

Rakennusten lämpöteknisen suunnittelun ja ylläpidon simulointityökalun kehityisperusteet

Sami Karjalainen, Satu Kärki, Tim Salsbury, Reima Tuhkanen

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5421-3 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5422-1 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, hus- och brandteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology,
Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Toimitus Kerttu Tirronen

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Karjalainen, Sami, Kärki, Satu, Salisbury, Tim & Tuhkanen, Reima. Rakennusten lämpötekni-
suunnittelun ja ylläpidon simulointityökalun kehityspäätökset. Espoo 1999, Valtion teknillinen
tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1943. 90 s.

Avainsanat simulation, default value library, life cycle, buildings, thermal behavior, validation,
computer systems programs

Tiivistelmä

Hankkeen pitkän aikavälin tavoitteena on helppokäyttöinen, tehokas ja luotettava käy-
tännön simulointityökalu, jota voidaan hyödyntää rakennuksen elinkaaren eri vaiheiden
keskeisissä päätöstilanteissa. Päämäärän saavuttaminen edellyttää sekä tietyn perustek-
nologian kehittämistä, mistä tässä hankkeessa on kysymys, että yritysten tuotekehitystä
lopputuotteiden kehittämiseksi.

Projektissa luotiin ensin katsaus rakennuksen lämpötekniistä käyttäytymistä kuvaavien
mallien laskentamenetelmiin ja niitä käyttäviin simulointiohjelmiin. Seuraavaksi
selvitettiin markkinoilla olevien simulointiohjelmien soveltuvuutta käytettäväksi
rakennuksen koko elinkaaren aikana tarkastelemalla niiden ominaisuuksia ja
käytettävyyttä.

Simulointityökalun luotettavuus koostuu useista eri tekijöistä, mutta tärkeimpänä
voidaan pitää itse simulointiohjelman laskennan luotettavuutta, mikä luo pohjan koko
simulointityökalun luotettavuudelle. Projektissa tarkasteltiin simulointiohjelman vali-
dointia ja testausta.

Projektissa perehdyttiin myös neutraalimuotoiseen prosessimallien formaaliin
kuvauskieleen, joka mahdollistaa useiden eri simulointiohjelmien käytettävissä olevat
simulointimallit ja NMF:n (Neutral Model Format) nykyiseen tilanteeseen.

Projektissa määriteltiin rakennusten suunnittelun ja ylläpidon tietojärjestelmiin
liitettävien simulointityökalujen toteutusmalli. Työssä toteutettiin myös malliin kuuluva
oletusarvotietokanta Internet-pohjaisine käyttöliittymineen. Oletusarvotietokannassa
ylläpidetään tietoa tiloista, sisäisistä kuormista, rakenteista, materiaaleista, ikkunoista
yms. simuloinnissa tarvittavaa tietoa.

Suunnittelun ja ylläpidon yksinkertaisen simulointimallin kehittämiseen liittyen
kokeiltiin erästä valmiina olevaa vaihtoehtoa, TRNSYS-pohjaista TRNSED-simu-
laattoria. Työssä tehtiin simulointimalli yksinkertaiselle rakennukselle, joka koostuu
neljästä seinästä, katosta, lattiasta ja ikkunoista. Samalla pystyttiin kokeilemaan
oletusarvotietokantaa käytännössä.

Alkusanat

Työnimeltään *Rakennusten suunnittelun ja ylläpidon simulointityökalu* -tutkimusprojekti kuului osana Teknologian kehittämiskeskuksen (TEKES) rahoittamaan Rakennusten energiankäytöntutkimusohjelmaan (RAKET). Toisena rahoittajana oli VTT Rakennustekniikka.

Hankkeen pitkän aikavälin tavoitteena on helppokäyttöinen, tehokas ja luotettava käytännön simulointityökalu rakennuksen elinkaaren eri vaiheisiin. Tämä edellyttää sekä tietyn perusteknologian kehittämistä, mistä tässä hankkeessa on kysymys, että yritysten tuotekehitystä lopputuotteiden kehittämiseksi. Tässä projektissa on kehitetty malli koko rakennuksen elinkaaren kattavalle lämpötekniselle simulointityökalulle ja sen vaatimuksille sekä demonstroitu simulointityökalun käyttämää oletusarvo-tietokantaa ja helppokäyttöistä tehtäväpohjaista simulaattoria.

Tutkimustyöstä vastasivat tutkijat Satu Kärki, Sami Karjalainen ja Reima Tuhkanen sekä vieraileva tutkija Tim Salisbury. Teollisuuden näkökulman oletusarvotietokantaan antoivat Markku Jokela, Kenneth Lassila ja Antti Keinänen Insinööritoimisto Olof Granlund Oy:stä.

Kiitämme kaikkia tutkimukseen osallistuneita heidän työpanoksestaan ja antamistaan hyvistä neuvoista.

Espoossa 1998

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Alkusanat	4
1. Johdanto	7
2. Simulointiohjelmistotarkastelut	11
2.1 Laskentamenetelmät	11
2.1.1 Yksinkertaistetut menetelmät	11
2.1.2 Dynaamiset simulointimallit	11
2.2 Markkinoilla olevat lämpötekniset simulointiohjelmat	13
2.2.1 BLAST	13
2.2.2 BUS++	15
2.2.3 DOE-2	16
2.2.4 ESP-r	19
2.2.5 HVACSIM+	20
2.2.6 IDA	21
2.2.7 TRNSYS	21
2.2.8 TRNSYS 14.2 with PRESIM	21
2.2.9 TRNSYS 14.2 with IISIBat	22
2.2.10 tsbi3	23
2.3 Neutraalimuotoiset simulointimallit	25
2.3.1 NMF-mallinnuskieli	25
2.3.2 NMF Translator ja IDA	27
2.3.3 NMF-mallikirjastot	27
2.4 Simulointityökalulle asetettavia vaatimuksia	30
3. Ohjelmistojen validointi ja testaus	34
3.1 Johdanto	34
3.1.1 Olemassa olevia validointimenetelmiä	35
3.1.2 Rakennussimulointiohjelman empiirinen validointi	35
3.1.2.1 Datasetsien valinta	36
3.1.2.2 Empiirinen validointimetodiikka	37
3.1.2.3 Empiirinen validointimenettely	38
3.1.3 BESTEST	39
3.1.4 Simulointiohjelmien validointeja	40
3.1.4.1 BESTEST-validointi	40
3.1.4.2 IEA Annex 21 -validointi	42
3.1.4.3 METOP-tapaus	42
3.1.5 NMF-mallien käyttö TRNSYS:ssä	43

4. Simulointityökalun perusteiden määrittely	45
4.1 Laskentaohjelmaympäristön määrittely.....	46
4.2 Työkalun tulosteiden määrittely	47
4.2.1 Visualisointitekniikat	47
4.2.2 Mahdolliset tulosteet	48
4.2.3 Suunnittelun alkuvaiheen simulointityökalun tulosteet	48
4.2.4 Luonnossuunnittelun simulointityökalun tulosteet	49
4.2.5 Toteutus suunnittelun simulointityökalun tulosteet	49
4.2.6 Ylläpidon simulointityökalun tulosteet	50
4.2.7 Yhteenveto simulointityökalun tulosteista.....	50
4.3 Oletusarvotietokannan määrittely.....	50
4.4 Simulointitietokannan määrittely.....	55
5. Oletusarvotietokannan toteutus	56
5.1 Yleistä.....	56
5.2 Oletusarvotietokannan pääosat	57
5.2.1 Materiaalien oletusarvot.....	57
5.2.2 Ikkunat.....	59
5.2.2.1 Ikkunoiden tunnukset.....	59
5.2.2.2 Ikkunoiden lämmönläpäisykertoimet.....	59
5.2.3 Karmirakenteet	61
5.2.4 Rakennetyypit.....	62
5.2.5 Rakennus	63
5.2.6 Huoneet	65
5.2.7 Kuormat.....	66
5.2.8 Internet-käyttöliittymä.....	67
5.3 IFC-yhteensopivuus.....	71
5.4 Päätelmiä	75
6. Helppokäyttöinen tehtäväpohjainen simulaattori.....	77
6.1 Simulointiohjelmistojen käytettävyys	77
6.2 TRNSED-apuohjelma.....	77
6.3 Rakennussimulointidemo	78
6.4 Arvio TRNSED:n käytettävyydestä	84
7. Yhteenveto	86
Lähdeluettelo.....	88

1. Johdanto

Rakennuksen lämpötekniistä simulointia voidaan hyödyntää rakennuksen koko elinkaaren aikana. Suunnittelun alkuvaiheessa tehdään merkittävimmät energiankulutukseen ja investointikustannuksiin vaikuttavat ratkaisut. Luonnos- ja toteutussuunnittelussa simulointiohjelmiä voidaan käyttää yksittäisen huoneen jäähdytystarpeen ja koko rakennuksen lämmitysenergian tavoitekulutuksen laskentaan. Lisäksi näissä vaiheissa voidaan tarkistaa rakennuksen eri järjestelmien mitoitus ja laitevalinnat sekä etsiä kokonaisuuden toimivuuden kannalta parhaat säätöparametrit ja tarkastella kokonaisuuden energianhallintaa.

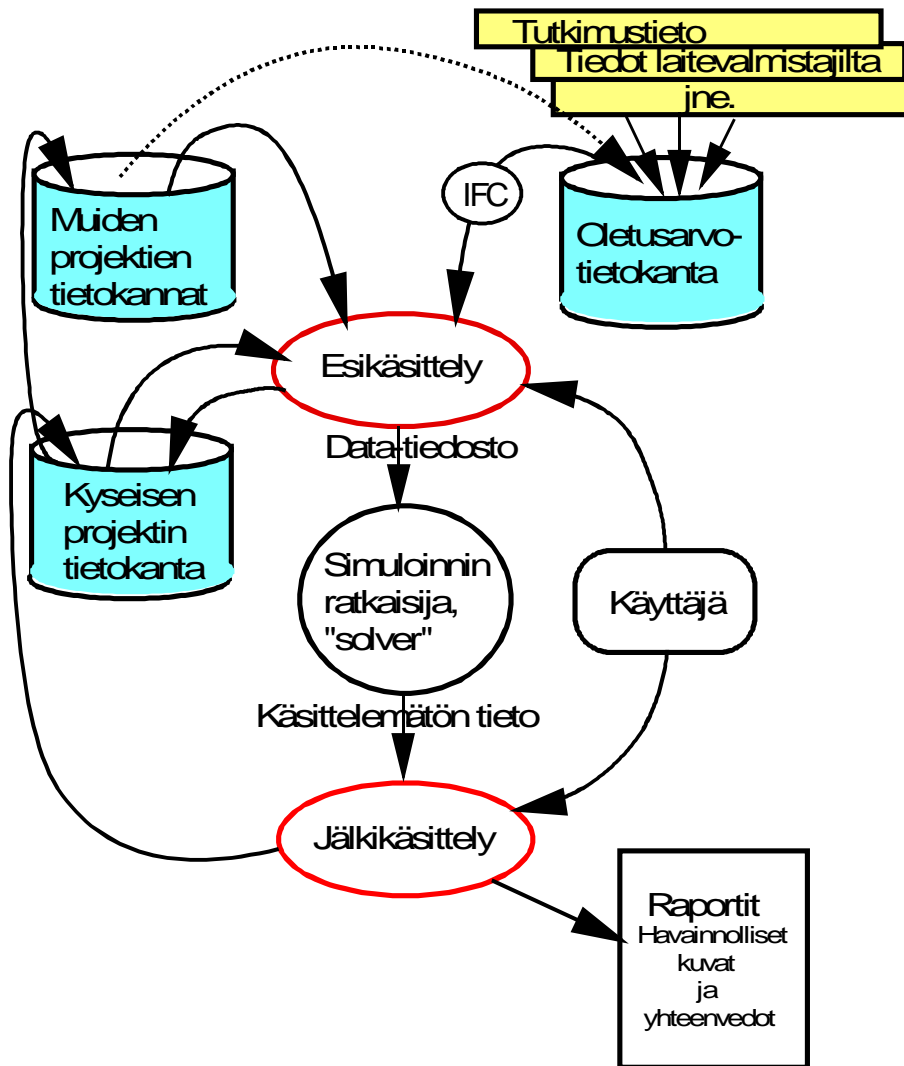
Rakennuksen käytön ja ylläpidon aikana rakennuksen käyttäjä voi simuloimalla vertailla erilaisia käyttöstrategioita (ilmastointikoneiden käyntiajat, sisäänpuhalluslämpötilat ym.) keskenään ja arvioida erilaisten saneeraustoimien vaikutuksia. Tällöin työkalun avulla voidaan arvioida eri energiamuotojen tavoitekulutukset.

Rakennuksen simulointiin soveltuvia pitkälle kehitettyjä simulointiohjelmistoja on olemassa useita. Kuitenkin vain erittäin harvat ohjelmistot ovat riittävän yksinkertaisia ja havainnollisia soveltuakseen sellaisenaan sekä suunnittelun alkuvaiheessa että rakennuksen koko elinkaaren aikana käytettäväksi. Siten ohjelmistoihin tulisi kehittää tarkoituksenmukaisia käyttöliittymiä ja tiedonsiirtoa suunnitteluprosessista ohjelmistoon.

Eurooppalaisessa yhteistyössä on tullut ilmi, että koko rakennuksen elinkaaren kattavalle simulointityökalulle on olemassa selkeä tarve myös kansainvälisellä tasolla. Monissa maissa suunnittelijat ovat vakiintuneet käyttämään tiettyjä simulointiohjelmiä (esimerkiksi ROM: BLAST; Ove Arup: DOE), joiden teoria on havaittu hyväksi ja joiden käytöstä on kertynyt pitkäaikaisia kokemuksia.

Raket-projektin T612 ensimmäisenä vuonna (1996) selvitettiin markkinoilla olevien simulointiohjelmien soveltuvuutta käytettäväksi rakennuksen koko elinkaaren aikana tarkastelemalla niiden ominaisuuksia ja käytettävyyttä.

Tavoitteena oli määritellä rakennusten suunnittelun ja ylläpidon tietojärjestelmiin liitettävien simulointityökalujen toteutusmalli. Simulointityökalulla tuettavia elinkaaren vaiheita ovat: suunnittelun alkuvaihe, luonnos- ja toteutussuunnittelu sekä rakennuksen käyttö. Toisena tavoitteena oli toteuttaa simulointityökalun käyttämän oletusarvotietokannan käyttöliittymä, jolla hallitaan ja ylläpidetään oletusarvotietokannan tietoja. Tehtävään kuuluu myös tietoverkkopohjaisen luotettavan päivitysmahdollisuuden selvittäminen siten, että päivitys saadaan mahdollisimman automaattiselle tasolle.



Kuva 1. Simulointityökalun tietovirrat.

Yhtenä suurena ongelmana on ollut simuloinnissa tarvittavien tietojen kokoaminen ja hallinta. Tiedon siirron ja hallinnan ongelmiin on herännyt myös alan teollisuus, ja vuoden 1995 loppupuolella IAI yhteistyökumppaneineen ryhtyi luomaan omaa IFC-standardiaan (IFC - International Foundation Classes), jossa määritellään rakennuksen tietojenhallinta siten, että eri osapuolet voivat käyttää yhteisiä tietoja. Myös ISO/STEP-standardin puitteissa tehdään jatkuvasti työtä rakennuslalle soveltuvien tiedonhallintamallien kehittämiseksi.

Projektissa määriteltiin ja toteutettiin varsinkin suunnittelun alkuvaiheen simulointia helpottava oletusarvotietokanta, joka sisältää tyyppitietoa esimerkiksi tiloista, sisäisistä kuormista, rakenteista, materiaaleista ja ikkunoista. Oletusarvotietokannan Internet-pohjaisella käyttöliittymällä voidaan ylläpitää oletusarvotietokannan tietoja. Lisäksi tavoitteena on jatkokehittää oletusarvotietokantaa lisäämällä siihen tietoja. Oletusarvotietokannan tietojen kokoamisessa hyödynnetään ja demonstroidaan muiden tutkimusprojektien tuloksia sekä luotuja ja luomisvaiheessa olevia standardeja (IFC).

Oletusarvotietokanta soveltuu käytettäväksi rakennuksen kaikkien elinkaarivaiheiden aikaisiin simulointeihin.

Lisäksi tutkittiin erilaisia tiedonjakelutapoja, jotta oletusarvotietokantaa voitaisiin hyödyntää sekä ohjelmallisesti että yleisenä tietolähteenä selailuohjelman avulla. Raket-T612-projektissa osallistuttiin myös IEA Annex 30 -työskentelyyn. Projektissa selvitettiin oletusarvotietokannan liittyminen sitä hyödyntäviin ohjelmiin ICF:n tarjoamilla menetelmillä.

Toisena tavoitteena on tehtäväpohjaisten simulaattorien tutkiminen ja sellaisen toteuttaminen TRNSYS-simulointiohjelmasta valmiiksi käännettyä TRNSED-ohjelmaa käyttäen. Mahdollisia simulaattoreita ovat rakennussimulaattori, huonetilan simulaattori sekä IV-koneen simulaattori. Simulaattori pyritään rakentamaan siten, että se kykenee käyttämään oletusarvotietokantaa hyväkseen.

Projektissa perehdyttiin myös neutraalimuotoisten, useiden simulointiohjelmien käytävissä oleviin, simulointimallien kehitysmahdollisuuksiin ja niiden nykyiseen tilanteeseen. Tässä tarkoitetaan lähinnä ASHRAE:n vakioimaa Neutral Model Format (NMF) -mallinnuskieltä.

Tutkimushanke toimi tukena samanaikaisesti toteutettavalle RAKET-yrityshankkeelle "Rakennusten integroitu simulointijärjestelmä, RIUSKA". Tässä projektissa selvitettiin RIUSKAN ja simulointiohjelmien testausmahdollisuudet yleensä.

Lisäksi projektin tavoitteena on tiedottaa alan teollisuusyrityksiä simulointityökalujen käyttömahdollisuuksista ja saada jatkossa myös teollisuuden edustajat osallistumaan suunnittelu- ja ylläpitotyökalujen kehittämisprojekteihin.

Rakennuksen koko elinkaaren kannalta merkittävimmät energiankulutukseen ja investointikustannuksiin vaikuttavat ratkaisut tehdään yleensä jo suunnitteluprosessin alkuvaiheessa. Päätöksenteon tueksi ei kuitenkaan tällä hetkellä ole olemassa riittävän nopeita ja helppokäyttöisiä simulointityökaluja, joiden avulla erilaisten vaihtoehtoisten suunnitteluratkaisujen kuten rakennuksen muodon, ikkunoiden tyyppin, ilmastointijärjestelmän ym. vaikutusta voitaisiin tarkastella nopeasti ja helposti, ja näin luoda edellytykset kokonaistaloudelliselle päätöksenteolle. Simulointityökalulla tarkoitetaan tässä simulointiohjelman ja sen käyttöympäristön yhdistelmää.

Simulointityökalujen käytön hyödyt eivät rajoitu suunnittelun alkuvaiheeseen, vaan niiden avulla voidaan aikaansaada merkittäviä säästöjä myös muun suunnittelun ja rakennuksen käytön yhteydessä. Nykyisin luonnos- ja toteutussuunnittelun yhteydessä simulointiohjelmiä on käytetty lähinnä yksittäisen huoneen jäähdytystarpeen laskentaan sekä

koko rakennuksen lämmitysenergian tavoitekulutuksen laskentaan, mutta kehittyneen simulointityökalun avulla voitaisiin tarkistaa rakennuksen eri järjestelmien mitoitus ja laitevalinnat, ja etsiä kokonaisuuden toimivuuden kannalta parhaat säätöparametrit ja tarkastella kokonaisuuden energianhallintaa.

Helppokäyttöisen simulointityökalun avulla rakennuksen käyttäjä voisi vertailla erilaisia käyttöstrategioita (ilmastointikoneiden käyntiajat, sisäänpuhalluslämpötilat ym.) keskenään ja arvioida erilaisten saneeraustoimien vaikutuksia. Työkalun avulla voitaisiin lisäksi arvioida eri energiamuotojen tavoitekulutukset.

Rakennuksen simulointiin soveltuvia pitkälle kehitettyjä simulointiohjelmistoja on olemassa useita. Kuitenkin vain erittäin harvat ohjelmistot ovat riittävän yksinkertaisia ja havainnollisia soveltuakseen suunnittelun alkuvaiheessa käytettäväksi. Koko rakennuksen elinkaaren simulointitarpeet kattavaa simulointityökalua ei ole olemassa. Siten itse simulointiohjelmistojen kehittämiseksi ei ole olemassa tarvetta, mutta ohjelmistoihin tulisi kehittää tarkoituksenmukaisia käyttöliittymiä ja tiedonsiirtoa suunnitteluprosessista ohjelmistoon.

Hankkeen pitkän aikavälin tavoitteena on helppokäyttöinen, tehokas ja luotettava käytännön simulointityökalu, joka voidaan hyödyntää rakennuksen elinkaaren eri vaiheiden keskeisissä päätöstilanteissa. Tämän päämäärän saavuttaminen edellyttää sekä tietyn perustechnologian kehittämistä, mistä tässä hankkeessa on kysymys, että yritysten tuotekehitystä lopputuotteiden kehittämiseksi.

2. Simulointiohjelmistotarkastelut

2.1 Laskentamenetelmät

Rakennuksen lämpötekniistä käyttäytymistä kuvaavien mallien laskentamenetelmät voidaan jakaa yksinkertaistettuihin menetelmiin ja dynaamisiin simulointimenetelmiin (Kalliomäki & Kohonen 1989).

2.1.1 Yksinkertaistetut menetelmät

Yksinkertaisin menetelmä arvioida rakennuksen lämmitysenergiankulutusta on astepäivälukuun perustuva menetelmä. Tällöin astepäiväluku lasketaan yleensä sisälämpötilaan +17 °C. Lämmityskausi alkaa, kun ulkoilman vuorokauden keskilämpötila laskee alle +12 °C:een, ja loppuu, kun keskilämpötila nousee yli +10 °C:n. Ilmaisenergioiden oletetaan lämmittävän rakennusta n. +3 °C. Rakennusosan läpi johtuva lämpövirta lasketaan suoraan sisä- ja ulkoilman väliseen lämpötilaeroon perustuen rakennusosan lämmönläpäisykertoimen ja pinta-alan avulla. Menetelmällä ei voida arvioida rakennuksen suuntauksen vaikutusta.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D5 (Ympäristöministeriö 1985a) esittää menetelmän energiantarpeen laskentaan, joka perustuu parannettuun astepäivälukumenetelmään. Menetelmässä lasketaan rakenteiden läpi johtuva energia, ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema energia ja vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia astepäiväluvulla, joka lasketaan suunniteltuun sisälämpötilaan. Edelliseen lisätään maahan johtuva energia ja käyttöveden lämmityksen tarvitsema energia. Saadusta lämmitysenergiantarpeesta vähennetään sisäisistä lämmönlähteistä ja auringon säteilystä hyödynnettävä energia. Menetelmässä käytetään säätietojen referenssivuosia, jotka ovat osan D5 liitteenä. Menetelmällä ei voida arvioida lämmön varastoitumisen vaikutusta energiankulutukseen.

2.1.2 Dynaamiset simulointimallit

Dynaamiset simulointimallit voidaan jakaa lämpötasemenetelmiin ja painokerroinmenetelmiin (Heikkinen et al. 1985). Lämpötasemenetelmässä ratkaistaan samanaikaisesti yhtälöryhmä, joka muodostuu laskettavan tilan pintojen ja sisäilman lämpötaseista. Näin voidaan yhdistää rakennuksen kaikissa kohdissa sisäiset kuormat, auringonsäteily ja ulkolämpötila, jotta saadaan koko rakennuksen lämpötasapaino laskettua. Siis kappaleeseen varastoitunut lämpö on yhtä suuri kuin kappaleen nettolämpövirta lisättynä kappaleeseen.

leessa kehittyneellä lämmöllä. Kolme perustapausta lämpötaseen hallintaan ovat: seinärakenteen sisällä olevan solmupisteen lämpötase (johtuminen, lämmönkehittyminen), seinärakenteen pinnalla olevan solmupisteen lämpötase (johtuminen, konvektio, säteily, lämmönkehittyminen) ja suljetun ilmatilan solmupiste (konvektio, lämmönkehittyminen).

Lämpötasemenetelmiä voidaan luonnehtia myös sen numeerisen menetelmän mukaan, jota käytetään ratkaisemaan lämmön johtuminen kiinteissä seinissä. Lämmönjohtumisen käsittelyyn voidaan käyttää "lumped capacitance"-menetelmää, differenssimenetelmää (finite difference), pulssivastekerroinmenetelmää (response factors), Z-siirtofunktiomenetelmää, Fourierin menetelmää tai Laplace-muunnosmenetelmää.

Yksinkertaisin menetelmä kappaleen lämmönjohtumisen viiveellisyyden huomioon ottamiseksi on "lumped capacitance"-menetelmä, joka on analoginen sähköverkon RC-piirin laskennan kanssa. Menetelmä on käyttökelpoinen, kun kappaleen lämpötilajakamalla paikan suhteen ei ole merkitystä. Menetelmää voidaan soveltaa kohtuullisella tarkkuudella olosuhteissa, joissa Biotin luku on pienempi kuin 0,1. Tällöin rakennuksen lämpötase voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata yhden aikavakion mallilla, jossa rakennuksen lämpökapasiteetti muodostuu vaipan eristyksen sisäpuolisten rakenteiden ja kalusteiden lämpökapasiteeteista sekä rakennuksen lämpökonduktanssi vaipan, ilmanvaihdon ja vuotoilmanvaihdon lämpökonduktansseista.

Differenssimenetelmä on tarkin tapa johtumisen käsittelemiseksi. Ongelmana menetelmässä on sen vaatima runsas laskentatyö. Differenssimenetelmää sovellettaessa muutetaan ensin kaikki muuttujat äärellisiksi osiksi eli määritellään pituus $x = j\Delta x$ ja aika $t = n\Delta t$, missä Δx on solmupisteiden väli ja Δt on aika-askel sekä j ja n ovat kokonaislukuja. Differenssiyhtälön ratkaisun kolme yleisintä numeerista menetelmää ovat Eulerin menetelmä eli eksplisiittinen menetelmä, puhtaasti implisiittinen menetelmä ja edellisillä yhtäläisesti painotettu Crank-Nicolsonin menetelmä.

Pulssivastekerroinmenetelmä perustuu siihen, että seinämää voidaan karakterisoida sen perusteella, miten se reagoi lämpötilaherätteeseen. Määrätyn muodon ja koon omaavan yksikköherätteen aiheuttamaa ajallisesti muuttuvaa lämpövirtaa seinämässä kutsutaan seinämän vastekertoimeksi.

Z-siirtofunktiomenetelmä eroaa pulssivastekerroinmenetelmästä siten, että siinä otetaan huomioon pelkkien lämpötilojen lisäksi myös edellisen hetken lämpövirta rakenteiden läpi.

Painokerroinmenetelmässä jokainen erillinen huoneen lämmitys- ja jäähdytystehontarpeeseen vaikuttava lämpökuormakomponentti otetaan huomioon tälle ominaisten paino-

kertoimien avulla. Rakennuksen lämpötase ratkaistaan painokerroinmenetelmällä seuraavasti:

Lasketaan kaikkia tilan lämpökuormakomponentteja vastaavat painokertoimet vi ja wi sekä ilman lämpötilan painokertoimet pi ja gi tai käytetään valmiiksi laskettuja kertoimia.

Lasketaan kiinteää sisäilman lämpötilaa vastaava tehontarve ajan funktiona laskemalla yhteen eri lämpökuormakomponenttien vaikutukset.

