande. Typiska områden där köldbryggor uppstår är:

- Där material med högre värmeledningsförmåga genomskrär klimatskalet.
- Avvikande tjocklek i klimatskalet.
- Större värmeöverförande yta mot den kalla utomhussidan, exempelvis vid anslutningar mellan olika konstruktionsdelar (vägg mot vägg, tak och golv).

Köldbryggorna kan delas in i linjära och punktformiga, där de sistnämnda uppstår i områden där tredimensionellt värmeflöde råder såsom vid mötet mellan ett vägghörn och tak. Linjära köldbryggor uppstår vid mötet mellan olika konstruktionselement som väggar, fönster, dörrar m.m. och anges per längdmeter. I och med att punktformiga köldbryggor ofta finns i linjära köldbryggors skärningspunkt fås de med i de linjära köldbryggorna och kan försummas då resultatet inte kräver extrem noggrannhet. Köldbryggor kan påverka den genomsnittliga värmegenomgångskoefficienten från 5 % upp mot 20 % eller mer beroende på klimatskalets homogenitet och utformning [28]. Värmegenomgångskoefficienten, Ψ_k , för olika delar varierar beroende på material och konstruktion [27].

I Isolerguiden [29] finns beräkningsmodeller för köldbryggor i olika typer av konstruktionssegment. För yttervägghörn i lättbetong gäller:

$$\Psi = -0,009685 + 0,4038 \cdot \lambda^{0,8} - 0,02053 \cdot (\lambda/d)^{1,4} \quad (31)$$

Där $\lambda [W/mK]$ är värmekonduktiviteten i väggen med tjocklek $d [m]$.

Anslutning mellan tak och yttervägg i lättbetong beräknas som:

$$\begin{aligned} \psi = & -0,01945 + 0,04283 \cdot d_i^{0,2} - 0,07204 \\ & \cdot \left(\frac{\lambda}{d_v}\right)^{0,6} + 0,1331 \cdot \left(\frac{\lambda}{d_v}\right)^{0,8} + 2,144 \\ & \cdot (\lambda \cdot d_b)^{1,2} + 0,001885 \cdot \left(\frac{d_v}{d_i}\right)^{-1,4} \end{aligned} \quad (32)$$

Där $\lambda [W/(m \cdot K)]$ är värmekonduktiviteten i väggen och $d_v [m]$ är dess tjocklek, $d_b [m]$ är bjälklagets tjocklek och $d_i [m]$ är isoleringens tjocklek.

Värdet på värmegenomgångskoefficienten, ψ_k , för köldbryggor varierar beroende på hur byggnaden är konstruerad men enligt [27] är värdena i Tabell 2 rimliga för linjära köldbryggor i olika anslutningar.

Tabell 2 Rimliga värden på värmegenomgångskoefficienten vid olika konstruktionsanslutningar. [27]

Anslutning	Värmegenomgångskoefficient [W/(m · K)]
Tak mot yttervägg	0,02 (0,02-0,06)
Yttervägg mot yttervägg	0,03 (0,03-0,06)
Innervägg mot yttervägg	0,01 (0,01-0,04)
Fönster/dörr mot vägg	0,02 (0,01-0,05)
Mellanbjälklag mot yttervägg	0,02 (0,02-0,04)
Platta på mark mot yttervägg med isolering mot varandra	0
Platta på mark mot yttervägg utan direkt anslutning mellan isolering	0,1
Utdragande betongplatta genom yttervägg	0,04-0,4

Där yttervägg kan vara av träregel eller lättbetong. Tak kan vara värmeisolerat varmtak eller värmeisolerat vindsbjälklag.

4.6 Normalårskorrigerig

För att rättvist kunna jämföra uppvärmningsbehovet mellan olika år kan energiförbrukningen normalårskorrigeras. Det innebär att energibehovet korrigeras för att motsvara ett normalår, alltså ett år med normala medeldygnstemperaturer. En metod för detta är att räkna med graddagar. Strategin är enligt följande:

Differensen mellan gränstemperaturen, T_g , och dygnsmedeltemperaturen utomhus, $T_{ute,dm}$, summeras per dag. Mängden graddagar fås enligt ekvation (33):

$$G_d = \sum_{i=dagar} (T_g - T_{ute,dm}) \quad (33)$$

Om utetemperaturen är högre än gränstemperaturen exkluderas det dygnet. För att jämföra mot ett normalår görs samma summering där dygnsmedeltemperaturen utomhus ersätts med den normala medeldygnstemperaturen, $T_{ute,nm}$, under den aktuella perioden. Två mängder graddagar erhålls, dels för den faktiska perioden, G_d , samt för ett normalår, $G_{d,nm}$. Kvoten mellan det faktiska värdet och normalvärdet ger en korrektionsfaktor, K_f :

$$K_f = \frac{G_d}{G_{dn}} \quad (34)$$

Denna korrektionsfaktor divideras sedan med det beräknade uppvärmningsbehovet under den aktuella perioden, vilket ger ett mer informativt värde sett över ett normalår. Normalårskorrigeringen gör att extrema temperaturhändelser får en mindre inverkan på resultatet [30] [31].

5 Relativ fuktighet och kondens

Atmosfärsluft kan betraktas som en blandning av torr luft och vattenånga. Atmosfärstrycket är summan av trycket hos den torra luften och vattenångan, det sistnämnda kallas ångtryck, P_a . Luft kan bara innehålla en viss mängd vatten vid en given temperatur. Förhållandet mellan fukten i luften och den maximala mängd fukt som luften kan innehålla vid en given temperatur kallas relativ fuktighet, RF :

$$RF = \frac{v_{luft}}{v_{mättad}} \quad (35)$$

Där v är ånghalten kg/m^3 , index *luft* avser den faktiska mängd vatten i luften medan index *mättad* avser maximalt möjlig vattenmängd vid samma temperatur. För torr luft är $RF = 0$ medan mättad luft har $RF = 100$. Partialtrycket hos vattenånga i mättad luft kallas mättnadstrycket. Mängden fukt i luften är helt beroende av temperaturen och den relativa fuktigheten. Ångtrycket beror av den relativa fuktigheten enligt:

$$P_a = RF \cdot P_{mättad} \quad (36)$$

Där $P_{mättad}$ är mättnadstrycket hos vatten vid en viss temperatur. Kondensering sker när temperaturen hos ånga sänks under dess mättnadstemperatur, $T_{dagtemp}$:

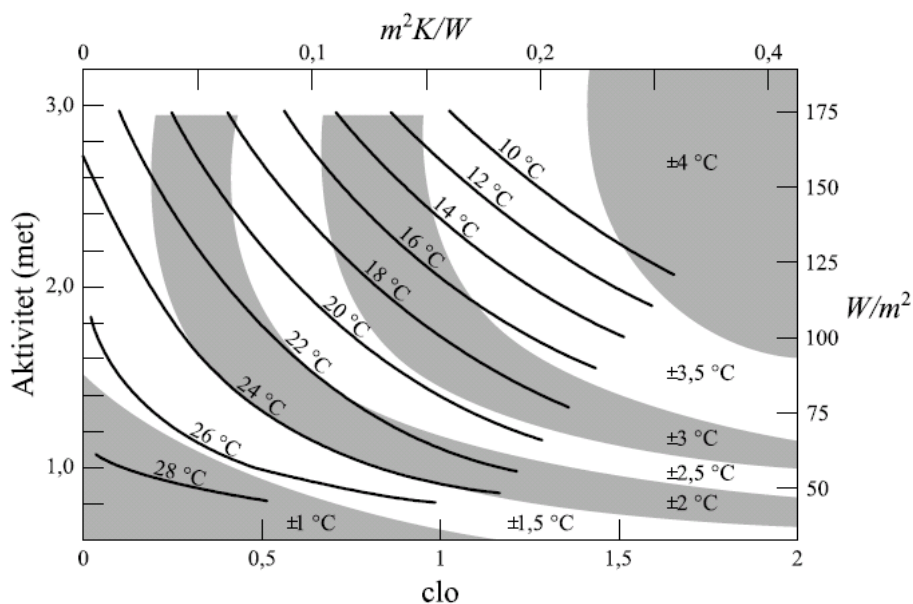
$$T_{dagtemp} = T_{mättad@P_a} \quad (37)$$

Fuktutfällning sker ofta när ånga träffar en solid yta som håller en lägre ytemperatur än mättnadstemperaturen men kan även ske mot den fria ytan hos en fluid eller i en gas. När kondensering sker mot en yta kan två former av kondensering uppstå; filmkondensering och droppkondensering. Det första innebär att kondensatet bildar en vattenfilm mot ytan som glider nedåt på grund av gravitationen medan det vid droppkondensering bildas droppar på ytan [25] [32].

6 Komfort och inomhusklimat

Att avgöra om ett inomhusklimat är bra är komplicerat då individer upplever komfort olika och många faktorer inverkar. Den fysiska aktiviteten ökar kroppens värmeproduktion. En vuxen person producerar ca 60 W/m^2 värme sittande och upp mot ca 450 W/m^2 värme under påfrestande kroppsansträngning. Den värme som avges via konvektion och strålning är relativt konstant vid olika fysisk ansträngningsgrad medan värmeavgivning via andning och svettning ökar vid ökad ansträngning. Värmeproduktionen kan mätas i met som är ett mått på avgiven värmeeffekt per kvadratmeter hudyta. Basmetabolismen är $1 \text{ met} = 60 \text{ W/m}^2 \text{ hudyta}$. Tabellerade värden över värmeproduktionen hos en vuxen person vid olika fysisk ansträngning finns i *Bilaga 1 - Tabellerade värden*. Kläder har en viss värmeisolerande förmåga vilket kan mätas i clo som motsvarar $0,155 \text{ (K} \cdot \text{m}^2)/\text{W}$. Polarklädsel har ett värde på 4 clo medan 0 clo motsvaras av inga kläder.

Kvaliteten på inomhusklimatet definieras efter hur många som upplever det som bra, för det finns internationella standarder att tillämpa. Med utgångspunkt i klädsel och fysisk aktivitet kan den förväntade klimatupplevelsen bestämmas. Metoden baseras på PMV- och PPD-index som står för Predicted Mean Value respektive Predicted Percentage of Dissatisfied. PMV är en sjugradig skala, från +3 till -3, som anger ett förväntat medelutlåtande hos en grupp som definierar sin upplevelse av klimatet från hett till kallt. PPD-index är ett procentuellt värde på det förväntade antalet missnöjda som utgår från PMV-skalan. Den optimala operativa temperaturen, $\text{PMV} = 0$, vid $\text{PPD} < 10 \%$ kan utläsas i Figur 2 för olika aktivitetsgrad och klädsel.



Figur 2 Optimal operativ temperatur vid olika fysisk aktivitet och klädsel [33]

Till höger i Figur 2 visas PPM värdet som varierar med $\pm 0,5$. Man kan se att det accepterade intervallet ökar med högre fysisk aktivitet och mer klädsel [26].

7 Värmeavgivning och värmeåtervinning från generator

All den rörelseenergi som generatoren omvandlar blir inte till elektricitet utan en viss del går förlorad som värmeenergi. Denna värme förs delvis bort med hjälp av kylsystem men viss värme avgår till omgivningen via konvektion och strålning. En synkronmaskins förluster består av belastningsförluster, P_b , tomgångsförluster, P_t , och magnetiseringsförluster, P_m :

$$P_{förluster} = P_b + P_t + P_m \quad (38)$$

Tomgångsförlusterna innefattar järn- och friktionsförluster. Synkrogeneratorns varvtal är konstant varför friktionsförlusterna är konstanta. Samma gäller för järnförlusterna då magnetflödet är konstant vid oförändrad spänning. Via tomgångsprov uppmäts storleken på tomgångsförlusterna. Strömmen i magnetiseringslindningen orsakar magnetiseringsförluster. Även dessa kan antas konstanta under drift. Belastningsförlusterna orsakas av statorlindningens resistans under drift beroende på belastning [13] [34].

För en synkrogenerator kan belastningsförlusterna, P_b [W], beskrivas som:

$$P_b = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (39)$$

R – statorlindningens effektiva resistans [Ω/fas]

I – ström [A]

Belastningsförlusterna tas fram genom kortslutningsprov vid märklast. För att hitta ett samband mellan märklast och den aktuella lasten vid drift måste huvudströmmen vara känd. Den totala effekten i en trefaslindning kan beskrivas enligt:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (40)$$

P – aktiv effekt [W]

U_H – huvudspänning [V]

I – ström [A]

$\cos\varphi$ – effektfaktor

Genom en kombinerad omskrivning av ekvation (39) och (40) fås ett samband mellan belastningsförluster vid drift och vid märklaster:

$$P_{b,d} = 3 \cdot R \cdot \left(\frac{P_d}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos(\varphi)} \right)^2 \quad (41)$$

$P_{b,d}$ – belastningsförlust vid drift [W]

P_d – aktiv effekt vid drift [W]

$$P_{b,m} = 3 \cdot R \cdot \left(\frac{P_m}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos(\varphi)} \right)^2 \quad (42)$$

$P_{b,m}$ – belastningsförlust vid märklaster [W]

P_m – märkeffekt [W]

Division av ekvation (42) och (41) ger ett samband för belastningsförlusterna vid drift:

$$P_{b,d} = P_{b,m} \cdot \left(\frac{P_d}{P_m} \right)^2 \quad (43)$$

Ovanstående ekvationer gäller under antagandet att effektfaktorn inte varierar under drift, samt att spänningen är konstant. [15] [13] [34]

Den maximala värme som kontrollerat kan återvinnas från en generator är den värme som kyls bort via kylsystemet:

$$P_{\text{värmeåtervinning}} = P_{\text{förluster}} - P_{\text{konvektion}} - P_{\text{strålning}} \quad (44)$$

Generatorkunnig personal angav att ca 6 % av generatorns effekt kan ses som värmeförluster, varav ca 4 % avges via konvektion och strålning [35]. Generatorer kan vara väldigt olika varför ett generellt värde för andel förluster är väldigt osäkert.

