CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

En analys av pentakloranisol, partiklar och luftflöde genom bjälklaget i en skola med uteluftsventilerad krypgrund

Kandidatarbete inom Bygg- och miljöteknik

RAMI ASADI
FREDRIK HELLQUIST
HASAN HUSSAIN
ADRIEN MOYSSET

Institutionen för Byggnadsfysik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2016

Sammandrag

Det finns ett utbrett problem med innemiljön i svenska skolor och en stor del av skolor där klagomål på innemiljön framförts är konstruerade med en uteluftsventilerad krypgrund. Syftet med projektet är att, i en skola belägen i västra Göteborg med en uteluftsventilerad krypgrund, undersöka flödet genom skolans bjälklag och hur flödet förändras över året. Med hjälp av flödet genom bjälklaget undersöks hur föroreningar i krypgrunden påverkar innemiljön i skolan. Vidare undersöks hur flödet genom bjälklaget förändras vid installation av en frånluftsfläkt i krypgrunden. Flödet genom bjälklaget beräknas med hjälp av simuleringsprogrammet CONTAM. Indata till simuleringarna har erhållits genom fältundersökning på skolan, ritningar på skolan samt kompletterande litteraturundersökning. Endast skolans sysslöjdssal och den del av krypgrunden som ligger direkt under sysslöjdssalen simuleras. Genom studie av utredningsrapport på skolan valdes den specifika föroreningen pentakloranisol (PCA) ut att studeras. Hur föroreningen PCA transporteras från krypgrunden till syslöjdssalen genom bjälklaget simuleras med hjälp av CONTAM. Vidare undersöks genom partikelmätningar, Blower Door- test i ett klassrum i skolan och det erhållna luftflödet från CONTAM-simuleringarna hur och vilka partiklar i krypgrunden som når innemiljön. Partikelmätningarna gjordes för fyra storleksintervall; > 0.3 µm, > 0.5 µm, > 1,0 µm och > 5,0 µm och utfördes i ett av skolans rum, i krypgrunden samt utomhus. CONTAM-simuleringarna visar att det råder ett undertryck i syslöjdssalen under hela året vilket leder till att luft flödar från krypgrunden upp genom bjälklaget till syslöjdssalen under hela året. Flödet varierar från 1,4 l/s till 1,8 l/s. Det leder till att 3,8 - 4,7 % av den mängd PCA som finns i krypgrunden når syslöjdssalen. Luftflödet genom bjälklaget varierar med årstiden och är som störst på vintern och som minst på sommaren. Andelen PCA som når inomhusluften följer luftflödet och är som störst då luftflödet är som störst. Mängden PCA i krypgrunden varierar dock främst med vinden då ingen frånluftsfläkt är installerad. Vid installation av en frånluftsfläkt i krypgrunden med ett flöde på 2,4 l/s erhålls ett undertryck i krypgrunden under hela året vilket leder till att luften istället flödar från syslöjdsalen till krypgrunden och ingen PCA når syslöjdssalen. Partikelmätningarna visade att samtliga partikelstorlekar hade sin största halt utomhus och partikelhalten i krypgrunden var högre än inomhus för samtliga storlekar utom > 5,0 µm. Vid skapandet av ett undertryck i omklädningsrummet med Blower Door ökar partikelhalten mest för partikelstorleken > 0,5 µm och > 1,0 µm som ökar 16- respektive 17-faldigt. Eftersom PCA har en mycket låg lukttröskel och att simuleringarna visar att luften flödar uppåt från krypgrunden till sysslöjdssalen är det troligt att PCA bidrar till att innemiljön uppfattas som dålig i skolan. Det är även troligt att PCA orsakar dålig lukt i salen under hela året. Vidare är det möjligt att partiklar från krypgrunden, i form av svampsporer, är en bidragande orsak till dålig innemiljö i skolan. Det går dock inte genom undersökningar i detta projekt konstatera att en viss typ eller mängd partiklar i inomhusluften härstammar från en föroreningskälla i krypgrunden då de likväl kan komma från utomhusluften. För att dra slutsatser om partiklarnas ursprung krävs mer omfattande mätningar.

Abstract

There is a widespread problem with the indoor climate in Swedish schools. A large number of the schools where complaints have been heard are built with a crawl-space. The purpose of this project is to investigate how the airflow, through the floor of a school with a crawl-space located in the western side of Gothenburg, changes over a year. Based on the airflow, the effects to the indoor climate of contaminants can be examined. Through an investigation report of the school, pentachloroanisoles have been chosen for examination. Furthermore, the airflow through the floor is examined while a crawl- space fan is installed. The necessary information for the simulations has been obtained from field investigations at the school, drawings of the building and from literature. Based on the obtained information, the contaminant pentachloroanisoles was chosen. All calculations are simulated in CONTAM. How and which contaminants that reach the indoor environment is furthermore examined thanks to a particle measurement and a Blower Door- test at the school and thanks to the airflow results obtained from the CONTAM- simulations. The particle measurements were made for four different size ranges; > 0,3 µm, > 0,5 µm, > 1,0 µm, > 5,0 µm and were executed in one room in the school, in the crawl- space and outside the school. The simulations show there is a negative pressure in the handicraft- room all year around which makes the airflow go from the crawl-space to the indoor environment all year around. The airflow varies from 1.4 l/s to 1.8 l/s which leads to that 3.8- 4.7 % of the pentachloroanisoles that's produced in the crawl- space reaches the indoor environment. The airflow varies with the seasons and the proportion of pentachloroanisoles follows the shape of the airflow. The amount of pentachloroanisoles in the crawl- space varies with the wind speed. When a crawl-space fan at 2,4 l/s is installed a negative pressure in the crawl- space is obtained which makes the airflow go from the indoor environment to the crawl- space and no pentachloroanisoles reaches the handicraft- room. The particle measurement showed that all particle ranges had their highest concentration outside and that the particle concentration in the crawl- space was higher for all size ranges except > 5,0 µm. When a negative pressure was established in the school, due to the Blower Door- test, the highest increase of particle concentration was found for the size ranges > 0,5 µm and 1 µm which increased 16- respectively 17 times. The fact that pentachloroanisoles has a very low odor threshold and that the simulations showed an airflow up through the floor, it is most likely that the indoor environment is poorly perceived in the school through the entire year. It is not possible to state that a certain type or amount of particles in the indoor environment originates from a contaminant- source because they could as likely come from outside. Additionally, it is possible that particles from the crawl- space, in the shape of spores, are a contributing factor to the bad indoor environment in the school.

Innehållsförteckning

1 INLEDNING 1
1.1 SYFTE 1
1.2 FRÅGESTÄLLNINGAR 1
1.3 AVGRÄNSNINGAR 2
1.4 METOD 2

2 TEORI 3
2.1 TRYCK OCH LUFTRÖRELSER 3
2.1.1 Mekanisk ventilation 3
2.1.2 Termisk drivkraft 4
2.1.3 Vindens inverkan 5
2.1.4 Strömningsvägar och lufttäthet 5
2.2 FUKTTRANSPORT I KRYPGRUNDER 5
2.2.1 Krypgrunder 6
2.3 LUFTKVALITET 7
2.3.1 Partiklar och mikroorganismer 8
2.3.2 Klorfenol och kloranisol 10
2.4 ÅTGÄRD EMOT DÅLIG LUKT INOMHUS 11

3 BERÄKNINGSMETODIK OCH INDATA TILL CONTAM- SIMULERINGAR 12
3.1 BAKGRUND OM DEN UNDERSÖKTA SKOLAN 12
3.2 BERÄKNINGSMETODIK 12
3.3 SIMULERAD BYGGNAD OCH KLIMAT 13
3.3.1 Generell indata för samtliga simuleringar 13
3.3.2 Indata till och förklaring av simulering 1-3 16
3.3.3 Indata till och förklaring av simulering 4-5 17
3.3.4 Indata till och förklaring av simulering 6 17
3.3.5 Indata till och förklaring av simulering 7 17

4 RESULTAT 18
4.1 RESULTAT AV CONTAM-SIMULERINGAR 18
4.1.1 Simulering 1, utan frånluftsfläkt i krypgrunden 18
4.1.2 Simulering 2, krypgrundsfläkt med luftflöde 2,0 l/s 20
4.1.3 Simulering 3, krypgrundsfläkt med luftflöde 2,4 l/s 20
4.1.4 Simulering 4, minimum temperatur samt vind 20
4.1.5 Simulering 5, maximum temperatur samt vind 21
4.1.6 Simulering 6, stor tryckskillnad mellan till- och frånluftsventilation 21
4.1.7 Simulering 7, ingen mekanisk ventilation inomhus 21
4.2 RESULTAT FRÅN PARTIKELHALTMÄTNINGEN 21

5 DISKUSSION 24
5.1 CONTAM- SIMULERINGAR 24
5.2 PARTIKELHALTMÄTNINGAR 27

6 SLUTSATS 29

KÄLLFÖRTECKNING 31

BILAGOR 34

1 Inledning

I dagsläget förekommer det många skolor i Sverige där innemiljön inte upplevs tillfredställande för varken personal eller elever. Vanliga klagomål är störande lukt, torr luft samt drag (Byggnadsrelaterad ohälsa, 2013, s. 3). Hälsoeffekter som uppenbarar sig i miljöer med dålig kvalité på inomhusluft är till exempel irritation i ögon och slemhinnor samt koncentrationssvårigheter, vilket även lett till att elever presterat sämre i skolan (Stafford, 2014, s. 3). Boverket presenterar i en rapport (2010, s. 61-62) resultat som visar att 40 % av svenska skolor har någon form av fuktskada och att drygt 60 % av befintliga skolbyggnader har en uteluftsventilerad krypgrundskonstruktion. Vidare visar Boverkets rapport att 70 % av de grunder som har fuktskador är krypgrunder. Att skolmiljön är den miljö, efter hemmet, som barnen vistas mest i gör det extra viktigt att en god innemiljö i skolorna säkerställs.