Lasketaan tilan todellinen lämmitys- ja jäähdytysteho sekä sisäilman lämpötilan ajallinen käyttäytyminen ilman lämpötilan painokertoimien sekä lämmitys- tai jäähdytystehon säätötavan perusteella.

Painokerroinmenetelmässä rakennuksen lämpötaseen määrittelevä yhtälöryhmä ratkaistaan täsmällisesti vain painokertoimien luomisen yhteydessä.

2.2 Markkinoilla olevat lämpötekniset simulointiohjelmat

Simulointiohjelmistojen avulla rakennusten lämpö- ja virtausteknistä toimintaa voidaan analysoida rakentamatta kalliita testausympäristöjä (Kärki 1992). Lisäksi voidaan nopeasti vertailla erilaisten järjestelmävaihtoehtojen ja säätöratkaisujen energiataloudellisuutta sekä niiden LVI- ja säätötekniistä vaikutusta rakennuksen toimintaan. Simuloinnin tärkeimpiä hyötyjä kokeelliseen tutkimukseen verrattuna ovat nopeus, muunneltavuus, toistettavuus ja edullisuus. Toisaalta simuloimalla voidaan valita teoreettisesti analysoiduista vaihtoehdoista lupaavimmat toteutettaviksi todellisissa kohteissa.

Rakennusten lämpötekniisiä simulointiohjelmiä on markkinoilla lukuisia, esimerkiksi BLAST, BUS++, CHEETAH, CLIM2000, DOE, ENERGY, ESP, HTB, HVACSIM[†], IDA, PIBNET, SERI-RES, SUNCODE, TASE, TRNSYS ja tsbi3. Seuraavassa on esitelty joitakin näistä.

2.2.1 BLAST

BLAST-järjestelmä (Building Load Analysis and System Thermodynamics) on joukko tietokoneohjelmia rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutuksen ennustamiseen ja energiakustannusten analysointiin (<http://www.bso.uiuc.edu>). Mekaanisten järjestelmien suunnittelua varten tehtävien huippukuormalaskentojen (suunnittelupäivät)

lisäksi BLAST arvioi laitteiden vuosittaisen energiateknisen toiminnan, mikä on tärkeää energiasuunnittelun ja kustannusten määrittelyyn. BLASTia voidaan käyttää vaihtoehtoisten suunnitteluratkaisujen arviointiin, muokkaamiseen ja uudelleen arviointiin vuosittaisen energiankulutuksen ja kustannusten perusteella. Oikeaa laitetyyppiä ja -kokoa sekä laitteiden säätöä voidaan myös määrittellä.

BLAST-ohjelma käyttää yksityiskohtaisia algoritmeja kuormien laskentaan sekä puhallin-, kattila- ja jäähdytysjärjestelmien simulointiin. Ohjelmalla on oma käyttäjäorientoitunut syöttötietokieli ja siihen liittyy kirjasto, joka sisältää kaikki ASHRAE Handbook of Fundamentalsissa listatut materiaalit sekä seinä-, katto- ja lattiaprofiilit. Ohjelman ajoaika on riittävän lyhyt useiden vaihtoehtojen taloudellisiin tarkasteluihin. Ohjelma ei ole suojattu, joten se on avoin käyttäjien tarkasteluille.

BLAST-analysointiohjelma sisältää kolme aliohjelmaa: tilan kuormien arviointiohjelman (Space Load Predicting), ilmanjakelujärjestelmän simulointiohjelman (Air Distribution System Simulation) ja keskuslaitteiden simulointiohjelman (Central Plant Simulation). Tilan kuormien arviointiohjelma laskee tunnitteiset tilojen kuormat rakennuksessa perustuen säätietoihin sekä käyttäjän syöttötietoihin, jotka kuvaavat rakennuksen rakenteet ja käytön. Laskennassa käytetään pulssivastekertoimia. Ilmanjakelujärjestelmän simulointiohjelma käyttää laskettuja tilojen kuormia, säätietoja ja käyttäjän määrittelemän ilmankäsittelyjärjestelmän tietoja rakennuksen ja ilmankäsittelyjärjestelmän lämpimän veden, höyryn, kaasun, jäähdytetyn veden ja sähkötehtarpeen laskentaan. Keskuslaitteiden simulointiohjelma käyttää säätietoja, ilmanjakelujärjestelmän simulointituloksia sekä käyttäjän määrittelemiä keskuslaitteiden tietoja simuloimaan kattiloiden, jäähdytysjärjestelmien, paikalla olevien tehonsyöttöjärjestelmien ja aurinkoenergiajärjestelmien kuukausittaista ja vuosittaista polttoaineen ja sähkön kulutusta.

LCCID (Life Cycle Cost in Design) kehitettiin elinkaarikustannusanalyysiin (LCCA = Life Cycle Cost Analyses). LCCID:n avulla voidaan tehdä mitä-jos-analyyskejä perustuen sellaisiin muuttujiin kuten nykyiset ja tulevat kustannukset ja/tai käyttö- ja korjauskustannukset.

HBLC (Heat Balance Loads Calculator) on BLAST:n graafinen Windows-käyttöliittymä syöttötiedostojen tekemiseen. HBLC:n avulla käyttäjä voi visualisoida rakennusmallia ja muokata aikaisemmin luotuja syöttötiedostoja. HBLC:ssa rakennuksen jokainen kerros esitetään pohjapiirroksena, joka saattaa sisältää useita erillisiä vyöhykkeitä. Lukuisia muita rakennuksen yksityiskohtia voidaan tarkastella ja niitä voidaan muuttaa hiiren avulla.

BLAST-ohjelmaa voidaan käyttää itse asiassa missä tahansa ympäristössä. PC-versio on tarkoitettu erityisesti PC-yhteensopiville tietokoneille eikä sitä varten tarvitse ostaa oh-

ohjelman lähdekoodia tai kääntää ohjelmaa paikan päällä. Siirrettävä versio on tarkoitettu käyttäjille, joilla on yhteys työasemiin tai muihin ei-PC-ympäristöihin. PC-version laitteistovaatimukset ovat seuraavat:

- **386/486/Pentium-yhteensopiva kone, jossa on matematiikkaprosessori**
- **DOS 3.3 tai korkeampi, Windows 3.1 tai korkeampi**
- **8 MB laajennettua RAM:a**
- **30 - 100 MB levytilaa (vaihtelee syöttötiedoston monimutkaisuuden mukaan).**

BLAST:n PC-versio maksaa 950 \$. BLAST:n kehitti USA:n armeijan rakennustekniikan tutkimuslaboratorio (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, USACERL).

Ohjelman toimittaja:

BLAST Support Office
University of Illinois
Department of Mechanical & Industrial Engineering
140 Mechanical Engineering Building, MC-244
1206 W. Green Street
Urbana, IL 61801
USA
Puh. 990-1-217-333 3977
Telekopio 990-1-217-244 6534
Internet: support@blast.bso.uiuc.edu

2.2.2 BUS++

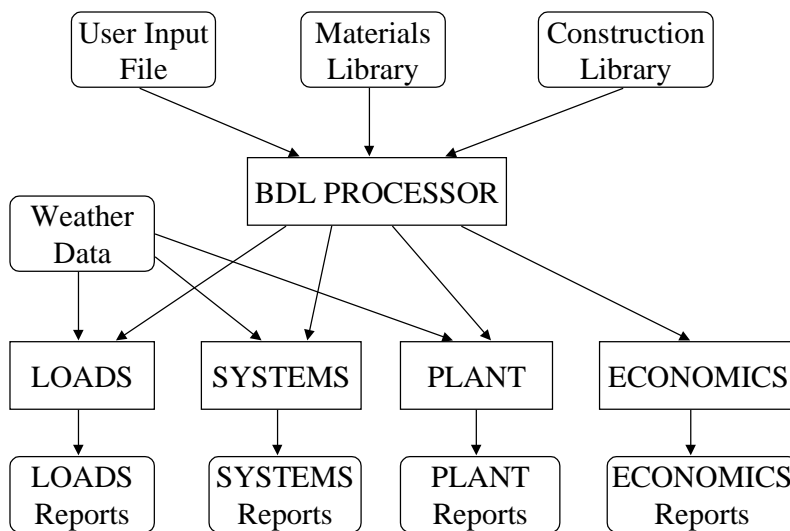
BUS++ on VTT Rakennustekniikassa kehitteillä oleva uuden sukupolven laskentatyökalu, jossa yhdistetään rakennuksen aineen- ja lämmönsiirron sekä sisäilmaston laskenta tulevaisuuden tutkimustarpeet tiedostaen (Tuomaala 1996). Laskentaan valittu algoritmi perustuu massa-, liikemäärä-, energia- sekä epäpuhtaustaseiden tehokkaaseen ratkaisemiseen sekä olioperustaiseen tietotekniseen toteutukseen. Näin eri osaprosessit pääsevät vuorovaikuttamaan toisiinsa ohjelmatasolla ja ohjelman sisäinen tiedonsiirto on nopeaa. Lisäksi projektissa kehitetään olemassa olevien luotettavien laskentatyökalujen välille tiedonsiirtorutiineja rakenteiden aineen- ja lämmönsiirron sekä sisäilmaston laadun välisen kytkennän ottamiseksi mukaan simulointiin. Jatkoprojektien painopistealueina ovat tekniset laitejärjestelmät, järjestelmien säätötekniikka, sisäilmastoteknologia sekä matalaenergia- ja ekologinen rakentaminen.

Lisätietoja:

Pekka Tuomaala
VTT Rakennustekniikka
PL 1804 (Lämpömiehenkuja 3, Espoo)
02044 VTT
Puh. (90) 456 4929
Telekopio (90) 455 2408
Internet: Pekka.Tuomaala@vtt.fi

2.2.3 DOE-2

DOE-2 (<http://eande.lbl.gov/btp/DOE2/DOE2.html>) on tietokoneohjelma, joka simuloi rakennuksen tunnittaisen oletetun energiankulutuksen ja energiakustannuksen, kun syöttötietoina ovat rakennuksen säätiedot, arkkitehtuuri, materiaalit, käyttöajat ja LI-laitteet. DOE-2 on laajasti käytössä Yhdysvalloissa ja 42 muussa maassa rakennusten energiataloudelliseen suunnitteluun, uusien teknologioiden vaikutusten analysointiin ja energiastandardien kehitykseen.



Kuva 2. DOE-2-ohjelmakokonaisuus.

DOE-2-ohjelman kehitti Lawrence Berkeley -laboratorion simulointitutkimusryhmä. DOE-2 on Fortran-ohjelma, jota voidaan käyttää useilla tietokoneilla. Käyttäjä voi mallintaa rakennuksen tai vaihtoehtoiset suunnitteluratkaisut yksinkertaisesti tai yksityiskohtaisesti ja saada tarkat arviot rakennuksen energiankulutuksesta, sisäilmaolosuhteista ja energiakustannuksista. DOE-2:ta on käytetty yksinkertaistettujen suunnittelutyökalujen kehitykseen ja validointiin. DOE-2:n algoritmeja on käytetty myös vaihtoehtoisten laskentaohjelmien tuotantoon. Lisäksi DOE-2 on ollut perustyökalu kehitettäessä ja päivitettyäessä ASHRAE:n suunnittelustandardeja ja käsikirjoja. Kuva 2 esittää DOE:n osat.

Uusin versio DOE-2-ohjelmasta on DOE-2.1E, joka sisältää päivänvalonsimuloinnin, automaattisen LI-järjestelmien mitoituksen, lämmöntalteenoton, lämmön varastoinnin ja tuottamisen. Monien uusien ominaisuuksien joukossa ovat kylmän varastointi, haihdutusjäähdytysmallit, parannettu energiakustannusten laskenta sekä liityntä WINDOW-4-ohjelmaan.

PowerDOE on helppokäyttöinen versio DOE-2-ohjelmasta, jossa on graafinen Windows-käyttöliittymä (<http://eande.lbl.gov/btp/DOE2/POWERDOE.html>). PowerDOE 1.0 valmistui vuonna 1997 ja sisältää kuvaruutupohjaiset vuorovaikutteiset syöttötiedot graafisella palautteella, on-line-helppit ja -dokumentaation, graafisen tulosten esittämisen sekä lukuisia kirjastoja sisältäen säätietoja, rakennusprototyypppeja, tiloja, aikatauluja, materiaaleja, rakenteita, ikkunoita ja järjestelmätyyppejä. Suurin parannus PowerDOE:n ja DOE-2.2:n laskennassa on kuormien, järjestelmien ja tuottopään yhdistetty laskenta samalla aika-askeleella (sen sijaan, että laskettaisiin kukin termi ensin vuositasolla) sekä järjestelmien ja tuottopään sulauttaminen yhteen LI-moduuliin.

SPARK:lla (Simulation Problem Analysis and Research Kernel) voi nopeasti rakentaa innovatiivisten järjestelmien ja laitosten malleja, jotka eivät kuulu DOE-2:n piiriin (<http://eande.lbl.gov/btp/DOE2/SPARK.html>). Tämä tapahtuu yhdistämällä graafisesti LI-komponentteja, kuten puhaltimia, ilmastointipattereita ja jäähdytysyksiköitä, kirjastosta. Ohjelma tullaan yhdistämään DOE-2:een (sekä DOE-2.2:een että PowerDOE:en) siten, että voidaan laskea SPARK:lla luotuja LI-malleja käyttäen DOE-2:lla laskettuja kuormia. SPARK on samantapainen kuin TRNSYS tai HVACSIM⁺, mutta kehittäjän mukaan helppokäyttöisempi, nopeampi ja järeämpi. SPARK:n perusosia ovat vuorovaikutteinen graafinen editori, LI-komponenttien laskentamalleja sisältävä oliokirjasto ja ratkaisurutiini (solver), joka ratkaisee joukkoja simuloitavia LI-järjestelmiä vastaavia samanaikaisia algebrallisia ja differentiaaliyhtälöitä. Graafisella editorilla voi lisätä omia komponentteja kirjastoon, muokata olemassa olevia komponentteja, graafisesti yhdistää komponentit LI-järjestelmää kuvaaviin verkostoihin, määritellä syöttötietoparametreja, alustaa laskentoja ja piirtää tuloksia.

Lisätietoja DOE-2.1E-, PowerDOE- ja SPARK-ohjelmista:

Kathy Ellington
Lawrence Berkeley Laboratory
1 Cyclotron Road Mailstop 90-3147
Berkeley, CA 94720
USA
Telekopio 990-1-510-486 4089
Internet: kathy@gundog.lbl.gov

DOE-2:sta on olemassa lukuisten eri toimittajien tekemiä PC-versioita. Yksi näistä on VisualDOE, joka on Windows-käyttöliittymä DOE-2.1E-ohjelmalle. VisualDOE:n avulla voidaan muodostaa simuloitavan rakennuksen rakennuslohkot, luoda vyöhykkeet, määrittellä ikkunat, yhdistää vyöhykkeet järjestelmiin sekä määrittellä järjestelmät ja keskuslaitteistot. Omia laskentamalleja ei voi lisätä simulointiin käytettäessä VisualDOE:ta. Laitteistovaatimukset ovat:

- **486-yhteensopiva kone värimonitorilla ja hiirellä**
- **Windows 3.1 tai korkeampi**
- **8 MB RAM**
- **30 MB levytilaa**

Yhden käyttäjän versio VisualDOE:sta maksaa 950 \$.

VisualDOE:n toimittaja:

Eley Associates
142 Minna Street
San Francisco CA 94105
USA
Puh. 990-1-415-957 1977
Telekopio 990-1-415-957 1381
Internet: celey@eley.com

MICRO-DOE2 on toinen DOE-2:n PC-versio, mutta se on tarkoitettu DOS-ympäristöön. BDL Builder on Windows-käyttöliittymä syöttötiedostojen tekemiseen. MICRO-DOE2:ta ja BDL Builderia myydään myös erikseen, mutta parhaiten ne soveltuvat käytettäväksi yhdessä. MICRO-DOE2.1E:n laitteistovaatimukset ovat:

- **386/486-yhteensopiva kone**
- **MS-DOS 5.0 tai myöhempi**

- **4 MB muistia**
- **30 MB levytilaa**
- **matematiikkaprosessori**

BDL Builderin laitteistovaatimukset ovat:

- **386/486/Pentium-yhteensopiva kone**
- **MS-DOS 3.1 tai korkeampi**
- **Windows 3.0 tai myöhempi**
- **8 MB muistia**
- **10 MB levytilaa**
- **VGA-näyttö tai parempi**

MICRO-DOE2.1E maksaa 500 \$ ja BDL Builder 750 \$. Jos ostaa molemmat ohjelmat yhdessä, hinta on 1175 \$.

MICRO-DOE2.1E:n ja BDL Builderin toimittaja:

Acrosoft International, Inc.
 3435 South Yosemite Street, Suite 220
 Denver, Colorado 80231
 USA
 Puh. 990-1-303-696 6888
 Telekopio 990-1-303-696 0388
 Internet: 102447.2611@compuserve.com

2.2.4 ESP-r

ESP-r (<http://www.strath.ac.uk/Departments/ESRU/ESP-r.htm>) on yleinen simulointi-ohjelmisto, jota voidaan käyttää laajalti termisten toimintakysymysten alueella. Sitä useimmiten käytetään rakennusten ja niiden järjestelmien tarkasteluun, mutta sillä voidaan simuloida myös muunlaisia ongelmia esimerkiksi kulkuvälineitä, valmistusteollisuuden tuotekomponentteja tai aurinkojärjestelmiä.

Yleisin ongelmatyyppi käsittää rakennusten virtausten, viihtyisyyden ja/tai energiatarpeiden ennakoinnin. Monet sellaiset ongelmat kuvataan tarkasti ideaalisin säätöjärjestelmin ja määrättyjen ilman liikkeiden avulla. Monissa tapauksissa simulointiongelmat liittyvät myös ajan mukaan vaihteleviin rakenteiden ja massavirtojen vuorovaikutuksiin. Tämäntapaisia ongelmia varten kuvataan reitit, joiden kautta virtaus voi kulkea, sekä

ennakoidaan virtauksiin vaikuttavat reunaehdot. Kolmas tyypillinen simulointiongelma on keskuslaitteistoihin liittyvä massavirta.

Simulointeja varten käyttäjät tyypillisesti tarvitsevat huomattavaa apua suunnitteluhypoteesin ja sen muunnelmien määrittelyssä toiminnallisten ilmaisujen muodossa. ESP-r:n Project Manager tukee suunnitteluongelmien määrittelyä neljällä tavalla (http://erg.ucd.ie/combine/design_tools.html): rakennuksen geometrian kuvauksessa, ilmavirtojen vuotoverkostojen kuvauksessa, keskuslaitteiden määrittelyssä ja säätöjärjestelmien määrittelyssä. Ongelmaa määriteltäessä käyttäjällä on yhteys on-line-tietokantoihin, jotka sisältävät tietoja rakennusmateriaaleista, keskuslaitteistokomponenteista, profiiliprototyypeista, optisista ominaisuuksista, painekertoimista ja säätäjakoista.

Lisätietoja:

Internet: esru@strath.ac.uk

2.2.5 HVACSIM⁺

HVACSIM⁺ (HVAC Simulation plus other systems) on Yhdysvalloissa kehitetty modulaarinen rakennuksen ja LVI-järjestelmien simulointiin tarkoitettu ohjelmisto (Clark 1985). HVACSIM⁺-simulointiohjelmisto koostuu kolmesta pääohjelmasta sekä komponenttikirjastosta (Marjamäki et al. 1990). HVACGEN-ohjelmalla (HVAC simulation generation) käyttäjä tekee kuvauksen simuloitavasta järjestelmästä. SLIMCON-ohjelma muuttaa HVACGEN-ohjelmalle tehdyn tiedoston varsinaiselle MODSIM-simulointiohjelmalle sopivaan muotoon. MODSIM on yleiskäyttöinen matemaattinen ratkaisuohtelma (solver). Simuloitaessa rakennusta tarvitaan lisäksi erillisiä ohjelmia seinämärakenteen siirtofunktioiden määrittämiseen ja säätietojen luomiseen.

Ohjelmat on tehty ANSI-standardin mukaisella Fortran77 -ohjelmointikielellä. Ohjelmisto on saatavissa sekä mainframe- että mikrotietokoneversiona. Numeerinen ratkaisu tehdään MODSIM-ohjelmalla. Differentiaaliyhtälöryhmän ratkaisussa käytetään "variable time step, variable order"-integrointitekniikkaa eli ohjelma säätelee automaattisesti sekä integrointiajan pituutta että menetelmän kertalukua. Epälineaaristen algebrallisten yhtälöryhmien ratkaisemisessa käytetään SNSQ-ohjelmaa (simultaneous nonlinear equation -solving package), joka perustuu Powellin hybrid -menetelmään.

Rakennuksen komponenttimalleissa käytetään kiinteällä aika-askeleella laskettujen rakenteiden siirtofunktioiden takia kiinteää aika-askelta. Muissa malleissa käytetään muuttuvaa aika-askelta, jolle käyttäjä antaa minimi- ja maksimiarvot. Simuloinnin alussa ja muutostilanteiden jälkeen aika-askel on pieni, kun taas järjestelmän tilan tasapainotuttua aika-askelta pidennetään.

2.2.6 IDA

IDA on ruotsalainen lähinnä rakennusten ja energiajärjestelmien simulointiin tarkoitettu simulointiympäristö (Sahlin & Bring 1993). Ohjelmisto jakautuu kolmeen osaan: vuorovaikutteiseen graafiseen käyttöliittymään (IDA Modeller), IDA-ratkaisuohjelmaan (IDA Solver) ja neutraalien malliformaattien kääntäjiin (model translators from the Neutral Model Format NMF). IDA Modeller on kirjoitettu Common Lispillä ja IDA Solver Fortranilla.

NMF on ehdotettu standardi mallien esittämiseen. Sillä on kaksi päätavoitetta: (1) mallit voidaan automaattisesti kääntää useisiin simulointiympäristöihin eli formaatti on ohjelman ja koneen kannalta neutraali sekä (2) mallien tulisi olla helposti ymmärrettävissä ja esitettävissä ei-asiantuntijoille. Ensimmäisen tavoitteen mukaan otetaan käyttöön yleiset mallikirjastot, joita voidaan käyttää useista simulointiympäristöistä.

2.2.7 TRNSYS

TRNSYS (A Transient System Simulation Program) on termisten energiajärjestelmien simulointiin tarkoitettu ohjelma. Järjestelmän jokainen fyysinen komponentti, kuten pumppu, patteri tai aurinkokerääjä, kuvataan Fortran-aliohjelmalla (<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/trnwin.htm>). Aliohjelmat yhdistetään ajettavaksi ohjelmaksi, jota ohjataan käytettävät komponentit ja niiden väliset yhteydet kuvaavalla syöttötiedostolla. Kaikilla TRNSYS-käyttäjillä on käytettävissä ohjelman lähdekoodi, joten omia fyysisten järjestelmien malleja voi joustavasti lisätä ohjelmistoon.

Vuonna 1996 TRNSYS:sta ilmestyi kaksi Windows-versiota (TRNSYS 14.2), joista toinen muistuttaa vuonna 1994 julkaistua TRNSYS 14.1 DOS-versiota ja toinen yhdistää ohjelmistoon yleisen käyttöliittymän, jota kutsutaan IISIBat:ksi. Seuraavassa on kuvattu molempia uusia versioita.

2.2.8 TRNSYS 14.2 with PRESIM

TRNSHELL-ohjelma ottaa haltuunsa kaikki toiminnot TRNSYS:ia käytettäessä. Tehdäkseen tämän TRNSHELL yhdistää yhdeksi kokonaisuudeksi tiedoston käsittelyn, editoinnin, piirtämisen, parametritaulukoiden luomisen, TRANSED-tiedostojen luomisen sekä muiden ohjelmien kutsumisen. Kun käyttäjä aloittaa TRNSHELL:n, TRNSHELL-editorin avulla voi luoda ja editoida Fortran-tiedostoja. Fortran-lähdekoodi

voidaan tällöin kääntää ja linkata ajettavissa olevaksi ohjelmaksi. Seuraavaksi luodaan syöttötiedosto, joka sisältää tiedot, kuinka järjestelmän komponentit on liitetty toisiinsa. Käyttäjä voi myös valita useita standarditulostustiedostoja, esimerkiksi piirrettäväksi näytöllä. TRNSHELL:n avulla voidaan myös määrätä tehtäväksi useita peräkkäisiä simulointiajoja vaihtuvien muuttuja-arvojen avulla.

Jokaisella TRNSYS-komponentilla on sisäänmenoja ja ulostuloja, jotka edustavat fyysisten vastinosien signaaleja. Kaikki aliohjelmat linkitetään ja niitä ohjataan TRNSYS-pääohjelmasta. Syöttötiedosto kertoo TRNSYS:lle, mitä parametreja ja alkuarvoja kullekin komponentille käytetään ja miten eri komponentit on liitetty yhteen. Jokaiselle komponentille tulee antaa syöttötiedostossa joukko parametreja (muuttujia, jotka eivät muutu ajan mukana), syöttötietoja l. inputteja (muuttujia, jotka muuttuvat ajan mukana ja voivat tulla muista komponenteista) sekä alkuarvoja.

PRESIM-ohjelman avulla käyttäjä voi yhdistää järjestelmän komponenttien kuvat graafisesti ja täyttää komponenttitietolomakkeet. PRESIM jakaa TRNSYS:n standardikomponentit komponenttikirjastoihin, jotka esitetään ruudun vasemmassa laidassa. Haluttu ikoni voidaan sitten hiirellä raahata työskentelyalueelle. Kaksi komponenttia voidaan helposti yhdistää osoittamalla ja klikkaamalla hiirellä. Komponenttien sisäänmenot ja ulostulot esitetään ikonissa. Tuplaklikkaamalla komponentin ikonia käyttäjä voi muokata komponentin alkuarvoja. Ikonien avulla TRNSYS:n koko syöttötiedosto voidaan määrittellä PRESIM:ssa, minkä jälkeen se tekee varsinaisen syöttötiedoston.

TRNSYS.EXE on nyt erillinen Windows-ohjelma, joka säätelee, mitä esitetään Windowsissa TRNSYS:ia ajettaessa, ja kutsuu DLL-kirjastoa nimeltään TRNLIB.DLL, joka sisältää varsinaisen TRNSYS:n Fortran-lähdekoodin. Simuloinnin kuluessa voidaan TRNSYS.EXE-ohjelmalla esittää 10 muuttuja-arvoa.

2.2.9 TRNSYS 14.2 with IISIBat

IISIBat tarkoittaa ranskan kielestä käännettynä rakennusten simuloinnin älykästä käyttöliittymää ja on yleinen simulointiympäristöohjelma. Sen joustavan rakenteen takia monia tehokkaita työkaluja ja sovellusohjelmia voidaan "isännöidä" IISIBat:n kautta. Tällä tavalla kokonainen simulointipaketti voidaan sisällyttää yhdeksi käyttöympäristöohjelmaksi. IISIBat on suunniteltu käsittelemään kaikkia tarvittavia TRNSYS:n toimintoja. Toisessa TRNSYS:n Windows-versiossa tämä rooli on TRNSHELL:lla. Nämä toiminnot sisältävät Fortran- ja syöttötiedostojen editoinnin, ulostulojen ja listausten esittämisen, tulosten graafisen piirtämisen, on-line-helpin tarjoamisen, parametritaulukoiden luomisen sekä liitynnät useisiin toistuvasti tehtäviin toimintoihin, kuten Fortran-koodin kääntämiseen ja linkittämiseen. Lisäksi IISIBat:ssa on integroitu

esikäsittelytoiminto, jonka avulla käyttäjä voi graafisesti luoda TRNSYS-syöttötiedoston yhdistämällä TRNSYS-komponentteja kuvaavien ikonien sisäänmenot ja ulostulot. Tämä toiminto on teoriassa samanlainen kuin PRESIM-ohjelmassa.