I vattenkraftstationerna Sädva och Grytfors, som ägs av Skellefteå Kraft, finns värmeåtervinningssystem som tar tillvara på spillvärme från generatorerna. I Tabell 3 visas den värme som återvinns från respektive system.

Tabell 3 Andel återvunnen värme i de olika systemen i Skellefteå Krafts stationer Sädva och Grytfors.

Procentuell andel av märkeffekt	Grytfors	Sädva
Totalt återvunnen värme [%]	0,3	0,3
Återvunnen värme från bärlager [%]	0,2	0,3
Återvunnen värme från generatorkylning [%]	0,1	-

I Grytfors återvinns värme från både bärlager och generatorkylningen medan man i Sädva enbart återvinner värme från bärlager.

I Hissmofors, som är ett av Jämtkrafts vattenkraftverk, finns två typer av värmeåtervinningssystem. I den äldre stationen finns ett system som använder generatorns värmeförluster, tillsammans med en elpanna. Ett vattenburet system värmer, förutom kraftstationen, omkringliggande byggnader såsom garage och kontorslokaler. Värmen distribueras till golvvärmesystem samt ventilation. I kontorsbyggnaden finns även en ackumulatortank för tappvarmvatten som laddas genom värmeväxling mot det varma vattnet från generator och elpanna.

I den nya stationen värms byggnaden främst av spillvärme från generatorerna via värmeväxlare i ventilationssystemet. Som spets finns en elpanna för tillfällen då stationen inte är i drift. Bärlager och statorlindning kyla av ett slutet vattensystem. Den upptagna värmen växlas mot rumsvärmare varefter den kvarvarande värmen kyla bort med ett råvattensystem där man tar in älvvatten som sedan släpps ut nedströms kraftverket. Det kalla vattnet används även för rumskyla. Här finns ett stort ventilationssystem som genom reglering anpassar ventilationen för att hålla ett övertryck i stationen och önskad temperatur.

8 Ekonomi

Nedan beskrivs två metoder för ekonomisk analys av investeringar. Payoff-metoden är en enklare metod medan livscykelkostnadsanalys (LCC) är en mer djupgående modell.

För nuvärdesberäkningar användes en kalkylränta på 7 % i enlighet med en dokumenterad kalkyl över Järnvägsforsen 2012. Det elpris som användes i beräkningarna är ett medelvärde av historiska elpriser från 2013 som togs fram internt på Statkraft. I medel låg priset på 318 kr/MWh.

8.1 Payoff-metoden

För att enkelt analysera hur snabb återbetalningen är för en viss investering kan payoff-metoden användas. Genom att dividera grundinvesteringen, $C_{investering}$, med den årliga ekonomiska energibesparing, $C_{besparing}$ per år, som investeringen genererar fås payoff-tiden:

$$Payoff\ tid = \frac{C_{investering}}{C_{besparing\ per\ år}} \quad (45)$$

Payoff-tiden för olika investeringsalternativ kan jämföras, där det med lägst värde är mest lönsamt. Metoden är mycket enkel och missgynnar långsiktiga investeringar. Ingen hänsyn tas till restvärde, räntor och underhållskostnader varför en mer djupgående beräkning, exempelvis nuvärdesberäkning, bör göras då ett mer tillförlitligt beslutsunderlag eftersträvas [36].

8.2 Livscykelkostnadsanalys

En metod för att beskriva totala kostnaden för en viss investering är livscykelkostnad. Det inkluderar investeringskostnad så väl som drift- och underhållskostnader, samt energikostnader under en bestämd kalkylperiod. Den totala livscykelkostnaden för en viss investering ges av:

$$LCC = C_{investering} + C_{underhåll} + C_{energi} \quad (46)$$

Nuvärdet av ett belopp som utfaller varje år diskonteras enligt:

$$NUV = C \cdot \frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \quad (47)$$

Där C är kostnaden per år [kr/år], i är kalkylränta [%] och n är kalkylperioden [år].

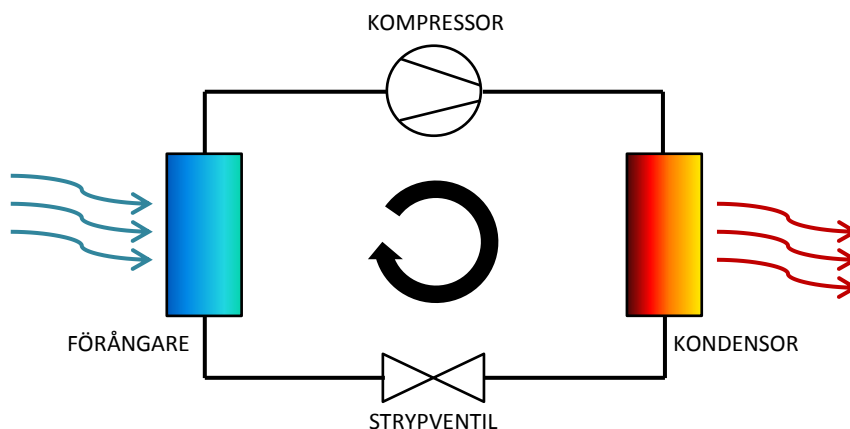
Ett belopp som endast infaller ett visst år framåt i tiden får ett nuvärde enligt:

$$NUV = C \cdot (1 + i)^{-n} \quad (48)$$

Där n är det år beloppet utfaller. Denna metod ger en mer informativ ekonomisk analys än payoff-metoden i och med att underhåll och räntor medtas. Ovan beskrivna LCC-beräkning har vissa förenklingar. Fler parametrar, såsom restvärde och årlig energiprisökning, kan även medtas för att få ett än mer korrekt underlag [37].

9 Värmepump

En värmepump minskar elenergibehovet i och med att uppvärmningen sker mer effektivt än vid direkt eluppvärmning. Värmepump som värmekälla blir allt mer vanlig i takt med att tekniken går framåt och effektiv elanvändning blir mer efterfrågad. Principiellt är en värmepump ett omvänt kylskåp. Istället för att generera kyla, tar man värme från ett kallt medium. I en värmepump förångas ett köldmedium vid låg temperatur. En eldriven kompressor höjer trycket och därmed temperaturen. Köldmediet kondenseras därefter och den värmeenergi som avges vid kondenseringen går till värmesystemet, se principskiss Figur 3.



Figur 3 Principskiss över en värmepump. Köldmediet cirkulerar i kretsen och värme tas upp av köldmediet på den kalla sidan vid förångaren, därefter höjs trycket i kompressorn varefter köldmediet kondenserar och värme avges. (Figur: Amanda Åström)

Den värme som avges vid kondenseringen är summan av den upptagna värmen vid förångaren, P_f , och den tillförda kompressoreffekten, P_k . Förhållandet mellan den avgivna värmen och den tillförda effekten beskrivs med en värmefaktor som kallas COP (Coefficient Of Performance):

$$COP = \frac{P_f + P_k}{P_k} \quad (49)$$

Ju lägre temperaturdifferensen är mellan förångaren och kondensorn desto högre blir värmefaktorn. Storleken ligger vanligtvis mellan 3 - 4. Energibesparingen blir större ju längre värmepumpen används under året. De dimensioneras sällan efter DVUT utan kompletteras med spetsvärme [26].

9.1 Uteluftsvärmepump

En uteluftsvärmepump är försett med ett luftvärmebatteri på utomhussidan där uteluften kyla. En uteluftsvärmepump kan värma inomhusluft men även ett vattenburet värmesystem. I analogi med Figur 3 gäller att köldmediet tar upp värme från uteluften vid förångaren och från kondensorn avger värme till inomhusdistributionen. Problemet är att utomhustemperaturen är som lägst då värmebehovet är som störst vilket gör att COP-värdet blir lågt. Luftvärmepumpen kan användas för kylning under sommaren genom att ”vändas” [26].

9.2 Sjövattenvärmepump

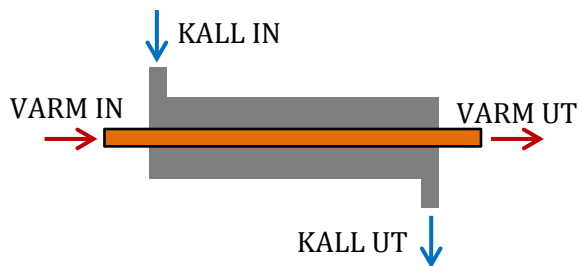
Solenergi lagras som värme i vatten och vid sjöbotten är det sällan kallare än 4°C. Temperaturnivån i sjövattnet är jämnare än i uteluften varför en sjövattnenvärmepump har bättre driftförhållanden. En slang placeras på sjöbotten och förses med tyngder för att motverka att den flyter upp. Det är viktigt att den placeras på isfritt djup och att systemet dimensioneras så att isbildning inte sker. Om is fastnar mot slangen kan den flyta upp. Slangen är fylld med ett kolektormedium som tar upp värme från sjövattnet. Kolektormediet tas i sin tur till förångaren där värmen upptas av köldmediet i värmepumpen. Slutligen överförs värme till det medium som ska värma byggnaden [26].

9.3 Bergvärmepump

Där de geologiska förhållandena tillåter kan den värme som lagras i berg och grundvatten nyttjas för att värma en byggnad. Enligt samma princip som i Figur 3 och för sjövattnenvärmepumpen tas värme från grundvattnet via kolektormediet till värmepumpen där det cirkulerande köldmediet överför värmen till huset via kondensorn. Ett hål borrar i vilket en slang förs ner, djupet är ofta mindre än 200 meter. Slangen innehåller en vätska som brukar består av 70 % vatten och 30 % frysskyddsvätska. Mellan borrhålen ska det vara minst 20 meter för att hålen inte ska påverka varandra. Bergvärme har en jämnare temperatur än både luft- och sjövattnenvärme. Problematiken är att det kan vara svårt att få ut tillräckligt mycket värme ur borrhålet. Bergvärmepumpen kan kompletteras med solfångare som tillför värmeenergi under sommaren [26] [38].

10 Värmeväxlare

I en värmeväxlare sker ett värmeutbyte genom att två fluider med olika energiinnehåll passerar varandra. Beroende på tillämpning krävs olika utformning hos värmeväxlaren. I och med att behoven varierar har flertalet innovativa lösningar tagits fram. Den enklaste varianten är uppbyggd av två rör med olika dimensioner, se Figur 4.



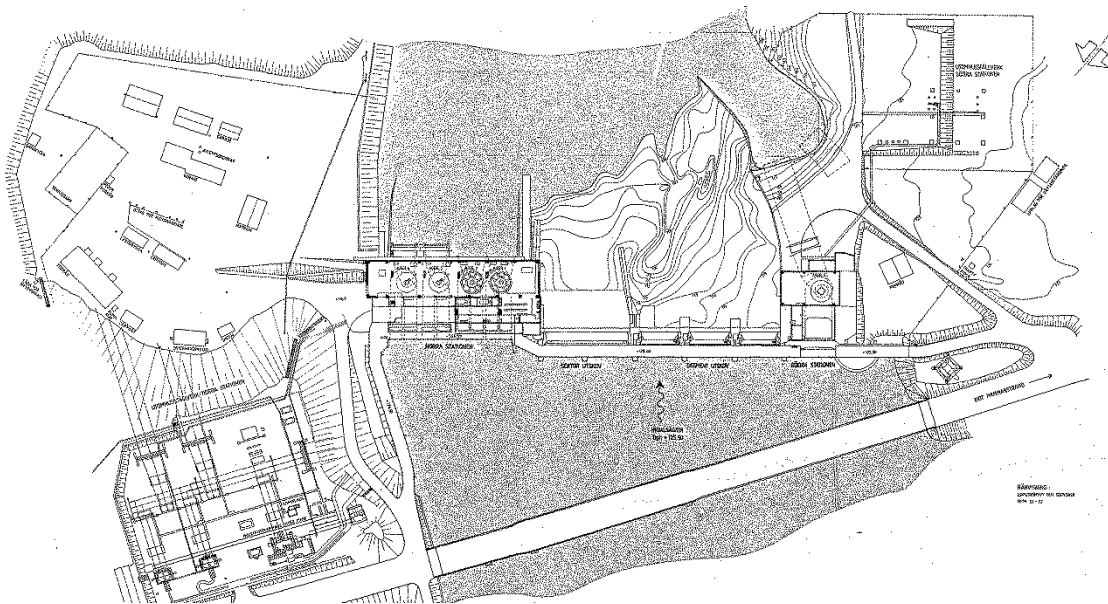
Figur 4 Principskiss över värmeväxlare med parallella flöden. (Figur: Amanda Åström) [25]

Värme överförs från den varma till den kalla fluiden genom den vägg som skiljer dem åt. I vissa utformningar gör den inre tuben några svängar i den yttre tuben (skalet) för att öka den värmeöverförande ytan. I värmeväxlaren kan flödet vara parallellt eller motströms. Det förstnämnda innebär att fluiderna har inloppen på samma sida och rör sig i samma riktning medan de i en motströmsvärmeväxlare rör sig i motsatt riktning. En typ av värmeväxlare som har mycket god värmeöverföringsförmåga är så kallad plattvärmeväxlare. I plattornas hörn finns hål där medierna förs in. De strömmar sedan mot varandra i parallella plattor. För att förbättra värmeöverföringen är de korrugerade vilket ökar turbulensen i strömningen. Denna variant är lämplig vid värmeöverföring mellan två vätskor [25] [31].