Problem kan dock uppkomma på en eller flera olika delar av klimatskärmen, vilken omfattas av de omslutande delarna av huset. Orsaken bakom ett problem behöver inte nödvändigtvis vara förknippat med byggnadstekniska aspekter utan kan även bero på andra faktorer, till exempel bristande underhåll. Förekomsten av flertalet påverkande aspekter gör det därför ibland svårt att härleda orsaken bakom problemen.

Detta projekt grundar sig i en befintlig skolbyggnad, belägen i västra Göteborg, där innemiljön under senare tid inte ansetts tillfredställande. Klagomål har framförts både av personal och elever och gäller i huvudsak dålig lukt i skolans syslöjdssal. Skolan är en prefabricerad modulbyggnad med uteluftsventilerad krypgrund (kommer hädanefter benämnas "krypgrund") från 70-talet och likt många andra 70-tals byggnader har problem uppstått med luftkvaliteten (Boverket, 2009, s. 51).

Tillhandahållen utredningsrapport innehållande tidigare utförda provtagningar på material i krypgrunden indikerar på att orsaken till klagomålen kan härstamma från krypgrunden. Utredningsrapporten indikerar förekomsten av mikrobiell tillväxt på blindbotten och klorfenol samt kloranisol har uppmäts på material i krypgrunden. Beslut har tagits att genomföra en temporär åtgärd i form av en frånluftsfläkt i krypgrunden, detta i väntan på en omplacering av verksamheten då byggnaden planerats att rivas inom en snar framtid.

1.1 Syfte

Projektets syfte är att undersöka hur kloranisol och partiklar i en uteluftsventilerad krypgrund når och påverkar en skolas inomhusluft. För att undersöka detta kartläggs hur lufttransporten genom skolans bjälklag förändras över ett år. Vidare undersöks hur luftflödet förändras vid installation av en frånluftsfläkt i krypgrunden.

1.2 Frågeställningar

Hur föroreningar i krypgrunden påverkar luftkvaliteten inomhus beror på vilka föroreningar är samt vilka och hur mycket av dessa som når inomhusmiljön. För att reda på detta behöver följande frågor besvaras:

- Hur ser luftflödet genom den undersökta skolans bjälklag ut och hur varierar flödet under året?

- Når kloranisol och/ eller partiklar inomhusluften och hur påverkar det i så fall skolans luftkvalitet?

- Om kloranisol når inomhusluften, vilket luftflöde krävs i så fall på en frånluftsfläkt i krypgrunden för att skapa ett undertryck där året om och för att förhindra att kloranisol påverkar luftkvaliteten?

1.3 Avgränsningar

För att lättare kunna besvara frågeställningarna beräknas endast luftflödet genom skolans bjälklag för den del av bjälklaget som ligger under syslöjdssalen. Dock antas luftflödet vara identiskt för hela skolans bjälklag. Endast hur stor mängd av föroreningen pentakloranisol (PCA) som når inomhusluften beräknas och alstringen av PCA antas vara konstant under hela året. Således tas ingen hänsyn till hur relativa fuktigheten i krypgrunden påverkar alstringen av PCA.

Partikelmätningarna på skolan har endast utförts en gång och i en begränsad del av skolans lokaler. Potentiella föroreningar från krypgrunden har valts att studeras, närmare bestämt partiklar. Den typ av partikel som främst undersöks är de partiklar som härstammar från mikroorganismer.

1.4 Metod

För att analysera transporten av luft, kloranisol och partiklar genom ett bjälklag har undersökningar i projektet utförts genom en fältundersökning samt en simuleringsdel.

Fältundersökningen har utförts på skolan och omfattar både en partikelhaltmätning och en läckagesökning av byggnaden. Partikelhaltmätningen utförs för att ta reda på om partiklar och mikroorganismer tar sig upp från krypgrunden och in i inomhusluften. Mätningarna har genomförts både vid normala förhållanden och i samband med skapandet av ett undertryck inomhus relativt utomhus med hjälp av en Blower Door. Partikelhalten i byggnaden har mätts i krypgrunden, i ett av skolans omklädningsrum och utanför skolbyggnaden. Detta för att kunna skapa sig en bild av hur partiklarna är fördelade i och kring byggnaden. Mätningarna utfördes för att få ett förhållande mellan partikelstorlekarna. Partikelstorlekarna som mättes var > 0,3 µm, > 0,5 µm, > 1 µm och > 5 µm. Mätningarna utfördes under en dag i februari och under en period då det ej förekom aktivitet i skolan.

Läckagesökningen utförs för att få en uppfattning av byggnadens otätheter och har utförts med hjälp av värmekamera för att skapa en bild av otätheternas fördelning i rummet. För att särskilja otätheter från köldbryggor har även luftrörelser sökts med hjälp av händerna där värmekameran visat lägre temperatur. För att studera tryckförhållandet mellan inomhus och krypgrunden användes en så kallad rökpuffpenna. Genom att följa röken som puffas ut från pennan kan en bild av åt vilket håll luften flödar erhållas.

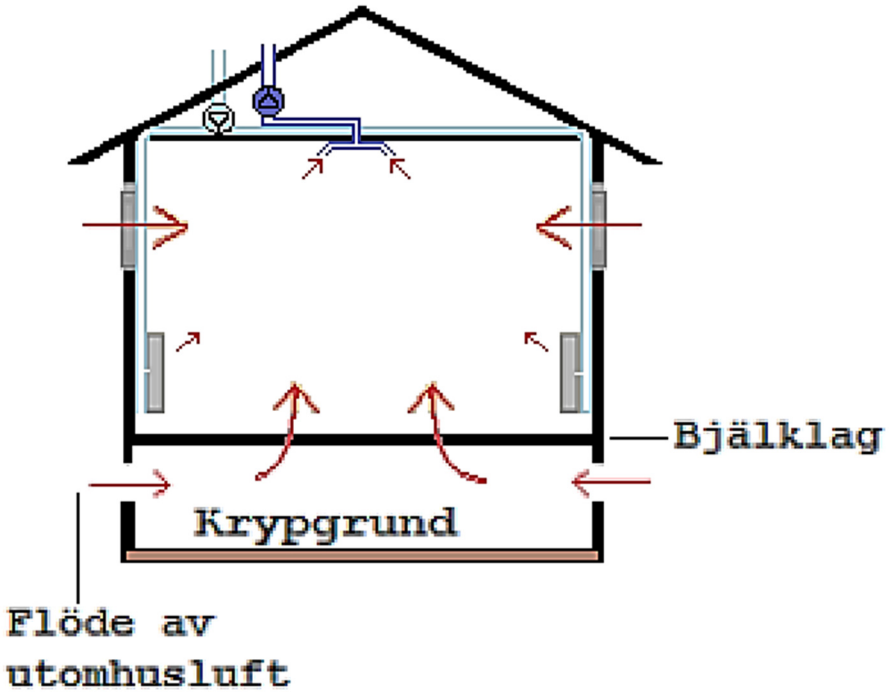
För att kunna simulera hur luftflödet varierar under året och för att ta reda på om pentakloranisol når inomhusluften har modelleringsprogrammet CONTAM använts, se kapitel 3. Fältundersökningen har, tillsammans med ritningar och litteraturundersökning, legat till grund för simuleringarnas indata. Vidare har en utredningsrapport av skolbyggnaden analyserats för att välja ut lämplig förorening att simulera i CONTAM.

2 Teori

Luftkvaliteten i en byggnad med uteluftsventilerad krypgrund är beroende av olika faktorer. Några av dessa faktorer tas närmre upp i det här kapitlet. Tryckförhållanden i och kring byggnaden påverkar luftens strömningsvägar, temperaturförändringar kan orsaka fuktproblem i krypgrunden som i sin tur kan leda till att partiklar, emissioner från byggnadsmaterial samt mikroorganismer letar sig in till inomhusluften.