Pääikkuna, jossa luodaan ja työskennellään TRNSYS-järjestelmien kanssa IISIBat-ympäristössä, on Assembly Window. Pääikkuna sisältää useita ikoneja ja niitä yhdistäviä viivoja. Jokainen ikoni kuvaa järjestelmän eri komponenttia. Ikonien väliset liitännät kuvaavat putkia ja johtoja, jotka yhdistävät fyysisiä komponentteja. Ikkunan vasemmalla puolella on sarja työkaluja (Tools), joita käyttäen voidaan asettaa ikoneja työskentelyalueelle, yhdistää ikoneja tarvittaessa, ajaa simulointeja, puuttua piirtotoimintoihin jne. Sen sijaan, että TRNSHELL ohjaisi monia TRNSYS:n liittyviä toimintoja ja syöttötiedostot luotaisiin PRESIM:lla, kaikkia TRNSYS-toimintoja ohjaa suoraan Assembly Window.

IISIBat:ssa on laaja komponenttien kuvaustapa nimeltään Proforma, joka on standardimenetelmä komponenttimallien kuvaamiseen lauseopillisessa muodossa. Jokainen TRNSYS-komponenttimalli on muutettu Proforma-formaattiin ja täten tallennettu IISIBat-ohjelmaan. Proforma-ikkunan ensimmäinen sivu sisältää tietoa komponenttimallin historiasta ja toiminnasta sekä toinen sivu täydellisen kuvauksen mallin tarvitsemista muuttujista.

Ohjelman toimittaja:

Solar Energy Laboratory
University of Wisconsin-Madison
1500 Johnson Drive
Madison, WI 53706
USA
Puh. 990-1-608-263 1589 tai 990-1-608-263 1586
Telekopio 990-1-608-262 8464

2.2.10 tsbi3

tsbi3 (thermal simulation of buildings and installations) on kaupallinen DOS-pohjainen tietokoneohjelma rakennuksen sisäilmaston, energiateknisten toimintojen, järjestelmien ja säätötoimintojen analysointiin. Fyysisten rakenteiden ja järjestelmien yksityiskohtaisilla matemaattisilla kuvauksilla voidaan simuloida jopa hyvin monimutkaisia rakennuksia, joissa on kehittyneet lämmitys- ja ilmastointijärjestelmät kuten myös tietyt passiiviset tai aktiiviset hybridiaurinkojärjestelmät. tsbi3:lla voi simuloida rakenteiden ja järjestelmien dynaamisia vuorovaikutuksia sekä ajan mukaan vaihtelevia säätöstrategioita.

tsbi3:n käyttöliittymä koostuu joukosta menuja, joita voidaan käyttää hiiren ja näppäimistön kautta. Kaikki tieto rakennuksesta, vyöhykkeistä, ikkunoista, aurinkosuojauksista, LI-järjestelmistä ja -laitteista, säätöstrategioista, sisäisistä kuormista jne. määritellään näiden menujen kautta. Menujärjestelmä vaikuttaa rakennusmallin yleiseen rakenteeseen. Pääperiaate on, että eri elementit kuvataan yleiseltä tasolta hyvin yksityiskohtaiseen tasoon menusarjojen kautta. Sekä malli että menujärjestelmä on rakennettu hierarkkisesti siten, että seuraava taso antaa aina lisätietoja ko. hetkisestä tasosta. Ohjelma käyttää kirjastoja monista rakennusmallin tarvitsemista tiedoista. Tällaisia voidaan muodostaa esimerkiksi materiaaleista, rakennetyypeistä, ikkunoista, henkilökuormista, aikamäärittelyistä ja päiväprofiileista.

Rakennusmalli on yksinkertaistettu kuvaus rakennuksesta. Yksinkertaistukset on tehty energia- ja sisäilmastonäkökulmasta, joten malli kuvaa vain näihin liittyviä ominaisuuksia, siis lämpötekniisiä ja energiariippuvia olosuhteita. Rakennusmalli yhdistää seuraavat:

- **tiedot rakennuksen paikasta sisältäen säätiedot**
- **rakennuksen muodon (sen jaon huoneisiin ja vyöhykkeisiin, vyöhykkeitä rajoittavat pinnat ja rakenteet sisältäen ikkunat ja ovet sekä käytetyt materiaalit)**
- **rakennuksen järjestelmät ja kuormat**
- **toiminta- ja käyttötapatiedot.**

Ohjelman laitteistovaatimukset ovat:

- **Intel 286/386/486 tai yhteensopiva PC**
- **DOS 3.3 tai myöhempi**
- **matematiikkaprosessori tyyppiä Intel 80287, 80387 tai yhteensopiva**
- **640 kB RAM**
- **20 MB levytilaa**
- **EGA-, VGA- tai SVGA-näyttö**
- **Microsoft-yhteensopiva hiiri**

Ohjelman toimittaja:

SBI Statens byggeforskningsinstitut
Danish Building Research Institute
P.O.Box 119
DK-2970 Horsholm
Tanska
Puh. 990-45-42-865533
Telekopio 990-45-42-867535

2.3 Neutraalimuotoiset simulointimallit

2.3.1 NMF-mallinnuskieli

NMF (Neutral Model Format) on ASHRAE:n (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers) "standardisoima" mallinnuskieli, jolla voi kuvata yhtälöpohjaisia simulointimalleja (Sahlin 1996). Sillä on kaksi päätavoitetta:

- **mallit voidaan automaattisesti kääntää joidenkin modulaaristen simulointiohjelmien (esimerkiksi TRNSYS ja HVACSIM+) edellyttämään muotoon, siis formaatti on ohjelmariippumaton ja konekielisesti luettavissa**
- **mallien tulisi olla helposti ymmärrettävissä ja ilmaistavissa ei-asiantuntijoille**

Periaatteita, joita NMF-mallinnuksessa pyritään hyödyntämään, ovat (Sahlin et al. 1996):

- **yhtälömallintaminen,**
- **komponenttien verkottaminen,**
- **ominaisuuksien perintä,**
- **hierarkkinen hajottaminen,**
- **mallien validointi.**

Jatkuvat NMF-mallit kuvataan täysin implisiittisillä differentiaali-algebrallisilla yhtälöryhmillä, jotka yleisessä muodossa esittää seuraavasti:

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \mathbf{p}, t) = 0$$

jossa f on vektorifunktio \mathbf{x} -vektorista, sen aikaderivaatasta \mathbf{x}' , parametrivektorista \mathbf{p} ja ajasta t . NMF-yhtälömallit ovat input/output-riippumattomia. Siis yhtälöissä mitkä tahansa muuttujat voidaan määritellä inputeiksi tai outputeiksi, kunhan vain pidetään huoli siitä, että kaikki halutut outputit ovat ko. yhtälöillä ratkaistavissa.

Simuloitava järjestelmä kootaan erillisistä NMF-komponenttimalleista. Mallien yhteensopivuuden lisäämiseksi kaikki komponenttimallissa käytettävät muuttujatyypit määritellään globaalisti. On suositeltavaa käyttää valmiiksi määriteltyjä tyyppejä aina, kun se on mahdollista. Ns. linkkityypeillä (link type) määritellään niiden muuttujatyyppien ryhmät, jotka kuvaavat mallien mahdollisia liityntätapoja.

```

CONTINUOUS_MODEL PELTI

ABSTRACT "
Purpose:      Mallintaa NMF-kielillä säätöpelti IDA-kurssin harjoitustyönä.
Limits:       None
Reference:    HVACSIM+ Reference Manual
Date:        April 23, 1997
Made by:     Satu Kärki
              <Satu.Karki@vtt.fi>
Call:        None
"

EQUATIONS
/* Pellin virtausvastus voidaan laskea pellin ominaiskäyrän avulla, joka muodostuu
painotettuna keskiarvona lineaarisen ja eksponentiaalisen pellin vastuksista. Kun pellin
ominaiskäyrän määräävä parametri Painoker on 0 kyseessä on eksponentiaalinen pelti. Kun parametri on
1, kyseessä on lineaarinen pelti. */
Vastus      :=      K_auki*Painoker/(((1-Vuoto)*Ohjaus+Vuoto)**2)      +      (1-
Painoker)*K_auki*Vuoto**(2*Ohjaus-2);

/* Lähtevän virtauksen paineen laskenta */
Paine_out = Paine_in - Vastus*(Massavirta**2);

LINKS
/* type      name      variables... */
VentX      Virtaus_in  Paine_in, POS_IN Massavirta, Lampotila, Epapuhtaus, Abs_kost;
VentX      Virtaus_out  Paine_out, POS_OUT Massavirta, Lampotila, Epapuhtaus,
Abs_kost;
Z          Asento      Ohjaus;

VARIABLES
/* type      name      role  def      min      max      description */
MassFlow    Massavirta  IN    3.6      0        BIG      "Pellin läpi kulkeva
massavirta"
Pressure    Paine_in    IN    101325   -BIG     BIG      "Tulevan virtauksen paine"
Pressure    Paine_out   OUT   101150   -BIG     BIG      "Lähtevän virtauksen paine"
Factor      Ohjaus        IN    0.5      0        1        "Pellin asento"
Temp        Lampotila   IN    10       ABS_ZERO BIG      "Virtauksen lämpötila"
Fraction_y  Epapuhtaus   IN    0.01     0        BIG      "Virtauksen epäpuhtausmäärä"
HumRatio    Abs_kost     IN    0.008    0        BIG      "Virtauksen absoluuttinen
kosteus"
Generic     Vastus         LOC   1.3      SMALL    BIG      "Pellin aiheuttama
virtausvastus"

PARAMETERS
/* type      name      role  def      min      max      description */
Generic     K_auki     S_P   1.3      0        BIG      "Täysin auki olevan pellin
virtausvastus"
Factor      Painoker    S_P   0        0        1        "Pellin ominaiskäyrän määräävä
parametri"
Generic     Vuoto      S_P   0.02     SMALL    BIG      "Venttiilin vuoto"

END_MODEL

```

Kuva 3. Esimerkki NMF-mallista.

Kuva 3 esittää yksinkertaisen NMF-kielisen säätöpeltimallin, jolla voi simuloida sekä logaritmisella että lineaarisella säätökäyrällä olevia säätöpeltejä. NMF-malli alkaa aina termillä CONTINUOUS_MODEL, jonka jälkeen on mallin nimi. ABSTRACT-sanan

jälkeen voi kirjoittaa lainausmerkkien sisälle käyttäjälle tarkoitettua informaatiota mallista. NMF-mallin ydin on EQUATIONS-osa, jossa määritellään käytettävät yhtälöt. LINKS-osassa määritellään mallin liityntätavat muihin malleihin. Liitynnöille annetaan tyyppi, nimi ja liittyvät muuttujat. VARIABLES-osassa määritellään muuttujat antamalla niille tyyppi, nimi, rooli oletusarvot alkuarvoiksi, minimi- ja maksimirajat sekä kuvaus. Muuttujan rooli kuvaa sitä tapaa, miten muuttujaa käsitellään käännettäessä malli muihin ympäristöihin (esim. TRNSYS:n inputiksi tai outputiksi). PARAMETERS-osassa määritellään mallin parametrit. Kaikissa NMF-mallin osissa kommentit kirjoitetaan /*- ja */-merkkien väliin (siis /* kommentti */). NMF-malli päättyy ilmaisuun END_MODEL.

2.3.2 NMF Translator ja IDA

NMF Translator on ohjelma, jota käytetään NMF-mallien kehittämiseen ja kääntämiseen eri simulointiympäristöjen ymmärtämään muotoon. Ohjelman pääpiirteitä ovat:

- **moni-ikkunainen lähdekoodin editor**
- **suora palaute virheistä ikkunoittain**
- **valinnainen eräajotoiminta**
- **virhetarkistus**
- **symbolisten mallien käsittely**
- **Help-tiedostot NMF-kuvauksista**
- **NMF-mallien kääntäjät**

IDA on Kungliga Tekniska Högskolanin (KTH) kehittämä modulaarinen simulointiympäristö (Hyttinen & Vuolle 1997). IDA Solver on IDA-ympäristön sydän. Se on epälineaaristen yhtälöryhmien ratkaisija. NMF-mallit soveltuvat parhaiten käytettäväksi IDA-ympäristössä. IDA:n ongelmana ovat aikaisemmin olleet erittäin suuret hankinta- ja käyttökustannukset, mutta ne ovat hiljattain merkittävästi laskeneet. Lisäksi IDA-ympäristöä on muihin nykyisiin simulointiympäristöihin verrattuna melko kömpelöä käyttää. Suomessa IDA-ympäristön ja NMF-kielen pääasiantuntemus löytyy TKK:n LVI-tekniikan laboratoriosta.

2.3.3 NMF-mallikirjastot

NMF-mallikirjastot ovat vapaasti jaettavissa. Kirjastojen malleja voi kääntää NMF Translatorilla käytettäväksi omassa simulointiympäristössä. Keskeisimpiä LVI-alan kirjastoja, jotka on käännetty myös NMF-muotoon, ovat ASHRAE:n HVAC 2 Toolkit,

Climate and Energy, Multi Air Exchange sekä kirjasto IEA Annex 10 ja 17 projektien tuloksista.

HVAC 2 Toolkit kehitettiin ASHRAE:n tutkimusprojektissa 629-RP energialaskelmista vastaavan teknisen komitean 4.7 tukemana (Brandemuehl et al. 1993). Toolkit on kokoelma Fortran-aliohjelmia ja niihin liittyviä dokumentteja, jotka kuvaavat LI-komponenttien toimintaa mallintavat algoritmit. Toolkitin mallit voidaan liittää osaksi muihin simulointirutiineihin tai yksittäisiä malleja ajaa Toolkitin mukana toimitettavan HVAC2KIT-ohjelman kautta. Toolkit sisältää malleja yksinkertaistettujen virtauskomponenttien, yksityiskohtaisten virtauskomponenttien, lämmön- ja massansiirron komponenttien, säätökomponenttien ja esimerkkijärjestelmien simulointiin. Lisäksi Toolkit sisältää malleja ilman ominaisuuksien sekä lämmön- ja massansiirron ominaisuuksien laskentaan sekä yleisiä rutiineja. Taulukko 1 kuvaa sitä, millaisia laskentamalleja Toolkit sisältää.

Taulukko 1. NMF HVAC 2 Toolkitin sisältämät mallit.

Mallityypit	Mallit
Yksinkertaistetut virtauskomponentit	<ul style="list-style-type: none"> • yksinkertainen puhallin (paineesta riippumaton) • yksinkertainen pumppu (paineesta riippumaton) • säätöventtiili • virtausten sekoitus • kostean ilman sekoitus
Yksityiskohtaiset virtauskomponentit	<ul style="list-style-type: none"> • yksityiskohtainen puhallin (paineesta riippuva) • yksityiskohtainen pumppu (paineesta riippuva) • yksityiskohtainen venttiili tai pelti (paineesta riippuva) • virtausvastus
Lämmön- ja massansiirron komponentit	<ul style="list-style-type: none"> • yleinen yksinkertainen lämmönsiirrin • lämmönsiirtimen konduktanssi • kuivan lämmönsiirron patteri • märän lämmönsiirron jäähdytyspatteri (täysin märkä pinta) • märän lämmönsiirron jäähdytyspatteri (osittain märkä pinta) • yksinkertaistettu märän lämmönsiirron patteri • jäähdytyspatterin ohituskerroin ja kastepisteolosuhteet • yksityiskohtainen patteri ilman jäähdytykseen ja kuivaukseen • yksinkertainen jäähdytys- ja kuivauspatteri • yksityiskohtainen vesikiertoinen lämmityspatteri • yksinkertainen lämmityspatteri • lämmitys- tai jäähdytyspatteri, kun lähtevän ilman lämpötila tunnetaan • ilmastointilaite • DOE 2.1-ohjelman mukainen jäähdytyspatteri • ilma-ilma lämmönsiirrin • suora höyrystyskostutin tai -jäähdytin • epäsuorajäähdytin • höyrykostutin
Säätökomponentit	<ul style="list-style-type: none"> • vapaajäähdytys • P-säädin
Esimerkkijärjestelmät	<ul style="list-style-type: none"> • vakioilmavirtainen jälkilämmitysjärjestelmä • muuttuvailmavirtainen jälkilämmitysjärjestelmä • 2-kanavajärjestelmä • esimerkki ilmastointikomponenttien yhdistämisestä
Ilman ominaisuudet	<ul style="list-style-type: none"> • kastepistelämpötila • kuivalämpötila • märän ilman entalpia • kyllästysentalpia • absoluuttinen/suhteellinen kosteus • kuivan/märän ilman tiheys

jatkuu

Mallityypit	Mallit
jatkoa	<ul style="list-style-type: none"> • kyllästyspaine • kyllästyslämpötila • ilman ominaisuudet eri lähtösuureista
Lämmön- ja massansiirron ominaisuudet	<ul style="list-style-type: none"> • ilmapuolen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin kuivalle/märälle pinnalle • ripahyötysuhde • konvektiivinen lämmönsiirtokerroin putkessa • lämmönsiirtokerroin, kun putkessa virtaa höyrystyvää jäähdytysaine • lämmönsiirtokerroin kondenssitapauksessa
Yleiset mallit	<ul style="list-style-type: none"> • Newton-Raphsonin iterointi • parametrien suuruuden tarkistus • modifioidut Besselin funktiot • erilaisia yksikkömuunnoksia

Climate and Energy -kirjasto sisältää rakennuksen lämpötekniisessä simuloinnissa tarvittavat osamallit, kuten seinät, ikkunat, huonemalli, säämalli ja yksinkertaiset IV-komponenttimallit (Hyttinen & Vuolle 1997). Niiden avulla voidaan mallinnettavasta rakennuksesta luoda simulointimalli, jonka avulla voidaan simuloida rakennuksen lämpötekniistä käyttäytymistä.

Multi Air Exchange -kirjasto mallintaa rakennusten sisäiset virtaukset ja vuotoilmavirtaukset. Kansainvälisissä IEA Annex 10 ja 17 -projekteissa mallinnettiin monia LVI-komponentteja. Näistä NMF-mallikirjastoksi on käännetty: lämmitys- ja jäähdytyspatteri, kostutin, aksiaalipuhallin, ilman suodatin, kanava, ilman sekoitus, venttiili ja toimimoottori, kattila, kompressorijäähdytys, jäähdytystorni, huonemalli, T-kappale ja MIV-yksikkö.

2.4 Simulointityökalulle asetettavia vaatimuksia

LVI-suunnittelijan kannalta ideaaliselle simulointiohjelmalle on esitetty kriteerejä (Jokela & Keinänen 1995):

- samaa ohjelmaa käytetään rakennuksen koko elinkaaren aikana, vain käyttöliittymä muuttuu
- lähtötiedot annetaan vain kerran (alussa syöttötiedot otetaan kirjastoista ja suurin osa arvoista on oletusarvoja, suunnittelun edetessä tietoa korjataan ja tarkennetaan)

- suunnittelu- ja ylläpitotietokannan ja simulointiohjelman syöttötietojen välillä pitäisi olla liityntä
- tulosteiden pitäisi olla havainnollisia
- suunnittelijan pitäisi voida valita tarvitsemansa tulosteet/ulostulotiedot
- laskennan tarkkuuden pitäisi olla tarpeiden mukainen (ei liian tarkka).

Arkkitehtisuunnittelun tehtäväluettelo ARK 95, rakennesuunnittelun tehtäväluettelo RAK 95 ja talotekniikan suunnittelun tehtäväluettelo TATE 95 asettavat eri suunnitteluvaiheiden kannalta käytännön vaatimuksia simulointiohjelmalle, jota käytettäisiin rakennuksen koko elinkaaren aikana. Seuraavassa taulukossa on esitetty, missä lämpötekniisessä suunnitteluvaiheessa mitkään tulostiedot pitäisi saada milläkin lähtötiedoilla.

Taulukko 2. ARK 95:n ja TATE 95:n lämpötekniiset (LT) tiedot.

LT-vaihe	Lähtötiedot	Saadaan tehtäväluettelosta	Tulostiedot
ARK 2.7 Kustannustavoitteiden asettaminen	tilaluettelo	ARK 95 2.3	ylläpitokustannukset
TATE 2.5 Taloteknisten suunnittelu- arvojen määrittely	tilaluettelo, laatutasovaihtoehdot	ARK 95 2.3 TATE 95 2.2	ylläpitokustannukset
TATE 3.2 Tontinkäyttö- ja massoitteluvaihtoehtojen vertailu talotekniikan osalta	tilaluettelo, laatutasotiedot, massoitteluvaihtoehdot	ARK 95 2.3 TATE 95 2.5 ARK 95 3.1.2	energiankulutus, ylläpitokustannukset
TATE 3.5 Taloteknisten ratkaisuvaihtoehtojen kustannusvertailu	tilaluettelo, laatutasotiedot, ehdotuspiirustukset (hyv. massoittelu, rakenneleikkaukset), järjestelmävaihtoehdot	ARK 95 2.3 TATE 95 2.5 ARK 95 3.2.3 RAK 95 3.2 TATE 95 3.3	energiankulutus, ylläpitokustannukset

jatkuu

LT-vaihe	Lähtötiedot	Saadaan tehtäväluettelosta	Tulostiedot
TATE 3.8 Luonnossuunnitelma-asiakirjojen laatiminen	huoneluettelo, tyyppihuonepiirustukset, laatutasotiedot, pohjapiirustukset, rakennepiirustukset (k-arvo), alustava järjestelmävalinta	ARK 95 3.3.3 TATE 95 2.5 RAK 95 3.3 TATE 95 3.6	jäähditys- ja lämmitystekot
TATE 3.10 Kustannus- ja ylläpitotavoitteiden tarkistaminen	huoneluettelo, tyyppihuonepiirustukset, laatutasotiedot, pohjapiirustukset, rakennepiirustukset (k-arvo), järjestelmätiedot, laiteluettelot	ARK 95 3.3.3 TATE 95 2.5 RAK 95 3.3 TATE 95 3.8	ylläpitokustannukset
TATE 4.2 Toteutussuunnitelma-asiakirjojen laatiminen	pohjapiirustukset, julkisivupiirustukset, rakennetyypit, ikkuna-kaaviot, huoneselostus, laatutasotiedot, järjestelmäkaaviot	ARK 95 4.1.2 RAK 95 4.1.5 RAK 95 4.1.7 ARK 95 4.1.6 ARK 95 4.1.10 TATE 95 2.5 TATE 95 3.8	lämmitys- ja jäähdytystarpeet, säätötavat, käyttöperiaatteet
TATE 5.1 Suunnitelmätietoihin perustuvan käyttö- ja huoltosuunnitelman laatiminen	pohjapiirustukset, järjestelmäkaaviot, laiteluettelot, ohjelma- ja raporttiluettelot, säätökaaviot toimintaselostuksineen, säätö-, ohjaus- ja valvontapisteluettelo, julkisivupiirustukset, rakennetyypit, ikkunakaaviot, laatutasotiedot	ARK 95 4.1.2 TATE 95 4.2 RAK 95 4.1.5 RAK 95 4.1.7 ARK 95 4.1.6 TATE 95 2.5	käyttö- ja huoltosuunnitelma
TATE 5.10 Käyttö- ja huoltosuunnitelman täydentäminen rakennusaikaisilla tiedoilla	kuten edellä	kuten edellä + TATE 95 5.4	käyttö- ja huoltosuunnitelma jatkuu

LT-vaihe	Lähtötiedot	Saadaan tehtäväluestelosta	Tulostiedot
TATE 7.3 Energian tavoitekulutuksen laskenta	kuten edellä	kuten edellä + TATE 95 5.10	kuukausitasoiset tavoitekulutuslaskelmat (lämpö, vesi, sähkö)

Myös muussa kuin suunnittelukäytössä olevalle lämpötekniselle simulointiohjelmalle voidaan lisäksi esittää esimerkiksi seuraavanlaisia vaatimuksia:

- **ohjelmaan pitäisi voida lisätä omia laskentamalleja ja muokata olemassa olevia malleja**
- **varsinkin tutkimuskäyttöön lähdekoodi pitäisi olla saatavilla**
- **sopiva hinta**
- **laskenta-aika ei ole kohtuuttoman pitkä**
- **PC- tai muu haluttu käyttöympäristö**
- **havainnollinen käyttöliittymä, esimerkiksi Windows-pohjainen**
- **laskentaperiaatteet, mallit, käyttötapa jne. hyvin dokumentoitu**
- **liittyminen muihin ohjelmiin ja tietokantoihin mahdollista (määritellyt rajapinnat)**
- **laskentamallit verifioitu ja niiden oikeellisuus todennettu**
- **laskennan aika-askel muutettavissa oleva parametri**
- **käytettävät säätiedostot voidaan tuottaa itse**
- **eri käyttäjät saavat samalla ohjelmalla samanlaisia tuloksia (vähän "hämäriä" parametreja, yksiselitteiset käyttöohjeet).**

Laskentatarpeiden kannalta lämpöteknisellä simulointiohjelmalla pitäisi voida laskea ainakin energiankulutus, lämpötilat sekä lämmitys- ja jäähdytystehon tarpeet erilaisilla rakennuksen suuntauksilla ja sijainneilla, rakenne- ja ikkunatyypeillä sekä käyttöajoilla ja -tavoilla. Lisäksi on hyvä, jos voidaan tarkastella kokonaisuuksien energianhallintaa, tehdä erilaisia säätötarkasteluita (eli ohjelmassa on mukana rakennuksen ja järjestelmien dynamiikka), vertailla ja havainnollistaa eri laitejärjestelmien toimintaa sekä laskea tavoitekulutusarvoja ja energiakustannuksia.

3. Ohjelmistojen validointi ja testaus

3.1 Johdanto

Rakennusteollisuudessa tiedostetaan yhä enenevästi laadunvarmistuksen tarve. Simulointiohjelmien valmistajat ja -myyjät tarvitsevat työkaluja testaamaan tuotteittensa luotettavuutta. Samoin ohjelman käyttäjät saattavat toivoa omiin sovelluksiinsa laadun varmistustestejä varmistamaan, että ohjelma heidän käyttämäänsä täyttää heidän odotuksensa. Joissakin tapauksissa ulkopuoliset tahot, kuten tutkimuslaitokset, saattavat haluta testata ja akkreditoida tiettyjä ohjelmia.

Ennen kuin ohjelma voidaan ottaa käyttöön, ohjelma on validoitava (Vuolle 1995). Täydellinen validointiketju sisältää kirjallisuusosan, ohjelmakoodin tarkastamisen, analyttisen vertailun, herkkyystarkastelun, mallien välisen vertailun sekä tulosten vertailun mittaustuloksiin. Ohjelmien validointiketjuun pitäisi lisätä käyttöliittymän, dokumentoinnin ja käyttöohjeiden validoinnit, koska ohjelmien suuri virhelähde on käyttäjä, jonka subjektiiviset valinnat vaikuttavat merkittävästi lopputuloksiin.

Validointi voi laajentaa ohjelman uskottavuutta, johtaa parannuksiin sovelluksessa ja lisätä käyttäjien luottamusta ohjelmaan. Kuitenkaan tietokoneohjelman validointi ei ole helppo tehtävä. Itse asiassa on kiistelty siitä onko absoluuttinen oikeaksi todistaminen ylipäättään mahdollista. Tämän vuoksi validointi on nähtävä jatkuvana toimintana, jota tehdään useiden toisiaan täydentävien tekniikoiden avulla kokeillen ja arvioiden ohjelman luotettavuutta.

Analyttisessä vertailussa ohjelman antamia tuloksia verrataan tunnettuun analyttiseen ratkaisuun. Analyttisellä tarkastelulla voidaan verifioida ja tarkastaa ohjelmakoodia sekä testata tietokonemallin tarkkuutta. Analyttisessä validoinnissa pitää esimerkiksi seinärakenteiden materiaaleja ja paksuuksia vaihdella, sillä jos malli toimii hyvin 15 cm:n paksuiselle betoniseinälle, mallin toimivuudesta 50 cm:n eristekerroksessa ei ole takeita.