11 Kraftverket i Hammarforsen

Hammarforsen ligger i den 430 km långa Indalsälven och är Sveriges yngsta vattenfall. År 1796 tömdes Ragundasjön efter att Magnus Huss, Vildhussen, försökt genomskära den grusås som agerade damm åt sjön. Tidigare slogs timret sönder på sin väg ner mot Sundsvall och i ett försök att lösa problemet orsakade Vildhussen en omfattande översvämning och sedermera en förflyttning av Indalsälven. I och med det skapades den nya forsen, Hammarforsen, samtidigt som den gamla Storforsen blev torrlagd. Idag kallas det området Döda fallet [39].

Kraftverket i Hammarforsen har byggts upp i olika etapper. De första aggregaten, G1 och G2, togs i drift 1928. Tio år senare gjordes en påbyggnad av två aggregat, G3 och G4. Slutligen, kring år 1950, byggdes den södra stationsbyggnaden där generatort G5 står. Idag finns alltså fem aggregat med en total kapacitet på 80 MW och en produktion på 575 GWh per år. [40] Kraftverket är uppdelat i en nordlig och en sydlig stationsdel, se Figur 5. I den norra är fyra aggregat placerade, medan det femte G5 är placerat i den södra byggnaden. Den sistnämnda stationsbyggnaden är aktuell för det här projektet.



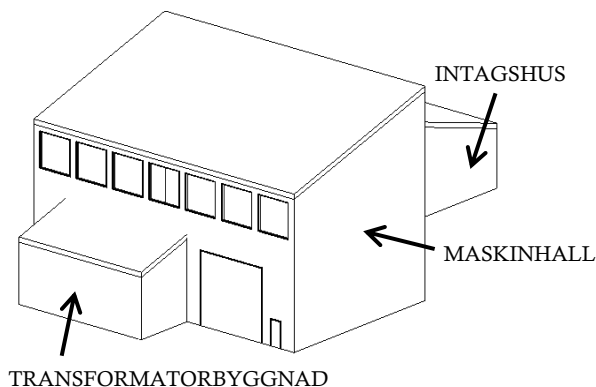
Figur 5 Situationsplan över Hammarforsens vattenkraftverk (Bild: Statkraft)

I Figur 5 är transformatorerna placerade på den norra älvstranden samt i den södra stationsbyggnaden. Idag är samtliga transformatorer belägna på den södra sidan, nedanför stationsbyggnaden. Kraftverket arbetar med både Francis och Kaplan-turbiner.

Som ovan nämnt är det den södra stationsbyggnaden som ska analyseras i det här projektet, den består av i huvudsak tre sektioner:

- Intagshus
- Maskinhall innefattande entrehall, turbinvåning och personalrum
- Transformatorbyggnad

Figur 6 visar en principskiss över byggnaden. Väggarna är av betong med utvändig siporexisolering vilket är en typ av lättbetong. Dimensioner och areor finns presenterade i *Bilaga 2 - Dimensioner och beräkningar gällande stationsbyggnaden*. Transformatorbyggnaden har en tunn plåtfasad medan resterande sektioner har putsfasad. Under 2011 gjordes en fasadrenovering, samtidigt tilläggsisolerades intagshuset och taket med 50 mm mineralull. De mindre fönstren byttes ut till tvåglasfönster.



Figur 6 Figur 6 Södra stationsbyggnaden i Hammarforsen (Bild: Amanda Åström)

Tidigare fanns transformator T5 i transformatorbyggnaden men den är nu flyttad, lokaltransformatorn är dock kvar. I stationsbyggnaden finns utrymme för ett nytt aggregat. Beslut om huruvida det ska byggas har inte tagits ännu.

Ventilationssystemet består av ett luftschakt i transformatorbyggnaden. Den inkommande luften värmdes tidigare i oljekylare som kylde transformatoroljan. Dessa oljekylare finns kvar idag men är inte i bruk då transformatorn nu är borttagen.

Luftomsättningen i stationen är relativt okontrollerad. Det är i stort sett endast självdrag som gör att luft transporteras genom byggnaden. Med självdrag kan luftomsättningen vara låg, särskilt under sommartid då temperaturskillnaden inomhus och utomhus är låg vilket gör att densitetsskillnaden blir väldigt liten. Spetsuppvärmningen idag sker via aerotemperar och elradiatorer som är placerade på ett flertal platser i byggnaden.

Generator G5

Aggregatet i den södra stationen drivs av en kaplanturbin och har en aktiv märkeffekt på 25 MW. Vid märkeffekt är de olika förlustposterna enligt följande:

- | | |
|---------------------------|--------|
| • Tomgångsförluster | 292 kW |
| • Magnetiseringsförluster | 82 kW |
| • Belastningsförluster | 134 kW |

Märkdata för generatoren erhöles via Statkrafts databas. Statorn är försedd med luftkylare som tillsammans med bär- och styrlageroljor kylv av ett öppet kylvattensystem. Älvvatten tas in via ett intag i dammen, det får sedan passera luftkylare och oljekylare för att slutligen släppas ut i ett kylvattenavlopp bakom sugrörluckan. Inga mätningar finns över oljeflöden eller kylvattnets utloppstemperatur och flödes hastighet.

12 Genomförande

Byggnadens uppvärmningsbehov analyserades genom en teoretisk undersökning av konstruktion och värmeledning. En uppskattning av uppvärmningsbehovet gjordes, där en övergripande transmissionsberäkning enligt ekvation (16) samt en beräkning av värmeförluster till följd av luftomsättning, ekvation (18) gjordes. För att beräkna generatorns värmeförluster användes ekvation (44). Information kring byggnadens termiska dynamik inhämtades genom temperatur- och luftfuktighetsmätning. Alla beräkningar är utförda i Excel.

12.1 Datainsamling och mätutrustning

För att analysera den aktuella stationsbyggnaden krävdes data över produktionen och vissa temperaturer. Generatorns kyleffekt fanns inte loggad varför en uppskattning av dess värmeförluster gjordes via diskussion med erfaren personal samt beräkningar. Produktionsdata erhöles via personal på Statkraft. För analys av byggnadens temperaturer användes Wisensys dataloggers för fjärrmätning, hyrd via Intab.

Mätutrustningen bestod av sex temperaturgivare, varav en även mätte luftfuktigheten i byggnaden. Givarna monterades på lämplig plats med isoleringstejp. Systemet använder en basstation som placerades centralt i byggnaden. Givarna skickade mätvärden till basstationen som avlästes via ett webbaserat verktyg. Figur 7 nedan visar givare, basstation samt exempel på montering.

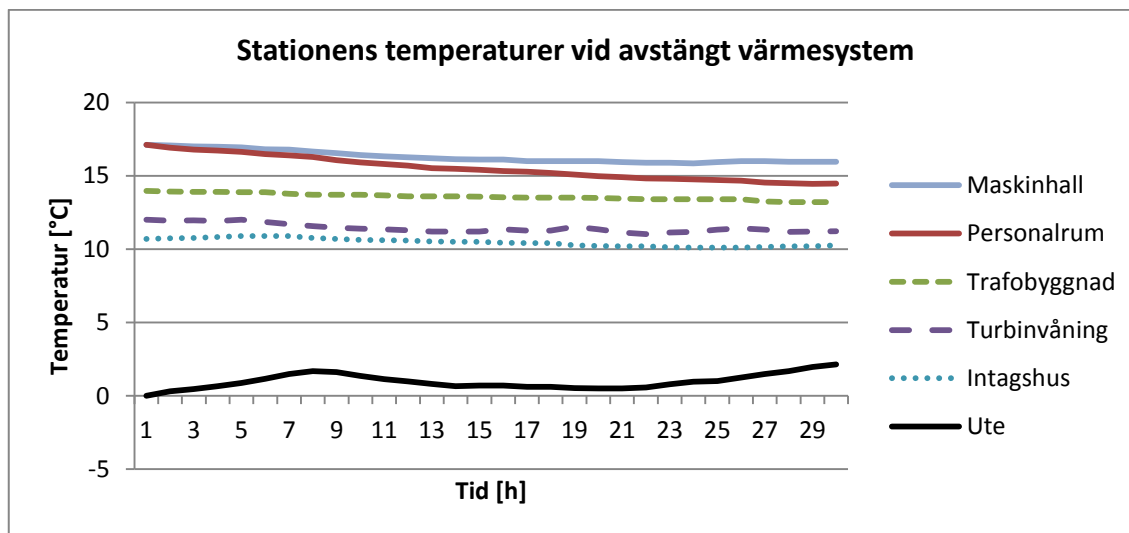


Figur 7 Från vänster: givare, basstation, montering av givare i intagshuset. (Foto: Amanda Åström)

Utomhustemperaturen mättes nedströms stationen. Givaren placerades några meter från byggnaden, skyddad mot vind och regn. Inomhustemperaturer mättes i intagshus, personalrum, transformatorbyggnad, turbinvåning och maskinhall. I maskinhallen mättes även luftfuktighet, det ansågs mest relevant då ett mindre kontrollrum innehållande datorer är placerat där vilket är det område som främst är känsligt mot fuktutfällning. En graf över uppmätta temperaturer och luftfuktighet finns i *Bilaga 3 - Data från mätningar*.

12.2 Avstängning av uppvärmningssystem

Genom att stänga av uppvärmningssystemet i stationsbyggnaden kunde ett avkylningsförlopp registreras. Södra stationsbyggnaden värms idag av dels generatorns konvektions- och strålningsförluster men främst av de elektriska aerotemperar och radiatorer som är placerade i olika delar av byggnaden. Värmen stängdes av under ca 1,5 dygn. Avsvalningsförloppet presenteras i Figur 8 nedan.



Figur 8 Avsvalningsförlopp i stationsbyggnad under avstängt värmesystem.

Som visas i Figur 8 sker en viss sänkning av temperaturerna under perioden med avstängd värmesystem. Personalrummet och maskinhallen har de brantaste avsvalningskurvorna. Personalrummet värms direkt av elradiatorer varför en snabb avsvalning var väntad då dessa stängdes av. Maskinhallen värms delvis av generatorn och man kan se i Figur 8 att även om temperatursänkningen är brantare än i turbinvåningen exempelvis så sjunker inte temperaturen lika snabbt som i personalrummet. I maskinhall och turbinvåning finns även flertalet maskiner som avger viss värme. En viss värmelagring i materialen finns även. Av Figur 8 kan man se att hela byggnaden har en värmetröghet som gör att temperaturen sjunker relativt långsamt.

12.3 Beräkning av byggnadens uppvärmningsbehov

Värmeförlustfaktorer för transmission och ventilation beräknades för stationsbyggnaden enligt ekvation (16) och (18). Värmeledningsförmåga och tjocklek för byggnadens konstruktionsskikt presenteras i *Bilaga 2 - Dimensioner och beräkningar gällande stationsbyggnaden*. Eftersom både personalbyggnad och turbinvåning ligger i direkt anslutning till maskinhallen och har i stort sett samma väggkonstruktion beräknades ett gemensamt värmegenomgångstal för dessa under benämningen maskinhall.

Korrektioner av U värdet anses i detta fall inte vara nödvändigt då det ger en försumbar inverkan. Däremot ger köldbryggor ett visst bidrag till värmeförlusterna varför dessa studerades närmare. Köldbryggor i anslutning mellan vägg och tak beräknades med ekvation (32) och köldbryggor i klimatskalets vägghörn beräknades med ekvation (31).

Det genomsnittliga värmegenomgångstalet, U_m , beräknades till $0,73 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, enligt ekvation (17).

Byggnaden har inget styrt ventilationssystem eftersom de gamla oljekylarna inte längre är i bruk. Idag är det genom de gamla luftintagen och genom otätheter i klimatskalet som luft kommer in via självdrag. För att få en ungefärlig bild över hur mycket värme som går förlorad genom luftomsättningen gjordes beräkningar där tryckdifferensen till följd av densitetsskillnaden är den drivande kraften. De dimensioner som användes vid beräkning av luftflödet genom intagen i transformatorbyggnaden finns presenterade i *Bilaga 2 - Dimensioner och beräkningar gällande stationsbyggnaden*. Under perioder då temperaturskillnaden är liten samt då det är varmare utomhus än inomhus är luftomsättningen mycket låg.

Med ekvation (22) erhöles ett totalt luftflöde på ca $1 \text{ m}^3/\text{s}$ där antagandet gjordes att temperaturskillnaden mellan utomhusluften och transformatorbyggnadens temperatur just vid luftintaget är ca 3°C . Vid besök på plats upplevdes det betydligt kallare i ventilationsschaktet jämfört med i resterande delar av transformatorbyggnaden varför temperaturskillnaden antogs låg. Luftflödet gav att förlustfaktorn, Q_{vent} , för ventilationen är $1300 [\text{W}/\text{K}]$, dock är det ett mycket osäkert värde.

Den dimensionerande vinterutetemperaturen, DVUT, togs fram genom att beräkna medelvärdet av Östersunds och Sundsvalls DVUT, vilket gav $-23,3^\circ\text{C}$ [26]. Tidskonstanten antogs vara två dygn. Antagandet grundar sig på att byggnaden är äldre och att konstruktionen har relativt hög värmeledning. Markens temperatur, DMT, antogs vara årsmedeltemperaturen på platsen, $2,2^\circ\text{C}$ [41]. De dimensionerande inomhustemperaturerna, DIT, sattes till vad värmesystemet ska kunna hålla. Den interna gratisvärmen antogs till tre grader, alltså $T_g = DIT - 3$.