2.1 Tryck och luftrörelser

Hur luften tar sig in till en byggnad har stor betydelse för hur innemiljön i en byggnad upplevs. Några olika sätt som utomhusluft kan nå inomhusluften visas i Figur 1. Beroende på var luften kommer ifrån kan den föra med sig partiklar och odörer som kan vara skadliga för kroppen. För att luften ska kunna flöda in respektive ut ur en byggnad behövs en tryckskillnad och en strömningsväg (Bankvall, 2013, s. 47). Det brukar skiljas mellan en kontrollerad respektive okontrollerad tryckskillnad. Kontrollerade tryckskillnader fås av mekanisk ventilation och okontrollerad tryckskillnad fås av termiska drivkrafter och vindinverkan. Det totala lufttrycket över klimatskärmen fås genom att lägga ihop ventilationens, vindens och den termiska inverkan.



Figur 1. Möjliga luftflödesvägar in till en byggnad med en mekanisk till- och frånluftsventilation och en krypgrund. Författarens egen bild.

2.1.1 Mekanisk ventilation

Installation av ett ventilationssystem i en byggnad påverkar lufttrycksförhållandet mellan inomhus- och utomhusmiljö och styr luftomsättningen i rummet. Ett undertryck eftersträvas för att undvika transport av varm och fuktig inomhusluft genom konstruktionen. Undertrycket leder till att riskerna för fuktskador i konstruktionen minimeras då ingen varm och fuktig inomhusluft transporteras ut genom klimatskärmen. Undertrycket kommer resultera till att utomhusluften eller luften från krypgrunden tar sig in till byggnaden. Tryckstorleksordningar

med avseende på ett från- och tilluftssystem (FT-system) regleras oftast så att man får ett undertryck på några få Pascal (Bankvall, 2013 s. 61). Med tiden kan dock även ytterligare obalans i FT-system uppstå vilket kan leda till att ett större undertryck erhålls på grund av den mekaniska ventilationen (Hagentoft, 2001, s.77). Obalansen kan bero på att tilluftsfläkten blir smutsigare än frånluftsfläkten. Ett frånluftssystem skapar normalt sätt ett större undertryck än ett FT-system, vanligen cirka 5-8 Pa (Bankvall, 2013 s. 61).

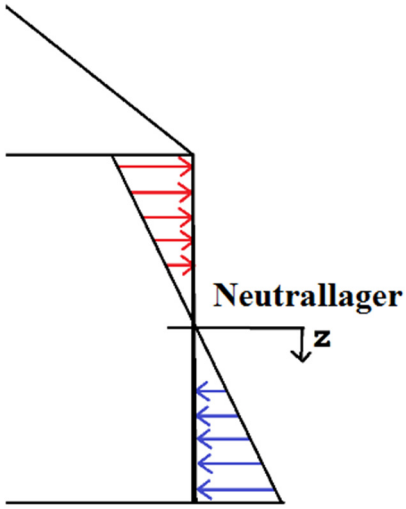
2.1.2 Termisk drivkraft

Luftens densitet är beroende av två faktorer: relativ fuktighet och temperatur (Bankvall, 2013, s. 51). Den relativa fuktigheten anger ett förhållande mellan ånghalt och mättnadsånghalten för rådande temperatur. Relativa fuktigheten betecknas RF och anges i procent. När den relativa fuktigheten uppnår sin fulla kapacitet på 100 % kondenserar vattenångan i luften (Burström, 2007, s. 55). Temperaturdifferensen sätter luften i rörelse på grund av en densitetsskillnad. Varm luft med lägre densitet i jämförelse med kall stiger medan kall luft sjunker. Densitetskillnaden kan även uppstå över en klimatskärm om det förekommer en temperaturskillnad mellan inomhus och utomhusmiljön. Lufttrycket uppstår eftersom att luftmolekyler ovan trycker ner luftmolekyler under. Trycket blir därmed beroende utav temperaturen då varm och kall luft har olika densitet som nämnt ovan (Bankvall, 2013, s. 49). Skillnader i temperatur över klimatskärmen ger en tryckskillnad på grund av så kallad skorstenseffekt enligt följande ekvation:

$$\Delta p_{skorstenseffekt} = z * 3456 * (\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i}) \quad (1)$$

där T_e är utomhustemperaturen [K] och T_i är inomhustemperaturen [K]. Z är höjden från neutrala lagret [m] positiv riktning nedåt. (Hagentoft, 2001, s. 76).

Höjden där tryckskillnaden på grund av de termiska effekterna är noll kallas för neutrallagret. Neutrallagret förflyttas beroende på hur otätheternas fördelning över klimatskärmen ser ut. Vid jämnt fördelade otätheter ligger neutrallagret i mitten, se Figur 2. Större mängd otätheter högt uppe i klimatskärm förflyttar neutrala lagret uppåt och vice versa för större otätheter nere. Vid högre temperatur inomhus än utomhus blir det ett undertryck inomhus jämfört med utomhus under neutrala lagret och ovanför neutrala lagret blir det ett övertryck inomhus jämfört med utomhus. Vid omvända temperaturförhållanden mellan inomhustemperaturen och utomhustemperaturen blir även tryckbilden omvänd (Bankvall, 2013).



Figur 2. Tryckbild mot en vägg på grund av den termiska drivkraften. Otätheterna är jämnt fördelade. Blå pilar på undre halvan visar på ett undertryck inomhus och röda pilar ett övertryck. I figuren är temperaturen inomhus högre än utomhus. Författarens egen bild.

2.1.3 Vindens inverkan

När vind blåser mot en byggnad uppstår ett så kallat vindtryck. Vindtrycket varierar beroende på träffriktningen, träffytan samt byggnadens geometriska form (Bankvall, 2013, s. 54). Vindens påverkan på byggnaden är dessutom beroende av det geografiska läget, intilliggande byggnader samt omgivande terräng. Det är exempelvis mycket lägre vindpåverkan inuti staden eller i ett bebyggt område än i ett öppet landskap.

2.1.4 Strömningsvägar och lufttäthet

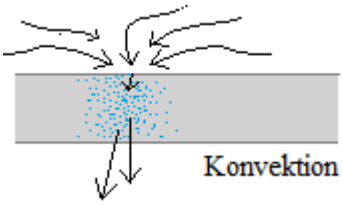
För att luft skall kunna ta sig genom klimatskärmen krävs det utöver en tryckskillnad även att det förekommer läckagevägar. Läckagevägar delas enligt Bankvall (2013, s. 48) in i oavsiktliga och avsiktliga strömningsvägar. I gruppen oavsiktliga strömningsvägar nämner Bankvall otätheter vid anslutningar och genomföringar och i avsiktliga till exempel öppnade fönster och ventiler. Luft kan även transporteras genom material, där storleken på luftflödet genom materialet beror på materialets genomsläpplighet och hur stor tryckskillnad det är över materialet (Bankvall 2013, s. 64). Byggnadens totala otäthet utgörs av hur mycket luft som flödar genom materialen i byggnadens klimatskärm och genom de oavsiktliga strömningsvägarna.

Genom att trycksätta en byggnad med 50 Pa övertryck kan ett tal för klimatskärmens totala täthet erhållas. Det baseras på hur mycket luft som flödar genom klimatskärmens totala otätheter. Det totala flödet divideras sedan med byggandens omslutningsarea varpå klimatskärmens täthet fås i enheten l/sm^2. Petersson (2012,s. 73) anger att klimatskärmens täthet för bostäder vid 50 Pa övertryck inte bör överstiga 0,8 l/sm^2 och för övriga byggnader inte bör överstiga 1,6 l/sm^2. Sandberg, Sikander, Wahlgren, Larsson (2007, s. 8) skriver att klimatskärmens täthet 2,0 l/sm^2 ofta uppmätts för hus från 70- och 80- talet.

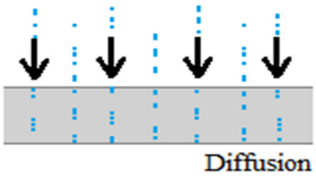
2.2 Fukttransport

Fukt kan transporteras på tre olika sätt. De tre transportsätten benämns diffusion, konvektion samt kapillärsugning. Fuktkonvektion innebär transport av fukt i ångfas genom

konstruktioner, se Figur 3. Fukten transporteras med luften genom otätheter och drivkrafterna bakom denna transport är i huvudsak temperaturskillnader, vind samt ventilation. Vid fukttransport via diffusion är det istället skillnad i ånghalt som är drivkraften, se Figur 4. Fukten transporteras från luft med hög till låg ånghalt. Kapillärsugning avser transport av fukt i form av vatten i material. När material med en otät porstruktur kommer i kontakt med vatten sker en transport av fukt från områden med hög fukthalt till områden med lägre fukthalt i försök om att nå jämvikt i materialet.