Mallien välisessä vertailussa kehitettävää ohjelmaa verrataan ohjelmaan, joka on paremmin validoitu tai joka on tarkoitettu vain validoitavan ohjelman jonkin yksittäisen osan ratkaisuun ollen näin yksityiskohtaisempi. Mallista saatuja tuloksia tulisi aina verrata mittaustuloksiin.

3.1.1 Olemassa olevia validointimenetelmiä

Validointi voidaan suorittaa useilla eri tasoilla. Seuraavassa on kuvattu yleisimmin käytetyt menetelmät.

Koodin tarkastaminen. Tämä näkökulma pitäisi olla osa sovelluksen kehitystyötä. Formaaliset testit voivat suorittaa ohjelman tekijät tai, mikä vielä toivottavampaa, kolmas osapuoli. Tämä varmistaa, että ohjelman lähtötiedot prosessoidaan luotettavasti, mutta se ei kerro ohjelman todennäköisestä luotettavuudesta todellisessa käytössä.

Analyttinen tarkastaminen. Ennustemalleja vertaillaan eksakteihin matemaattisiin ratkaisuihin. Analyttiset testit ovat ideaalisia tutkittaessa tietyn yksittäisen algoritmin tarkkuutta. Kuitenkin on vaikeata tehdä johtopäätöksiä näiden testien perusteella algoritmin sopivuudesta reaali maailman ongelmiin, mikäli algoritmi toimii yhdessä muiden algoritmien kanssa.

Mallien väliset vertailut. Sellaiset vertailut, jotka osoittavat eroja (tai yhtäläisyyksiä) kahden tai useamman ohjelman ennusteissa. Vertailut eivät kerro absoluuttisesta luotettavuudesta, koska käytössä ei ole "totuusmallia", eli ei tiedetä oikeata vastausta. Kuitenkin mallien välisillä vertailuilla voidaan löytää spesifisiä ongelmia ja ohjelmointivirheitä simulointiohjelmista. Vaikka todellista tilannetta ei tiedetäkään, eri simulointiohjelmien antamien ennusteiden trendien (esimerkiksi energiankulutuksen vaihtelua ikkunapinta-alan vaihdellessa) vertailulla voidaan saada arvokasta tietoa sekä rakennuksen, että ohjelman suorituskäytöstä.

Empiirinen validointi on tärkein testi simulointiohjelman validoimisessa. Mallin ennusteita vertaillaan todellisiin kenttämittaustuloksiin. Tämä menetelmä on kuitenkin kallis ja aikaavievä. Tarjolla on varsin vähän laadukkaita mittaustuloskokonaisuuksia, joita voi käyttää empiiriseen validointiin. Monet tai lähes kaikki ohjelman sisäiset algoritmit toimivat yhtäaikaaisesti. Siksi on vaikeata yksittäisellä datasetillä mitata yksittäisen algoritmin tarkkuutta. Järjestelmätason data, joka sisältää erittäin yksityiskohtaista tietoa yksittäisten tekijöiden vaikutuksesta koko prosessiin on tämän vuoksi erityisen arvokasta.

3.1.2 Rakennussimulointiohjelman empiirinen validointi

Tämä katsaus keskittyy rakennusvaippaa käsitteleviin ohjelmiin eli ohjelmiin jotka ennustavat dynaamisia (tunneittain tapahtuvaa) muutoksia kuten laitekuormien, energian ja lämpötilan muutoksia ennemminkin kuin niitä, jotka simuloivat LVI- tai aktiivisen aurinkojärjestelmän toimintaa. Katsaus perustuu lähteissä oleviin teoksiin ja

osittain IEA Annex 21 (osa C), the Building Research Establishment, ja the Institute of Energy and Sustainable Development - IESD (Leicester De Montfort University):ssä tehtyyn työhön

3.1.2.1 Datasettien valinta

Validointiin kannattaa valita riittävän laadukkaaksi todettu data. IESD:ssä on kehitetty kriteerit datasetin laadukkuuden arviointiin ja nämä kriteerit kuvataan seuraavassa.

Ensimmäiset kolme kriteeriä ovat ensisijaisia hyväksymiskriteerejä, jotka datasetin pitää ainakin täyttää validoitaessa jotain dynaamista termistä (rakennusvaipan) ohjelmaa. Datasettejä, jotka täyttävät kaikki kolme kriteeriä voidaan kutsua "Hyväksyttäväksi datasetiksi".

1. Rakenteet eivät saa sisältää toimivia aktiivisia aurinkolämmitys- tai jäähdytysjärjestelmiä.
2. Säätiiedot pitää olla kerätty rakennuksen kohdalta.
3. Rakennuksesta mitattu tieto ja säätiiedot pitää olla saatavilla jokaiselta tunnilta tai sitä pienemmältä ajanjaksolta.

Datasettejä, jotka täyttävät kaikki kolme seuraavaa kriteeriä voidaan kutsua "Käyttökelpoisiksi datasetiksi".

1. Kaikki kolme sään päätekijää eli ilman lämpötila, tuulen nopeus ja suunta sekä aurinkosäteilyn eri komponenttien pitää olla mitattu rakennuksen kohdalla koko vertailuajankohdalta.
2. Rakenteet eivät saa osallistua mihinkään toimintaan, kuten passiiviseen auringon hyödyntämiseen, mitä ei voi yksiselitteisesti mallintaa ja jokaisen rakennuksen osan pitää kuulua muista osista riippumattomaan lämmitys- ja jäähdytysalueeseen eli säätiö pitää pystyä tehdä tilakohtaisesti.
3. Mitattu suotautuminen ja, mikäli tarkoituksen mukaista, tilojen väliset ilmansiirrot pitää olla saatavilla koko vertailujaksolta.

Datasettejä, jotka täyttävät myös seuraavat kriteerit voidaan pitää "Korkealaatuisina datasetteinä".

1. Rakenne ei saa sisältää piirteitä tai ympäristön säätelyjärjestelmiä, joiden mallintaminen ei ole mahdollista yhdelläkään validoitavalla ohjelmalla.
2. Tietolähteen pitää olla helposti käytettävissä ja myös yhteydet mittaukset suorittavaan instituutioon pitää olla mahdollisia.
3. Tietolähteitä, jotka eivät ole koskaan tuottaneet tietoa mallien validointi työhön, tai dataa, jota ulkopuolisten häiriöiden vuoksi ei luokitella kelpaavan validointityöhön, ei tule käyttää.

IESD:n tutkimuksessa evaluoitiin 580 datasettiä ympäri maailmaa. Ainoastaan neljän paikan datasetit täytti kaikki kriteerit (Lomas, 1990). Nämä paikat ovat:

- the (former) Polytechnic of Central London test cells monitored by the Energy Monitoring Company (EMC);
- the PASSYS test cells;
- the EMC test cells used in the recent IEA empirical validation exercise (Lomas et al, 1994);
- the US National Institute of Standards and Technology (NIST) passive solar test facility.

3.1.2.2 Empiirinen validointimetodiikka

Iteratiivista lähestymistapaa on käytetty yleisesti simulointiohjelmien validoinnissa. Jokaisella iteroitukierroksella lähtötietoja korjataan uskottavuuden rajoissa, jotta simuloinnin tulokset ja todelliset mittaukset vastaisivat mahdollisimman hyvin toisiaan. Tätä menetelmää on nimetty "Luokan B" lähestymistavaksi (Judkoff et al, 1983) ja sen avulla simulointitulokset voidaan saada vastaamaan erittäin hyvin mittaustuloksia. Kuitenkaan lähestymistapa ei ole soveltamiskelpoinen käytännön tilanteissa, sillä tuloksia ei tiedetä ennalta. Lisäksi lähtöarvojen liiallinen muuttaminen peittää simulointiohjelman luotettavuuden.

"Luokan A" lähestymistapa (Lomas, 1991) vastaa paremmin käytännön tilanteita. Tämä lähestymistapa ei oleta eikä tiedä todellisista mittaustuloksista mitään eikä mittaustuloksia käytetä parantamaan simulointituloksia iteroimalla. Kaikki epävarmuustekijät ja mahdollisten virheiden suuruusluokat selvitetään sekä

mittaustuloksista että ohjelman lähtötiedoista. Tilastollisilla vertailuilla selvitetään miten virheet huomioidaan.

Kolmitasoiseksi empiiriseksi validointimenetelmäksi (Lomas & Bowman, 1987; Lomas, 1991) on ehdotettu seuraavaa:

Taso 1: Perustapauksen ennustukset hankitaan huomioimatta mittausten hyvyttä. Näitä ennusteita ja vastaavia mittauksia vertaillaan ja mikäli poikkeavuudet ovat pienempiä, kuin mittausten virheet yksinään, malli kelpaa tasolle 1 tarkempaan tarkasteluun; ellei, niin on suositeltavaa siirtyä tasolle 2.

Taso 2: Ulkoisten virheiden aiheuttama kokonaisepävarmuus selvitetään. Jos perustapauksen ennuste poikkeaa mittaustuloksista vähemmän kuin kokonaisepävarmuus, malli kelpaa tasolle 2; ellei siirrytään tasolle 3.

Taso 3. Sisäiset virheet, jotka aiheuttavat poikkeavia ennusteita tutkitaan joko vertaamalla ennusteita yksittäisiin algoritmeihin pelkistetyissä tilanteissa tai käyttäen jotain muuta validointitekniikkaa.

Tason 3 suorittamisen jälkeen pitäisi olla mahdollista korjata sisäiset virheet ja suorittaa validointiprosessi. Huomattavaa kuitenkin on, että jos sovellus antaa tyydyttävät tulokset tasoilla 1 ja 2, se ei kuitenkaan tarkoita, ettei sisäisiä virheitä ole. Ennemmin sovelluksen virheet ovat liian pieniä, jota ne voitaisiin havaita tai virheet kumoavat toisensa. Virheitä voi myöskin olla sovelluksen niissä osissa, joita ei käytetä kyseisen datasetin prosessoinnissa.

3.1.2.3 Empiirinen validointimenettely

Empiirisen validoinnin osatehtävät:

1. Etsitään datasetti, joka täyttää valintakriteerit.
2. Konfiguroidaan simulointi vastaamaan halutun rakennuksen määrittelyjä.
3. Valitaan tulokset suorituskyvyn validoimiseksi. Tyypillisenä esimerkkinä mainittakoon huonelämpötila, lämmityskuormat, pintalämpötilat, lämpövuodot jne.
4. Vertaillaan simulointituloksia mittaustuloksiin. Tehdään vertailevia arviointeja käyttäen useita eri apuvälineitä ja ohjelmia:
 - Graafisesti. Piirretään simulointi- ja mittaustulokset.

- Numeerisesti. Vertaillaan etenkin simulointi- ja mittaustulosten numeerisia ominaisuuksia, kuten kulunutta kokonaisenergiaa, maksimilämpötilaa tai minimilämpötilaa. Tilastollisella normalisoinnilla voidaan parantaa numeeristen vertailujen käytettävyyttä.
5. Arvioidaan lähtötietojen epävarmuustekijöiden vaikutusta simulointituloksiin. Rakennuksen ominaisuuksista geometriset ominaisuudet ovat suhteellisen luotettavia, kun taas termiset ominaisuudet voivat vaihdella esimerkiksi kosteuden vaikutuksesta. Useita tilastollisia menetelmiä voidaan käyttää epävarmuustekijöiden selvittämiseksi. Mahdolliset menetelmät voivat sisältää differentiaalisia herkkyyksianalyyssejä (edellyttää lineaarisuutta), Monte Carlo -menetelmää jne.

3.1.3 BESTEST

Lähteessä (Judkoff & Neymark 1995) on esitetty menettely rakennuksen kokonaisenergiankulutuksen simulointiohjelmien systemaattiseen testaukseen ja eroavaisuuksien diagnosointiin (ns. BESTEST). Metodiikka muodostuu yhdistelmästä empiiristä validointia, analyttistä validointia ja vertailevia analysointitekniikoita. Menetelmän kenttätutkimuksia tehtiin joukolla "referenssiohjelmia" (BLAST, DOE2, ESP, SERIRES, S3PAS, TASE ja TRNSYS), jotka edustivat parasta yksityiskohtaisten simulointiohjelmien nykytilannetta (state-of-the-art) Yhdysvalloissa ja Euroopassa. Myöhemmin testattiin myös muita ohjelmia.

BESTEST-menetelmä koostuu sarjasta huolellisesti määriteltyjä testirakennuksia, jotka systemaattisesti etenevät erittäin yksinkertaisesta suhteellisen realistiseen rakennukseen. BESTEST-diagnostinen menetelmä koostuu 39 rakennussimuloinnista. Tuloksia, kuten vuosittaisia kuormia, vuosittaisia maksimi- ja minimilämpötiloja, vuosittaisia huipputehoja ja joitakin tunnittaisia tietoja, verrataan ja käytetään diagnostisoinnissa määrittämään eroavaisuuksista vastuussa olevat algoritmit. Monimutkaiset, vaikkakin geometrisesti yksinkertaiset, tapaukset testaavat ohjelmien kykyä mallintaa erilaisten ominaisuuksien vaikutuksia, esimerkiksi termisten massojen, suoran auringonsäteilyn (ikkunoihin), ikkunoiden varjostusten, sisäisten lämpökuormien, vuotoilmavirtojen, alapohjarakenteiden, ikkunoiden koon ja suuntauksen sekä termostaattisen takaisinkytkennän.

Arkkitehdit, insinöörit, ohjelmankehittäjät ja tutkijat voivat käyttää BESTEST-menetelmää usealla tavalla, esimerkiksi:

- **vertailla muiden rakennuksen energiasimulointiohjelmien tuloksia esitettyihin referenssituloksiin**

- vertailla useita rakennuksen energiasimulointiohjelmaa määrittelemään niiden väliset eroavaisuudet
- diagnosoimaan algoritmien aiheuttamat erot rakennusten energiasimulointiohjelmien välillä
- verrata ohjelmaa sen aikaisempaan versioon varmistamaan, että vain tarkoitetut muutokset koodiin on tehty
- verrata ohjelmaa itseensä yksittäisen algoritmimuutoksen jälkeen, jotta ymmärrettäisiin algoritmien välinen herkkyys.

HERS BESTEST on yksinkertaistettu versio BESTEST:stä, joka on alunperin kehitetty varmistamaan kodin energiajärjestelmien laskentaohjelmien oikeellisuutta. HERS BESTEST -menetelmässä analysoidaan 21 erilaista perusjärjestelmän versiota, joita verrataan referenssilaskelmiin.

3.1.4 Simulointiohjelmien validointeja

3.1.4.1 BESTEST-validointi

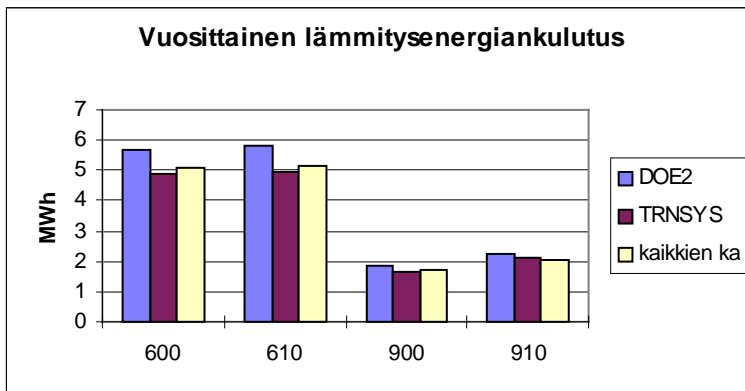
BESTEST-menetelmän yhteydessä on esitetty kahdeksan eri simulointiohjelman tulokset BESTEST-menetelmän mukaisista laskelmista (Judkoff & Neymark 1995). Näissä tuloksissa eri ohjelmien laskemat vuosittaiset lämmitysenergiankulutukset vaihtelivat keskenään 28 % kevyissä rakennuksissa ja 39 % raskaissa rakennuksissa. Jäähdytysenergiankulutukset vaihtelivat 37 % kevyissä rakennuksissa ja peräti 66 % raskaissa rakennuksissa. Vastaavasti lämmitystehontarve vaihteli 23 % kevyissä rakennuksissa ja 39 % raskaissa rakennuksissa sekä jäähdytysenergiantarve 17 % kevyissä rakennuksissa ja 35 % raskaissa rakennuksissa.

BESTEST-menetelmän tuloksista on päätelty, että energiasimulointiohjelmat toimivat hyvin, kun lämmönsiirto on yksidimensioista lämpövirtaa kiinteiden pintojen, kuten ovien ja kattojen, kautta (Anon 1996). Ongelmia esiintyy, kun muut mekanismit, esimerkiksi auringonsäteily ikkunoiden kautta tai lämpöhäviö maahan, alkavat hallita. Myös kosteuskuormien laskenta-algoritmeissa voi olla ongelmia. Siten energiasimulointi vaikuttavat suhteellisen tarkoilta laskelmissa, joissa on käytössä kylmä ilmasto, kohtuullisen kokoiset ikkunat ja hyvä alapohjan eristys. Laskelmien varmuutta ei voida taata kuumissa ilmastoissa, kun ikkunapintaa tai termistä massaa on paljon.

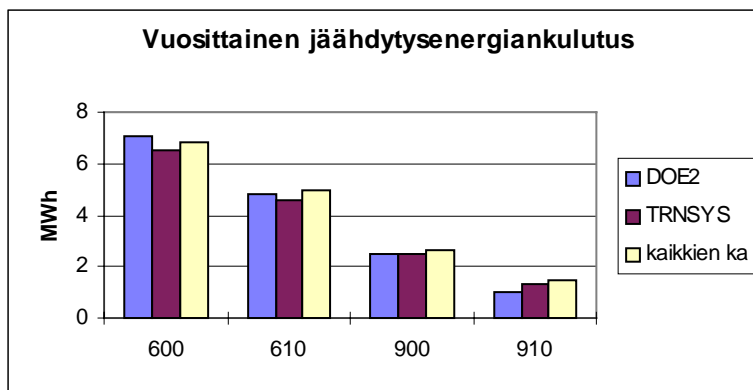
Kuvissa 4 ja 5 on esitetty BESTEST-menetelmällä DOE:lla ja TRNSYS:lla lasketut vuosittaiset lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutukset sekä kaikkien tapausten keskiarvot. Kuvien tapaukset ovat seuraavat:

- 600 = kevyt rakenne
- 610 = kevyt rakenne + auringonsäteilyltä suojaava lippe
- 900 = raskas rakenne
- 910 = raskas rakenne + auringonsäteilyltä suojaava lippe

Esitetyissä tapauksissa ikkunoita oli vain etelään. Laskelmissa käytettiin TRNSYS:n versiota 13.1 ja DOE:n versiota 2.1D.



Kuva 4. BESTEST-menetelmällä DOE:lla ja TRNSYS:lla lasketut vuosittaiset lämmitysenergiankulutukset sekä kaikkien mukana olleiden ohjelmien keskiarvot.



Kuva 5. BESTEST-menetelmällä DOE:lla ja TRNSYS:lla lasketut vuosittaiset jäähdytysenergiankulutukset sekä kaikkien mukana olleiden ohjelmien keskiarvot.

Lämmitysenergiankulutuksissa DOE:n lasketut tulokset ovat suurempia kuin TRNSYS:n (tapauksessa 600 15 %, 610 14 %, 900 12 % ja 910 7 % suurempi). TRNSYS:n antamat tulokset ovat lähempänä kaikkien ohjelmien keskiarvoa kuin DOE:n tulokset lämmitysenergiankulutuksessa.

Jäähdytysenergiankulutuksissa DOE:n laskema tulos oli suurempi kuin TRNSYS:n kevyillä rakenteilla 600 (8 %) ja 610 (5 %), kun taas raskailla rakenteilla 900 (1 %) ja 910

(26 %) TRNSYS:n tulos oli suurempi kuin DOE:n. Jäähdytysenergiankulutuksissa TRNSYS:n tulokset olivat kaikissa tapauksissa pienemmät kuin kaikkien ohjelmien keskiarvot ja raskaissa rakenteissa lähempänä keskiarvoa kuin DOE:n tulokset.

3.1.4.2 IEA Annex 21 -validointi

International Energy Agency (IEA) Annex 21:ssä tehtiin empiiristä validointia 25. eri ohjelma- tai käyttäjäyhdistelmällä (Eppel 1993). Lämmitysenergiankulutuksia ja maksimi- ja minimilämpötiloja verrattiin mittaustuloksiin yksinkertaisissa yksivyöhykkeisissä testihuoneissa. Huolimatta rakennuksen yksinkertaisuudesta ohjelmien laskemat energiankulutukset vaihtelivat 50 % ja lämpötilat jopa 11 °C.

DOE2.1E:llä lasketut energiankulutukset olivat 14 - 27 % pienemmät kuin mitatut kulutukset ja TRNSYS 13.1:llä lasketut 26 - 37 % pienemmät kuin mitatut. DOE2.1E:llä lasketut minimilämpötilat olivat 1,5 - 3 °C alhaisemmat kuin mitatut lämpötilat ja TRNSYS 13.1:llä lasketut 0,5 - 1,5 °C alhaisemmat kuin mitatut. DOE2.1E:llä lasketut maksimilämpötilat olivat 0,5 - 3 °C suuremmat kuin mitatut lämpötilat ja TRNSYS 13.1:llä lasketut välillä (käyttäjistä riippuen) 1 °C pienempi ja 0,1 - 4 °C suurempi kuin mitattu.

3.1.4.3 METOP-tapaus

Matalaenergiatoimistotalo eli METOP on kaksikerroksinen rakennus, jossa on yhteensä 10 huonetta. Rakennuksessa on muuttuvilmavirtainen ilmastointi ja lämpötilaa säädetään huonekohtaisesti. Lämmitys on toteutettu pelkästään ilmalämmityksenä. Ilmastoinnin keskuslaitteistolla ovat puhaltimet, LTO-laite, sekoitusosa ja ilman esilämmitys. Huoneyksikössä ovat jälkilämmitys ja ilmavirran säätö. Alakertaan tulo- ja poistoilma johdetaan lattian alla olevassa kaksoiskuorilaatassa ja yläkertaan yläpohjan ontelolaatan onteloiden kautta. Yläkerran jälkilämmityspatterit sijaitsevat ennen onteloita.

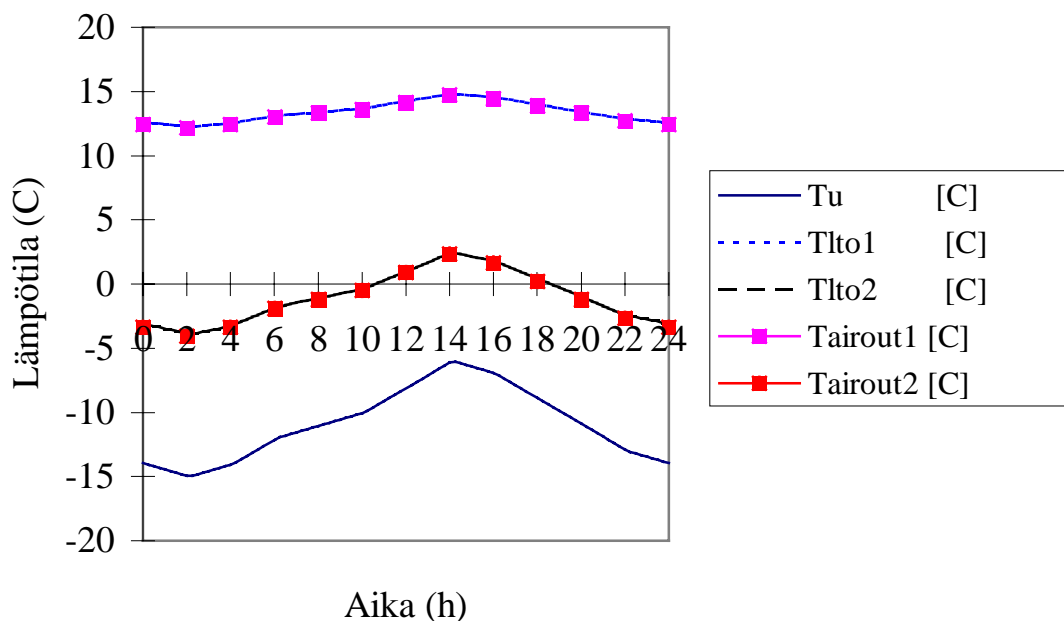
METOP-tapauksessa verrattiin TRNSYS 13.1 -ohjelmalla simuloituja ja mitattuja energiankulutuksia (Parvio 1992). Simuloiduissa tapauksissa laskennallinen kokonaissähkönkulutus on 85 - 99 % mitatusta arvosta. Pelkän rakennuksen (IV-kone pois) osalta simuloidut sähkötehot ovat 68 - 119 % mitatusta tehosta. Yhdessä testihuoneessa simuloidut sähkötehot ovat 83 - 146 % mitatusta. Kun ilmastointikoneen energiankulutus erotetaan rakennuksen vaipasta tai tarkastellaan vain yhtä huonetta, laskelmien tarkkuus huononee. Suurin virhelähde on vuotoilmanvaihto. Simuloidut

energiankulutukset vastaavat jo 6. tunnin tarkastelujaksolla varsin hyvin mitattuja arvoja.

3.1.5 NMF-mallien käyttö TRNSYS:ssa

NMF-mallien käytettävyyttä TRNSYS 14.2:ssa testattiin simuloimalla ilmastointikonetta, johon kuului LTO ja lämmityspatteri. TKK:n LVI-tekniikan laboratorio teki vastaavat laskelmat IDA-ympäristössä. Simulointia varten tarvittavat mallit käännettiin NMF Translatorilla TRNSYS 14.2:n vaatimaan muotoon. Näiden käännettyjen mallien perusteella tehtiin TRNSYS:iin soveltuva ajokelpoinen DLL. TRNSYS:iin tehtiin mallien mukainen syöttötiedosto eli ns. deck. Ulkolämpötilana käytettiin T_u -käyrän mukaista arvoa kunakin ajanhetkenä (Kuva 6). TRNSYS-simuloinnit tehtiin 0,25 h:n eli 15 min:n aika-askeleella.

LTO:lta lähtevien virtausten lämpötilat



Kuva 6. TRNSYS:lla ja IDA:lla lasketut LTO:lta lähtevät ilman lämpötilat. Erot lämpötiloissa ovat niin pienet, ettei niitä voida havaita kuvasta. T_u = ulkolämpötila, $T_{lto1}/T_{airout1}$ = TRNSYS:lla/IDA:lla laskettu LTO:lta lähtevä tuloilman lämpötila, $T_{lto2}/T_{airout2}$ = TRNSYS:lla/IDA:lla laskettu LTO:lta ulospuhallettavan ilman lämpötila.

Myöskään lämmityspatterilta lähtevän ilman ja veden lämpötiloissa ei eri ympäristöissä laskettuna ollut merkittäviä eroja. Lähtevän ilman lämpötiloissa laskentaympäristöjen tulosten ero oli $-0,05 \dots 0,17 \text{ }^\circ\text{C}$ ja lähtevän veden lämpötiloissa $-0,04 \dots 0,09 \text{ }^\circ\text{C}$.

Suurin ongelma NMF-mallien käyttöön TRNSYS-ympäristössä olivat muuttujien tyypit. Fortran-koodeista osa oli määritelty tyypiksi double precision ja osa tyypiksi real. Näiden välinen tyyppimuunnos ei tapahtunut automaattisesti, joten ko. tyypit oli muutettava koodiin toisiaan vastaaviksi. Tämä on yleinen ongelma laajemminkin Fortran-ohjelmakirjastojen kanssa.