För energibehovsberäkningarna användes gradtimmar, se kapitel *Byggnaders uppvärmningsbehov*. Eftersom byggnadens olika sektioner har olika temperaturer togs gradtimmar fram för respektive gränstemperatur, Tabell 4.

Tabell 4 Gradtimmar vid olika gränstemperaturer från [26].

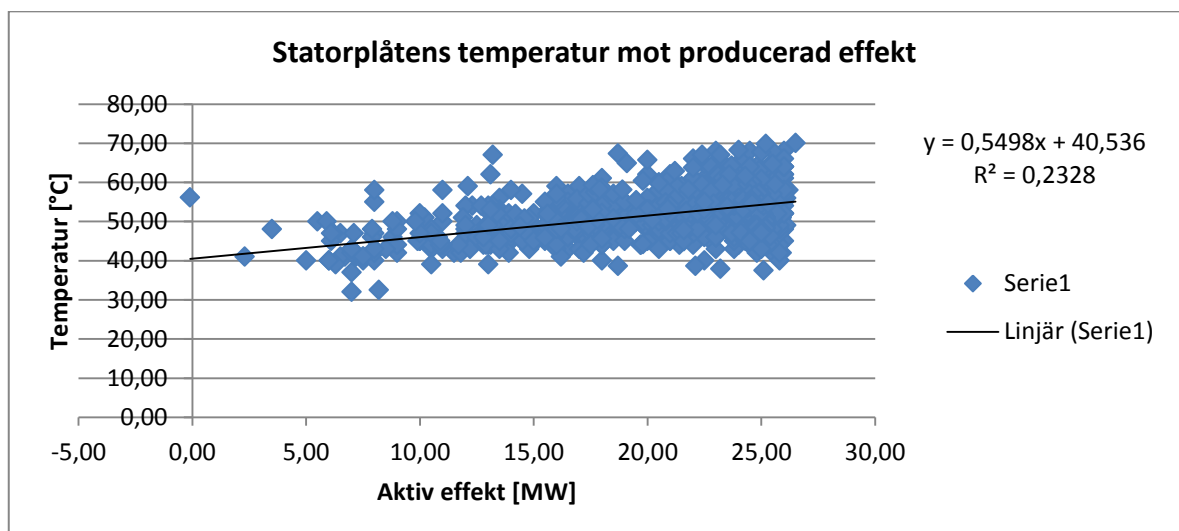
Gränstemperatur, T_g [$^\circ\text{C}$]	Gradtimmar, G_t [$^\circ\text{Ch}/\text{år}$]
15	116500
11	87480
10	80900
9	74560

Det beräknade uppvärmningsbehovet presenteras i resultatkapitlet nedan. Den aerotemper som idag finns i intagshuset antas vara kvar för att säkerställa att intagsluckans växelolja hålls varm. Därav berörs inte intagshuset av åtgärder och uppvärmningssystem utan behandlas som en separat sektion.

12.4 Beräkning av generatorns värmeavgivning

Generatorns värmeförluster antas vara noll då ingen produktion sker. Under perioder då aggregatet är igång beräknades belastningsförluster enligt ekvation (43). De totala värmeförlusterna beräknades genom att summera belastningsförluster, tomgångsförluster och magnetiseringsförluster.

Av de totala värmeförlusterna kyla den största delen bort via kylvattensystemet, resterande värme avgavs via konvektion och strålning. Ett ungefärligt värde på den avgivna värmen via konvektion och strålning togs fram med ekvation (2) och (11) där värmeöverföringskoefficienten beräknades enligt ekvation (3). Generatorns geometri tillåter approximationen av en horisontell yta, ekvation (5). Det gav att värmeöverföringskoefficienten är ca $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. För uppskattning av strålningsvärmen antogs generatoren vara en svart kropp och omgivningstemperaturen vara samma som luftens temperatur i maskinhallen. Antagandet om en svart kropp gör att ett något högt värde fås i och med att emissiviteten är maximal, $\varepsilon = 1$. Statorplåtens temperatur varierar med produktionen varför ett samband mellan temperaturen och generatorns effekt togs fram, Figur 9.



Figur 9 Statorplåtens temepatur mot aktiv effekt för generator G5.

Statorplåtens temperatur har en stor spridning vilket troligtvis beror på att den omgivande temperaturen också påverkar statorplåten. Under perioder då det är varmt ute blir även inomhusklimatet varmare dock kan generatoren producera samma effekt oavsett utomhustemperatur. Denna anpassning användes ändå eftersom det var en uppskattning av konvektions- och strålningsförlusterna som eftersöktes.

För att undersöka värmetillgången i generatoren är kylsystemets temperaturer intressanta. Loggade värden på temperaturer hos styr- och bärlagerolja och kylluft togs fram internt. Dock fanns inget data över olje- eller kylvattenflöde varför en uppskattning av den återvinningsbara värmen gjordes. Befintliga värmeåtervinningssystem i andra stationer undersöktes tillsammans med samtal med generatorkunnig personal.

13 Teori gällande lösningsförslag

Här presenteras åtgärder för att minska energibehovet i stationsbyggnaden samt lösningsförslag till hur värmebehovet kan tillgodoses.

13.1 Åtgärdsförslag 1: Isolera maskinhall mot transformatorbyggnad

Eftersom transformatorbyggnaden nu inte används är det av intresse att undersöka hur stor energibesparing man skulle få om transformatorbyggnaden isolerades mot maskinhallen. Inga aerotemprar eller elradiatorer finns i transformatorbyggnaden utan den värms enbart av maskinhallen. Genom att avskärma byggnadssektionerna kan eventuellt en besparing göras. Mellan maskinhallen och transformatorbyggnaden finns en port som tidigare användes för att tillgängliggöra transformatorn. Porten har troligtvis en relativt hög värmeledningsförmåga. Idag finns lokaltransformator LT5 placerad i transformatorbyggnaden men den klarar kalla temperaturer.

Den gamla porten reglas upp och fylls med 21 cm isolering med en värmekonduktivitet på $0,037 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. En ny, mindre port på 15 m^2 ansätts i den gamla porten, med ett U-värde på $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. På så sätt kan lokaltransformatorn hållas tillgänglig. Hela väggen mot transformatorbyggnaden föses med 7 cm mineralull av samma typ som ovan. Ingen omfattande byggnation antas ske inom det närmsta decenniet varför en kalkylperiod på 10 år används.

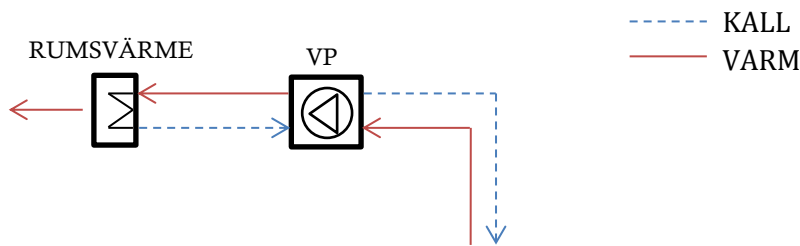
13.2 Åtgärdsförslag 2: Sänka inomhustemperaturen

Idag är det ca 18°C i maskinhall och personalrum. Intagshuset håller ca 10°C , turbinvåningen ca 13°C och transformatorbyggnaden 14°C . I samråd med företagshandledare beslöts att en sänkning av maskinhallens temperatur med $4 - 5^\circ\text{C}$ är rimlig och intressant. Med antagandet kraftig inomhusklädsel, 1,5 clo, och en arbetsaktivitet på ca 2 met fås att temperaturen kan sänkas till 14°C , utan att arbetsmiljön försämras, enligt Figur 2 med ett PPM-index $< 10 \%$. Personal arbetar inte kontinuerligt på platsen men temperaturen bör vara så pass att man inte fryser när väl arbete utförs. För en rättvis jämförelse används samma kalkylperiod som i Åtgärdsförslag 1.

13.3 Systemalternativ 1: Bergvärmepump

Ett sätt att minska uppvärmningens elbehov är att använda värmepumpar (VP). Enligt teorin gällande värmepumpar, kapitel *Värmepump*, krävs mindre el för samma värmeeffekt.

Byggnaden förses med bergvärmepumpar som tillgodoser uppvärmningsbehovet. Värmepumpen överför värme från köldmediet till ett vattenburet värmesystem som i sin tur distribuerar värmen till önskad plats via vattenburna aerotemperar. Som spets finns en elpanna för de tillfällen då värmesystemet inte kan täcka behovet. Se principskiss nedan, Figur 10.



Figur 10 Bergvärmesystem principskiss (Figur: Amanda Åström)

Intagshuset behåller den eldrivna aerotemper som finns där idag eftersom det är viktigt att intagsluckans växelolja hålls varm. Inomhustemperaturen sätts till 14°C och transformatorbyggnaden ses som isolerad enligt föregående åtgärdsförslag.

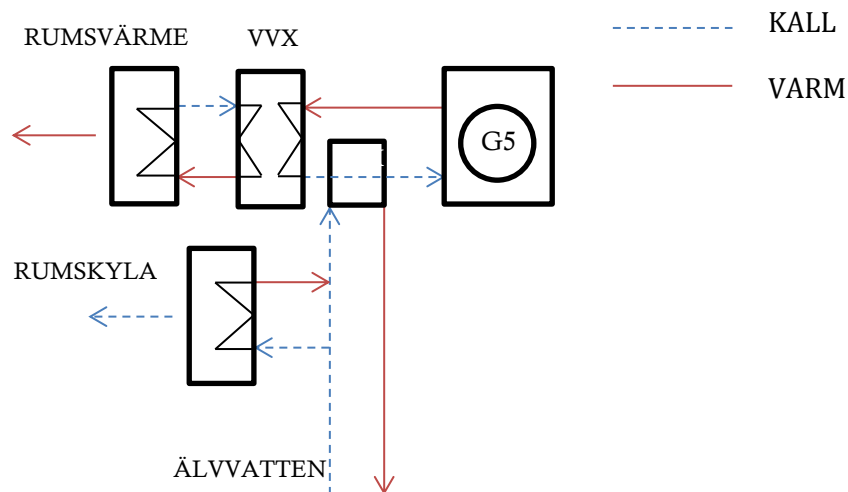
IVT angav att ett schablonpris för totalkostnaden för installation och borrning är mellan 14 000 - 16 000 kr/kW och att livslängden för en värmepump brukar vara 15 – 18 år. Själva borrhålen har dock en betydligt längre livslängd.

Vid en installation av ett bergvärmepumpssystem måste en anmälan skickas till kommunen. Ragunda kommun, där Hammarforsen ligger, tar ut en avgift på 700 kr för handläggning av anmälan. Anmälan ska skickas in minst tre veckor innan arbetet påbörjas [42].

13.4 Systemalternativ 2: Värmeåtervinning från generator

Från generatoren kan värme återvinnas från antingen lager eller stator, alternativt båda. En ombyggnation av luftkylare i statorn kan vara komplicerat då utrymmet är begränsat. I Hammarforsen är statorn omgiven av ett betonghölje där det idag inte finns utrymme för värmeväxelpaket. Värmen i generatorns bär- och styrlagerolja är något lättare att återvinna då systemet ligger utanför statorn och temperaturerna är höga. Värmeöverföring mellan olja och vatten är dessutom effektivare än mellan luft och vatten. För analys av detta alternativ undersöks dock både stator- och lagerkylningen.

Stator och lager kyls av ett primärt vattensystem. Via värmeväxlare överförs värmen till ett slutet sekundärt vattensystem som i sin tur växlar värme till distributionssystemet i byggnaden. Det primära vattensystemet kyls mot älvvatten för att säkerställa tillräcklig kylning av generatoren. Värmen distribueras med vattenburna aerotemperar till byggnadens olika sektioner på samma sätt som i systemalternativ 1. Då byggnaden behöver kylas kan älvvattnet även kyla aerotemperarna. Se principskiss nedan, Figur 11.



Figur 11 Värmeåtervinningssystem principskiss (Figur: Amanda Åström)

Om generatoren står finns i stort sett inga värmeförluster att tillgå. För att säkerställa att värmebehovet alltid kan tillgodoses adderas därför en elpanna som spets. Uppvärmningsbehovet gäller för en inomhustemperatur i maskinhallen på 14°C och att transformatorbyggnaden är isolerad enligt åtgärdsföreslag 1 och 2.

Livslängden för ett kylsystem antas vara ca 30 år vilket i samråd med personal på Statkraft ansåg rimlig.

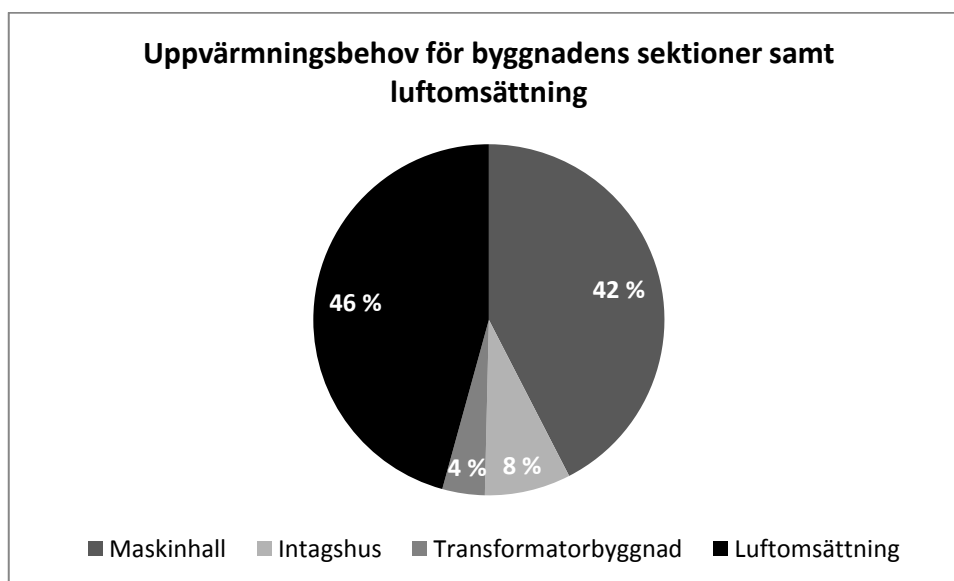
14 Resultat

Nedan presenteras resultaten från beräkningar samt analyser av åtgärdsförslag och systemalternativ. Slutligen i detta kapitel presenteras en sammanfattning av lösningsförslagen.