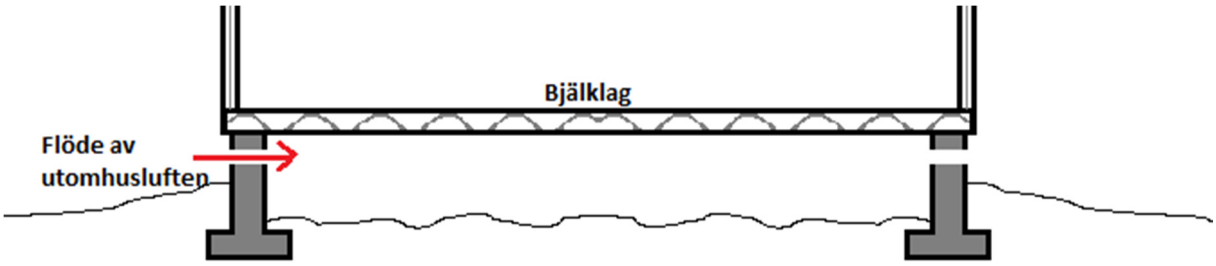
Figur 3. Konvektion genom bjälklag. Författarens egen bild.



Figur 4. Diffusion genom bjälklag. Författarens egen bild

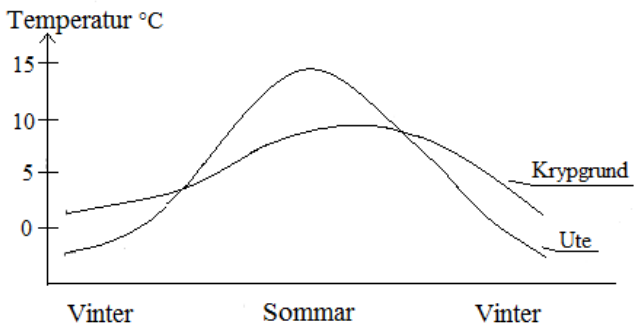
2.2.1 Krypgrunder och fuktförhållande i krypgrunder

En krypgrund är en konstruktion där bjälklaget ligger upphöjt över marken, se Figur 5 nedan. Det finns icke ventilerad, inneluftsventilerad och uteluftsventilerad krypgrund, där den senare är den mest använda. Att bjälklaget är upphöjt över marken minskar fukttillskottet från marken eftersom kapillärsugning ej kan ske. För att inspektion av krypgrunden ska kunna utföras finns det krav på att krypgrundens höjd ska vara minst en halv meter hög (Petersson, 2012, s. 176).

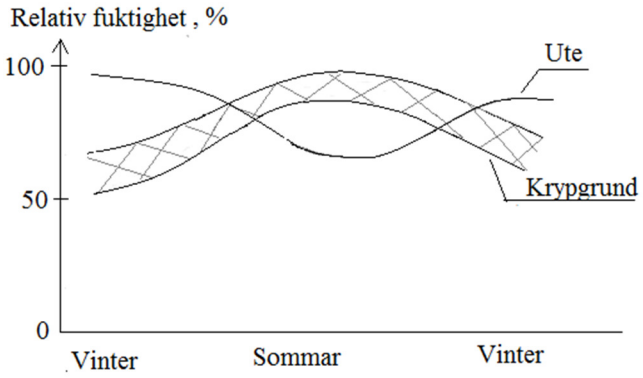


Figur 5. Uteluftsventilerad krypgrund. Författarens egen bild.

Den uteluftsventilerade krypgrunden ventileras genom väl fördelade ventiler. Denna väl fördelade självdragsventilation skapar en luftcirkulation som bidrar till att bevara fuktbalansen i utrymmet genom att byta ut krypgrundsluften med uteluften. Krypgrundsfläkt kan behövas installeras om krypgrunden är stor och därav inte kan uppnå tillräcklig luftomsättning genom självdrag (Petersson, 2012, s.176).



Figur 6. Temperaturen utomhus och i en uteluftsventilerad krypgrund över ett år (Bankvall, 2013). Författarens egen bild.



Figur 7. Relativa fuktigheten utomhus och i en uteluftsventilerad krypgrund över ett år (Bankvall, 2013). Författarens egen bild.

På grund av den varierande uteluftstemperaturen och markens värmekapacitet, förhåller sig den relativa ånghalten i krypgrunden olika under året (Petersson, 2012, s. 174-175). I början på sommaren är marken och därmed även krypgrundsluften fortfarande kall. När den varma, fuktiga uteluften tar sig in i krypgrunden höjs den relativa ånghalten därinne och klimatet blir fuktigt. Därför kan en större luftomväxling i krypgrunden under sommaren resultera i att en större mängd fukt förs in i krypgrunden, se Figur 6 och 7. Detta kan leda till mögel och andra fuktproblem på blindbottenskivor, syllar och eventuellt skräp eller sågspån på marken (Nilsson, 2006, s. 2). Petersson (2012, s. 174-175) fastslår att om hänsyn tas till fukttillskott såsom fukt från mark och byggnadsmaterial så kommer krypgrundsluften att vara fuktig under stora delar av året. Det är därför viktigt att plastfolien som läggs på marken fullständigt täcker marken. Detta så att ingen elak lukt skall kunna avges från marken och transporteras via bjälklaget till inomhusluften vid fuktiga förhållanden i krypgrunden (Olsson, 2009, s. 163). Det är inte enbart den varma uteluften som transporteras in i krypgrunden utan även inomhusluften kan transporteras ner till krypgrunden via otätheter och sprickor i bjälklaget året om ifall det råder ett undertryck i krypgrunden gentemot inomhus.

Elmroth, Harderup, Hedström, Samuelson, Svenungsson (2007, s. 1) nämner produktionstekniska och ekonomiska fördelar som den huvudsakliga anledningen till att krypgrunden fortsätter vara en vanlig konstruktionslösning, trots riskerna med fuktproblem.

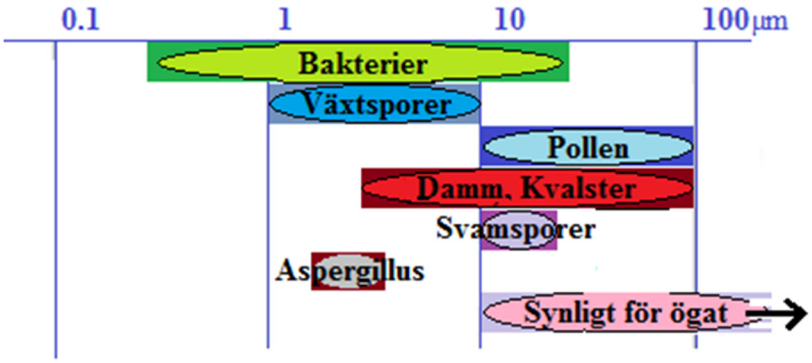
2.3 Luftkvalitet

Bra luftkvalitet i inomhusluften är en förutsättning för god inomhusmiljö. För att skapa en god luftkvalitet ventilerars byggnaderna. God ventilation är dock inte tillräckligt för att säkerställa god luftkvalitet utan det krävs att föroreningar förhindras nå inomhusluften.

Föroreningar som påverkar luftkvaliteten negativt kan förekomma i såväl gas och som partikelform. En möjlig källa till föroreningarna är byggnadsmaterial som avger emissioner. Emission från material innebär att ämnen, antingen i form av partiklar eller gas, avges från materialet (Burström, 2007, s. 199). De emitterade ämnena påverkar sedan luftkvaliteten i olika stor grad. Mikroorganismer är en annan möjlig föroreningskälla som kan leda till att partiklar når och försämrar luftkvaliteten inomhus.

2.3.1 Partiklar och mikroorganismer

Partiklar kan, förutom att delas upp efter storlek, även delas upp efter till exempel ursprung, någon viss effekt eller ett visst ämne som bygger upp partikeln. Diametern på luftburna partiklar definieras enligt Folkhälsomyndigheten från ett par nanometer till någon tiondels millimeter (Ericsson, 2006, s. 14). I kategorin små partiklar innefattas bland annat tobaksrök och virus medan det i kategorin för stora partiklar innefattas mögelsporer och sandkorn. Några olika ämnens partikelstorlekar visas i Figur 8.



Figur 8 Vanliga partikelstorlekar, (Abel, Elmroth, 2014, s.39). Författarens egen bild.

När partiklar delas in efter storlek används den aerodynamiska diametern som mått. Det innebär den diameter den hade haft om den var sfärisk, hade densiteten 1g/cm^3 samt hade den fallhastighet den har (Ericsson, 2006, s.14). Airaksinen, Kurnitski, Pasanen och Seppänen (2003, s. 2) diskuterar småpartiklars påverkan och konstaterar att framför allt småpartiklar med en storlek på mindre än 2,5 µm har en negativ inverkan på hälsan. De förklarar vidare att en stor del av inomhusluften (cirka 80 %) är utav partiklar med en aerodynamisk diameter på mindre än 4,7 µm, vilket är inandningsbara storlekar. Vanligtvis brukar dessa luftburna partiklar ha sin högsta koncentration runt 1-3 µm (Airaksinen et al, 2003, s. 2). Inhalation av partiklar med storlek mindre än 2 µm partiklar kan ta sig ner till alveolerna vilket kan orsaka framtida lungbesvär (Abel, Elmroth, 2014, s. 39).