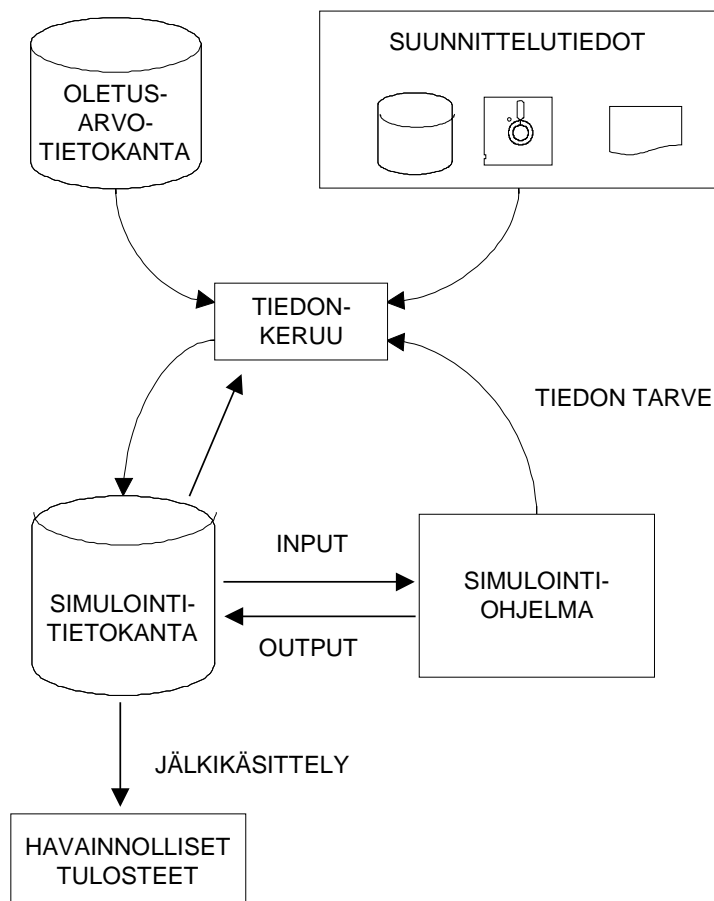
4. Simulointityökalun perusteiden määrittely

Talotekninen suunnitteluprosessi jakautuu hanke-, luonnos- ja toteutussuunnitteluun. Lisäksi suunnittelijalle voi kuulua rakennusaikaisia, käyttöönottoon liittyviä ja erillistehtäviä.

Talotekniikan suunnittelun tehtäväluettelon (TATE 95) mukaan hankesuunnittelussa tarkistetaan ja täydennetään lähtötietoja, vertaillaan ja havainnollistetaan taloteknisiä laatusovaihtoehtoja, osallistutaan hankkeen ajoitukseen ja toteutustavan suunnitteluun, määritellään talotekniset suunnitteluvaihtoehdot, vertaillaan ja yhteensovitetaan eri suunnittelualueiden suunnittelutavoitteet sekä hyväksytetään hankesuunnittelu. Hankesuunnittelulla tarkoitetaan siis suunnittelun alkuvaihetta.

TATE 95:n mukaan luonnossuunnittelussa vertaillaan tontinkäyttö- ja massoitteluvaihtoehtoja talotekniikan osalta, laaditaan talotekniset ehdotussuunnitelmat, vertaillaan eri suunnittelualojen ratkaisuvaihtoehtoja, vertaillaan taloteknisten ratkaisuvaihtoehtojen kustannuksia, valitaan ja hyväksytetään toteutettavat talotekniset ratkaisut, vertaillaan ja yhteensovitetaan eri suunnittelualojen toteutettavat ratkaisut, laaditaan luonnossuunnitelma-asiakirjat, vertaillaan ja yhteensovitetaan eri suunnittelualojen luonnossuunnitelmat, tarkistetaan kustannus- ja ylläpitotavoitteet sekä hyväksytetään luonnossuunnitelma. TATE 95:n mukaan toteutussuunnittelussa tarkennetaan toteutussuunnittelun lähtötiedot, laaditaan toteutussuunnitelma-asiakirjat, vertaillaan ja yhteensovitetaan eri suunnittelualojen toteutussuunnitelmat sekä hyväksytetään toteutussuunnitelma.

4.1 Laskentaohjelmaympäristön määrittely



Kuva 7. Laskentaohjelmaympäristön periaate.

Kuvassa 7 on esitetty laskentaohjelmaympäristön periaate. Varsinainen simulointiohjelma sisältää syöttötietojen luvun, laskentamallit, ratkaisurutiinin (solver) ja tulostietojen kirjoittamisen. Simulointitietokanta on tiedon ylläpidon ja tiedon tallentamisen väline. Simulointitietokantaan tallennetaan kaikkien eri simulointitapausten lähtö- ja tulostustiedot. Simulointiohjelmalla on tietotarpeita, jotka vaikuttavat tiedonkeruuseen. Simulointitietokantaan on tallennettu tieto tarvittavista syöttötiedoista. Tieto kerätään mahdollisimman automaattisesti oletusarvokirjastoista ja kulloinkin käytettävissä olevista suunnittelutiedoista, jotka voivat olla tietokannoissa, tiedostoina tai paperidokumentteina. Oletusarvotietokanta on avoin sovellusriippumaton tietokanta, joka sisältää simuloinnissa tarvittavia tietoja oletus- ja/tai tyyppiarvoina. Simuloinnin jälkeen tapahtuu tietojen jälkikäsitteily hyödyntäjälle mahdollisen havainnolliseen muotoon. Tulosteet eivät tule suoraan simulointiohjelmasta, koska ne voivat sisältää

tietoa myös simuloinnin lähtötiedoista. Ideaalitapauksessa laskentaohjelmaympäristöä hallitaan yhdellä käyttöliittymällä.

4.2 Työkalun tulosteiden määrittely

4.2.1 Visualisointitekniikat

Visualisointitekniikoita ovat kuvaajat, vääräväriesitykset, pintaesitykset, tasa-arvokäyrät, tasa-arvopinnat, hajapisteiden esitykset, partikkelit, vektorit, tilavuussävytys, animaatio, FEM, pallot ja tikut, force-feedback-käyttöliittymät, sonifikointi sekä eri tekniikoiden yhdistelmät (<http://www.csc.fi>).

Vääräväriesityksessä muodostetaan kuvaus tutkittavasta suureesta värikarttaan. Tavallinen tapa on tehdä lineaarikuvaus suureen arvon ja kuvan harmaasävyyn välille. Pintaesityksessä $z = f(x,y)$ ja väritasa-arvoalueet tehdään joko jakamalla osiin tai yksiulotteisella tekstuurilla. Tasa-arvokäyrä piirretään kohtaan, jossa $f(x,y) = k$ (kynnysarvo). Tasa-arvopinta piirretään kohtaan, jossa $f(x,y,z) = k$ (kynnysarvo).

Hajapisteitä eli diskreetisti sijaitsevia suureita voidaan esittää piirtämällä annettuihin koordinaattipisteisiin, luokittelua kuvakkeilla, väreillä, muuttamalla geometrisia ominaisuuksia ja interpoloimalla pisteitä hilaan. Partikkelit ovat painottomia olioita, jotka liikkuvat virtauskentässä ja joiden liike saadaan integroimalla nopeuskentässä. Vektoreja käytetään tyypillisesti virtauksien esittämiseen, jolloin vektorin suunta näyttää virtauksen suunnan. Yleensä vektorin pituudella näytetään virtauksen voimakkuus.

Tilavuussävytyksessä kappaleen tilavuusalkiolla eli vokseleilla on väri- ja läpinäkyvyysarvot. Kuva tuotetaan katselutasolle pikseli kerrallaan yhdistämällä kuhunkin pikseliin niiden vokselien tieto, jotka kyseisen pikselin ja silmän välinen suora lävistää. Animaation avulla voidaan helpottaa kolmiulotteisten objektien hahmottamista ja tutkia aikariippuvaa dataa. Pallo ja tikku -esitystapaa käytetään erityisesti molekyyylimallien esittämiseen.

Force-feedback-menetelmissä käytetään ohjauslaitteita, joissa on voimavasteeseen perustuva palaute. Sonifikaatiossa suureen arvo ohjaa äänen ominaisuuksia. Ohjattavissa olevia ominaisuuksia ovat: korkeus, voimakkuus, kesto, aaltomuoto, syytyminen, vaimeneminen, suunta, etäisyys, tremolo ja vibrato.

4.2.2 Mahdolliset tulosteet

TRNSYS-ohjelmassa lasketaan huonetilojen lämpötiloja, kosteuksia, tehontarpeita, energiankulutuksia sekä rakenteiden pintalämpötiloja. Ilmastointijärjestelmästä tarkastellaan ilmastointiprosessien, kuten lämmitys- ja jäähdytyspatterien tai ilman sekoituksen, toimintaa. Ilmastoinnin yksikköprosesseista lasketaan laitteelta lähtevä lämpötila ja kosteus erilaisilla säätöviesteillä sekä prosessien tuottama lämmitys- tai jäähdytysteho. Lisäksi lasketaan kumulatiivisesti laitteiden ja niistä muodostuvien järjestelmien energiankulutusta.

TRNSYS:ssa huoneilman oletetaan olevan täysin sekoittunutta eli tietyn tilan sisälämpötila on sama koko huoneessa. Yksittäisen huoneen sisälämpötilan muutokset aiheutuvat lähinnä tapahtuvista kuormitusmuutoksista (esimerkiksi ulkoisista auringon säteilykuormista tai sisäisistä henkilö-, laite- tai valaistuskuormista) ja säädön hitaudesta tai muusta kyvyttömyydestä reagoida niihin. Myös mahdollinen laitejärjestelmien virheellinen mitoitus vaikuttaa keskeisesti lämpötilatasoihin. Koska huonelämpötilaa kuvaa vain yksi lukuarvo, huonekohtaisia lämpötilakenttiä ei voida esittää. Tällöin ainoaksi mahdollisuudeksi jää usean eri suuntiin sijaitsevan huoneen lämpötilavaihteluiden ja niiden syiden esittäminen. Havainnollisuutta voidaan lisätä visualisoimalla myös tietyn tilan pintalämpötiloja. Lisäksi voidaan vertailla geometrialtaan ja suuntaukseltaan samanlaisten, mutta varustetasoltaan erilaisten huoneiden lämpötiloja. Vastaavalla tavalla voidaan visualisoida myös huoneilman kosteutta ja huoneen tehontarvelaskentaa.

Ilmastoinnin yksikköprosessien toimintaa voidaan havainnollistaa laitteiden syöttötietojen vaihtuessa, esimerkiksi patterille tulevan ilman tai veden lämpötilan tai määrän muuttuessa tai säätöventtiilin ohjausviestin vaihdellessa. Samalla vaihtelevat lähtevän ilman tila ja laitteen luovuttama teho. Myös säätöjärjestelmän toimintaa voidaan havainnollistaa esittämällä esimerkiksi sen toimintaperiaatetta tai asetusarvon ja mittausarvon välistä yhteyttä.

4.2.3 Suunnittelun alkuvaiheen simulointityökalun tulosteet

Hankesuunnitteluvaiheessa simulointia voidaan käyttää esittelymateriaalin sekä erilaisten selvitysten tuottamiseen. Lähtötietoina ovat haluttu sisäilmasto, sisäiset lämpökuormat ja alustavat käyttöajat, tilaluettelo sekä muiden suunnittelualojen esitykset.

Esittelymateriaalia tuotetaan talotekniikan suunnittelun tehtäväluettelon (TATE 95:n) vaiheessa 2.2 "Taloteknisten laatutasovaihtoehtojen vertailu ja havainnollistaminen", jossa esitellään tyyppiratkaisuja sekä vertaillaan niiden ominaisuuksia ja kustannuksia.

Simuloimalla tyyppiratkaisujen avulla saavutettavissa olevia sisälämpötiloja voidaan havainnollistaa sisäilmaston laatuasioja. Lisäksi voidaan tarkastella sisälämpötilojen pysyvyyttä eri tyyppiratkaisuissa. Simuloimalla voidaan havainnollistaa erilaisten suuntausten, rakennuksen muodon, rakennetyyppien ja ikkunavarjostusten vaikutusta energiankulutukseen.

TATE 95:n mukaisessa hankesuunnitteluvaiheessa 2.5 "Taloteknisten suunnittelutavoitteiden määrittely" ja arkkitehtisuunnittelun tehtäväluettelon (ARK 95:n) hankesuunnitteluvaiheessa 2.7 "Kustannustavoitteiden asettaminen" selvitetään mm. ylläpitokustannukset. Tätä varten tarvitaan alustava tieto energiankulutuksesta, joka voidaan simuloida tunnetuilla tiedoilla sekä tyyppirakenteilla ja muilla tyyppitiedoilla.

4.2.4 Luonnossuunnittelun simulointityökalun tulosteet

Luonnossuunnitteluvaiheessa simulointia käytetään selvitysten ja kustannusvertailujen tuottamiseen. Talotekniikan suunnittelun tehtäväluettelon (TATE 95:n) luonnossuunnitteluvaiheessa 3.2 "Tontinkäyttö- ja massoitteluvaihtoehtojen vertailu talotekniikan osalta" vertaillaan massoitteluvaihtoehtojen vaikutusta energiankulutukseen sekä investointi- ja ylläpitokustannuksiin. Tällöin lähtötietoina ovat massoitteluvaihtoehdot, tilaluettelo ja laatuasetiedot.

TATE 95:n luonnossuunnitteluvaiheessa 3.5 "Taloteknisten ratkaisuvaihtoehtojen kustannusvertailu" tehdään vertailuja investointi- ja ylläpitokustannuksista sekä energiankulutuksesta. Lähtötietoina ovat ehdotuspiirustukset, tilaohjelma, laatuasetiedot, alustavat rakennetiedot ja järjestelmävaihtoehdot.

TATE 95:n vaiheessa 3.8 "Luonnossuunnitelma-asiakirjojen laatiminen" lasketaan jäähdytys- ja lämmitystehot. Lähtötietoina ovat pohjapiirustukset, leikkaukset, julkisivut, huoneluettelo, tyyppihuonepiirustukset, rakennepiirustukset, rakennetyypit ja k-arvot.

TATE 95:n vaiheessa 3.10 "Kustannus- ja ylläpitotavoitteiden tarkistaminen" tehdään investointi- ja ylläpitolaskelmat, joita varten tarvitaan esimerkiksi simuloimalla tehty energiatarkestelu. Lähtötietoina ovat tässä vaiheessa pohjapiirustukset, huoneluettelot, rakennetiedot, järjestelmätiedot ja laiteluettelot.

4.2.5 Toteutussuunnittelun simulointityökalun tulosteet

Talotekniikan suunnittelun tehtäväluettelon toteutussuunnitteluvaiheessa 4.2 "Toteutussuunnitelma-asiakirjojen laatiminen" lasketaan huoneiden lämmitys- ja jäähd-

dytystarpeet. Lähtötietoina ovat pohjapiirustukset, julkisivupiirustukset, rakennetyypit, ikkunakaaviot, huoneselostus, laatutasotiedot ja järjestelmäkaaviot.

4.2.6 Ylläpidon simulointityökalun tulosteet

Talotekniikan suunnittelun tehtäväluettelon vaiheissa 5.1 "Suunnitelmatietoihin perustuvan käyttö- ja huoltosuunnitelman laatiminen" ja 5.10 "Käyttö- ja huoltosuunnitelman täydentäminen rakennusaikaisilla tiedoilla" tehdään käyttö- ja huoltosuunnitelma, jolloin voidaan simuloimalla tehdä erilaisia säätötarkasteluja (esimerkiksi asetusarvojen, säätöstrategioiden, säätöparametrien virityksen vaikutus huonelämpötiloihin ja energiankulutukseen).

TATE 95:n vaiheessa 7.3 "Energian tavoitekulutuksen laskenta" lasketaan kuukausittaiset lämmön, veden ja sähkön tavoitekulutukset. Tällöin käytössä ovat kaikki suunnittelun eri vaiheiden aikana syntyneet tiedot.

4.2.7 Yhteenveto simulointityökalun tulosteista

Käytännön suunnittelutyö ei välttämättä etene täysin talotekniikan suunnittelun tehtäväluettelon mukaisesti, vaan erilaisia simulointeja voidaan tehdä kaikissa eri suunnitteluvaiheissa. On tapauskohtaista, millaisia simulointeja missäkin hankkeessa tehdään, mutta lähtötietojen tarkkuus luonnollisesti vaihtelee vaiheittain. Tärkeimpiä tulosteita ovat aina kulutustiedot (lämpö, sähkö, vesi) ja niiden kustannukset sekä tarkasteltavien tilojen lämpötilat ja viihtyisyysolosuhteet. Simuloitaviksi tiloiksi valitaan yleensä yksi tila joka ilmansuuntaan. Koko rakennuksen energiankulutus lasketaan summaamalla neliömäärittäin simuloitujen tilojen kulutusten perusteella. Simulointityökalun tulosteissa on tärkeitä esittää keskeiset lähtötiedot ja niiden muunnelmat, esimerkiksi eri ikkunaratkaisut, sekä niiden vaikutukset energiankulutukseen ja lämpötiloihin.

4.3 Oletusarvotietokannan määrittely

Oletusarvotietokanta on avoin sovellusriippumaton tietokanta. Se sisältää simuloinnissa tarvittavia oletus- ja tyyppi-arvoja, joita käytetään silloin, kun jotakin tietoa ei ole vielä käytettävissä, mutta simulointeja pitäisi kuitenkin jo tehdä. Tyyppi-arvot liittyvät tarkasteltaviin tiloihin, niiden rakenteisiin ja taloteknisiin järjestelmiin.

Raket-projektissa T611 selvitettiin, mitä lämpötekniisiin laskelmiin tarvittavaa tietoa kukin suunnittelija tuottaa. Lähteessä (Talopoika et al. 1990) on koottu eri lämpötekni-

ten simulointiohjelmien syöttötietoselvitysten pohjalta syöttötietotaulukko. Edellä mainittuja lähteitä on käytetty seuraavassa esitettävän oletusarvotietokannan taulujen tietosisällön määrittelyssä. Tietosisältömäärittelyihin on valittu sellaista tietoa, jota ei välttämättä ole käytettävissä jossakin simulointivaiheessa.

Koska rakennuspaikka on tiedossa, sitä ei tarvitse esittää oletusarvotietokannan rakennustiedoissa (Taulukko 3). Rakennuspaikkatietoa tarvitaan laskennassa käytettävien säätiöjen valinnassa. Ulkoseinien suuntauksia ei oletusarvoisesti sisällytetä oletusarvotietokantaan, koska tontin muoto ja koko vaikuttavat siihen, miten rakennus voidaan sijoittaa. Näin ollen suuntausvaihtoehdot on valittava tontin tietojen mukaan.

Tilatiedoissa (Taulukko 4) ovat tietotyyppinä tyyppitila, tyyppirakenne, tyyppi-ikkuna, suojaustyyppi, laatutasotyyppi ja tyyppikaluste, joiden sisältö on kuvattu seuraavassa. Tyyppitiloja ovat esimerkiksi toimisto, neuvotteluhuone, olohuone, makuuhuone tai muu valittu tila.

Tyyppitilatiedoissa (Taulukko 5) esitetään kuhunkin tyyppitilaan liittyvät ulkoilmavirrat, huonekorkeudet sekä sisäiset kuormat, niiden profiilit ja jakautuminen konvektio- ja säteilyosaan. Tässä on oletettu, että tyyppitilojen pinta-alat ja muut koot saadaan piirustuksista. Jos näin ei ole, voidaan tyyppitiloille esittää myös ko. tiedot. Laatutasotyyppitiedot (Taulukko 6) sisältävät sisälämpötila-arvoja.

Tyyppirakennetiedot (Taulukko 7) sisältävät tyyppillisten ulkoseinien, väliseinien, yläpohjien, alapohjien, välipohjien ja ovien tietoja. Tyyppitiloina, tyyppirakenteina, tyyppi-ikkunoina ja tyyppikalusteina on ajateltu käytettävän lähteessä (Lassila 1992) kuvattuja tietoja. Ko. lähteessä tyyppirakenteet on kuvattu materiaalikerroksittain. Jos käytetään jotain muuta lähdettä eikä materiaalikerroksia ole tiedossa, tarvitaan vähintään tiedot k-arvosta ja rakenteen massiivisuudesta. Oletusarvoisesti kaikki seinämä- ja ikkunapinnat ovat pystysuorassa, joten kallistusastetta ei ole otettu mukaan tietokannan tietoihin. Ikkunasuojausten oletetaan olevan 90°:een kulmassa, joten suojaustyyppitiedoissakaan (Taulukko 9) ei ole mukana kallistusastetta.

Tyyppi-ikkunatiedot (Taulukko 8) sisältävät mm. ikkunan k-arvon sekä läpäisykertoimet eri auringonsäteilyn tulokulmilla. Tyyppikalustetiedot (Taulukko 10) sisältävät simuloinneissa tarvittavaa tietoa kalusteista. Tyyppi-profiilitiedoissa (Taulukko 11) esitetään rakennuksen viikottaisen ja päivittäisen käytön aikataulu.

Taulukko 3. Rakennustiedot.

Tieto	Tietotyyppi
Muoto	Muototyyppi (suorakaide, I jne.)

Taulukko 4. Tilatiedot.

Tieto	Tietotyyppi
Tyyppi	Tyyppitila (toimisto, keittiö jne.)
Muoto	Muototyyppi
Sisäseinien suuntaukset	Liittyvän tilan laatutasotyyppi
Rakenteiden lkm (ei ikkunoita mukana)	Kokonaisluku
Rakenteet	Tyyppirakenne (us1, us2, vs1 jne.)
Ikkunoiden lkm	Kokonaisluku
Ikkunat	Tyyppi-ikkuna (ikk1, ikk2 jne.)
Ikkunasuojaus	Suojaustyyppi
Sisäilman laatutaso	Laatutasotyyppi
Kalusteet	Tyyppikaluste
Vuotoilmanvaihtokerroin	1/h

Taulukko 5. Tyypitilatiedot.

Tieto	Tietotyyppi
D2:n mukainen ulkoilmavirta	l/dm ²
Huonekorkeus	m
Henkilökuorma	W/m ²
Henkilökuorman konvektio-osuus	%
Henkilökuorman säteilyosuus	%
Sidottu lämmönluvutus	W/m ²
Henkilökuorman profiili	Tyypiprofiili
Laitekuorma	W/m ²
Laitekuorman konvektio-osuus	%
Laitekuorman säteilyosuus	%
Laitekuorman profiili	Tyypiprofiili
Valaistuskuorma	W/m ²
Valaistuskuorman konvektio-osuus	%
Valaistuskuorman säteilyosuus	%
valaistuskuorman profiili	tyypiprofiili

Taulukko 6. Laatutasotyyppitiedot.

Tieto	Tietotyyppi
Sisälämpötila talvella	°C
Sisälämpötila kesällä	°C

Taulukko 7. Tyyppirakennetiedot.

Tieto	Tietotyyppi
K-arvo	W/m ² K
Materiaalikerrosten lkm	Kokonaisluku
Materiaalikerroksittain	
Rakenne	Materiaalityyppi
Paksuus	mm
Lämmönjohtavuus	W/mK
Tiheys	kg/m ³
Ominaislämpökapasiteetti	J/kgK

Taulukko 8. Tyyppi-ikkunatiedot.

Tieto	Tietotyyppi
Lasiosan k-arvo	W/m ² K
Läpäisykerroin auringonsäteilyn tulokulmilla 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ja 90°	
Suora säteily	0 - 1
Absorptio (huoneeseen siirtynyt osa)	0 - 1
Hajasäteilyn läpäisykerroin	0 - 1
Hajasäteilyn absorptiokerroin	0 - 1

Taulukko 9. Suojaustyypitiedot.

Tieto	Tietotyyppi
Tyyppi	ei ole, ylä, vasen, oikea
Ulkonema	mm

Taulukko 10. Tyypikalustetiedot.

Tieto	Tietotyyppi
Massa/kalusteiden peittämä lattia-ala	kg/m ²
Ominaislämpökapasiteetti	J/kgK
Tiheys	kg/m ³

Taulukko 11. Tyypiprofiilitiedot.

Tieto	Tietotyyppi
Viikkoaikataulu	ma - su
Päiväaikataulu	0 - 24 h

4.4 Simulointitietokannan määrittely

Simulointeja voidaan tehdä eri suunnitteluvaiheissa. Suunnittelun alkuvaiheessa monet lähtötiedot ovat oletusarvoja tai arvauksia. Suunnittelun edetessä lähtötiedot tarkentuvat ja energiankulutuksen tavoitearvoja laskettaessa kaikki suunnittelutieto on käytettävissä. Jotta ollaan selvillä siitä, millä lähtötiedoilla tietty simulointi on laskettu, tallennetaan jokaisen simuloinnin käytetyt lähtötiedot ja tulostiedot simulointitietokantaan. Koska simulointitietokannan tulosteet voivat sisältää myös lähtötietoa, tehdään tulosteiden jälkikäsitteily vasta, kun tulosteet on ensin tallennettu simulointitietokantaan. Simulointitietokannan tarkka rakenne määräytyy tehtävien laskelmien mukaan.

5. Oletusarvotietokannan toteutus

5.1 Yleistä

Tietotekniikan kehittymisen myötä rakennuksen, sen lämmitys- ja ilmastointiprosessien sekä niiden säätöjärjestelmien toiminnan simuloiminen on yleistynyt ja tulee vieläkin yleistymään. Tähän asti rakennuksesta on saatu simuloinnissa tarvittavat toteutuneet lähtötiedot niin myöhäisessä vaiheessa, että simulointitulosten saamisen jälkeen ei ole ollut mahdollisuuksia vaikuttaa enää muihin kuin varsinaisten LVI-laitteiden valintaan. Vaikka huonelämpötilaa säädetäänkin pääasiassa LVI-laitteilla, voitaisiin esim. massiivisten rakenteiden lämmönvaraamiskykyä käyttää hyväksi lämpötilan säädössä. Simuloinnin avulla voidaan selvittää entistä paremmin rakennuksen käyttökustannukset ja rakennuksen energiatalous kokonaisuudessaan. Näin voidaan kalliintuntuisia ratkaisuja perustella pidemmän aikavälin säästöillä. Simuloinnin hyöty näkyy suoraan rakennuksen laadussa.

Rakennuksen energiatalous ja hyvä sisäilmasto ovat niin tärkeitä asioita, että ne tulisi voida huomioida kaikessa suunnittelussa rakennusprojektin alusta lähtien. Tämän vuoksi on nähty tarpeelliseksi koota oletusarvotietokanta, johon on kerätty yleisesti käytettyjä rakenteita, materiaaleja, rakennusosia yms., jolloin rakennusta voidaan simuloida jo hyvin varhaisessa vaiheessa. Rakennusprojektin edetessä tiedot tarkentuvat ja sitä kautta myös simulointitulokset.

Oletusarvojen kerääminen helpottaa ja nopeuttaa laskijan työtä, sillä järkeviä lähtötietoja ei tarvitse kerätä aina uudestaan. Ongelma on ollut myös se, että jopa samassa suunnittelutoimistossa eri suunnittelijat ovat käyttäneet erilaisia lähtöarvoja esim. laitteiden lämpökuormissa. Näin tulokset eivät ole keskenään vertailukelpoisia.