14.1 Södra stationsbyggnadens uppvärmningsbehov

De totala transmissionsförlusterna, inklusive köldbryggor beräknades till $2386 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Luftomsättningens förluster beräknades till $1300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Det dimensionerande uppvärmningsbehovet för hela stationsbyggnaden beräknades till ca 117 kW, energibehovet är då 328 MWh.

Luftomsättningens värmeförluster står för ca 46 % av uppvärmningsbehovet, således är 56 % transmissionsförluster. Av dessa motsvarar köldbryggor ca 1 %, vilka sett till det totala uppvärmningsbehovet står för 0,7 %. Vid beräkningen av köldbryggor medtogs endast sektioner vägg mot vägg, vägg mot golv och vägg mot tak. Egentligen uppstår köldbryggor även vid dörrar och fönster varför det beräknade värdet kan vara något lågt. Uppvärmningsbehovet fördelat på de olika sektionerna samt luftomsättningen presenteras i Figur 12 nedan.



Figur 12 Uppvärmningsbehov fördelat på maskinhall, transformatorbyggnad, intagshus och luftomsättning.

Maskinhallen är den byggnadssektion som står för det största effektbehovet på 54 kW. Det är den till volymen största sektionen och har stora ytor med hög värmetransport såsom fönster och dörrar. Intagshusets effektbehov är 10 kW vilket täcks av den aerotemper som finns där idag på 15 kW.

För analys av uppvärmningslösningar exkluderas intagshuset eftersom det ses som en separat sektion. Då intagshuset inte medräknas är effektbehovet ca 107 kW och energibehovet ca 300 MWh/år. Den el som idag värmer byggnaden motsvarar ca 95 000 kr/år och 1,34 ton CO₂/år. Motsvarande el från kolkraft ger ca 230 ton CO₂/år.

Nuvärdet av elen presenteras i Tabell 5 för de kalkylperioder som gäller för åtgärderna och systemalternativen.

Tabell 5 Nuvärde av den el som krävs för uppvärmning av byggnaden idag, vid åtgärdsförslagets och systemförslagets kalkylperioder.

Kalkylperiod [år]	Nuvärde [kr]
10	666 000
18	953 000
30	1 176 000

Åtgärdsförslagen och systemalternativen kan jämföras mot nuvärden ovan för en uppskattning av dess lönsamhet.

14.2 Värmeförluster från generator G5

Värmeavgivningen från generatorm beräknades enligt ekvation (44). Mellan 2011 och 2013 var de totala förlusterna i medel ca 450 kW varav strålning- och konvektionsförluster var ca 30 kW. Förutsatt att 420 kW måste kylas bort med kylsystemet fås att kylvattentemperaturen höjs med ca 4°C då flödet antas 26,4 l/s som är det totala kylvattenbehovet för luft- och oljekylare enligt ritning.

Värmen i bär- och styrlagerolja samt kylluft presenteras i Tabell 6 nedan.

Tabell 6 Bär- och styrlageroljans samt kylluftens temperaturer. Medelvärden och extremvärden under åren 1992 till 2014.

Temperaturer kylsystem	Medel [°C]	Max [°C]	Min [°C]
Styr- och bäragerolja			
Varm	51	69	39
Kall	31	53	20
Kylluft			
Varm	39	54	21
Kall	22	26	8

Kylvattnet koler både statorluft och lagerolja. Idag returneras kylvattnet direkt ut i älven. Det inkommande, kalla vattnet håller i medel en temperatur på ca 15°C men det varierar beroende på årstid. Som kallast har det varit ca 3°C och som varmest ca 29°C under åren 1992 till idag. Samma tidsperiod gäller för oljan och kyl luften i Tabell 6. Det är tydligt att oljan håller en hög temperatur vilket är gynnsamt vid eventuell värmeåtervinning.

Den återvinningsbara värmen beräknades i analogi med systemen i Grytfors och Sädva, Tabell 3. Med ett liknande värmeåtervinningssystem som det i Grytfors fås att totalt 64 kW värme kan återvinnas varav 38 kW från bärager och 26 kW från generatorkylningen. Värmeåtervinning från enbart bärageret, såsom systemet i Sädva är utformat, ger att ca 77 kW värme kan återvinnas. Generator G5 var under 2011, 2012 och 2013 igång ca 8664, 6888 respektive 6024 timmar. Antaget att möjlig återvinningsbar värme är 65 kW och att generatorm är igång 6500 timmar fås att 423 MWh värme finns att tillgå.

14.3 Analys av lösningsförslag

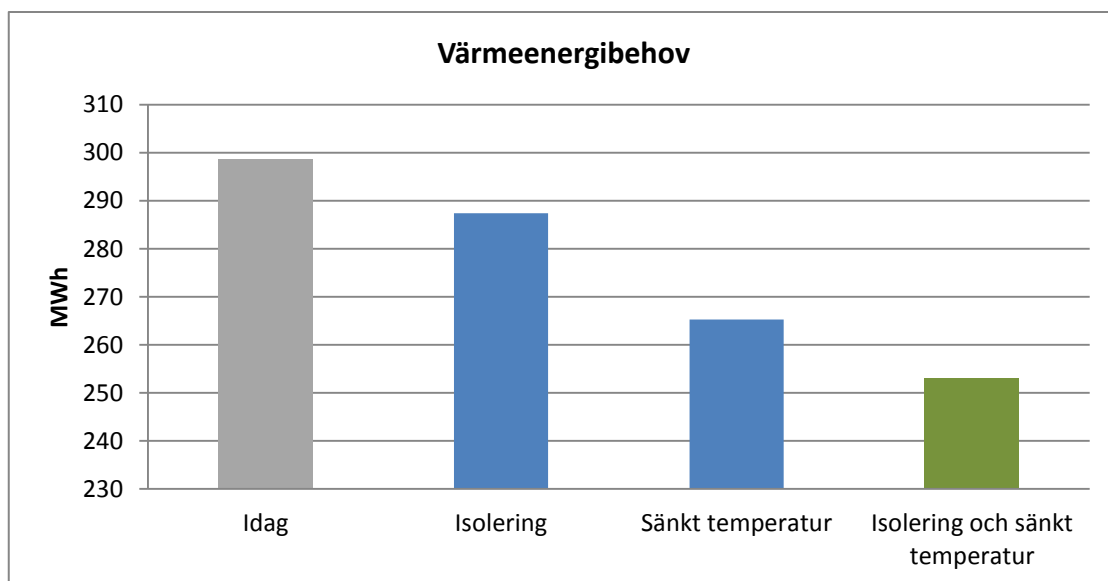
Här presenteras analysen av de olika åtgärdsförslag som togs fram under arbetet. För samtliga beräkningar är intagshuset exkluderat, alltså är utgångspunkten att det totala uppvärmningsbehovet är 300 MWh. För systemförslagen är även transformatorbyggnaden exkluderad. Den el som värmer byggnaden idag motsvarar ca 95 000 kr per år.

Generellt är en effektivare energivändning positivt ur ett miljöperspektiv. Då mindre lokalkraft krävs för att värma stationen kan mer vattenkraftsel säljas. Teoretiskt sett kan då elanvändningen från energikällor med större miljöpåverkan reduceras.

En sammanställning av åtgärdsförslagen samt systemförslagen presenteras slutligen i detta kapitel.

14.3.1 Åtgärdsförslag 1 och 2: Isolera maskinhall mot transformatorbyggnad samt sänka maskinhallens temperatur

Här analyseras en isolering av vägg mellan maskinhall och transformatorbyggnad enligt antaganden i kapitel *Åtgärdsförslag 1: Isolera maskinhall mot transformatorbyggnad* samt en sänkning av maskinhallens temperatur från 18 till 14°C. Figur 13 visar den energibesparing dessa åtgärder skulle ge. En kombinerad åtgärd där både isolering och sänkning av temperatur görs ger att det dimensionerande effektbehovet sänks till 98 kW.



Figur 13 Stationsbyggnadens totala energibehov vid de olika åtgärdsförslagen.

Att sänka temperaturen i maskinhallen är den post som ger störst energibesparing, ca 33 MWh/år. Endast isolering ger en sänkning av energibehovet på ca 11 MWh/år. Tillsammans reducerar åtgärderna energibehovet med 46 MWh/år.

Isoleringen antas vara mineralull med en tjocklek på 70 mm och med ett pris på ca 25 kr/m² [43]. Den totala kostnaden för isoleringen är ca 3800 kr. Antaget att kostnaden för arbetet är 500 kr/timme [44] och att arbetet kan utföras under en vecka (40 timmar) fås en totalkostnad på 23 800 kr.

Det minskade energibehovet gör att mindre el krävs för uppvärmning. Teoretiskt sett kommer elen från den kommer elen från den lokalkraft stationen förbrukar. Med ett minskat elbehov kan mer el säljas. Energibesparingen på 46 MWh/år ger en ekonomisk besparing på ca 11 000 kr/år. Den el som kan säljas istället för att värma byggnaden ger 0,6 ton koldioxidutsläpp mindre än vindkraft och än vindkraft och ca 35 ton mindre än kolkraft, CO2 ekvivalenter är hämtade från

Tabell 1.

Den relativa fuktigheten i maskinhallen varierade mellan 25 och 44 % under mätperioden. Risk för kondens föreligger i områden där temperaturen understiger vattenångans dagstemperatur. För luft vid 18°C och 44 % relativ fuktighet finns ca 6,6 g vatten per m³, samma mängd vatten antas finnas kvar i luften efter temperatursänkningen. I Tabell 7 nedan visas hur relativa fuktigheten och dagstemperaturen förändras vid en sänkt inomhustemperatur.

Tabell 7 Relativ fuktighet och dagstemperatur vid sänkt inomhustemperatur.

Inomhus- temperatur [°C]	Maximalt fuktinnehåll [g/m ³]	Relativ fuktighet [%]	Mättnadstryck [kPa]	Ångtryck [kPa]	Dagstemperatur [°C]
18	15	44	2,06	0,91	5,48
14	12	55	1,61	0,89	5,18

Risken för kondens i kontrollrummet är mycket liten eftersom temperaturen där är 14 °C.

Då det är varmt ute kan luften innehålla en större mängd fukt. Under perioder då utomhusluften är varmare än inomhusluften sker en kylning då luft tas in. I samband med att luften kyls sker en höjning av den relativa fuktigheten. Antaget att under en varm period har uteluften en temperatur av ca 20°C och en relativ fuktighet på 90 %. Luften kan då maximalt innehålla 17,3 g/m³ ånga vilket ger att ca 15,6 g ånga finns i luften. Antaget att samma mängd inkommer med uteluften som sänks till 14°C fås att den relativa fuktigheten i byggnaden blir ca 130 % vilket innebär att luften inte kan hålla fukten och risk för kondens finns. Även vid en temperatur på 18°C fås att relativa fuktigheten är högre än 100 %. Perioden då luftfuktigheten och temperaturen ute är hög är under sensommar och höst. Under sommaren ackumuleras troligen värme i byggnaden så att inomhustemperaturen är över 14°C.

14.3.2 Systemalternativ 1 och 2: Bergvärme och värmeåtervinning från generator

Systemalternativen utgår från åtgärdsförslagen, alltså att transformatorbyggnaden är isolerad och maskinhallens temperatur är 14°C. Systemlösningen gällande bergvärme togs fram tillsammans med IVT. Det kalkylprogram IVT använder räknar med DUT istället för DVUT. Enligt programmet är DUT -32°C för den aktuella platsen vilket ger att byggnaden har ett effektbehov på ca 120 kW. Kalkylprogrammet gav ett energibehov på 223 MWh. Dessa värden användes för båda systemalternativen för att kunna göra en rättvis jämförelse. För båda systemen antas samma värmedistributionssystem inomhus.

14.3.2.1 Systemalternativ 1: Bergvärmepump

För att tillgodose värmebehovet behövs två värmepumpar på 43 kW vardera som ger en framledningstemperatur på 55°C. Egenuppvärmningen sattes till 3°C, alltså är gränstemperaturen 11°C.

Enligt kalkylen erhöles nedanstående energibesparing, Tabell 8. Där den tillskottsenergi som behövs utöver värmepumpen, på ca 3 MWh, är inräknad.