Det har i en tidigare studie visats att partikelkoncentrationen i skolors inomhusluft är störst för de mindre partiklarna. Detta samband har visats för partikelstorlekar i intervallet 0,3- 10 µm, där storleken 0,3 µm har störst koncentration och 10 µm lägst (Alsmo, 2012, s. 13). Partiklar mindre än 1 µm har sin dominerande källa utomhus och större än 1 µm från inomhusaktivitet. Partiklar med storlek större än 5 µm orsakas i hög grad av mänsklig aktivitet (Holmberg, Chen, 2003).

Partikelformiga föroreningar finns alltid i såväl inomhus- som utomhusluften. Utomhus kan halten variera kraftigt på kort tid (Abel, Elmroth, 2014, s. 37). Vidare förklarar Abel & Elmroth (2014, s. 37) att inomhus är det människor som är den främsta partikelkällan och halten beror till stor del av verksamheten. Vanligen är också partikelhalten högre i

inomhusluften, om det vistas människor i lokalen, än partikelhalten i utomhusluften (Abel, Elmroth, 2014, s. 37).

Partikelformiga föroreningar har olika ursprung. Förenklat sägs dock fina partiklar härstamma från bland annat förbränning och kemiska reaktioner i luften, medan grova partiklar härstammar framför allt från ofullständig förbränning, växter och djur (Ericsson, 2006, s. 15-16). Koncentrationen inomhus beror delvis på människorna samt deras aktivitet. Dock är det även koncentrationen i utomhusluften som till stor del styr koncentrationen inomhus. Det gör att luftflödet mellan inomhus och utomhus är av stor betydelse för partikelkoncentrationen. Via ventilation påverkas partikelhalten av vilken typ av filter som används medan det vid otätheter och sprickor i byggnadens klimatskärm till exempel i bjälklaget mellan krypgrunden och inomhus inte finns samma möjlighet att kontrollera vilka partikelstorlekar som når inomhusluften (Ericsson, 2006).

Studier av Airaksinen et al (2003, s. 9) påvisar höga penetreringsfaktorer hos partiklar med en storlek på 0,5 - 2,5 µm. Enligt Abel och Elmroth (2014, s. 48) är svampsporer vanligen i storleken 10-30 µm. Airaksinen et al (2003) visar dock i sin studie att svampsporer som kan förekomma i krypgrunden, som till exempel mikrosvampen Aspergillus, har sin högsta koncentration runt 2,1 - 3,3 µm. Det gör att dessa i krypgrunden vanligt förekommande svampsporer har lätt för att tränga igenom material och byggnadsdelar, som till exempel ett bjälklag. Från samma studie har det påvisats att penetrationen är högst beroende av tryckskillnaden.

Ytterligare exempel på partikelformiga föroreningar som kan påverka innemiljön negativt är bakterier som har partikelstorlek på 1 - 10 µm (Abel, Elmroth 2014 s. 40). Bakterier och svampar är samlingsnamnet på mikroorganismer, även kallat mögel. Mikroorganismer är mycket små och kan ej uppfattas av människans öga utan hjälpmedel. Vid fuktskadat material är det vanligt att tala om mögel, dock är det oftast svampundergruppen mikrosvampar som benämns som mögel eller mögelsvamp (Johansson, 2006, s. 6).

Mikroorganismernas uppgift i kretsloppet är att bryta ner dött organiskt material, en viktig roll som även innebär att mikroorgansimser finns naturligt och rikligt i naturen. Mikroorganismer växer på material och dess tillväxt beror på fukthalt i materialet, temperatur och tillgång till syre.(Burström, 2007, s. 387). Byggnader riskerar därför att utsättas för angrepp av mikroorganismer på fuktigt byggnadsmaterial. Vilken fukthalt som är gynnsam för tillväxt skiljer sig mellan såväl olika mikroorganismer som material. Den lägsta fukthalt i ett material som krävs för att en mikroorganism ska kunna etablera sig kallas kritiskt fukttillstånd se Tabell 1 (Johansson, 2006, s.11). Dessutom är tiden en viktig faktor för mikroorganismers utbredning, både när det gäller under hur lång tid och hur ofta förhållandena är gynnsamma för mikroorganismerna (Petersson, 2012, s. 84).

Tabell 1. Kritiskt fukttillstånd uttryckt i relativ fuktighet (RF) för några olika material. (Johansson, 2006,s. 11)

Materialgrupp	**RF, kritiskt fukttillstånd [%]**
Trä och träbaserade material	75-80
Gipsskivor med pappytor	80-85
Mineralullsisolering	90-95
Cellplastisolering (EPS)	90-95
Betong	90-95

En del mikrosvampar och bakterier bildar och frigör sporer till luften där de sprids innan de till slut landar på ett nytt ställe och material (Johansson, 2006, s. 8). Mängden sporer i utomhusluften varierar över året och är enligt Johansson (2006, s. 8) som störst under slutet av sommaren och hösten. Detta innebär att även byggnader som inte har material angripet av mikrosvampar har en viss halt sporer i inneluften och på materialytor. Sporerna letar sig in med till exempel luftventilation, byggnadsdelar och människors kläder. Sporer i luften är alltså inte nödvändigtvis ett tecken på att byggnaden är angripen av mikroorganismer.

Negativa hälsoeffekter så som allergi och framförallt slemhinneinflammation kan kopplas till inhalation av mikroorganismer, däremot är det inte kartlagt vad för ämnen hos organismerna som påverkar människans hälsa (Johansson, 2006, s. 8). Ytterligare påverkan är den elaka lukt som mikroorganismerna ger ifrån sig i form av lättflyktiga ämnen. Alla mikroorganismer påverkar dock inte inneluften negativt (Johansson, 2006, s. 6). Det finns inga riktlinjer för hur mycket sporer inomhusluften får innehålla. Däremot står det i Boverkets byggregler, BBR, (BFS 2011:6 - BBR 18) att "Byggnader och deras installationer ska utformas så att mikroorganismer inte kan påverka inomhusluften i sådan omfattning att olägenhet för människors hälsa eller besvärande lukt uppstår".

2.3.2 Klorfenol och kloranisol

För byggnadsdelar som riskerar att utsättas för fukt används ofta impregneringsmedel för att öka livslängden på materialet och för att undvika biologiskt angrepp (Burström, 2014, s. 390). På 60- och 70-talet användes vanligen tryckimpregnerat trä på blindbotten i krypgrunden samt till syllarna. På 70-talet framkom det dock att fuktskadat material som bearbetats med tryckimpregnerat trä innehållandes pentaklorfenol gav ifrån sig illaluktande emissioner (Boverket, 2010, s. 25). Mikroorganismer kan vid kontakt med fukt bidra till att pentaklorfenol omvandlas till kloranisoler som är ett mycket mer flyktigt ämne, det vill säga har en högre avgång till luften, än pentaklorfenol (Johannesson, Barregård, 2013, s. 6).

Kloranisoler avger lukt som ofta uppfattas som mögel (Boverket, 2010, s. 25). Människor uppfattar kloranisoler redan vid väldigt små koncentrationer, det vill säga har ett lågt lukttröskelvärde. Luktröskelvärdet varierar mellan olika uppsättningar av kloranisol. För pentakloranisol (PCA) ligger lukttröskelvärdet i luft på 2.2 $\mu g/m^3$, medan det för till exempel uppsättningen 2,4,6-triCA är betydligt lägre, $5 ng/m^3$ (Lorentzen, 2015, s. 3). För att PCA ska vara toxiskt krävs dock betydligt högre koncentrationer, flera tiopotenser högre. Enligt Lorentzen har det gjorts försök på gnagare som visar att PCA är svagt toxiskt vid doser på 40 mg/kg/dag. Lorentzen (2015, s. 9) anser det dock inte troligt att svenska byggnader med problem med PCA skulle generera de mängder som krävs för skapa toxisk koncentration. En slutsats Lorentzen baserar på resultat från undersökta byggnader med problem med kloranisol, där det uppmätta medelvärdet PCA är 12 ng/m^3 och det enskilt högsta uppmätta värdet är 260 ng/m^3. Däremot diskuterar Lorentzen (2015, s. 9-10) huruvida det faktum att kloranisol uppfattas som mögel tillsammans med den allmänna uppfattningen av att mögel har negativ inverkan på hälsan skapar stress hos människor som vistas i byggnader med kloranisol. Stress kan leda till symtom som huvudvärk och trötthet vilket är vanliga klagomål i byggnader med dålig innemiljö (Boverket, 2010, s.85).