Tuotemallintamiseen tähtääviä tutkimushankkeita on käynnissä useita eri puolilla maailmaa. Tuotemallien puutteena on toistaiseksi kuitenkin ollut niiden rajoitukset, jotka eivät mahdollista välttämättä riittävän monipuolista reaali maailman objektien mallintamista. Tuotemalleissa tuotteen ominaisuudet oletetaan vakioiksi ja muuttuvia arvoja on vaikea ilmoittaa reaali maailman vaatimalla tavalla. Esimerkkinä mainittakoon mineraalivillan kosteuden vaikutus lämmöneristysominaisuuksiin tai sälekaihtimen pölyisyyden ja kulman vaikutus huoneeseen tulevaan valonsäteilyyn. Erilaisia ratkaisumalleja tähän ongelmaan on kehitteillä.

Tuotemallien ollessa vielä varsin puutteellisia on tässä tutkimuksessa pyritty lähinnä keräämään tietoa rakennuksesta, ja saamaan se sähköiseen muotoon, josta sitä on

edelleen tulevaisuudessa helppo jalostaa haluttuun muotoon. Tietokantaan pääsyn tulee olla mahdollista Internet-pohjaisella käyttöliittymällä.

5.2 Oletusarvotietokannan pääosat

5.2.1 Materiaalien oletusarvot

Oletusarvotietokannassa olevassa Materiaalit-aulussa annetaan perustiedot tavallisesti käytetyistä rakennusmateriaaleista. Eri simulointiohjelmat tarvitsevat tietoja kuivatiheydestä, lämmönjohtavuudesta ja ominaislämpökapasiteetista. Lämmönjohtavuuteen vaikuttaa mm. asennustavat ja käyttöympäristö. Esimerkiksi mineraalivillalla voidaan erottaa seuraavat tapaukset:

- Eristys on molemmilta puolilta kiinni tiiviissä pinnassa (esim. betoni, tiiliverhous, tiivis levy, muovikalvo, eristyspaperi tms. pitävästi saumattuna).
- Seinässä olevan eristyksen lämmin puoli on kiinni tiiviissä pinnassa ja toisella puolella on tuulensuoja ilman tiivistävää saumausta (esim. rakennuslevy puskusaumoin ja naulakiinnityksellä tai rakennuspaperi puristetuin saumoin, mutta tiivistämättömin limisaumoin).
- Ylä- tai alapohjassa olevan eristyksen toinen puoli on kiinni tiiviissä pinnassa, toisella puolella on tuulensuoja ilman tiivistävää saumausta tai ilmatila, jossa virtausnopeus on enintään 1 m/s.
- Seinässä olevan eristyksen toinen puoli on kiinni tiiviissä pinnassa ja toisella puolella on ilmaräily tai -tila. Ylä- tai alapohjassa olevan eristyksen toisella puolella on ilmatila, jossa virtausnopeus voi olla suurempi kuin 1 m/s.

Näiden seikkojen vuoksi mineraalivillan lämmönjohtavuus vaihtelee välillä 0,037 - 0,045 W/mK. Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C4 (Ympäristöministeriö. 1979) on esitetty mineraalivillalle arvoa 0,040 W/mK (normaaliset lämmön johtavuudet 0,050 - 0,160 W/mK), joka vaikuttaa varsin hyvältä arviolta, ellei tarkempi arvo ole tiedossa. Uudempi, mutta ehdotuksen tasolle jäänyt C4 (Ympäristöministeriö. 1991) antaa mineraalivillan lämmönjohtavuuden arvoksi 0,045 W/mK (normaaliset lämmönjohtavuudet 0,055 - 0,10 W/mK). Hankkeen edistyessä arvo voidaan ja pitääkin tarkentaa, kun tiedetään hankkeessa käytettävät rakennetyypit. Lämmönjohtavuudesta laskelmissa käytetään yleensä normaalista lämmönjohtavuutta, mutta kaikki lähteet eivät ilmoita, onko kyseessä juuri normaalin lämmönjohtavuus. Tämän vuoksi

oletusarvotietokannan lämmönjohtavuuden arvoihin tulee suhtautua kriittisesti. Arvot ovat kuitenkin hyvin suuntaa-antavia.

Tiheydessä eri tuotteiden arvot eroavat huomattavasti toisistaan. Ero aiheutuu paitsi tuotannollisista syistä myös tuotteiden käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi mineraalivillan tiheys vaihtelee 15 - 300 kg/m³. Siksi näistä tuotteista mainitaan tyypillinen käyttö-kohde, jonka perusteella tietokannan käyttäjä osaa valita tarvitsemansa tuotteen. Tiheyden vaihtelun selvittämiseksi voitaneen käyttää seuraavaa lajittelua, joka perustuu mineraalivillan käyttötarkoitukseen (Ympäristöministeriö. 1979).

• Pehmeät rakennuseristeet.	$\rho = 30 - 40 \text{ kg/m}^3$
• Tuulensuojalevyt.	$\rho = 80 \text{ kg/m}^3$
• Tuulensuojalevyt metallirunkoon	$\rho = 140 - 200 \text{ kg/m}^3$
• Puhallusvillat	$\rho = 30 - 40 \text{ kg/m}^3$
• Jäykät rakennuseristeet 100 - 170 kg/m³	$\rho =$
• Seinäelementeissä	$\rho = 70 \text{ kg/m}^3$
• Vesikattoeristeet	$\rho = 105 - 170 \text{ kg/m}^3$
• Palonsuojaeristeet	$\rho = 100 - 140 \text{ kg/m}^3$

Vaihteluvälit ovat tuulensuojalevyissä, jäykissä rakennuseristeissä ja vesikattoeristeissä edelleen suuria, mutta poimimalla erikoistapaukset pois voidaan vaihteluväli saada riittävän pieneksi, jotta se voidaan esittää yhdellä oletusarvolla. Tiedot rakennuksesta tarkentuvat vasta rakennusprojektin myöhemmässä vaiheessa. Käyttäjän työtä helpottamaan tietokantaan on liitetty käyttötapasarake, jonka avulla oikean materiaalin löytäminen helpottuu (Taulukko 12 "Muuta" -rivi). Muissa rakennusmateriaaleissa voidaan helpommin löytää oletusarvot. Tietolähteitä ovat mm. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C4 (Ympäristöministeriö. 1979), C4 ehdotus (Ympäristöministeriö. 1991) ja valmistajien ilmoittamat tiedot (Partek Paroc Oy Ab, 1997).

Taulukko 12. Materiaalitietojen taulu.

	Tietotyyppi	Yksikkö	Esimerkki
Aine, tarvike	Text		Kipsilevy
Tuotenimi	Text		Gyproc GN
Tiheys	Single	kg/m ³	699,5
Lämmönjohtavuus (normaalinen)	Single	W/mK	0,15
Ominaislämpökapasiteetti	Single	kJ/kgK	0,84
Muuta	Text		Katoissa, (lämmönjohtavuuden arvo ei ole normaalin)

5.2.2 Ikkunat

5.2.2.1 Ikkunoiden tunnuksset

Ikkunan rakenne ilmoitetaan usein kirjaintunnuksilla, jotka kertovat ikkunan rakenteen ja toimintatavat. Käytettävät kirjaintunnukset ovat (Fenestra Oy, 1995):

- **MSE** sisäänaukeava kaksipuitteinen kolmilasinen ikkuna (sisäpuitteessa eristyslasi)
- **MSK** sisäänaukeava kolmipuitteinen kolmilasinen ikkuna
- **MS** sisäänaukeava kaksipuitteinen kaksilasinen ikkuna
- **MEK** kiinteä ikkuna, jossa kaksi- tai kolminkertainen eristyslasi
- **IO-S** sisäänaukeava yksilehtinen ikkunaovi
- **IO-U** ulosaukeava yksilehtinen ikkunaovi
- **IO-SU** sisään-ulosaukeava kaksilehtinen ikkunaovi.

5.2.2.2 Ikkunoiden lämmönläpäisykertoimet

Rakennuksen vaipan osista ikkunalla on heikoin lämmöneristävyys ja ikkunoiden vaikutus rakennuksen lämpö- ja energiataseeseen puolestaan suuri. Siksi ikkunoiden mallinukseen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Koska ikkunavalmistajia on paljon ja samantyyppisten ikkunamallien tekniset arvot saattavat poiketa hyvinkin paljon eri valmistajilla, joudutaan oletustietokannan ikkunoihin valitsemaan joitain tyypillisiä malleja. Ikkunoiden ominaisuuksiin vaikuttavat mm. lasien lukumäärä, selektiivilasien luku-

määrä ja karmimateriaalit. Eristyslaselementeissä käytetään usein myös argon- tai krypton- kaasua. Erityyppisillä selektiivilaseilla on myös erilaisia ominaisuuksia. Nykyisin lämmönläpäisykerroin valoaukon keskikohdassa saa olla enintään $2.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Ympäristöministeriö. 1985b).

Ikkunoihin liittyviä lähtötiedostoja on kaksi. Ensimmäisessä taulukossa on $12\text{M} \cdot 12\text{M}$ -ikkunasta annettu koko ikkunan U-arvo ja lasin keskiosan U-arvo. Tarkempaa laskentaa varten on erikseen vielä olemassa Karmit-taulu. Käyttämällä sekä Ikkunat- että Karmit- taulua voidaan suorittaa vielä tarkempia laskelmia kuin mitoitusikkunaa $12\text{M} \cdot 12\text{M}$ ikkunaa käyttäen. Osa tietojen eroavuuksista johtuu siitä, että tietoja on kerätty eri lähteistä.

Arvoja on ilmoitettu umpiolasi-ikkunasta, jossa on kolme lasia. Lasit ovat joko kirkkaita tai selektiivisiä ja kaasuina on käytetty ilmaa, argonia ja kryptonaa. MSE-tyyppisiä ikkunoita on myös listattu useita. Ikkunoissa on myös käytetty erilaisia välilistoja, esimerkiksi alumiinista $0,5 \text{ mm:n}$ listaa. (Hemmilä, 1996)

Lähteissä on lasien arvot esitetty yleensä minimi- ja maksimiarvojen välillä. Jotta tietokantaa pystytään käyttämään suoraan laskentaan, on ikkunoille jouduttu valitsemaan jotkut tyypilliset arvot, yleensä minimin ja maksimin keskiarvo.

Ikkunat- taulun arvoilla voidaan jo rakennusprojektin varhaisessa vaiheessa arvioida eri ikkunatyypin vaikutusta lämmitys- ja jäähdytyskustannuksiin tai -tarpeisiin. Laskelmat voivat olla pohjana ikkunatyypin valinnalle.

Taulukko 13. Ikkunat -taulu (lasiosa).

	Tietotyyppi	Yksikkö	Esimerkki
Tyyppi	Text		MSE
Tuote	Text		Sasmo, Maisema MSE179
Rakenne	Text		3 kirkasta lasia, joista 2 umpiorakenteena
Täytekaasu	Text		Ilma
U-arvo M12*M12 ikkunalla	Single	W/m ²	1,8
Lasiosan U-arvo	Single	W/m ²	1,88
Lasin keskiosan U-arvo	Single	W/m ²	1,85
Lasin reuna-alueen U-arvo	Single	W/m ²	2,26

5.2.3 Karmirakenteet

Karmimateriaalina käytetään enimmäkseen puuta. Ulkopuitteissa käytetään usein myös alumiinia. Lisäksi ikkunoissa saattaa olla erilaisia metallisia tai muovisia listoja eristyslasin välilistana ja puukarmi saattaa sisältää eristyskerroksia. Vakiokarmi-syvyydet ovat 103 mm ja 170 mm.

Karmirakenteet on tallennettu tietokantaan seuraavan taulukon esittämässä muodossa.

Taulukko 14. Karmit -taulu (lasiosa).

	Tietotyyppi	Yksikkö	Esimerkki
Nimi	Text		Sasmo, Maisema MSE179
Tyyppi	Text		MSE 175
Karmimateriaali	Text		Mänty
Puitemateriaali	Text		Mänty + PUR
Välilistamateriaali	Text		Alumiini
U-arvo	Single	W/m ²	1,22
Paksuus	Single	m	0,175

5.2.4 Rakennetyypit

Rakennetyyppien oletusarvoissa hyödynnetään materiaalitiedostoa, jolloin voidaan ainoastaan materiaalien keskinäisellä järjestyksellä ja materiaalikerrosten paksuudella kuvata tyypillisimmät rakennetyypit. Rakenteista annetaan myös U-arvo, koska kaavamaisesti materiaalikerrosten mukaan laskettu U-arvo voi poiketa oleellisesti todellisesta U-arvosta. Virhettä U-arvoon muodostuu esimerkiksi runkotolppien U-arvoa heikentävän vaikutuksen huomioonottamattajättäminen. Myös muut seikat, kuten esimerkiksi uritetun mineraalivillan käyttö, vaikuttavat oleellisesti U-arvon laskentaan, eikä voi olla varma, millaisella menetelmällä käytettävä laskentaohjelma laskee U-arvot. Rakenteen U-arvo tulee laskea tarkemmin myöhemmässä vaiheessa käytettävien rakennetyyppien varmistuttua.

Ulkoseinätyypeissä on esitetty tavalliset puurakenteiset seinät, täystiiliseinä ja sandwich-elementtiseinästä useita vaihtoehtoja eri paksuisilla lämmöneristyskerroksilla (Partek Paroc Oy Ab, 1997). Rakenteet on valittu siten, että niiden U-arvot ovat tyypillisiä muillekin vastaavissa kohteissa käytettäville rakennetyypeille. Esimerkiksi ulkoseinissä U-arvoon vaikuttavat oleellisesti vain tuuletusvälin sisäpuoliset materiaalikerrokset. Toisaalta sandwich-elementeissä ratkaisevaa on eristyskerroksen paksuus betonin lämmöneristyskyvyn ollessa suhteellisesti paljon huonompi. Koska lämmöneristeiden lämmönjohtavuus on niin pieni verrattuna betoniin, tiileen, rakennuslevyihin yms., niin sen kerrospaksuudella on ehdottomasti suurin merkitys U-arvoa laskettaessa.

Väliseinissä oleellisin tieto energialaskennan kannalta ei ole U-arvo, vaan seinän lämmönvaraamiskyky. Jotta kaikki rakennetyypit voidaan sijoittaa yhteen tauluun ilmoitetaan niistä myös U-arvo. Muita ilmoitettavia suureita ovat ominaislämpökapasiteetti cp. Arvot perustuvat laskelmiin, joissa on käytetty materiaalitiedostossa annettuja teknisiä arvoja. Koska jo materiaalitiedostossa on jouduttu liian kompleksisuuden välttämiseksi tekemään kompromissejä tarkkuuden kanssa, ovat väliseinienkin arvot varsin likimääräisiä ja vaativat tarkennusta, kun pyritään tarkkaan laskentaan.

Ohjelman lähtötietoja täsmennetään projektin edetessä. Oletusarvotietoihin on kerätty yleisimmin esiintyviä rakennetyyppejä Partekin rakennekirjasta (Suomala et al. 1987), LVIS 2000 Tyyppirakennuksista (Lassila, 1992) ja kirjasta ASHRAE Handbook of Fundamentals. Tietuekenttien selitykset esitetään seuraavassa (Taulukko 15). TRNSYS-ohjelmalle annetaan usein rakenteen numero, joka tulee taulukosta (kirjasta ASHRAE Handbook of Fundamentals). Nämä rakenteet erotetaan muista rakennetyypeistä laittamalla nimeksi TRNSYS, rakenne (esim. wall) ja rakennetyypin numero. Näin samaa tietokantaa voidaan käyttää useammalla ohjelmalla.

Taulukko 15. Rakennetyypit.

	Tietotyyppi	Yksikkö	Esimerkki
Tunnus	Text		O_US1
Kuvaus	Text		Kevyt
Käyttö	Text		Pientalon ulkoseinä
U-arvo	Single	W/m ²	0,23
Kapasitanssi	Single		14,89
Materiaali 1	Text		Kipsilevy
Paksuus 1	Single	m	0,013
...			
Materiaali 8	Text		
Paksuus 8	Single	m	

5.2.5 Rakennus

Rakennus voidaan kuvata kertomalla sen sijainti, muoto, koko ja käyttötarkoitus. Sijainti kerrotaan kaupungin nimellä ja muoto tekstinä. Rakennuksen kokoa kuvataan

pinta-alalla ja tilavuudella. Kerrosten lukumäärä on myös oleellinen tieto. Taulukko 16 esittää tietomäärittelyt.

Rakennukset luokitellaan tässä käyttötarkoituksen mukaan. Rakennuksen käyttötapaa voidaan hyödyntää mm. tyypillisten ilmanvaihtojärjestelmien, lämmitysjärjestelmien, rakennetyyppien ja kuormien valinnassa.

Tietojen pohjana on käytetty Tilastokeskuksen vuoden 1995 tilastoa valmistuneista rakennuksista ja asuinhuoneistoista käyttötarkoituksen ja rakentamistoimenpiteen mukaan. Muissa kuin asuinrakennuksissa, tyyppirakennus on saatu suoraan keskiarvona tilastokeskuksen luvuista. Asuinrakennuksissa tyyppitalo on normitettu siten, että asuntojen määräksi on saatu keskiarvoa lähinnä oleva kokonaisluku.

Sijainnin, muodon ja kerrosten lukumäärään ei ole kiinnitetty paljon huomiota, sillä vaihtelut ovat hyvin suuria. Kuitenkin näihinkin on esitetty jonkinlaiset oletusarvot, jotka ovat kuitenkin vain eräitä mahdollisia vaihtoehtoja.

Luvut antavat jonkinlaisen lähtöestimaatin rakennukselle. Huomattavaa kuitenkin on, että vaihtelut ovat hyvin suuria ja mikäli rakennus tiedetään tarkemmin, käytetään luonnollisesti tarkempia tietoja.

Taulukko 16. Tyyppirakennukset.

	Tietotyyppi	Yksikkö	Esimerkki
Rakennustyyppi	Text		Asuintalot
Tarkennus	Text		Luhtitalot
Sijainti	Text		Helsinki
Muoto	Text		Suorakulmio
Tilavuus	Single	m ³	2465
Kerrosala	Single	m ³	769
Asuntojen lkm	Single		13
Huoneiston pinta-ala	Single	m ²	50
Kerrosten lkm	Single		3

5.2.6 Huoneet

Huoneista on määritelty tyyppihuoneet olohuoneesta, keittiöstä, isosta ja pienistä makuuhuoneesta sekä toimisto ja neuvotteluhuoneesta (Lassila 1992).

Taulukko 17. Tyyppitilat.

	Tietotyyppi	Yksikkö	Esimerkki
Huoneen nimi	Text		Olohuone
Ihmisten lkm huoneessa	Single		2
Laitekuorma I	Single	W	0
Laitekuorma II	Single	W	100
Lämmitys, minimi lämpötila	Single	°C	21
Jäähdytys, maksimilämpötila	Single	°C	25
Minimi-ilmanvaihto	Single	dm ³ /s,m ²	5
Ilmastoinnin alkamisaika	Time		00:00:00
Ilmastoinnin päättymisaika	Time		23:59:59
Pinta-ala	Single	m ²	21,5
Huoneen korkeus	Single	m	2,5
Huoneen tilavuus	Single	m ³	54
Ikkunan leveys	Single	m	0,9
Ikkunan korkeus	Single	m	1,4
Ikkunoiden lukumäärä	Integer		2
Lasiaukon leveys	Single		0,7
Lasiaukon korkeus	Single		1,24
Oven leveys	Single	m	0,9
Oven korkeus	Single	m	2,1
Ovien lukumäärä	Integer		1

5.2.7 Kuormat

Ihmisen lämmönluovutus on vapaana lämpönä 75 W/hlö ja sidottuna lämpönä 38 W/hlö. Kosteuskuorma on 60 g/h henkilöä kohden huonelämpötilassa +25 °C. Lämpötilan vaikutus lukuihin on suuri. Ihmisten vapaasta lämmöstä 70 % siirtyy säteilyinä ympäröiviin pintoihin ja 30 % konvektiolämpönä suoraan huoneilmaan. (Lassila 1992)

Laitteet kuormittavat lämpöä konvektiona ilmaan ja säteilemällä suoraan pintoihin. Valmistajien ilmoittamat sähkötehot eivät kuvaa laitteen luovuttamaa lämpötehoa. Ilmoitetun tehoarvon sijasta tulisikin käyttää todellisia mitattuja arvoja.

Seuraavassa (Taulukko 18) on koottu eri ihmisen, valaistuksen ja erilaisten laitteiden lämpökuormia. Eri valmistajien laitteet poikkeavat kuitenkin huomattavasti toisistaan, joten taulukossa olevat arvot ovat lähinnä suuntaa antavia.

Taulukko 18. Lämpökuormat.

	Tietotyyppi	Yksikkö	Esimerkki
Kuormitus	Text		Mikrotietokone
Lämpö-teho	Single	W/h	120
Säteilyn osuus	Single	%	30
Konvektion osuus	Single	%	70
Kosteus	Single	kg/h.hlö	0

Koska kuormien esiintyminen huoneissa vaihtelee kellonajan ja viikonpäivän mukaan on, eri tyyppihuoneita varten määritetty myös aikataulut, joista selviää huoneen sisäiset lämpökuormat tunneittain (Taulukko 19) (Lassila 1992). Kuormista tarvitaan kaksi tasoa, jolloin I-taso kertoo esim. toimiston yöllä olevat lämpökuormat ja II-taso päivän lämpökuormituksen.

Taulukko 19. Huoneen sisäiset lämpökuormat tunneittain.

	Tietotyyppi	Yksikkö	Esimerkki
Tila	Text		Keittiö
Aika			Arkisin
Alku	Single		17:00:00
Loppu	Single		18:00:00
Ihmiset	Single	W	300
Valaistus	Single	W	225
Laitekuormat I	Single	W	0
Laitekuormat II	Single	W	625
Yhteensä I-taso	Single	W	525
Yhteensä II-taso	Single	W	1150

5.2.8 Internet-käyttöliittymä

Internet-käyttöliittymää tehtäessä on lähtökohtana ollut, että tietojen pitää olla mahdollisimman monen saatavilla. Siksi toteutustavan pitää olla sellainen, että järjestelmän käyttäjältä ei vaadita selaimen lisäksi mitään apuohjelmia. Tiedon on oltava nopeasti saatavilla.

Tietokantana on käytetty Access-tietokantaa, mutta se on vaihdettavissa esim. SQL-kannaksi. Käyttöliittymä on kannasta irrallinen osa. Myös kantaa voidaan käyttää ilman www-käyttöliittymää. Osa käyttäjistä voi käyttää kantaa access-lomakkeiden avulla ja osa Internet-selaimen kautta. Käyttöliittymä on toteutettu ASP (Active Server Pages) tekniikalla, jolloin kyselyt kantaan suoritetaan serverillä ja käyttäjä näkee tavallisia HTML sivuja (.asp-tiedostotunnisteena).

Käyttäjän tullessa oletusarvotietokannan www-sivuille ensimmäisenä avautuu näkyviin oletusarvotietokannan etusivu (Kuva 8), jossa on taulut, joihin päästään valitsemalla hiirellä haluttu linkki. Kukin osio pitää sisällään aakkosjärjestyksessä olevan listan tiedoista (Kuva 9), tietojen syöttölomakkeen (Kuva 10), muutos-lomakkeen, etsi-toiminnon. Käyttäjä pystyy näin lisäämään tietoja kantaan. Tästä prototyypistä puuttuu käyttäjän tunnistus, jonka avulla voitaisiin antaa eri käyttäjille erilaisia käyttöoikeuksia.

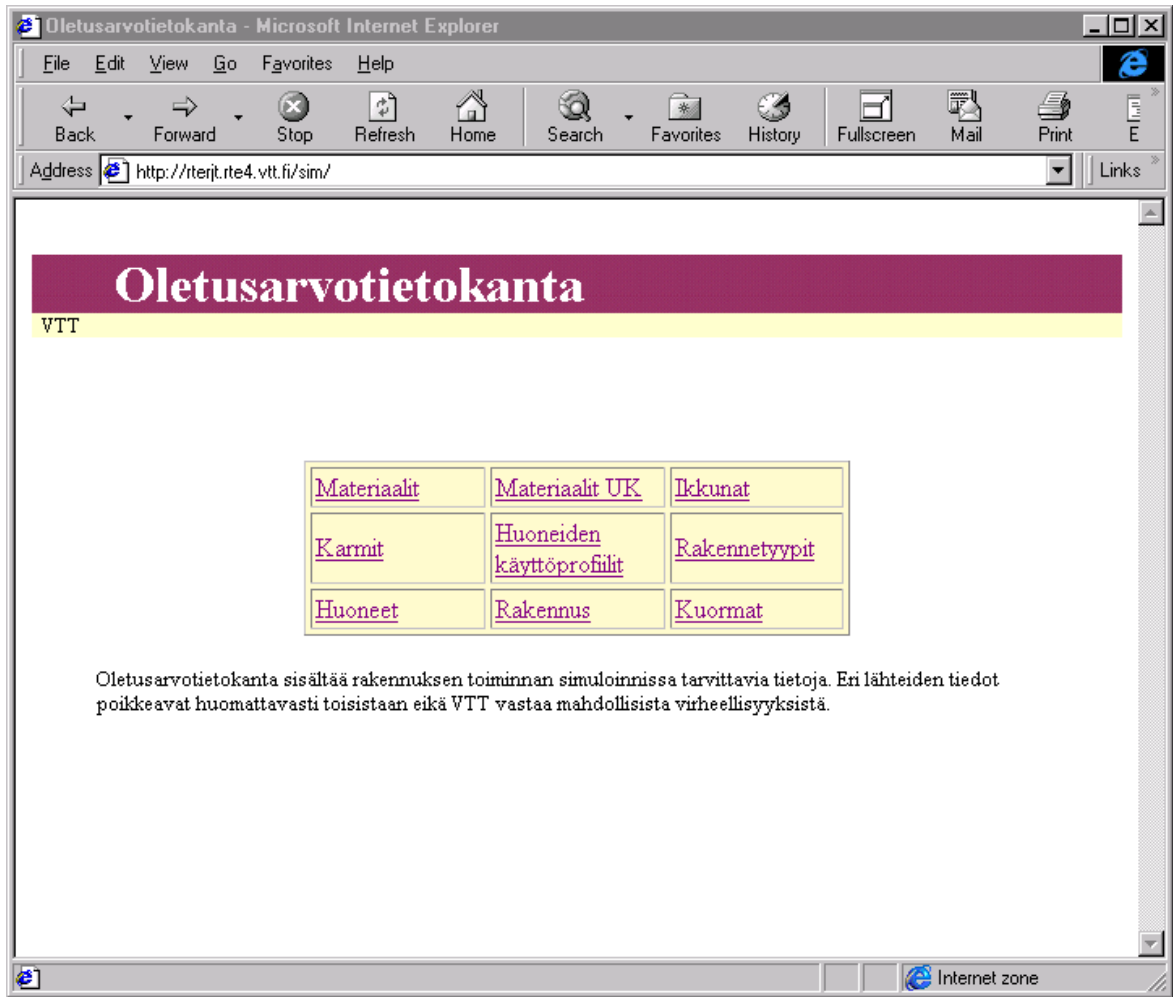
Käyttöoikeuksien rajoittamiseen liittyy ongelmia, kuten käyttökynnyksen nousu, ilkivalta (väärin tietojen syöttö, tietojen tuhoaminen).

Käyttäjäoikeudet voidaan määritellä suoraan tietokannan käyttöoikeuksien mukaan. Käyttäjät voidaan ryhmitellä esimerkiksi siten, että tietokannalla on ylläpitäjiä, joilla on kaikki oikeudet.

Toinen käyttäjäryhmä on valmistajat, jotka pääsevät muuttamaan jotain tiettyä taulua. Esimerkiksi ikkunavalmistaja voi muuttaa tietoja taulussa, jossa on ikkunoiden tietoja. Ongelmana on se, että yksi ikkunavalmistaja pääsee muuttamaan myös muidenkin ikkunavalmistajien tietoja. Tulossa on kehittyneempiä tietokantoja, joissa on mahdollista rajoittaa oikeuksia vielä tarkemmin niin, että tämä ongelma eliminoiduu.