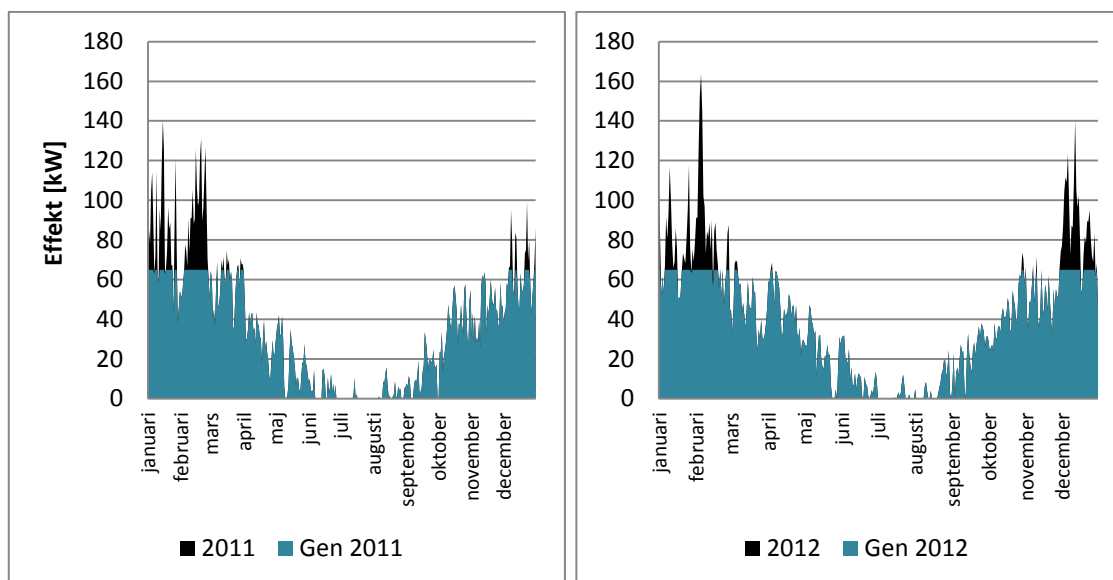
Tabell 8 Energibesparing bergvärmepumpar, inklusive tillskottsenergi som krävs utöver värmepumpar.

Nyttiggjord energimängd med värmepump	223	MWh
Inköpt driftenergi	65	MWh
Energibesparing	158	MWh

En effekttäckning på 70 % och en energitäckning på 98 % fås. Systemets drifttid är 2600 h/år. Energibesparingen på 158 MWh ger en kostnadsbesparing på ca 50 000 kr/år. I och med att det här är ett relativt enkelt system kan en investeringskostnad på 14 000 kr/kW användas vilket ger den totala kostnaden 1 204 000 kr. Kostanden gäller för själva installationen av bergvärmepumpen och inkluderar inte det värmedistributionssystem som finns inomhus.

14.3.2.2 Systemalternativ 2: Värmeåtervinning från generator

De totala värmeförlusterna som kyla bort via kylsystemet beräknades till ca 420 kW. Den återvinningsbara värmen beräknades i analogi med värmeåtervinningssystemen i Grytfors och Sädva. De perioder generatören varit av är under sommaren då värmebehovet är lågt. Enligt antaganden i kapitlet *Värmeförluster från generator G5*, att 65 kW kan återvinnas och att generatören är igång 6500 timmar, fås 423 MWh återvinningsbarvärme vilket vida täcker byggnadens uppvärmningsbehov. Utan möjlighet att ackumulera värmen uppstår ett underskott under de perioder då värmebehovet är större än 65 kW. Under 2011 och 2012 översteg effektbehovet 65 kW ca 816 respektive 864 timmar, och det maximala effektunderskottet var ca 53 kW. Figur 14 visar effekttäckningen av värmeåtervinning från generatören år 2011 och 2012.



Figur 14 Byggnadens effektbehov jämfört med potentiell värmeåtervinning från generatoren år 2011 och 2012.

Värmeåtervinning från generatoren täcker 83 % av energibehovet 2011 och 73 % 2012. Antaget att en elpanna krävs som spets under ca 850 timmar, med en medeleffekt på 30 kW fås att ett tillägg på 25,5 MWh krävs. Den totala energibesparingen ett normalår är ca 197 MWh vilket ger en ekonomisk besparing på ca 62 500 kr/år.

Eftersom generatorer och dess omgivning ser väldigt olika ut i olika stationer är det svårt att ge en exakt prisbild på vad ett värmeåtervinningssystem skulle kosta utan djupare analys. Personal på Skellefteå Kraft gav en uppskattning på mellan 1 500 000 kr och 3 000 000 kr. Värmedistributionssystemet inomhus antas inte vara inkluderat. Vid LCC beräkning används 1 500 000 kr.

14.4 Sammanställning av lösningsförslag

Nedan presenteras en sammanställning över energibesparing och kostnadsbesparing för åtgärdsförslagen, Tabell 9. Genom att både tilläggsisolera transformatorbyggnaden och sänka inomhustemperaturen fås en besparing på ca 14 500 kr/år. Att enbart sänka temperaturen ger även en, i sammanhanget, stor energibesparing.

Tabell 9 Energi- och ekonomiberäkningar avseende åtgärdsförslag.

	Temperatursänkning och isolering	Temperatur- sänkning	Isolering	
Värmeenergibehov före	298	298	298	MWh
Värmeenergibehov efter	253	265	287	MWh
Energibesparing	45	33	11	MWh/år
Procentuell sänkning av energibehov	0,15	0,11	0,04	%
Kostnadsbesparing	14 471	10 583	3 541	kr/år
Investeringskostnad	23 803		23 803	kr
Payoff-tid	1,6	0	6,7	år
LCC	77 839	74 332	1 067	kr

Den el som kan säljas istället för att värma byggnaden kommer från förnybar vattenkraft, om den istället produceras via kolkraft är det motsvarande koldioxidutsläppet betydligt högre, se Tabell 10.

Tabell 10 En jämförelse mellan koldioxidutsläpp av den vattenkraftsel som kan säljas istället för att värma byggnaden i och med åtgärdsförslagen mot motsvarande kolkraftsel.

	Temperatursänkning och isolering	Temperatur- sänkning	Isolering
Energibesparing [MWh/år]	45	33	11
CO2 utsläpp vattenkraft [ton/år]	0,21	0,15	0,05
CO2 kolkraft [ton/år]	35	26	9

Att enbart sänka temperaturen kräver ingen investering och är den självklart mest lönsamma åtgärden. Den el som värmer byggnaden kan ses som en minskad intäkt. I Tabell 11 nedan presenteras nuvärdet av denna förlust vid olika kalkylperioder där energiförbrukningen beräknats utifrån det kombinerade åtgärdsförslaget.

Tabell 11 Nuvärde av kostnaden för den el som krävs för uppvärmning vid sänkt temperatur och isolerad vägg.

Kalkylperiod [år]	Nuvärde [kr]
10	564 000
18	710 000 ¹
30	876 000 ¹

¹ Beräknat för ett energibehov på 223 MWh enligt kalkyl från IVT, se *Systemalternativ*

Nuvärdet av den el som krävs för uppvärmning vid det kombinerade åtgärdsförslaget ger en vinst på ca 100 000 kr jämfört med om värmen tillgodoses på det sätt som görs idag.

I Tabell 12 visas energibesparing och kostnadsbesparing för de två systemalternativen. Systemen antas kräva samma underhåll och värmedistributionssystem inomhus. För båda systemen är payoff-tiden 24 år.

Tabell 12 Energi- och ekonomiberäkningar avseende systemalternativ.

	Bergvärmepump	Värmeåtervinning generator	
Värmeenergibehov före	223	223	MWh
Värmeenergibehov efter	65	26	MWh
Energibesparing	158	197	MWh/år
Procentuell sänkning av energibehov	71	89	%
Kostnadsbesparing	50 017	62 525	kr/år
Investeringskostnad	1 204 000	1 500 000	kr
Payoff-tid	24	24	år
LCC	- 700 870	- 724 125	kr

Värmeåtervinning från generatoren har den största energibesparingen, vilket även ger den största årliga kostnadsbesparingen. På grund av den höga investeringskostnaden för värmeåtervinningssystemet blir LCC värdet ca 23 000 kr högre för bergvärmepumpslösningen. Den el som istället för att värma byggnaden kan säljas ger koldioxidutsläpp enligt Tabell 13 där det jämförs mot om motsvarande el producerats via kolkraft.

Tabell 13 En jämförelse mellan koldioxidutsläpp av den vattenkraftsel som kan säljas istället för att värma byggnaden i och med systemalternativen mot motsvarande kolkraftsel.

	Bergvärmepump	Värmeåtervinning generator
Energibesparing [MWh/år]	158	197
CO2 utsläpp vattenkraft [ton/år]	0,71	0,89
CO2 kolkraft [ton/år]	121	152

Nuvärdet av den el som krävs vid uppvärmning av byggnaden för de två systemalternativen presenteras i Tabell 14 nedan.

Tabell 14 Nuvärde av kostnaden för den elvärme byggnaden kräver vid systemalternativen.

Systemalternativ	Tillförd elvärme [MWh]	Nuvärde [kr]
Bergvärme	65	207 000
Värmeåtervinning från generator	26	100 500

Kalkylperioden för bergvärmesystemet är 18 år och 30 år för värmeåtervinningssystemet. Jämfört med hur värmen tillgodoses idag ger bergvärme en ökad elintäkt på ca 746 000 kr och värmeåtervinning från generatorn ger ca 1 080 000 kr. Det bör poängteras att systemalternativen utgår från åtgärdsförlagen där det totala uppvärmningsbehovet reducerats.

En fullständig sammanställning av energi- och kostnadsbesparingarna finns i *Bilaga 4 - Sammanställning över åtgärdsförslag och systemalternativ*.

15 Diskussion

De framtagna beräkningarna är baserade på en mängd antaganden varför de inte ska ses som exakta värden utan tolkas i enlighet med sin kontext.

15.1 Byggnadens uppvärmningsbehov

Det framtagna uppvärmningsbehovet har viss osäkerhet främst i och med de antaganden som gjorts i samband med luftomsättning, U-värden, köldbryggor och gradtimmar. Luftomsättningens värmeförluster är behäftade med stor osäkerhet. De antaganden som gjorts är vaga. Ingen dokumentation över ventilationen fanns att tillgå vilket gjorde att beräkningarna blev komplicerade.

Omgivningen under byggnaden är osäker med tanke på sammansättning av berg och vatten. Antagandet om marktemperaturen kan därmed vara missvisande. Det omkringliggande vattnet kan påverka temperaturen under byggnaden vilket beräkningarna inte tar hänsyn till.

Stationens uppvärmningsbehov hade kunnat uppskattas genom att beräkna skillnaden mellan lokalförbrukningen under en kall och varm period. Lokalförbrukningen fanns uppmätt för totala stationen men inte explicit för den södra stationsbyggnaden varför uppvärmningsbehovet uppskattades utifrån teoretiska beräkningar.

Värmetransporten antas ske endast i en riktning vilket inte är helt korrekt då det egentligen sker i tre dimensioner. För att för hand kunna uppskatta värmeförlusterna i byggnaden krävdes denna förenkling. Med ett numeriskt simuleringsprogram hade en utförlig analys kunnat göras men det ansågs för tidskrävande för detta projekt.

Att maskinhallen står för den största förlustposten av byggnadens sektioner är fullt rimlig med tanke på storlek och utformning. I beräkningarna har inte hänsyn tagits till värmeflöden inne i byggnaden. Eftersom vissa sektioner, såsom intagshus, håller lägre temperatur än maskinhall och personalrum sker viss värmetransport internt i byggnaden. Det bör dock inte påverka resultatet avsevärt eftersom temperaturskillnaderna är relativt låga.

Under mätperioden inträffade inga extrema temperaturförändringar. Förhoppningen var att kunna studera en period med mycket låg utomhustemperatur för att se hur byggnaden reagerade på en sådan temperatursänkning. Dock gav mätvärdena information om hur temperaturprofilen ser ut mellan de olika sektionerna vilket gjorde att ett grundfall kunde analyseras.

15.2 Åtgärdsförslag

Att sänka temperaturen i maskinhall och personalbyggnad ger en stor besparing i relation till att det är en mycket enkel åtgärd som inte kräver några ingrepp. Arbetsmiljön bör inte försämrats vid en temperatur på 14°C i och med att temperaturen gäller vid PMV = 0 och PPD < 10 %, Figur 2. Personal bär skyddskläder som har en god isoleringsförmåga vilket gör att en sänkt temperatur till och med kan göra det behagligare att utföra fysiskt arbete i byggnaden.

Risken att kondens ska orsaka problem i kontrollrummet är mycket liten. Dagtemperaturen efter sänkningen är ca 5°C vilket är betydligt lägre än temperaturen i kontrollrummet på 14°C. Även om rummets ytor håller en något lägre temperatur än luften är sannolikheten mycket liten att de är under dagtemperaturen. Under sensommar och höst kan fukthalten vara betydligt högre i byggnaden i och med att den uteluft som tas in kan innehålla en större mängd fukt. Troligen ackumuleras värme i byggnadens konstruktion under sommaren vilket gör att temperaturen inomhus är varmare än 14°C och kondensrisken bör vara relativt låg. En avfuktare kan placeras i utrymmet för att säkerställa att datorer inte tar skada.

Genom att isolera transformatorbyggnaden kommer temperaturen där att sänkas. Väldigt lite arbete sker i transformatorbyggnaden varför det troligen inte är något problem. Eftersom porten mellan transformatorbyggnad och maskinhall endast regleras upp och isoleras kan den enkelt rivas vid behov. För att säkerställa en god luftomsättning och bra luftkvalitet bör ventilationen ses över. I och med att ventilationsschaktet är placerat i transformatorbyggnaden avskärmas det helt vid en eventuell isolering.

En kombination av energieffektiviseringsåtgärderna ger en vinst på ca 78 000 kr sett över 10 år. Det kan verka som en liten besparing i relation till kraftstationens totala omsättning men åtgärderna är mycket enkla att utföra, särskilt temperatursänkningen.