Spridningen av emissioner i gasform, likt de från fuktigt impregneringsmedel, har ett komplicerat förlopp på grund av att de avgivna emissionerna kan tas upp av andra material som står i kontakt med inomhusluften. Materialen som tagit upp emissionerna fungerar som

en slags buffert och behåller ämnena till dess att inneluften har lägre koncentration utav ämnet varpå det upptagande materialet avger emissionerna (Abel, Elmroth, 2014, s. 42-43).

2.4 Åtgärd för att förhindra att dålig lukt i krypgrunden når inomhusluften

Vid konstaterat fuktproblem i krypgrunden är en lösning att installera en frånluftsfläkt och därigenom skapa ett undertryck i krypgrunden och gentemot inomhus. På så vis hindras elak lukt och mögelsporer i krypgrunden från att tränga in genom bjälklaget till inomhusluften. Utöver detta krävs att ventiler på krypgrundens väggar täpps igen och att marken i krypgrunden lufttätas så att ett undertryck lättare skall kunna skapas. Att skapa ett undertryck i krypgrunden åtgärdar dock endast delvis problemet (Olsson, 2009, s. 164) då det kan medföra fuktskador i bjälklaget och installationen av frånluftsfläkten kan därför endast ses som en tillfällig lösning (Bankvall, 2013 s. 61). Fuktskadorna i bjälklaget kan orsakas av konvektionsfukt från inomhusluften (Petersson, 2012, s. 26).

3 Beräkningsmetodik och indata till CONTAM-simuleringar

För att analysera transporten av luft och kloranisol genom ett bjälklag har en modell skapats i simuleringsprogrammet CONTAM. Modellen är en förenklad bild av den undersökta skolan.

3.1 Bakgrund om den undersökta skolan

Skolbyggnaden är belägen i västra Göteborg och är en enplans prefabricerad modulbyggnad med uteluftsventilerad krypgrund, byggd på 70-talet. Under senare år har inneklimatet i skolan inte upplevts vara tillfredställande. Klagomål har framförts både av personal och elever och gäller i huvudsak dålig lukt i skolans syslöjdssal.

Byggnadens konstruktion utgörs utav trästomme och träbjälklag med en rötskyddsbehandlad blindbotten. Mellan golvbjälkarna finns mineralullsisolering utplacerad och marken under består av sand och grus, täckt av plastfolie.

Byggnaden har ett sluttande tak där högsta höjden är 3,5 m med undantag av en sektion, som utgörs av en idrottshall, där höjden till taket är 6,5 m. Krypgrunden täcker hela byggnaden med undantag av idrottshallen som är byggd med platta på mark. Höjden i krypgrunden är ca 1 m, varav 0,6 m förekommer under marknivå. Marken i krypgrunden lutar svagt.

Syslöjdsalen där problemen förekommer har dimensionerna 11,5x8,1x3,1m. I denna lokal förekommer ventilation med ett från- och tilluftssystem.

3.2 Beräkningsmetodik

Beräkningar har utförts genom modellering i programvaran CONTAM som är utformad av NIST (National Institute of Standards and Technology) (CONTAM, 2013). Programvaran kan beräkna olika tryckskillnader, luftflöden och spridning av föroreningar i två dimensioner. Simuleringar med hjälp av CONTAM utförs enligt lagen om massans bevarande, det vill säga det är stationära beräkningar där det går ut lika mycket luft från en zon som det går in. CONTAM antar att luften i alla zoner är välblandade, det vill säga eventuella föroreningar i zonens luft har lika stor koncentration i hela zonen. Vidare tar CONTAM endast hänsyn till skorstenseffekten gällande termiska effekter. Indata till programvaran har samlats in från nätbaserade källor, tryckta källor, ritningar av skolan samt från fältundersökningen. Denna indata sammanfattas i kapitel 3.3.

För att skapa en modell av skolan definierades tre zoner (krypgrund, syslöjdssal och tak). Därefter sattes olika temperaturer för de olika zonerna samt utomhusluften (T_e). Även om krypgrundens temperatur (T_{kg}) skiljer sig något från utomhustemperaturen förenklas den till densamma som utomhustemperaturen då dessa två zoner, via ventilerna på krypgrundens vägg, är i ständig kontakt. Simuleringar där krypgrundtemperaturen differentieras sig från utomhustemperaturen visar också att denna förenklingens påverkan är försumbar för resultatet (se Bilaga 1, Tabell 4).

Otätheters och sprickors storlek är svåra att uppskatta. De har definierats efter okulärbesiktning både med och utan värmekamera samt efter litteraturstudie. Då skolan är en typisk 70-tals byggnad tas klimatskärmens täthet fram därefter. Detta krav justeras sedan då

syslöjdssalen endast har två ytterväggar. Väggarna som skiljer syslöjdssalen till bredvidliggande rum anses vara i stationärt förhållande. Detta gör att innerväggarna inte påverkar klimatskärmens täthet.

För att skapa en tryckskillnad mellan tillufts- och frånluftsfläkten har tilluftsfläkten definierats som konstant. Frånluftsfläkten har därefter varierats till dess att en önskad tryckskillnad på några Pascal nåtts, se kapitel 3.3.2.

Vindhastigheter som använts har tagits ifrån SMHI (Alexandersson, 2006, s. 7). Då dessa vindhastigheter är tagna vid väderstationer, som oftast mäter vindhastigheten på tio meters höjd, så räknas vindhastigheten om enligt följande ekvation:

$$U_z = U_m * k * z^a \quad (2)$$

där U_m [m/s] är vindhastigheten vid väderstationen på tio meters höjd, U_z [m/s] är vindhastigheten på höjden z [m] av byggnaden. Konstanterna k och a beror på typ av terräng (Hagentoft, 2001, s. 73).

Den dominerande vindriktningen på västkusten är, enligt uppgifter från SMHI, västlig/sydvästlig riktning (SMHI, 2015). Skolan har plan mark till väster och grövre terräng till öster. Denna information har använts för att definiera väster som den dimensionerande vindriktningen i beräkningarna.

För att simulera halten av PCA har en alstring av föroreningen [kg/s] definierats i krypgrunden. Det beskriver hur mycket av ett ämne som produceras per tidsenhet. Detta värde har varierats till dess att gränsvärdet för lukttröskeln (se Kapitel 2.3.3) i syslöjdssalen uppnåtts och är därför inget sanningsenligt värde. Gränsvärdet har hittats för augusti månad, detta för att det är månaden (av de månader som eleverna går i skolan, juni och juli ej medräknade) där skillnaden mellan utomhustemperatur och inomhustemperatur är som minst. Minst temperaturskillnad ger minst skorstenseffekt. Det är därför troligt att denna månad kommer ge minst luftflöde under året från krypgrunden upp genom bjälklaget, och tros därför resultera i minst PCA- koncentration i syslöjdssalen. Övrig indata har hämtats från litteratur och ritningar eller med hjälp av en okulärbesiktning på plats i skolan och sammanställs i kapitel 3.3.

3.3 Simulerad skola och klimat

Totalt har sju simuleringar av skolan utförts. Simulering 1-3 är utförda över ett helt år och simulering 4-7 endast för en månad. Vissa antaganden och viss indata som använts är densamma för samtliga simuleringar medan annan indata varierar. Samtliga antaganden och indata redovisas nedan, se även Tabell 2.

3.3.1 Generell indata för samtliga simuleringar

Inomhusluften, vindriktningen samt PCA-alstringen är densamma för samtliga simuleringar.

Vid fältundersökning av skolan bedömdes otätheterna vara jämnt fördelade över ytterväggarna. Därför hamnar neutrallagret i mitten av väggen och otätheterna kan därför i CONTAM förenklas till en otäthet mitt på väggen för respektive yttervägg. Otätheterna fördelas jämt på de två ytterväggarna, taket och bjälklaget.

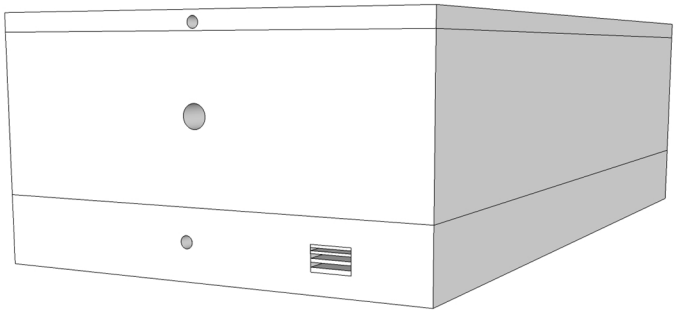
Ventilerna i krypgrunden uppskattas enligt Träguidens (2003) anvisningar till 0,05 m^2 per 100m^2 bjälklagsarea och fördelas på två lika stora ventiler.

Lukttröskelgränsvärde på PCA-koncentrationen är 2,2 µg/m3, se kapitel 2.3.2.