Kolmas ryhmä on tehokäyttäjät, joilla on tavallista käyttäjää suuremmat oikeudet joihinkin yleisiin tietoihin, jotka eivät ole kenenkään valmistajan vastuulla. Neljäs ryhmä, tavalliset käyttäjät, pääsevät vain selaamaan tietokantaa. Tavalliset käyttäjät eivät tarvitse käyttäjätunnusta ollenkaan.

Yksi mahdollinen käyttö onkin yrityskohtainen oletusarvotietokanta Intranetistä. Tähän tietokantaan täydennyksiä voi saada muilta yrityksiltä tai alkuperäisestä oletusarvotietokannasta, johon kirjoitusoikeus on ainoastaan ylläpitävällä organisaatiolla.



Kuva 8. Tietokannan taulut www-pohjaisessa käyttöliittymässä.

Document Title - Netscape
File Edit View Go Communicator Help

Back Forward Reload Home Search Guide Print Security Stop

Bookmarks Location: http://terit_nt/SimTK/Materiaalit.asp

Materiaalit

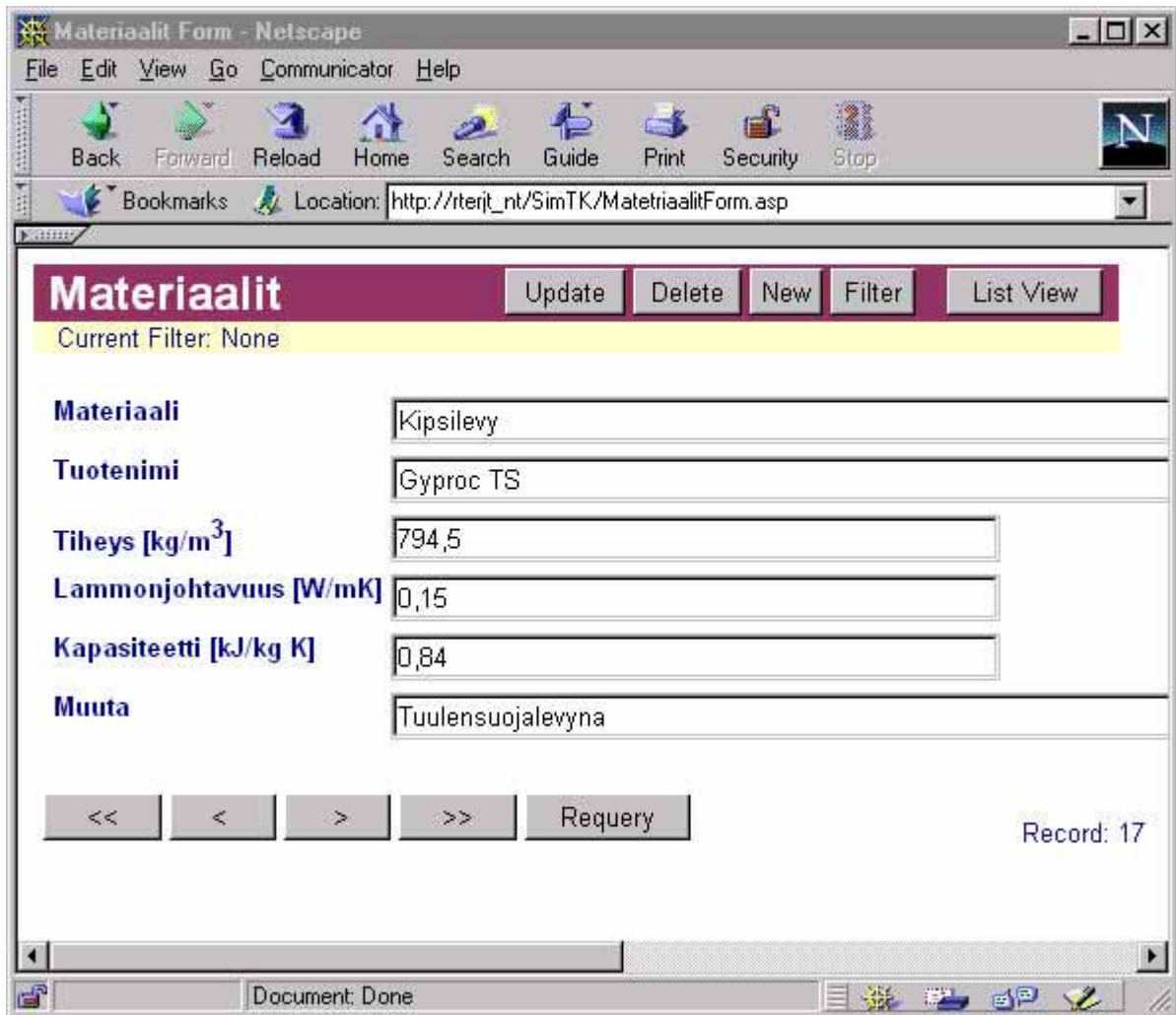
Aakkosjärjestyksessä

Materiaali	Tuotenimi	Tiheys [kg/m ³]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg K]	Käyttö
Kevytsoora		300	0,085	0,84	0
Kevytsoorabetoni		650	0,235	0,84	Harkkoina 10 mm:n saumat
Kevytsoorabetoni		500	0,15	0,84	Eristyksenä ala- ja yläpohjissa
Kevytsoorabetoni		1300	0,6	0,84	Paikoilleen valettuna
Kipsilevy	Gyproc 6mm	849,5	0,15	0,84	Saneerauslevyina
Kipsilevy	Gyproc EK	892,5	0,15	0,84	Seinissä
Kipsilevy	Gyproc GN	699,5	0,15	0,84	Katoissa
Kipsilevy	Gyproc TS	794,5	0,15	0,84	Tuulensuojalevyina
Koivu		600	1,36		
Korkki		0,581	0,21		http://www.kkassoc.com/~takinfo/prop1.htm

<< < > >> Requery Page: 2

[Lisää tai muuta tietoja](#)
[Etsi](#)

Kuva 9. Materiaalien ominaisuuksia.



Kuva 10. Tietojen syöttölomake.

5.3 IFC-yhteensopivuus

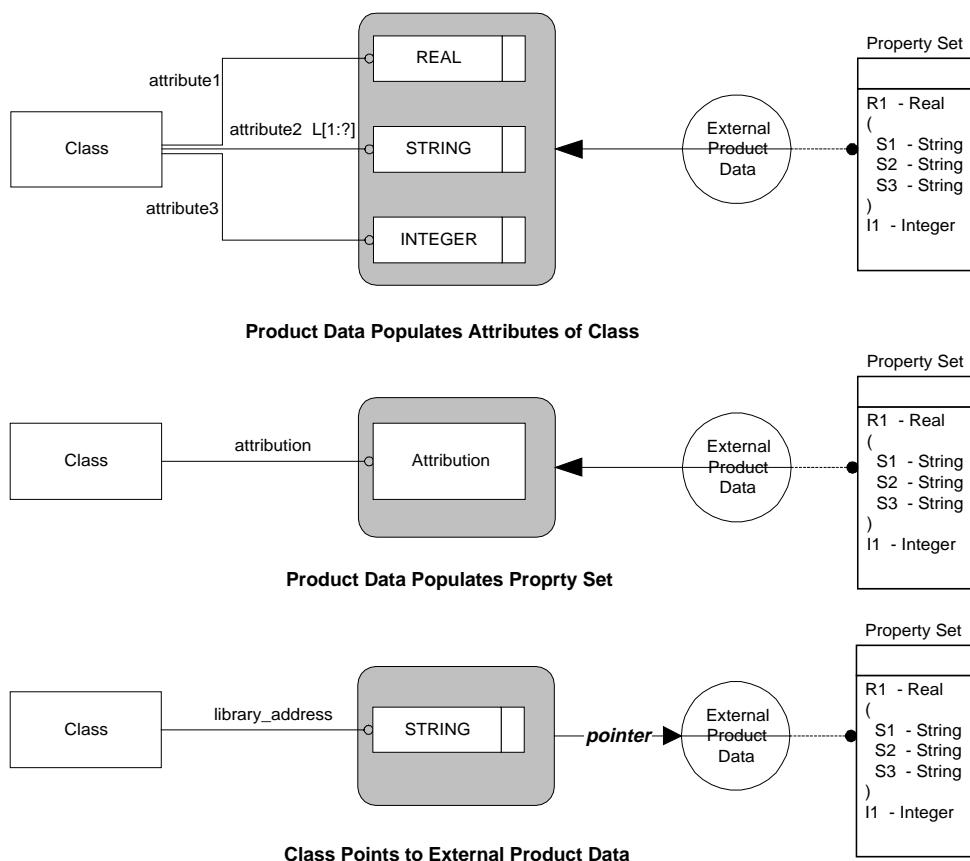
Rakennuksen elinkaaren aikana, suunnittelusta ylläpitoon ja purkamiseen asti, rakennustietoja hallitaan erilaisilla tietokonesovelluksilla. Prosessin aikana eri sovelluksille syötetään suuri määrä tietoa, joka on osittain päällekkäistä eli eri sovellukset käyttävät samoja tietoja. Tietojen siirtäminen sovelluksesta toiseen vaatii ennalta sovittuja menetelmiä, siirtotiedostoja tai muita tiedonsiirtotapoja.

IAI:ssa (International Alliance for Interoperability) on tämä ongelma tunnistettu ja kehitteillä on oliopohjainen luokkakirjasto IFC (Industry Foundation Classes) tietojen siirtämiseen. IFC:ssä pyritään luomaan joukko standardoituja älykkäitä olioita rakennusalan tarpeisiin. Määriteltäviä olioita voidaan siirtää arkkitehtien, suunnittelijoiden, insinöörien, urakoitsijoiden, kiinteistöhuollon jne. sovellusten välillä.

Koska tietokoneelta ja sovellukselta puuttuu äly todella tunnistaa oliot tarvitaan yhteensopivuuden aikaansaamiseksi tiettyjä pelisääntöjä:

1. Luokkien nimien on vastattava eri sovelluksissa toisiaan.
2. Luokkien tarkoituksen on vastattava toisiaan eri sovelluksissa.
3. Luokkien jakamisen sovellusten välillä on oltava yksikäsitteistä
4. Olioiden välisten relaatioiden on oltava yhteensopivia (mukaanlukien perintäsuhteet)

IFC:ssä on mainittu kolme tapaa käyttää ulkoisia kirjastoja (IAI, 1997b). Ensinnäkin mikäli projektissa jollakin luokalla on joku attribuutti sama jokaisella oliolla voidaan arvo sisällyttää suoraan luokan attribuutiksi (C++ -kielessä vastaa static-määrittelyä), toinen vaihtoehto on populoida olioiden attribuutteja ulkoisesta kirjastosta saaduilla arvoilla. Kolmas vaihtoehto on asettaa attribuutit vain viittaamaan ulkoisen kirjaston arvoihin eli arvoja ei sisällytetä suoraan projektiin vaan pelkästään viittaukset niihin. Tämä mahdollistaa arvojen muuttamisen koskematta projektin tietokantaan. Ulkoisilta kirjastoilta vaaditaan kuitenkin IFC:n mukaista luokkarakennetta.



Kuva 11. Ulkoisten kirjastojen käyttämahdollisuudet (IAI, 1997b).

Oletusarvotietokannan tarkoitus ei ole varsinaisesti jakaa luokkia vaan muodostaa uusia olioita sovelluksessa jo olemassa oleviin luokkiin. Tarkoitus ei myöskään ole muodostaa uusia olioita rakennusmalliin tai tarkemmin rakennusolioon. Tarkoituksena on antaa lisätietoa vastaanottavalle sovellukselle, joka mahdollisesti täydentää rakennusmallia osalla näistä tiedoista.

Relaatiotietokannassa ei ole luokkia vaan luokkien ilmentymien eli olioiden attribuutteja. Ensimmäinen yhteensopivuusehto saavutetaan laittamalla taulujen nimet vastaamaan luokkien nimiä. Esimerkiksi luokkaa IfcMaterial vastaa tietokannan taulu IfcMaterial. Myös attribuuttien on vastattava toisiaan. Relaatiotietokannan taulun tulee sisältää kaikki luokan attribuutit mukaanlukien perityt attribuutit, jotta sovellus voi käyttää taulua "sokeasti". Mikäli sovellus hakee tietokannasta jotain attribuuttia, sen tulee löytyä taulusta. Arvo tosin voi olla tyhjä ellei sitä ole määritelty pakolliseksi IFC:ssä. Ylimääräisiä, IFC:stä löytymättömiä attribuutteja voi tietokannassa kuitenkin olla.

Muut yhteensopivuusehdot eivät liity varsinaisesti olioiden ja luokkien yhteensopivuuteen. Relaatiotietokannat eivät pystyisikään perintäsuhteisiin. Myöskään kaikkia muita suhteita, jotka on määritelty EXPRESS-mallinnuskielessä ei voi toteuttaa relaatiotietokannoilla. Luokkien käyttötarkoitus on myös ongelmallinen implementoinnin kannalta. Esimerkkinä tästä voidaan ottaa esimerkiksi attribuutti, joka kuvaa jotain ominaisuutta, johon vaikuttavat muut tekijät. Tällaisia voivat olla pinnan väri tai materiaalin lämmönjohtavuus, jotka muuttuvat kosteuden muuttuessa. Ongelmaksi tulee valita attribuutille sellainen arvo, että se vastaa todellista tilannetta mahdollisimman hyvin kaikissa olosuhteissa. Tämä on selkeä riskitekijä, joka tulisi ottaa huomioon jo mallinnusvaiheessa.

Tietotyyppejä ei saa myöskään vastaamaan toisiaan, sillä IFC:ssä määritellään uusia tietotyyppejä, kun taas relaatiotietokannassa on käytössä yleensä vain tietyt ennalta määrätyt tietotyypit.

Näin relaatiotietokannasta on mahdollista tehdä jossain määrin IFC-yhteensopiva, mutta täydellisen yhteensopivuuden saavuttaminen lienee mahdotonta joitakin poikkeustapauksia lukuunottamatta. Etenkin luokat, jotka ovat monimutkaisten perintäsuhteiden tuloksia, ovat työläitä toteuttaa.

Esimerkki luokan IfcMaterial tietokantatoteutuksesta:

IfcMaterial luokka on määritelty seuraavasti (IAI, 1997a):

```
-- IfcPropertyResource - ENTITY Definitions for Material
ENTITY IfcMaterial
SUBTYPE OF (IfcProperty);
    MaterialName : STRING;
    MaterialClassification : IfcClassificationList;
INVERSE
    RegisteredBy : IfcProjectMaterialRegistry FOR RegisteredMaterials;
END_ENTITY;
```

Määrittelyn mukaan IfcMaterial-luokassa on kolme attribuuttia: MaterialName, MaterialClassification ja RegisteredBy.

IfcProperty luokka puolestaan on määritelty seuraavasti (IAI, 1997a):

```
ENTITY IfcProperty
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF(
    IfcPropertySet
    ,IfcObjectReference
    ,IfcSimpleProperty
    ,IfcProductShape ));
INVERSE
    PartOfPropertySet : SET [0:1] OF IfcPropertySet FOR HasProperties;
END_ENTITY;
```

Määrittelyn mukaan luokassa on yksi attribuutti: PartOfPropertySet.

Näistä tiedoista saadaan tietokannan taulun IfcMaterial pakolliset attribuutit: MaterialName, MaterialClassification, RegisteredBy ja PartOfPropertySet. Näistä kolme viimeistä attribuuttia ovat arvoltaan tyhjiä, koska yleinen tietokanta ei tiedä, mihin sitä käytetään, mutta ne tarvitaan, jotta esim. sovelluksen tehdessä esim. SQL-kyselyä ei tuloksena ole virheilmoitus. Lisäksi tarvitaan avainkenttä ID.

Relaatiotietokannat eivät tue luokkia tietotyyppeinä, joten tyhjien kenttien tietotyyppiä asetetaan text (string).

Table: IfcMaterial				
ID	MaterialName	MaterialClassification	RegisteredBy	PartOfPropertySet
1	Betoni			
2	Puu, koivu			

Ifc:ssä määritellään "Property Set", joka on varsin lähellä oletusarvotietokannan materiaalitietoja. Määritetyt tiedot ovat ominaispaino, ominaislämpö sekä U-arvo.

Relaatiotietokantaa ei ainakaan toistaiseksi saa täysin implementoitua IFC-yhteensopivaksi, mutta IFC:n kehitys etenee edelleen ja joitain sovitelmia on jo tehty. Periaatteessa täydellinen yhteensopivuus on saavutettavissa määrittelemällä kutsuvassa ohjelmassa luokat IfcTable ja IfcTableRow siten, että niihin voidaan lukea suoraan tietokannan taulut. Tällöin tiedot ovat vain taulukkomuodossa eikä taulukolla ole mahdollisuuksia kertoa, mitä arvot merkitsevät, mihin taas luokkarakenne pystyy.

Koska puhtaalla relaatiotietokannalla ei ole mahdollisuuksia välittää luokkamäärittelyjä toiselle sovellukselle jää yhteensopivuus pakostakin kutsuvan ohjelman vastuulle. Relatiotietokannat ovat kuitenkin helppokäyttöisiä ja käyttömahdollisuudet niin monipuoliset, että niitä kannattaa käyttää ja varmasti käytetäänkin tietovarastoina myös sovelluksissa, jotka hyödyntävät IFC:tä. Käyttö edellyttää jonkinlaista mappausrutiinia, joka voi olla joko kutsuvassa sovelluksessa tai ulkoisena konvertterina.

5.4 Päätelmiä

Jotta oletusarvotiedot olisivat kaikkien saatavilla, Internet on jakelukanavana tällä hetkellä olemassa olevista mahdollisuuksista ainoa toimiva ratkaisu. Oletusarvotietokantaan rakennettiin tämän vuoksi käyttöliittymä, joka mahdollistaa tietokannan käyttämisen suoraan WWW-sivulta. Tekniikkana käytettiin ASP-tekniikkaa (ASP - Active Server Pages). Microsoftin Active Server Pages on kehitysympäristö, joka mahdollistaa palvelimella suoritettavien skriptien upottamisen HTML-dokumentteihin lisäämään sivujen interaktiivisuutta. Toiminnallisuus toteutetaan pääasiassa palvelimella, joten käyttäjän päässä riittää tavallinen internet-ohjelmisto.

Yleisen oletusarvokirjaston toteuttamisessa on monia ongelmia. Eri simulointiohjelmat vaativat erilaisia lähtötietoja ja lähtötiedoilla lasketaan erilaisia asioita. Esille tulleista ongelmista pienimpiä ovat suureiden yksiköt. Kaikkialla ei käytetä SI-yksiköitä. Yksikkömuunnokset lisäävät virhemahdollisuuksia etenkin, kun ominaisuuksien arvoalueet vaihtelevat suuresti. Ongelmia aiheuttaa myös ominaisuuksien riippuminen ulkoisista olosuhteista kuten asennustavasta.

Globaalin kirjaston ongelmana on myös tuotteiden ja materiaalien paikallisuus. Tuotteen ominaisuuksien listaaminen edellyttää usein tuotteen spesifiointia tuotenimitasolle. Tuote ei kuitenkaan välttämättä kuvaa ollenkaan tuotetyypin ominaisuuksia, joten tiedon virheellinen käyttö on mahdollista ja jopa todennäköistä. Globaalin oletusarvotietokannan arvo onkin suurin rakennusprosessin alkuvaiheessa,

kun oleellista on tietää eri tekijöiden suuruusluokat, jotka voidaan olettaa saatavan selville käyttämällä yleistä oletusarvotietokantaa.

Yritys pystyy hyödyntämään oletusarvotietokantaa parhaiten käyttämällä pääasiassa omassa intranetissään olevaa oletusarvotietokantaa, joka täydentyy yrityksen omaksi tietopankiksi. Tähän yrityksen sisäiseen tietokantaan voidaan lisätä tietoja muista vastaavista tietokannoista. Yksi tietokannan tietojen tietolähde voi olla esim. materiaaleja testaava tutkimuslaitos.

Tietokantojen yhteydessä SQL on luonnollinen tiedonsiirtorajapinta. SQL tiedonsiirtoa voidaan helpottaa vielä sopimalla taulujen ja kenttien nimet yhteneviksi. Tässä apuna voi olla esimerkiksi standardinimet, jotka saadaan IFC:stä (International Foundation Classes).

6. Helppokäyttöinen tehtäväpohjainen simulaattori

6.1 Simulointiohjelmistojen käytettävyys

Simulointiohjelmistojen käyttö on rajoittunut lähinnä tutkimuskäyttöön niiden hankalakäyttöisyyden vuoksi. Simulointiohjelmiston tuloksellinen käyttö vaatii perehtymistä ohjelmaan, mikä ei käy hetkessä. Simuloitavien järjestelmien kokoaminen on aikaa vievää myös kokeneelle käyttäjälle. Myös ohjelman vaatimien lähtöarvojen hankkiminen voi olla työlästä. Simulointiohjelmistojen käytettävyyttä heikentävät usein puutteelliset manuaalit ja se, että käytetyimmissäkin ohjelmissa on yhä virheitä.

Viime vuosina simulointiohjelmistoihin on tullut erinäisiä apuohjelmia, joiden tarkoituksena on helpottaa simuloitavan järjestelmän kokoamista ja tulosten käsittelyä. Tässä käsitellään TRNSYS-simulointiohjelmaan liittyvää TRNSED-apuohjelmaa, jonka avulla voidaan rakentaa simulointimalliin yksinkertainen käyttöliittymä, jolloin kyseisen järjestelmän simulointi on mahdollista ilman kokemusta simuloinnista.

6.2 TRNSED-apuohjelma

TRNSED (Klein 1996) on TRNSYS-simulointiohjelmiston apuohjelma. Sen ideana on muodostaa TRNSYS:n syöttötiedostosta yksinkertaistettu versio. TRNSED esittää näytöllä vain ne parametrit, joita käyttäjä pystyy muuttamaan. TRNSED:n avulla tehtyä simulointimallia pystyy käyttämään TRNSYS:iin perehtymätönkin.

TRNSED näyttää pitkät nimet ja yksikön, jossa lähtöarvot syötetään. Käyttäjällä pystyy TRNSED:sta käsin syöttämään lähtöarvot, mutta se pystyy vain rajoitetusti muokkaamaan simuloitavaa järjestelmää. Eri järjestelmille tehdään omat TRNSED-tiedostonsa.

TRNSED vaatii syötettyjä arvoja niin, että kyseisen lähtöarvon minimiä ei aliteta, eikä maksimia ylitetä. TRNSED-käyttöliittymään voidaan myös rakentaa valikoita, joista käyttäjä valitsee simuloinnissa käytettävän lähtöarvon.

TRNSED:lla tehtyyn simulointimalliin pystyy rakentamaan opastuksen (Help). Painamalla näppäintä F1 käyttäjä saa tietoa kyseisestä syöttötiedosta. Siten käyttäjä voi siis saada tiedon esimerkiksi syöttötiedon normaaliarvosta.

TRNSYS:n normaalista syöttötiedostosta (*.dck) voidaan muokata TRNSED:n käyttämä tiedosto (*.trd) joko automaattisesti tai manuaalisesti. Käytännössä automaattisella toiminnalla pääsee alkuun, mutta TRNSED-tiedostoa joudutaan muokkaamaan lopulliseen muotoon manuaalisesti tekstieditorilla. TRNSED-tiedostoa tehtäessä annetaan kullekin syöttötiedolle kuvaileva nimi, pienin ja suurin mahdollinen arvo, kerrotaan, monellako desimaalilla se esitetään näytössä ja annetaan numero, jonka avulla oikea rivi löytyy Help-tiedostosta. Help-tiedosto kirjoitetaan manuaalisesti tekstieditorilla.

TRNSED ei sovellu käytettäväksi muiden simulointiohjelmistojen kuin TRNSYS:n kanssa.

6.3 Rakennussimulointidemo

TRNSED:n käyttöä kokeiltiin rakennussimuloinnissa. Työssä tehtiin simulointimalli yksinkertaiselle rakennukselle, joka koostuu neljästä seinästä, katosta, lattiasta ja ikkunoista.

TRNSYS-simulointiohjelmistossa on kaksi rakennuksen mallia, Type 56 ja Type 19. Seuraavassa taulukossa esitetään näiden rakennusmallien soveltuvuus TRNSED:n käyttöön.

*Taulukko 20. TRNSED:n avulla varioitavissa olevat rakennuksen energiankulutukseen vaikuttavat tekijät TRNSYS:n rakennusmalleissa. *:llä merkityt ovat valittavissa komponenttikirjastosta.*

	Type 56 Multi-Zone Building	Type 19 Detailed Zone
rakennustilavuus	ei	kyllä
rakennuksen suuntaus	ei	kyllä
seinien, katon ja lattian rakenne rakenteiden pinta-alat	ei ei	kyllä* kyllä
ikkunatyypit ikkunoiden pinta-alat	kyllä* ei	kyllä kyllä
sisäiset kuormat	kyllä	kyllä
vuotoilmanvaihto	kyllä	kyllä
ilmanvaihto	kyllä	kyllä

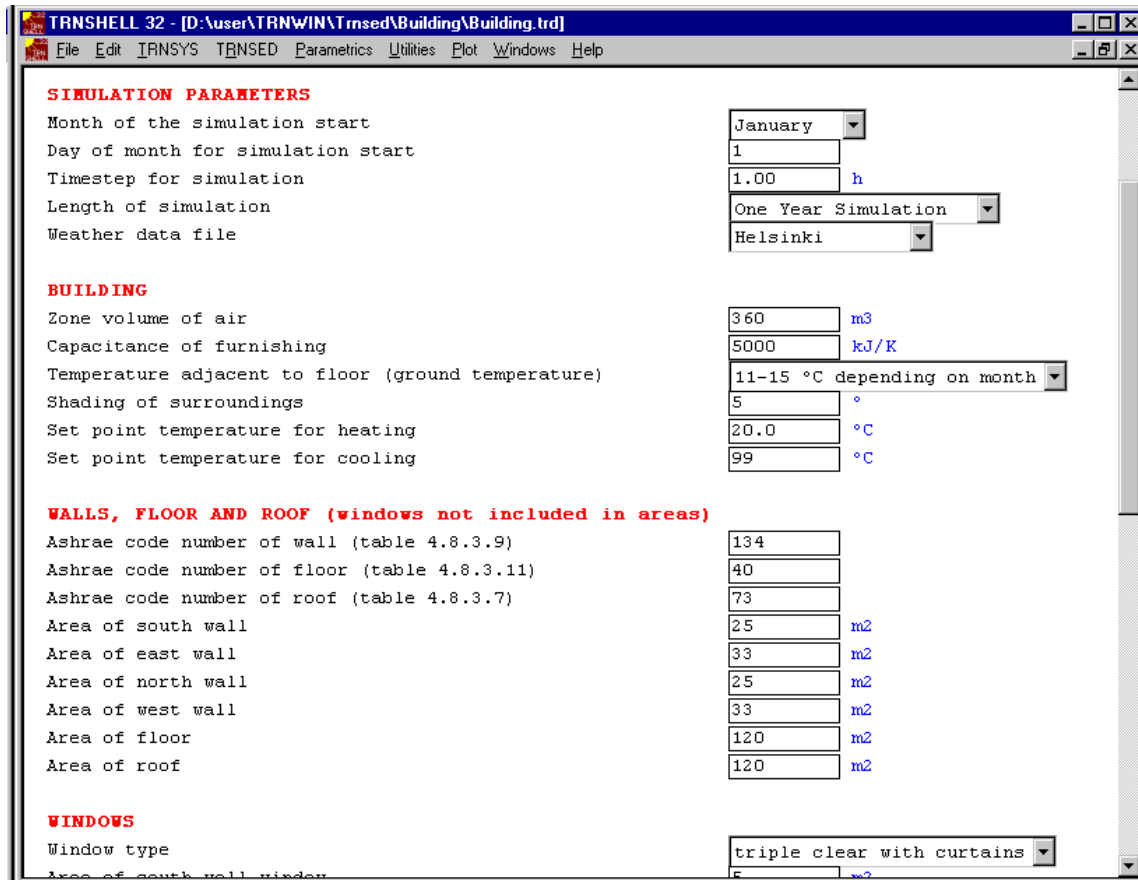
Demo tehtiin rakennusmallilla Type 19, koska se soveltuu selvästi paremmin TRNSED:n kanssa käytettäväksi. Suurin syy Type 56:n sopimattomuuteen on, että se

vaatii erillisen ohjelman (bid.exe) ajamisen aina, kun rakennuksen lähtöarvoja muutetaan.