Omgivande miljö påverkas i mycket liten utsträckning av åtgärderna. En minskning av 0,21 ton CO₂-ekvivalenter per år erhålls vilket är försumbart i relation till de 4,1 miljoner ton som hela Sveriges elproduktion motsvarade 2010. I relation till det utsläpp som motsvarande el från kolkraft skulle ge på 34 ton är vattenkraftsel betydligt bättre ur ett miljöperspektiv.

Energieffektiviseringsåtgärderna motiveras främst av att de är mycket enkla och ger en viss ekonomisk besparing.

15.3 Värmeförluster från generator

Generators beräknade värmeavgivning är behäftad med viss osäkerhet då ett flertal förenklingar gjordes. I jämförelse med de antaganden generatorkunnig personal angav ser man att värmeförlusterna ligger i liknande storleksordning. Tabell 15 nedan visar en procentuell jämförelse mellan de beräknade resultaten och uppskattningar från generatorkunnig personal. Dock är beräkningarna approximationer och har inte tagits fram med reella värden på oljeflöden och temperaturer m.m.

Tabell 15 Procentuella värmeförluster av märkeffekt och uppskattade andelar.

	Beräknat	Uppskattad andel	
Totala förluster	3	6	% av aktiv effekt
Andel strålning och konvektionsförluster	7	<4	% av totala förluster

Statorplåtens temperaturberoende mot effekten, Figur 9, har en stark spridning. För ett mer korrekt samband bör datat analyseras närmre med avseende på omgivande temperatur och producerad effekt.

Den återvinningsbara värmen beräknades i analogi med befintliga system i Sädva och Grytfors. Det gör att resultatet är en mycket grov uppskattning. Att värme i storleksordningen 65 kW kan återvinnas från generatoren anses dock rimligt. För en mer korrekt beräkning av potentiellt återvinningsbar värme bör mätningar över generatorns kylsystem göras.

15.4 Systemalternativ

Eftersom en stor del av energibehovet kan täckas av värmen från generatoren är det ett mycket intressant alternativ ur ett effektiviseringsperspektiv. I och med att det teoretiskt sett kan levereras mer el vid samma produktionsnivå höjs stationens totala verkningsgrad. Att tillgodose värmebehovet med hjälp av bergvärme är fullt möjligt. LCC-kalkylen gav att bergvärmesystemet är något billigare än värmeåtervinningssystemet. Den årliga besparingen är högre för värmeåtervinningssystemet men den höga installationskostnaden gör att bergvärmelösningen är billigare. För att avgöra vilken lösning som är mest lämpad måste andra parametrar beaktas. Fördelarna med värmeåtervinningssystemet är att man tar tillvara på spillvärme som alltid finns tillgänglig under produktion och som annars inte används. För båda systemlösningarna är den årliga besparingen stor i relation till att byggnaden idag enbart värms av el.

Ett värmeåtervinningssystem där värme från lageroljor och stator nyttjas kan vara aktuellt i samband med att kylsystemet måste förnyas. De lösningar som gjorts i Sädva och Grytfors installerades i samband med just renovering av kylsystem respektive större upprustning av maskiner. Personal på Skellefteå Kraft ansåg att systemen var lönsamma i de fallen. Systemen i Hissmofors installerades i samband med att kraftstationerna byggdes. Att det finns befintliga system av denna typ tyder på att en dylik installation är möjlig.

På grund av osäkerheterna kring underhållsbehovet för de olika systemlösningarna antogs de ha samma underhållskostnad. Värmedistributionssystemen inomhus antogs även vara samma för de båda systemen. En jämförelse av systemen påverkas alltså inte av dessa parametrar varför LCC-analysen avgränsades vid själva värmegenereringen.

Kalkylprogrammet som IVT använde gav ett något lägre energibehov än det beräknade, ca 30 MWh mindre. Det kan bero på att de räknar med schablonvärden och troligtvis färre gradtimmar. Programmet tar i viss mån hänsyn till vilken typ av byggnad det är men utan en helhetsanalys går vissa viktiga parametrar förlorade såsom att byggnadens olika sektioner håller olika temperatur och att viss del av byggnaden ligger under mark.

Ur ett miljöperspektiv är både värmeåtervinning från generator och bergvärme positiva jämfört med att värma byggnaden med högkvalitativ elenergi. Den el som besparas i samband med bergvärmelösningen hade annars gett 0,71 ton CO₂/år och med värmeåtervinningen 0,81 ton CO₂/år. Motsvarande el från kolkraft ger 121 respektive 152 ton CO₂/år vilket ur ett miljöperspektiv visar på att vattenkraftslösning är bättre för klimatet. Omgivande miljö påverkas i viss mån av ett bergvärmesystem i och med borrhölet. Den köldbärare som används i borrhålet innehåller frysskyddsvätska vilket idag vanligtvis består av komponenter som inte orsakar allvarlig miljöskada vid eventuellt läckage.

16 Slutsatser

Den södra stationsbyggnaden i Hammarforsen beräknades ha ett dimensionerande uppvärmningsbehov på ca 117 kW och ett energibehov på 328 MWh.

De analyserade energieffektiviseringsåtgärderna reducerar energibehovet enligt följande:

- Sänkt temperaturen i maskinhall 33 MWh
- Isolera maskinhall mot transformatorbyggnad 11 MWh
- Kombination av ovanstående åtgärder 46 MWh

Ekonomiskt görs en besparing på ca 14 500 kr/år med den kombinerade åtgärden. Att sänka temperaturen motiveras av att det är en mycket enkel åtgärd som märkbart minskar energibehovet.

De systemlösningar som studerats är värmeåtervinning från generator och bergvärmepumpar. Att installera bergvärme beräknades vara ca 23 000 kr billigare än värmeåtervinningssystemet, sett över deras totala livslängd. Återbetalningstiden är 24 år för båda systemlösningarna. Den årliga besparingen är ca 50 000 kr för bergvärmelösningen och ca 62 500 kr för värmeåtervinningen. Respektive systemalternativ reducerar energibehovet enligt följande:

- Bergvärme 158 MWh
- Värmeåtervinning från generator 197 MWh

Det är troligt att värmeåtervinning från generatören är lönsamt i samband med en renovering där kylsystemet måste bytas ut. Den tekniska potentialen är god vad gäller båda systemen. Befintliga värmeåtervinningsanläggningar finns i andra stationer, vilka anses lönsamma. Detta, tillsammans med att det finns mycket värme att tillgå motiverar alternativet med värmeåtervinning från generatören. Generellt ger en effektivare vattenkraftsproduktion att mer el från förnybara källor kan nyttjas vilket är positivt ur ett klimatperspektiv.

16.1 Förslag till fortsatt arbete

För att erhålla en mer korrekt analys av byggnadens transmissionsförluster kan en numerisk simulering göras i exempelvis IDA ICE. Modellen kan byggas genom att först termografera byggnaden, på så sätt kan faktiska temperaturer och köldbryggor bestämmas.

För att säkerställa god luftkvalitet krävs att ventilationssystemet ses över och förnyas. Systemet är gammalt och har förlorat sin funktion i och med att transformatorn är borttagen. Luftomsättningen bör studeras närmre genom mätningar av flöden. Vid en installation av värmedistributionssystem försvinner nyttan om den varma luften inte fördelas på ett säkert och bra sätt.

Värmeåtervinning från generatoren är definitivt ett intressant område. För att undersöka alternativet mer djupgående krävs att generatorns värmeförluster studeras vidare. Mätning av vatten-, luft-, och oljeflöden samt kylvattnets utloppstemperatur kan vara en bra utgångspunkt. En djupare studie av befintliga återvinningssystem bör även göras där den tekniska strukturen och ekonomin analyseras. Möjligheten med en ackumulatortank bör också studeras då det finns en stor mängd energi som inte kan nyttjas momentant. En kombination av värmepumpar och värmeåtervinning kan också vara ett intressant alternativ där värmen i kylvattnet från generatoren upparbetas med hjälp av värmepumpar.

17 Litteraturförteckning

- [1] Energimyndigheten, "Energiläget 2013," Energimyndigheten, 2013.
- [2] Svensk Energi, "Elåret," 04 2013. [Online]. Available: http://www.svenskenergi.se/Global/Statistik/El%c3%a5ret/Sv%20Energi_el%c3%a5ret2012_web.pdf. [Använd 09 05 2014].
- [3] Statkraft, "Vattenkraft," Statkraft, [Online]. Available: <http://www.statkraft.se/energikallor/vattenkraft/>. [Använd 24 01 2014].
- [4] Statkraft, "Statkraft i Sverige," Statkraft, [Online]. Available: <http://www.statkraft.se/om-statkraft/statkraft-i-sverige/>. [Använd 24 01 2014].
- [5] Statkraft, "Fakta om Statkraft," Statkraft, [Online]. Available: <http://www.statkraft.se/om-statkraft/fakta-om-statkraft/>. [Använd 09 05 2014].
- [6] Statkraft, "Annual Report 2012," Statkraft, 2013. [Online]. Available: <http://annualreport2012.statkraft.com/>. [Använd 09 05 2014].
- [7] Ekonomifakta, "Elproduktion - internationellt," Ekonomifakta, 14 10 2013. [Online]. Available: <http://www.ekonomifakta.se/sv/Fakta/Energi/Energibalans-internationellt/Elproduktion/>. [Använd 09 05 2014].
- [8] L. Andersson, R. Blondell, H. Hermansson, K. A. Jacobsson, S. Lidström, L. Lundén, E. Uddman och C. Öhlén, *Elkraftsystem 1*, Stockholm: Liber AB, 1997.
- [9] Å. Almgren, L. Goldring, L. Starby och P. Skymne, *Elkraftteknisk handbok 3*, Falköping: Esselte Studium AB, 1984.
- [10] ESHA, "Små vattnekraftverk - En handbok," ESHA, 2004.
- [11] A. V. Giffen, "The occurrence and prevention of frazil ice blockage at water supply intakes," Ministry of the Environment, Toronto, 1973.
- [12] L. Jonsson, Interviewee, *Drift och underhållschef*. [Intervju]. 14 05 2014.
- [13] A. Alfredsson, K.-A. Jacobsson, A. Rejminger och B. Sinner, *Elkraftteknisk handbok 2*, Uppsala: Esselte Herzogs, 1986.
- [14] D. Karlsson, "Utvärdering av fjädrande statorfötter," Uppsala universitet, Uppsala, 2010.
- [15] Å. Almgren, P. Axelberg, R. Blondell, T. Cegrell, J. Hagelberg, K. A. Jacobsson, C. Lindgren, T. Lundgren, M. Lundmark, P. Norberg, L. Wallin, R. Westöö, L. Wikman, L. Winell, B. Åkerberg och C. Öhlén, *Elkraftsystem 2*, Stockholm: Liber AB, 1997.
- [16] E. ON, "Så här funkar elnätet," E. ON, 13 02 2012. [Online]. Available: <http://www.eon.se/privatkund/Produkter-och-priser/Elnat/Sa-har-funkar-elnetet/>. [Använd

- 04 03 2014].
- [17] Svensk energi, "Elnätet," Svensk energi, 2012. [Online]. Available: <http://www.svenskenergi.se/Elfakta/Elnatet/>. [Använd 04 03 2014].
 - [18] "Vattenkraftens historia," e-on, 13 02 2012. [Online]. Available: <https://www.eon.se/om-eon/Om-energi/Energikallor/Historia/Vattenkraftens-historia/>. [Använd 25 02 2014].
 - [19] "Vattenkraft," Svensk energi, 2012. [Online]. Available: <http://www.svenskenergi.se/Elfakta/Elproduktion/Vattenkraft1/>. [Använd 25 02 2014].
 - [20] S. Sandberg, "Vattenkraft - miljöeffekter, åtgärder och kostnader i nu reglerade vatten," Elforsk AB, Stockholm, 2010.
 - [21] J. Gode, F. Martinsson, L. Hagberg, A. Öman, J. Höglund och D. Palm, "Miljöfaktaboken 2011," Värmeforsk Sverige AB, Stockholm, 2011.
 - [22] "Klimatpåverkan och växthusgaser," Svensk energi, 2012. [Online]. Available: <http://www.svenskenergi.se/Elfakta/Miljo-och-klimat/Klimatpaverkan/>. [Använd 07 05 2014].
 - [23] C. Bartusch, "Boosting behavioral change in residential electricity consumption," Mälardalen University, Västerås, 2011.
 - [24] Y. A. Cengel och M. A. Boles, Thermodynamics, New York: McGraw-Hill, 2011.
 - [25] Y. A. Cengel och A. J. Ghajar, Heat and Mass Transfer, New York: McGraw-Hill, 2011.
 - [26] C. Warfvinge och M. Dahlblom, Projektering av VVS-installationer, Lund: Studentlitteratur AB, 2010.
 - [27] B.-Å. Petersson, Tillämpad byggnadsfysik, Lund: Studentlitteratur AB, 2013.
 - [28] M. Soleimani-Mohseni, L. Bäckström och R. Eklund, EnBe - Energiberäkningar, Lund: Studentlitteratur AB, 2014.
 - [29] G. Anderlind och C.-G. Stadler, "Isolerguiden Bygg 06," Swedisol, 2006.
 - [30] SMHI, "Graddagar, Energi-Index och Kyl-Index - utökad information," 15 09 2011. [Online]. Available: <http://www.smhi.se/Professionella-tjanster/Professionella-tjanster/Fastighet/graddagar-energi-index-och-kyl-index-utokad-information-1.13663>. [Använd 19 02 2014].
 - [31] S. Frederiksen och S. Werner, Fjärrvärme, Lund: Studentlitteratur AB, 1993.
 - [32] OmBoende, "Fuktteori," OmBoende, 02 05 2011. [Online]. Available: <http://www.omboende.se/sv/Aga1/Inomhusmiljo/Fuktteori/>. [Använd 09 05 2014].
 - [33] M. Soleimani-Mohseni, "Miljösamverkan västerbotten," 03 12 2013. [Online]. Available: http://www.miljosamverkanvasterbotten.se/wp-content/uploads/2013/12/Presentation_Mohsen_131203.pdf. [Använd 08 04 2014].