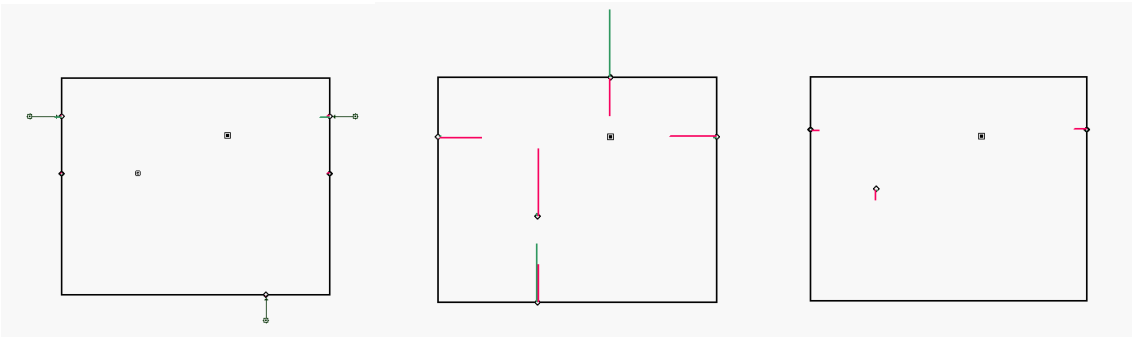
Den enda egenskap som använts för att skapa PCA-föroreningen med dess alstring i CONTAM är dess molekylmassa på 208 g/mol. Se Bilaga 2, Figur 11, för beräkning av molekylmassa.

Syslöjdsrummet är 11,5 m långt, 8,1 m brett och 3,1 m högt. Krypgrunden är 1 m hög men endast 0,4 m av krypgrunden befinner sig ovanför marknivå. I CONTAM måste ett tak definieras som en egen zon för att kunna simulera otätheter i taket. Takets höjd har definierats till 0,1 m.

Klimatskärmens täthet för skolan uppskattas för 70-tals hus vara 2,0 l/sm^2 (Sandberg et al, 2007, s. 8) justeras till 0,33 l/sm^2, se Bilaga 3, Figur 12. De två innerväggarna tas bort från omslutningsarean samt tak och golv då CONTAM skapar lika tryck på alla tre zoner. Därför blir det ingen tryckskillnad mellan zonerna i vertikalled utan bara mellan utomhus och inomhus, i horisontalled. Otätheterna i taket och i krypgrunden sätts lika stora.



Figur 9 Förenklad modell av skolan. Från ner och upp: krypgrund, syslöjdssal och tak. Cirklarna representerar de förenklade otätheterna. I krypgrunden syns även en ventil. De ljusa väggarna vetter mot utomhus och de skuggade mot intilliggande rum. Denna modell gäller för Simulering 1. I Simulering 2-7 tätas ventilen och ersätts med en frånluftsfläkt. Författarens egen bild.



Figur 10 CONTAM- modeller, sett uppifrån, av, från vänster till höger: krypgrund, syslöjdssal samt tak. De rosa strecken står för tryck och de gröna för luftflöde. Bilderna är från Simulering 1 då ingen frånluftsfläkt är installerad i krypgrunden. Bilderna visar ett luftflöde upp genom bjälklaget. Författarens egen bild.

Tabell 2. Indata för simuleringar i Contam.

Simu-lering	Månad	T_e [ºC]	T_{kg} [ºC]	T_i [ºC]	Tilluftsfläkt [l/s]	Frånluftsfläkt [l/s]	Vindhastighet U_z [m/s]	Krypgrundsfläkt
1	Januari	-0,9	-0,9	20	32,6	37,6	1,832	Nej
	Februari	-1,2	-1,2	20	32,6	37,6	1,977	Nej
	Mars	1,3	1,3	20	32,6	37,6	1,832	Nej
	April	6	6	20	32,6	37,6	1,639	Nej
	Maj	11,5	11,5	20	32,6	37,6	1,687	Nej
	Juni	15,2	15,2	20	32,6	37,6	1,784	Nej
	Juli	17,5	17,5	20	32,6	37,6	1,591	Nej
	Augusti	16,8	16,8	20	32,6	37,6	1,591	Nej
	September	13,1	13,1	20	32,6	37,6	1,591	Nej
	Oktober	8,6	8,6	20	32,6	37,6	1,687	Nej
	November	4,5	4,5	20	32,6	37,6	1,639	Nej
	December	1,8	1,8	20	32,6	37,6	1,687	Nej
2	Januari	-0,9	-0,9	20	32,6	37,6	1,832	Ja
	Februari	-1,2	-1,2	20	32,6	37,6	1,977	Ja
	Mars	1,3	1,3	20	32,6	37,6	1,832	Ja
	April	6	6	20	32,6	37,6	1,639	Ja
	Maj	11,5	11,5	20	32,6	37,6	1,687	Ja
	Juni	15,2	15,2	20	32,6	37,6	1,784	Ja
	Juli	17,5	17,5	20	32,6	37,6	1,591	Ja
	Augusti	16,8	16,8	20	32,6	37,6	1,591	Ja
	September	13,1	13,1	20	32,6	37,6	1,591	Ja
	Oktober	8,6	8,6	20	32,6	37,6	1,687	Ja
	November	4,5	4,5	20	32,6	37,6	1,639	Ja
	December	1,8	1,8	20	32,6	37,6	1,687	Ja
3	Januari	-0,9	-0,9	20	32,6	37,6	1,832	Ja
	Februari	-1,2	-1,2	20	32,6	37,6	1,977	Ja
	Mars	1,3	1,3	20	32,6	37,6	1,832	Ja
	April	6	6	20	32,6	37,6	1,639	Ja
	Maj	11,5	11,5	20	32,6	37,6	1,687	Ja
	Juni	15,2	15,2	20	32,6	37,6	1,784	Ja
	Juli	17,5	17,5	20	32,6	37,6	1,591	Ja
	Augusti	16,8	16,8	20	32,6	37,6	1,591	Ja
	September	13,1	13,1	20	32,6	37,6	1,591	Ja
	Oktober	8,6	8,6	20	32,6	37,6	1,687	Ja
	November	4,5	4,5	20	32,6	37,6	1,639	Ja
	December	1,8	1,8	20	32,6	37,6	1,687	Ja
4	–	– 26,4	-26,4	20	32,6	37,6	0	Ja
5	–	34,1	34,1	20	32,6	37,6	16,874	Ja
6	Februari	– 1,2	– 1,2	20	32,6	42,6	1,977	Ja
7	Februari	– 1,2	– 1,2	20	0	0	1,977	Ja

3.3.2 Indata till och förklaring av simulering 1-3

Simulering 1-3 är alla gjorda över ett helt år där utomhusmedeltemperaturen, se Diagram 1, som sätts lika med krypgrundtemperaturen för varje månad hämtades från Petersson (2012, s. 42), se Tabell 2. Medelvindhastigheten, se Diagram 2, som hämtades från Alexandersson (2006, s. 7) är även den densamma för simulering 1-3, se Tabell 2.

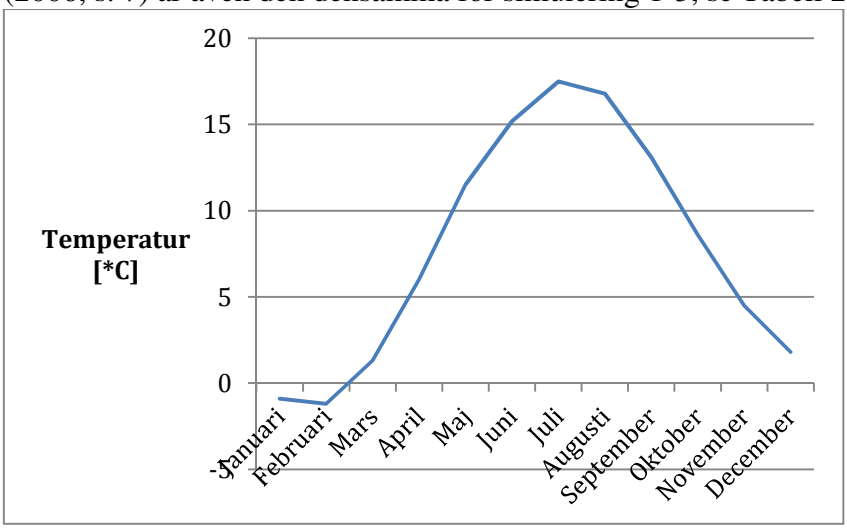


Diagram 1. Temperatur utomhus och i krypgrunden över ett år, då temperaturerna i krypgrunden och utomhus satts lika med varandra i simuleringarna.