Seinämien dynaaminen käyttäytyminen kuvataan rakennuksen mallissa Type 19 siirtofunktiokertoimien avulla. Rakennekirjastosta löytyy valmiiksi lasketut kertoimet 140:lle erilaiselle seinälle, 95:lle yläpohjalle sekä 47:lle väliseinä, välipohja tai lattiarakenteelle. Mikäli halutaan käyttää muita rakenteita, on kertoimet laskettava erillisellä ohjelmalla ja tallennettava tietokantaan.

Loppukäyttäjän tarpeista riippuen TRNSED-tiedosto voidaan muodostaa monella eri tavalla. TRNSED-tiedostoa rakennettaessa valitaan, mitkä arvot ovat käyttäjän annettavissa ja mitkä ovat vakioita. Tavoitteena voisi olla mahdollisimman tarkka laskenta mahdollisimman vähillä ja helposti ymmärrettävillä syöttötiedoilla.

Seuraavassa kuvassa esitetään demon käyttöliittymän ulkoasu.



Kuva 12. TRNSED -käyttöliittymän ulkoasu rakennussimulointidemossa.

Taulukko 21 esittää demon kaikki 44 syöttötietoa. Taulukko 22 esittää vakioiksi oletetut arvot ja muita laskennan oletuksia.

Taulukko 21. Rakennussimulointidemon vaatimat syöttötiedot.

	SIMULOINTIPARAMETRIT
1	Aloituskuukausi (valitaan joku 12:sta vaihtoehdosta)
2	Aloituspäivä kuussa (1-31)
3	Laskennan aika-askel (h)
4	Simuloinnin pituus (valittavana kuusi eri vaihtoehtoa välillä päivä - vuosi)
5	Sää tiedosto (valittavana on kolme eri säätä ja 11 eri vakio lämpötilaa)
	RAKENNUS
6	Rakennustilavuus (m ³)
7	Kalusteiden lämpökapasiteetti (kJ/K)
8	Maan lämpötila (°C) (oletusarvona riippuu kuukaudesta tai annetaan vakioarvo)
9	Ympäristön varjostuskulma (°)
10	Lämmityksen asetusarvo (°C)
11	Jäähdytyksen asetusarvo (°C)
	RAKENTEET
12	Ulkoseinän koodinnumero (1-144)
13	Lattian koodinnumero (1-47)
14	Katon koodinnumero (1-95)
15	Eteläseinän pinta-ala (m ²)
16	Itäseinän pinta-ala (m ²)
17	Pohjoisseinän pinta-ala (m ²)
18	Länsiseinän pinta-ala (m ²)
19	Lattian pinta-ala (m ²)
20	Katon pinta-ala (m ²)
	IKKUNAT
21	Ikkunatyypin valittavissa kahdeksasta eri vaihtoehdosta jatkuu

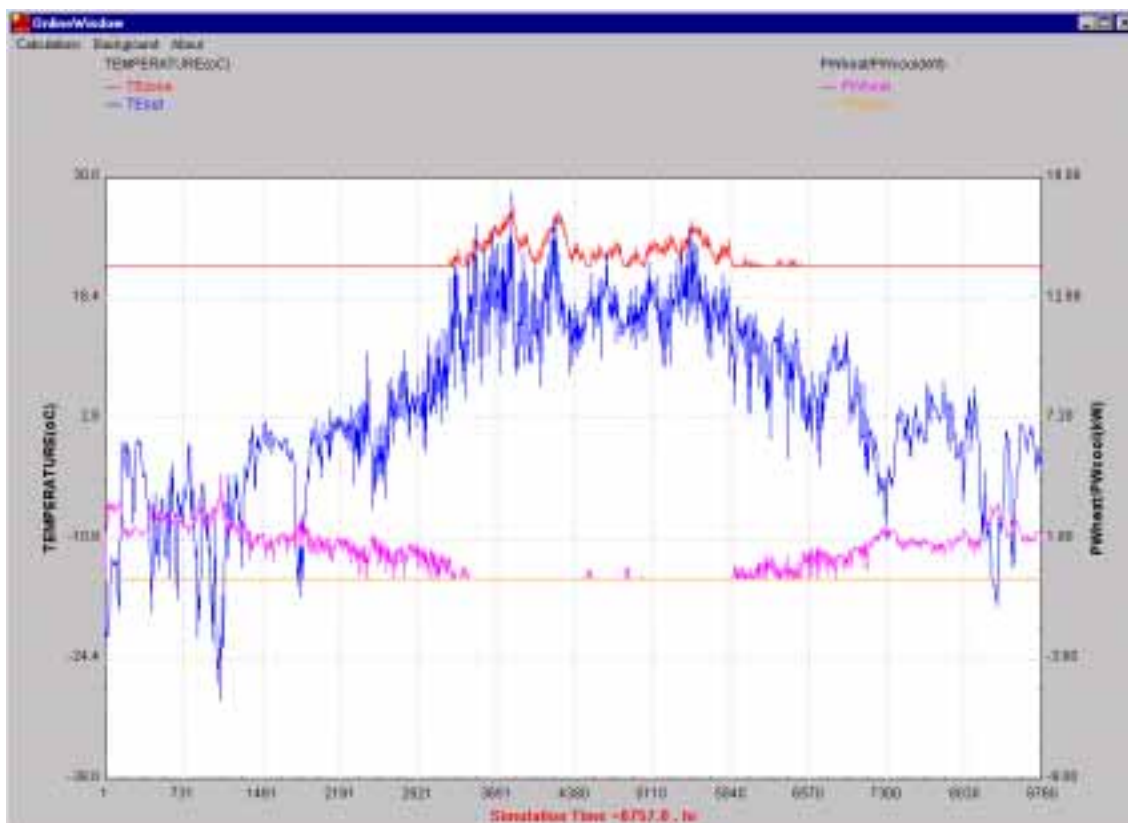
22	Eteläikkunan pinta-ala (m ²)
23	Itäikkunan pinta-ala (m ²)
24	Pohjoisikkunan pinta-ala (m ²)
25	Länsi-ikkunan pinta-ala (m ²)
	KÄYTTÖAIKATAULU
26	Ns. päiväaika alkaa ma-pe klo (h)
27	Ns. päiväaika loppuu ma-pe klo (h)
28	Ns. päiväaika alkaa lauantaisin klo (h)
29	Ns. päiväaika loppuu lauantaisin (h)
30	Ns. päiväaika alkaa sunnuntaisin klo (h)
31	Ns. päiväaika loppuu sunnuntaisin klo (h)
	SISÄISET KUORMAT
32	Ihmisten lukumäärä rakennuksessa päiväaikana (-)
33	Ihmisten lukumäärä rakennuksessa muulloin (-)
34	Ihmisten aktiiviteettitaso (valittavissa 11 eri vaihtoehtoa)
35	Valaistuksen ja laitteiden ym. lämpökuorman säteilyosa päiväaikana (W)
36	Valaistuksen ja laitteiden ym. lämpökuorman säteilyosa muulloin (W)
37	Valaistuksen ja laitteiden ym. lämpökuorman konvektiivinen osa päiväaikana (W)
38	Valaistuksen ja laitteiden ym. lämpökuorman konvektiivinen osa muulloin (W)
39	Kosteuskuorma (muu kuin ihmisten) päiväaikana (kg/h)
40	Kosteuskuorma (muu kuin ihmisten) muulloin (kg/h)
	VUOTOILMANVAIHTO JA ILMANVAIHTO
41	Vuotoilmanvaihto (1/h)
42	Ilmanvaihto päiväaikana (1/h)
43	Ilmanvaihto muulloin (1/h)
44	Ilmanvaihdon lämpötilahyötysuhde (%)

Taulukko 22. Rakennussimulointidemon oletuksia. Demon käyttäjä ei voi vaikuttaa näihin.

Samana rakennuksen kaikki ulkoseinät ovat rakenteeltaan samanlaisia.
Rakennemateriaalien absorptiokerroin on 0,6.
Sisäpintojen näkyvyyskerroimet määräytyvät pinta-alojen suhteessa.
Säätiedostossa on tunneittain seuraavat arvot: 1. Kuukausi, 2. Päivä, 3. klo, 4. Lämpötila (°C), 5. Suhteellinen kosteus (%), 6. Tuulen nopeus (m/s), 7. Kokonaissäteily vaakapinnalle (W/m ²), 8. Hajasäteily vaakapinnalle (W/m ²), 9. Maan laatu (kuiva ja lumeton=0...kokonaan lumessa=9).
Ympäristön varjostuskulma on sama kaikkiin ilmansuuntiin. Varjostuskulma vaikuttaa sekä suoraan säteilyyn että hajasäteilyyn. Ikkunoissa ei ole auringonsäteilyltä suojaavia lippoja.
Maanpinnan laatua käytetään hyväksi laskettaessa heijastunutta auringon säteilyä. Heijastuskerroin on 0,8, kun on lunta joului-, tammi-, helmi- ja maaliskuussa. Muulloin se on 0,2. Lunta on maassa, jos säätiedoston parametri, joka ilmaisee maan laatua on 6 - 9. (Lassila 1992)
Ikkunoiden säteilylämmönläpäisy ja johtumislämpöhäviöt lasketaan erillisellä mallilla (Type 35), joka ottaa huomioon säteilyn tulokulman vaikutuksen läpäisykerroimeen. Läpäisykerroin lasketaan 3-lasiselle kirkkaalle ikkunalle erikseen kaikkiin neljään ilmansuuntaan. Mikäli käytössä on joku muu ikkunatyyppi, käytetään ikkunan rakenteen huomioon ottavaa kerrointa, joita on annettu lähteessä (Ympäristöministeriö 1985).
Säteilykuorma ikkunoista jakautuu eri pinnoille pinta-alojen suhteessa.
Säätöjärjestelmää ei ole mallinnettu, joten säädön toiminta on ideaalinen. Rakennuksen malli laskee rakennukseen kulloinkin tarvittavan tehon, jolla huonelämpötila pysyy asetusarvossaan. Lämmityksen ja jäähdytyksen asetusarvo annetaan erikseen, mikäli huonelämpötila on tällä välillä, ei tarvita lämmitys- eikä jäähdytystehoa.
Rakennusmalli Type 19 kaatuu, mikäli joku pinta-aloista on nolla. Tämä ongelma on poistettu asettamalla pinta-ala tällöin hyvin pieneksi (0,00000001 m ²). Tästä aiheutuva teho on niin pieni, että se ei vaikuta laskennan tuloksiin.

Hankalasti löydettävillä arvoilla olisi löydettävät hyvät oletukset tai niiden arvioimiseen tulisi antaa opastusta (Help-tiedosto). Useimmat tämän demon syöttötiedoista ovat todennäköisesti suhteellisen helposti löydettävissä. Jos käyttäjä ei osaa antaa kalusteiden lämpökapasiteetille arvoa, opastuksessa on kaava sen arvioimiseen. Muita hankalasti löydettäviä arvoja ovat varmaankin sisäisiin kuormiin liittyvät arvot, erityisesti säteilylämmön ja konvektiivisen lämmön osuudet. Demoa voitaisiin kehittää edelleen niin, että sisäiset kuormat arvioitaisiin esimerkiksi rakennustyyppin mukaan. Myös muille lähtöarvoille voitaisiin lisätä oletusarvoja. Käyttötarve määrää muutostarpeet.

Vuoden pituisen jakson simulointi vie tavalliselta Pentium-tasoiselta tietokoneelta 1-2 minuuttia. Ajon aikana näytölle tulostuvat käyrinä (Kuva 13) huonelämpötila, ulkolämpötila, tarvittava lämmitysteho ja tarvittava jäähdytysteho. Samat arvot tulostuvat tiedostoon. Lämmitys- ja jäähdytystehon tarve sekä energiatase tulostuvat tiedostoon kuukausittain.



Kuva 13. Laskennan aikainen näyttö.

6.4 Arvio TRNSED:n käytettävyydestä

TRNSED vaikuttaa käyttökelpoiselta ohjelmalta, jolla voidaan tehdä räätälöityjä käyttöliittymiä. TRNSED soveltuu käytettäväksi yksinkertaisten järjestelmien simuloinnissa, esimerkiksi rakennussimuloinnissa. Simulointiohjelman käyttö ei vaadi kokemusta simuloinnista, mutta käyttäjän on tunnettava simuloitava järjestelmä, jotta hän osaa syöttää vaadittavat lähtöarvot.

Saman simulointimallin TRNSED-käyttöliittymä voidaan rakentaa hyvin eri tavoin riippuen siitä, mitä arvoja halutaan muuttaa käyttöliittymästä. Mikäli arvoja on vain muutama, TRNSED-tiedoston tekeminen onnistuu lisäämällä muutamia rivejä TRNSYS-syöttötiedostoon. Mikäli syöttöarvoja on paljon, käyttöliittymään tehdään

valikoita ja Help-tiedosto, TRNSED-tiedoston tekeminen vaatii enemmän työtä. Demona tehdyn TRNSED-tiedoston pituus on 800 riviä.

Useasti simuloiteja suoritettaessa tulee ongelmia (simulointi kaatuu tms.), joiden syyn selvittäminen ei onnistu ilman perehtymistä ohjelmaan. Mikäli simulointimallia käyttää TRNSYS-ohjelmaan perehtymätön henkilö, se tulisi testata erityisen hyvin. Koke-mattomalle käyttäjälle tehtävä simulointimalli vaatii selvästi enemmän työtä kuin omaan käyttöön tehtävä.

TRNSYS:lla tehtyyn simulointimalliin olisi mahdollista rakentaa räätälöity käyttöliittymä jollakin Windows-ohjelmointikielellä TRNSED:n sijaan. TRNSED:n etuihin kuuluu se, että se sisältyy TRNSYS-ohjelmaan ja muuta ohjelmointikieltä ei tarvita. TRNSED-tiedoston tekeminen on valmiin formaatin ansiosta selvästi nopeampaa kuin samantyyppisen käyttöliittymän toteuttaminen Windows-ohjel-moinnilla. TRNSED:n ominaisuudet ovat rajatummalla, mutta ilmeisesti riittävät moniin tarkoituksiin.

TRNSED:n hyviin puoliin kuuluu se, että ainakin tällä hetkellä TRNSYS-lisenssin omistaja voi tehdä TRNSED-simulaattoreita ja myydä tai jakaa niitä eteenpäin ilman eri korvausta TRNSYS:n oikeudenhaltijoille.

7. Yhteenveto

Hankkeen pitkän aikavälin tavoitteena on helppokäyttöinen, tehokas ja luotettava käytännön simulointityökalu, jota voidaan hyödyntää rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa keskeisissä päätöstilanteissa. Tämän päämäärän saavuttaminen edellyttää sekä tietyn perusteknologian kehittämistä, mistä tässä hankkeessa on kysymys, että yritysten tuotekehitystä lopputuotteiden kehittämiseksi.

Projektissa luotiin ensin katsaus rakennuksen lämpötekniistä käyttäytymistä kuvaavien mallien laskentamenetelmiin. Laskentamenetelmät voidaan jakaa yksinkertaistettuihin menetelmiin ja dynaamisiin simulointimenetelmiin (Kalliomäki & Kohonen 1989).

Rakennusten lämpötekniisiä simulointiohjelmaa on markkinoilla lukuisia, esimerkiksi BLAST, BUS++, CHEETAH, CLIM2000, DOE, ENERGY, ESP, HTB, HVACSIM[†], IDA, PIBNET, SERI-RES, SUNCODE, TASE, TRNSYS ja tsbi3. Kuitenkin vain erittäin harvat ohjelmistot ovat riittävän yksinkertaisia ja havainnollisia soveltuakseen sellaisenaan suunnittelun alkuvaiheessa ja rakennuksen koko elinkaaren aikana käytettäväksi. Tässä projektissa selvitettiin markkinoilla olevien simulointiohjelmien soveltuvuutta käytettäväksi rakennuksen koko elinkaaren aikana tarkastelemalla niiden ominaisuuksia ja käytettävyyttä.

Simulointityökalun luotettavuus koostuu useista eri tekijöistä, mutta tärkeimpänä voidaan pitää sitä, että itse simulointiohjelman laskennan luotettavuus luo pohjan koko simulointityökalun luotettavuudelle. Projektissa tarkasteltiin simulointiohjelman validointia ja testausta. Validointiketjuun kuuluu koodin tarkastaminen, analyttinen tarkastaminen, mallien väliset vertailut ja empiirinen validointi, jokaiseen on kehitetty erilaisia menetelmiä kuten BESTEST -menetelmä. Osaan on käytettävissä myös erillisiä tietokoneohjelmistoja.

Projektissa perehdyttiin myös neutraalimuotoisten, useiden simulointiohjelmien käytävissä oleviin, simulointimallien kehitysmahdollisuuksiin ja niiden nykyiseen tilanteeseen. Tässä tarkoitetaan lähinnä ASHRAE:n vakioimaa Neutral Model Format (NMF) -mallinnuskieltä.

Projektissa määriteltiin rakennusten suunnittelun ja ylläpidon tietojärjestelmiin liitettävien simulointityökalujen toteutusmalli. Simulointityökalulla tuettavia elinkaaren vaiheita ovat: suunnittelun alkuvaihe, luonnos- ja toteutussuunnittelu sekä rakennuksen käyttö. Simulointiohjelma sisältää syöttötietojen luvun, laskentamallit, ratkaisurutiinin (solver) ja tulostietojen kirjoittamisen.

Simulointitietokanta on tiedon ylläpidon ja tiedon tallentamisen väline. Simulointitietokantaan tallennetaan kaikkien eri simulointitapausten lähtö- ja tulostustiedot. Simulointiohjelmalla on tietotarpeita, jotka vaikuttavat tiedonkeruuseen. Simulointitietokantaan on tallennettu tieto tarvittavista syöttötiedoista. Tieto kerätään oletusarvokirjastosta siltä osin, kun se ei selviä käytettävissä olevista suunnittelu-tiedoista, jotka voivat olla tietokannoissa, tiedostoina tai paperidokumentteina.

Simulointityökalun käyttämä oletusarvotietokanta toteutettiin Internet-pohjaisine käyttöliittymineen, jolla hallitaan ja ylläpidetään oletusarvotietokannan tietoja. Oletusarvotietokannassa ylläpidetään tietoa tiloista, sisäisistä kuormista, rakenteista, materiaaleista, ikkunoista jne. Tehtävään kuului myös tietoverkkopohjaisen luotettavan päivitysmahdollisuuden selvittäminen siten, että päivitys saadaan mahdollisimman automaattiselle tasolle. Oletusarvotietokanta on avoin sovellusriippumaton tietokanta, joka sisältää simuloinnissa tarvittavia tietoja oletus- ja/tai tyyppiarvoina. Tiedonsiirron osalta tarkasteltiin myös IFC:n (International Foundation Classes) hyödyntäminen tiedonsiirrossa. Todellista hyödyntämistä haittasi standardointityön hitaus.

Tulevaisuudessa on mahdollista kehittää oletusarvotietokantaa siten, että siihen on pääsy kaikkialta maailmassa suoraan ohjelmallisesti. Tekniikkaa suurempi ongelma on oletusarvojen määrittäminen siten, että ne soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin, käytettäväksi muuttuvissa olosuhteissa sekä oikeiden arvojen löytäminen suuresta tietomassasta - peruseriaatteenahan pitää olla helppokäyttöisyyden. Avuksi voitaneen käyttää tietämystekniikkaa.

Toisena tavoitteena oli tehtäväpohjaisten simulaattorien tutkiminen ja sellaisen toteuttaminen TRNSYS-simulointiohjelmasta valmiiksi käännettyä TRNSED-ohjelmaa käyttäen. TRNSED:lla on mahdollista toteuttaa erilaisia simulaattoreita kuten rakennussimulaattori, huonetilan simulaattori sekä IV-koneen simulaattori. TRNSED:n käyttöä kehitettiin rakennussimuloinnissa. Työssä tehtiin simulointimalli yksinkertaiselle rakennukselle, joka koostuu neljästä seinästä, katosta, lattiasta ja ikkunoista.

Raket-T612-projektin puitteissa osallistuttiin myös IEA Annex 30 -työskentelyyn.

Lähdeluettelo

Anon. 1996. SPECIAL REPORT. Energy Simulation Software for Home Builders and Designers. Energy Design Update. April 1996. s. 5 - 15.

Brandemuehl, M.J., Gabel, S. & Andresen, I. 1993. HVAC 2 Toolkit. A Toolkit for Secondary HVAC System Energy Calculations. USA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers, Inc. ISBN 0-910110-98-0

Clark, D. R. 1985. HVACSIM⁺ Building Systems and Equipment Simulation Program. Reference Manual. Washington DC: National Bureau of Standards. 110 s. (NBSIR 84-2996).

Eppel, H. 1993. IEA 21C/12B Empirical Validation. Hotline Newsheet No. 7.

Fenestra Oy, 1995. Fenestra -kansio. Kortti 21.103. 12/95

Heikkinen, L., Kallavuo, M., Kalliomäki, P. Lindqvist, P. & Pekkonen, J. 1985 Rakenusten energiankulutuksen laskentaohjelmat. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakennustalouden laboratorio. 94 s. + liitt. 84 s. (VTT Tiedotteita 475). ISBN 951-38-2364-4

Hemmilä Kari, 1996. Energiansäästöä uusilla ikkunoilla. 9 s. Energiansäästö kiinteistöissä ja teollisuudessa '96 -seminaari.

Hyttinen, J. & Vuolle, M. 1997. IDA - Uuden sukupolven simulointiympäristö on nyt käytettävissä. Talotekniikka, 1997. Nro 4. s. 60 - 61.

IAI, 1997a. IFC Release 1.5 Volume 3: IFC Object Model Reference. 1997.

IAI, 1997b. FC R3.0 Domain Project Documentation: Project Summary - [XM-1] External Libraries. Draft1. September 1997.

Jokela, M. & Keinänen, A. 1995. The functional model of HVAC design. Simulation as a building life cycle tool. Teoksessa: Annex 30, Bringing Simulation to Application, Technical papers presented at the first working meeting of the working phase, Liege, Belgium 5 - 6 October 1995. (AN30-951005-06).

Judkoff, R. & Neymark, J. 1995. International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. 296 s.

Judkoff, R., Wortman, D., O'Doherty, B. & Burch, J. 1983. A methodology for validating building energy analysis simulations, Draft Report TR-254-1508, Solar Energy Research Institute, Golden, CO. 204 s.

Kalliomäki, P. & Kohonen, R. 1989. Rakennusten lämpötaseen ratkaisu. Menetelmät ja ohjelmistojen luotettavuuden arviointi. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. 129 s. + liitt. 13 s. (VTT Tiedotteita 1077). ISBN 951-38-3628-2

Klein, S.A et al. 1996. TRNSED for Windows 3.x, Windows 95 or Windows NT. A menu-driven front-end program for TRNSYS. Version 2.0. Madison, WI: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. 38 s.

Kärki, S. 1992. Tärkeimmät LVIS-2000 tutkimusohjelmassa hyödynnetyt simulointiohjelmistot. Teoksessa: Hyvärinen, J. & Nyman, M. (toim.) Rakennusten energia- ja automaatiojärjestelmät -yhteisseminaari, Hanasaaren kulttuurikeskus, Espoo 19.11.1992. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. S. 39 - 50. (LVIS-2000 Raportti 16). ISBN 952-9601-05-0

Lassila, K. (toim.) 1992. LVIS-2000 tyyppirakennukset. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. 51 s. (LVIS-2000 Raportti 17). ISBN 952-9601-06-9

Lomas, K.J. and Bowman, N.T., 1987, Developing and testing tools for empirical validation, Ch.14, Vol.4 of SERC/BRE final report on "An investigation into analytical and empirical validation techniques for dynamic thermal models", SERC GR/C/62871, 79 s.

Lomas, K.J., 1990, Data sets for validating dynamic thermal models of buildings, BE-PAC Technical Note 4/90, 82 s.

Lomas, K.J., 1991, Dynamic thermal simulation models of buildings: New method for empirical validation, BSER&T 12(1) 25-37.

Lomas, K.J., Eppel, H., Martin, C. and Bloomfield, D., 1994, Empirical Validation of Thermal Building Simulation Programs using Test Room Data, Volume 1: Final Report, International Energy Agency SHC Task 12B/ BCS Annex 21C, IEA21RR6/94, BRE, Watford, UK.

Marjamäki, P., Heimonen, I. & Katajisto, K. 1990. Lämmitys- ja ilmastointiprosessin dynaaminen simulointi HVACSIM⁺-ohjelmalla. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. 91 s. + liitt. 12 s. (VTT Tiedotteita 1091). ISBN 951-38-3661-4

Partek Paroc Oy Ab, 1997. Rakennuseristeet, tuoteluettelo. 2-1.1 .

Parvio, U. 1992. TRNSYS-simulointiohjelman verifiointi METOP:lla. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio. 9 s. + liitt. (Työraportti).

Sahlin, P. & Bring, A. 1993. Applying IDA to Air Flow Problems in Buildings. Göteborg, Sweden: ITM, Swedish Institute of Applied Mathematics. 28 s. (ITM Report no. 1993:3).

Sahlin, P. 1996. NMF Handbook. An Introduction to the Neutral Model Format. NMF version 3.02. 67 s.

Sahlin, P., Bring, A. & Sowell, E.F. 1996. The Neutral Model Format for Building Simulation. Version 3.02. 80 s.

Suomala J., Solarmo H. & Kihlman M. 1987. Rakennekirja 1988. 3. uud. p., Jyväskylä: Oy Partek Ab. 272 s. ISBN 951-99846-3-1.

Talonpoika, R., Björk, B.-C., Penttilä, H., Heikkinen, L. & Kalliomäki, P. 1990. Olio-orientoituneet energiataloudelliset analyysi- ja suunnitteluohjelmistot. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Yhdyskunta- ja rakennesuunnittelun laboratorio. 149 s. (ETRR-tutkimusohjelma/Raportti 2). ISBN 951-47-3709-1

Tuomaala, P. 1996. Rakennuksen aineen- ja lämmönsiirron laskentavalmiuksien yhdistäminen. ReTeE, VTT Rakennustekniikan henkilöstölehti 8/3.96.

Vuolle, M. 1995. Suomalaisen ja eurooppalaisen asuinrakennuksen lämmitysenergiantarpeen yksinkertaistettujen laskentamenetelmien vertailu ja kehittäminen. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. 106 s. (Lisensiaattityö).

Ympäristöministeriö. 1979. Lämmöneristys, Ohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö. (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C4).

Ympäristöministeriö. 1985a. Rakennusten lämmityksen tehon- ja energiantarpeen laskenta. Helsinki: Ympäristöministeriö. (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5).

Ympäristöministeriö. 1985b. Lämmöneristys, Määräykset. Helsinki: Ympäristöministeriö. (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C3).

Ympäristöministeriö. 1991. Lämmöneristys, Ohjeet, Ehdotus. Helsinki: Ympäristöministeriö. (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C4).