- [34] M. Hagelberg, "Energieffektivisering vid Stornorrfor's vattenkraftstation med fokus på värmeåtervinning," Umeå universitet, Umeå, 2010.
- [35] G. Sarosi och G. Aalvik, Interviewees, *Samtal med generatorkunnig personal*. [Intervju]. 02 2014.
- [36] Energimyndigheten, "Energikoll i små och medelstora företag," Statens energimyndighet, 2010.
- [37] Belok, "Belok LCC," 2014. [Online]. Available: <http://belok.se/verktyg-hjalp/lcc/lcc-kalkylator/>. [Använd 09 05 2014].
- [38] Svenska värmepumpföreningen, "Värmepump berg," Svenska värmepumpföreningen, [Online]. Available: <http://www.svepinfo.se/varmepumpar/berg/>. [Använd 09 04 2014].
- [39] Jamtli, "Historien om döda fallet," Internetmedia Kommunikationsbyrå AB, [Online]. Available: http://www.jamtli.com/dodafallet/8949.historien_om_doda_fallet.html. [Använd 25 04 2014].
- [40] Statkraft Sverige AB, "Våra vattenkraftverk i Sverige," [Online]. Available: http://www.statkraft.se/Statkraft/Documents/se/Vattenkraftverk/Statkraft_Indals_111005_orig_tcm11-17988.pdf. [Använd 2014].
- [41] "Dataserier med normalvärden för perioden 1961-1990," Smhi, [Online]. Available: <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/temperatur/dataserier-med-normalv%C3%A4rden-1.7354>. [Använd 2014].
- [42] C. Landin, "Blanketter," Ragunda kommun, 06 05 2014. [Online]. Available: <http://www.ragunda.se/system/ovrigt/blanketter.html>. [Använd 06 05 2014].
- [43] BYGGmax, "Mineralull," BYGGmax AB, 2011. [Online]. Available: <http://www.byggmax.se/isolering/mineralull>. [Använd 09 05 2014].
- [44] timpris.se, "Timpris snickare," timpris.se, [Online]. Available: <http://timpris.se/hantverkare/snickare/>. [Använd 06 05 2014].

Bilaga 1 - Tabellerade värden

Tabell 16 visar värmekonduktiviteten för olika material.

Tabell 16 Värmekonduktivitet för olika material [29].

Material vägg	Värmekonduktivitet [W/mK]
Trä	0,14
Betong	1,7
Lättbetong	0,12
Puts	1,0
Mineralull	0,037
Siporexisolering	0,12
Material mark	
Lera, slit, dränerad sand och grus	1,5
Moran, icke dränerad sand och grus	2,0
Berg	3,5

Siporex är en typ av autoklaverad lättbetong varför dess värmekonduktivitet antas vara samma som för lättbetong.

I Tabell 17 finns de värmeövergångsmotstånd som användes vid beräkningar av U-värden.

Tabell 17 Generella värden på värmeövergångsmotstånd enligt svensk standard [29].

Byggnadsdel	Värmeövergångsmotstånd insida	Värmeövergångsmotstånd utsida
	R_i [m^2K/W]	R_u [m^2K/W]
Väggar	0,13	0,04
Tak	0,1	0,04
Golv	0,17	0,04

Tabell 18 och Tabell 19 visar isoleringsförmåga för olika klädsel respektive värmelastring vid olika aktiviteter vilket användes vid analys av sänkt inomhustemperatur.

Tabell 18 Isoleringsförmåga för olika typer av klädsel [26].

Klädsel	Isoleringsförmåga [clo]
Naken	0
Tropikkädsel	0,3
Lätt sommarklädsel	0,5
Tunn arbetsklädsel	0,7
Normal inomhusklädsel	1,0
Kraftig inomhusklädsel	1,5
Polarklädsel	4,0

Tabell 19 Värmealstring vid olika aktivitetsgrad [26]

Aktivitet	Värmealstring [<i>W</i>]	Värmealstring [<i>met</i>]
Sömn	85	0,8
Vila, sittande	105	1,0
Skrivbordsarbete	125	1,2
På- och avklädning	160	1,6
Bilkörning, hushållsarbete	180	1,8
Sopa golvet	200	2,0
Promenera i 5 km/h	320	3,2
Dansa vals	360	3,6
Gång nedför trappa	470	4,7
Löpning (8,5 km/h)	740	7,4

Bilaga 2 - Dimensioner och beräkningar gällande stationsbyggnaden

Tabell 20 visar beräkningar av U-värden för de olika byggnadssektionerna.

Tabell 20 Beräkning av U-värden för olika byggnadssegment.

Sektion	Tjocklek [m]	R [$m^2 K/W$]	U-värde [$W/m^2 K$]
Transformatorbyggnad ovan jord			
Betong (lättbetong)	0,25	0,15	0,93
Siporex (lättbetong)	0,09	0,75	
Puts	0,01	0,01	
Transformatorbyggnad under jord			
Betong	0,25	0,15	0,64
Maskinhall ovan jord			
Betong (lättbetong)	0,25	0,15	0,75
Siporex (lättbetong)	0,12	1	
Puts	0,01	0,01	
Maskinhall under jord			
Betong	0,25	0,15	0,64
Intagsbyggnad ovan jord			
Betong (lättbetong)	0,25	0,15	0,37
Siporex (lättbetong)	0,12	1	
Mineralull	0,05	1,35	
Puts	0,01	0,01	
Intagsbyggnad under jord			
Betong	0,25	0,15	0,64

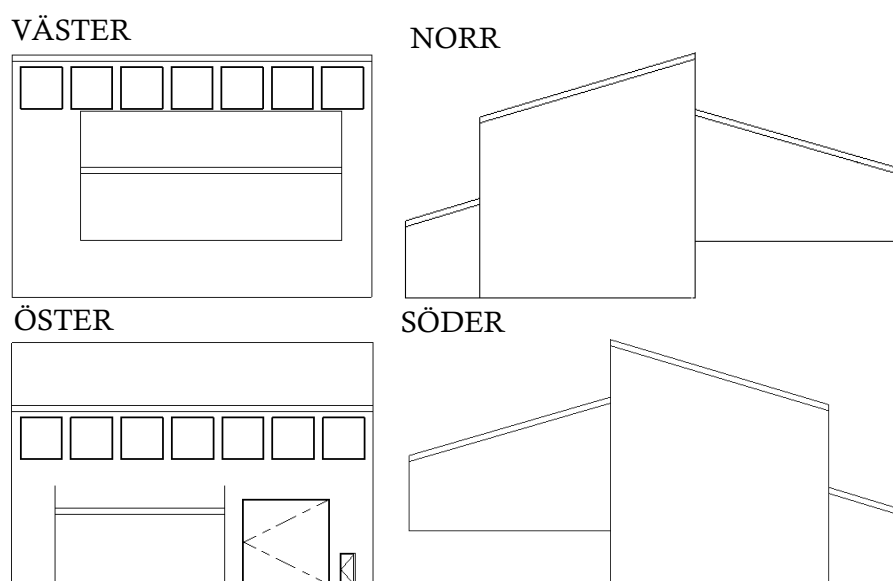
Areor av de olika sektionerna presenteras i Tabell 21.

Tabell 21 Byggnadssektionernas fasad-, fönster-, dörr- och portareor.

Sektion	Fasadarea [m^2]	Fönsterarea [m^2]	Dörrarea [m^2]	Portarea [m^2]
Ovan mark				
Intagshus	152,057	23,588	6,177	
Maskinhall	624,140	142,724	2,781	46,191
Transformatorbyggnad	101,250			
Under mark				
Intagshus	0,000			
Maskinhall	682,546			
Transformatorbyggnad	71,500			
Tak				

Intagshus	272,759
Maskinhall	379,388
Transformatorbyggnad	54,200
Golv	
Intagshus	269,231
Maskinhall	374,225
Transformatorbyggnad	53,434

Figur 15 visar en skiss över fasaden på den södra stationen i Hammarforsen.



Figur 15 Skiss över södra stationen i Hammarforsen (Figur: Amanda Åström).

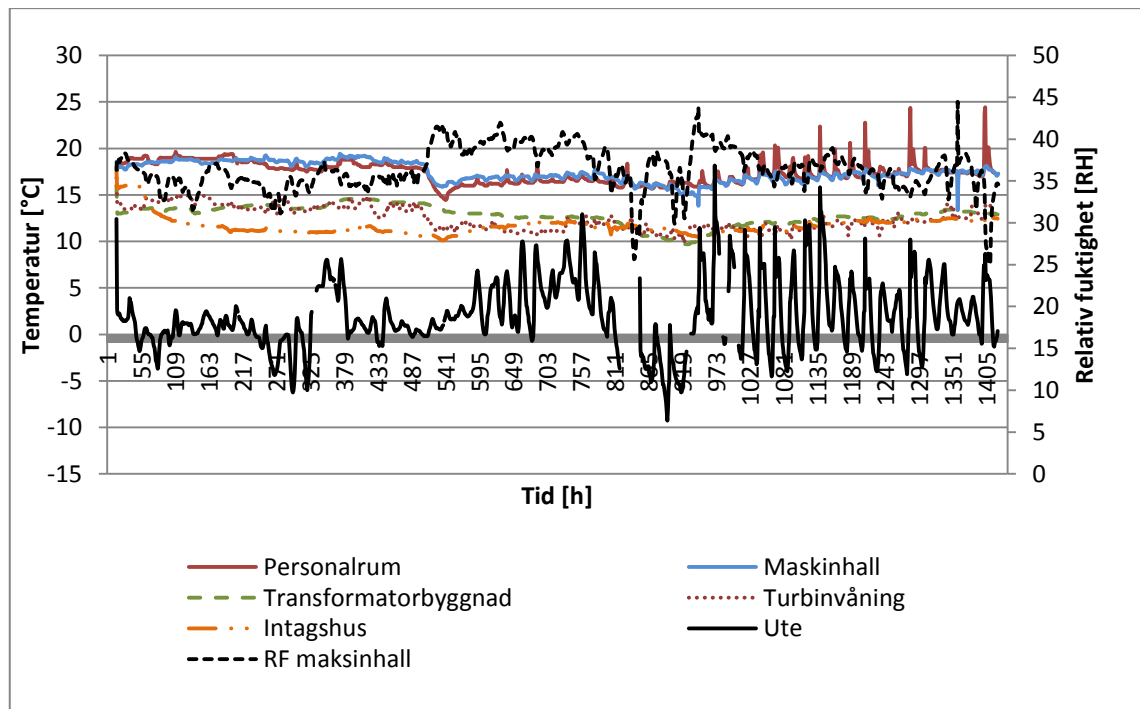
Dimensionerna av de luftintag som finns i ventilationsschaktet i transformatorbyggnaden visas i Tabell 22 tillsammans med data över luftens egenskaper. Värdena användes vid beräkning av luftflödet och luftomsättningens värmeförluster.

Tabell 22 Luftintagens dimensioner och luftdata.

Antal spjäll	Bredd [m]	Längd [m]	Antal intag
40	1,2	0,01	3
80	1,2	0,01	1
20	1,2	0,01	1
Luftdata			
Densitet [kg/m^3]	1,2		
Specifik värmekapacitet [kJ/kgK]	1		

Bilaga 3 - Data från mätningar

Byggnadens temperaturer och relativ fuktighet under mätperioden (140210 – 140410) presenteras i Figur 16.



Figur 16 Data över temperaturer och relativ fuktighet från mätningar.

Bilaga 4 - Sammanställning över åtgärdsförslag och systemalternativ

Tabell 23 Åtgärdsförslag

	Temperatursänkning och isolering	Temperatur- sänkning	Isolering	
Värmeenergibehov före	298	298	298	MWh
Värmeenergibehov efter	253	265	287	MWh
Energibesparing	45	33	11	MWh/år
Procentuell sänkning av energibehov	0,15	0,11	0,04	%
Kostnadsbesparing	14471	10583	3541	SEK/år
Investeringskostnad	23803		23803	kr
Payoff-tid	1,6	0	6,7	år
Kalkylränta	0,07	0,07	0,07	
Kalkylperiod	10,00	10,00	10,00	år
Minskat CO2 utsläpp	0,21	0,15	0,05	Ton/år
Nusummefaktor	7,02	7,02	7,02	
NUV kostnadsbesparing el	101641	74332	24870	SEK
LCC	77839	74332	1067	SEK

Tabell 24 Systemalternativ

	Bergvärmepump	Värmeåtervinning generator	
Värmeenergibehov före	223	223	MWh
Värmeenergibehov efter	65	26	MWh
Energibesparing	158	197	MWh/år
Procentuell sänkning av energibehov	0,71	0,89	%
Kostnadsbesparing	50017	62525	SEK/år
Investeringskostnad	1204000	1500000	kr
Payoff-tid	24	24	år
Kalkylränta	0,07	0,07	
Kalkylperiod	18	30	år
Minskat CO2 utsläpp	0,71	0,89	Ton/år
Nusummefaktor	10,06	12,41	
NUV kostnadsbesparing el	503130	775875	SEK
LCC	-700870	-724125	SEK