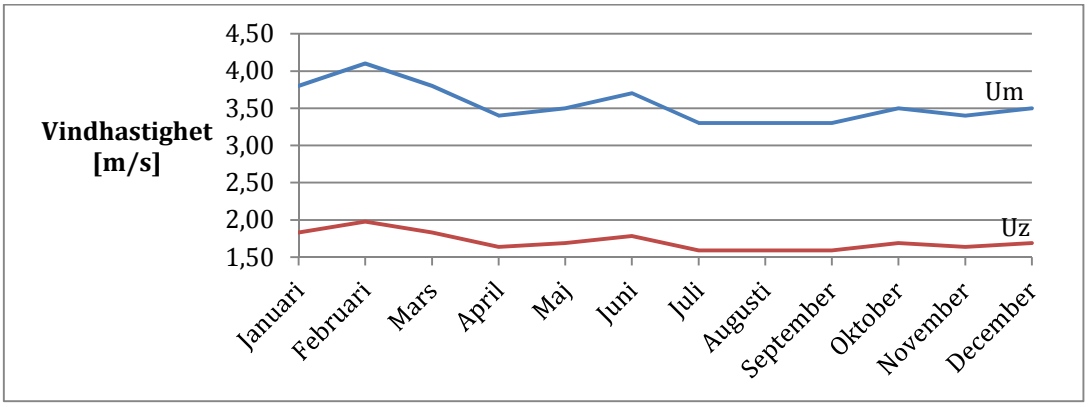


Diagram 2. Vindhastigheten vid mätstation, Um, och vindhastigheten vid byggnaden, Uz

Tilluftsventilationen inne sätts till 32,6 l/s för att klara BBR-kraven (Boverkets byggregler) på 0,35 l/sm^2 för bostadsrum (Elmroth, 2012). Frånluftsventilationen sätts till 37,6 l/s för att skapa ett undertryck inomhus gentemot utomhus så att en tryckskillnad på ungefär 2,9 Pa uppnås. Detta är inom ramen men i överkant för normala tryckskillnader (Bankvall, 2013, s. 61). I simulering 1 användes ingen frånluftsfläkt.

I simulering 2 undersöks vilket luftflöde på frånluftsfläkten som behövs för att det i augusti månad ska bli ett undertryck i krypgrunden gentemot inomhus. Klarar frånluftsfläkten detta i augusti, kommer den inte klara det i resterande månader på grund av att temperaturskillnaden mellan inomhus och utomhus är så liten som möjligt (under de månader som eleverna går i skolan, juni och juli ej medräknade), och därmed är skorstenseffekten minst i augusti.

I simulering 3 undersöks vilket luftflöde på frånluftsfläkten som behövs i februari. Klarar frånluftsfläkten detta i februari, kommer den klara det i resterande månader på grund av att

temperaturskillnaden mellan inomhus och utomhus är som störst då, och därmed är skorstenseffekten som störst i februari.

3.3.3 Indata till och förklaring av simulering 4-5

Utgångsläget för simulering 4 är februari månad från simulering 3.
I simulering 4 sätts utomhustemperaturen och krypgrundstemperaturen till den lägst, och i simulering 5 till den högst uppmätta temperaturen i Göteborg någonsin, -26,4 ^{o}C respektive 35,1 ^{o}C (Göteborgs Stad, 2003).

Luftflödet genom bjälklaget undersöks för att ta reda på vilken riktning det har, samt hur stort det är, i dessa kritiska fall. Visar resultatet att luftflödet går från kryprunden till inomhusluften, undersöks även hur stort flöde frånluftsfläkten behöver ha för att luftflödet ska gå åt motsatt håll.

3.3.4 Indata till och förklaring av simulering 6

Utgångsläget för simulering 6 är februari månad från simulering 3. I simulering 6 ändras tryckskillnaden mellan frånluftsventilationen och tilluftsventilationen. Frånluftsventilationen sätts till 42,6 l/s istället för 37, 6 l/s. Tilluftsventilationen är densamma som i tidigare simuleringar, 32,6 l/s.

3.3.5 Indata till och förklaring av simulering 7

Utgångsläget för simulering 7 är februari månad från simulering 3. I simulering 7 tas ventilationen inomhus bort. Till- och frånluftsventilation sätts till 0 l/s.

4 Resultat

För att analysera hur pentakloranisol och partiklar tar sig in i inomhusluften från krypgrunden samt för att analysera hur luftflödet varierar över året har både CONTAM-simuleringar och en partikelhaltmätning utförts.

4.1 Resultat av CONTAM-simuleringar

För att analysera hur luftflödet genom bjälklaget varierar över året, med och utan frånluftsfläkt i krypgrunden, har sju CONTAM-simuleringar genomförts. Dessutom har andelen pentakloranisol i krypgrunden som når inomhusluften analyserats för varje simulering.

4.1.1 Simulering 1, utan frånluftsfläkt i krypgrunden

Vid simulering 1 erhålls ett undertryck i syslöjdssalen jämfört med krypgrunden under hela året, se Diagram 3. Vidare flödar luften genom bjälklaget från krypgrunden till syslöjdssalen under hela året likt en sinusformad kurva, se Diagram 4. Lägst tryckskillnad och luftflöde fås under sommarmånaderna med minimumvärdet 3,06 Pa och 1,41 l/s i juli månad. Högst tryckskillnad samt luftflöde fås under vintermånaderna med maxvärde 4,12 Pa och 1,78 l/s i Februari.

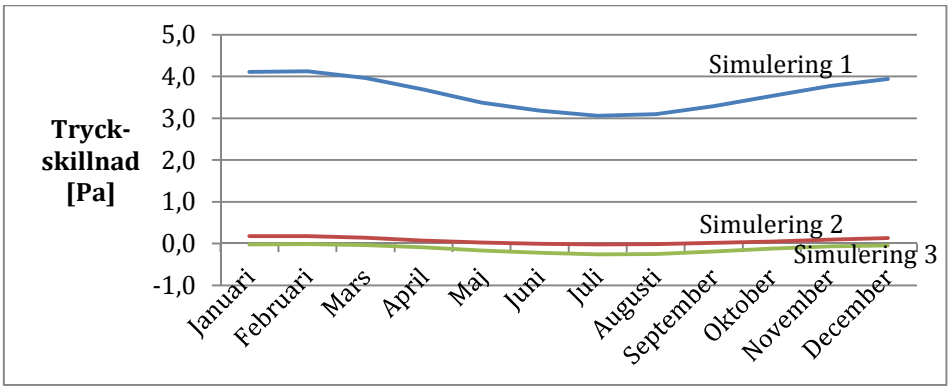


Diagram 3. Tryckskillnad över bjälklag. För positiv tryckskillnad gäller undertryck inomhus relativt krypgrunden och vice versa.

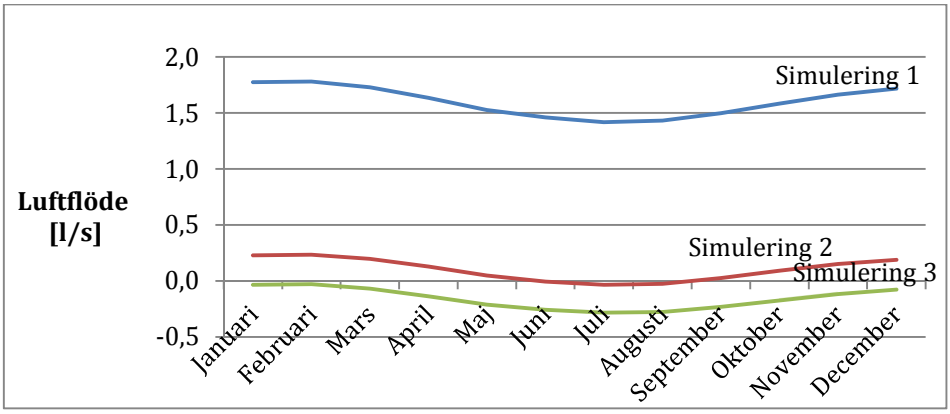


Diagram 4. Luftflöde genom bjälklag. För positivt luftflöde strömmar luften från krypgrunden in i inomhusluften och vice versa.

Mängden pentakloranisol (PCA) i krypgrunden varierar från 3,42 × 10^{-8} kg/kg i februari månad och 4,81 × 10^{-8} kg/kg i juli månad. Som framgår i Diagram 5 är följer koncentrationen PCA i krypgrunden inte en linjär kurva. Koncentrationen PCA i inomhusluften ligger kring lukttröskelgränsvärdet 2,2 µg/m^3 = 1,83 × 10^{-9} kg/kg större delen av året, se Diagram 6, med undantag av framförallt februari och juni då den är något lägre, 1,62 × 10^{-9} kg/kg. Högsta värdet 1,92 × 10^{-9} kg/kg erhålls i November. Med hjälp av koncentrationen PCA i krypgrunden och i syslöjdssalen kan ett Diagram ritas upp som visar hur stor andel av PCA:n i krypgrunden når sysslöjdssalen, se Diagram 7. Som mest, i januari och februari, går 4,7 % av PCA:n i krypgrunden upp till syslöjdssalen. Som minst, i juli och augusti, går 3,8 % av PCA:n i krypgrunden upp till syslöjdssalen.

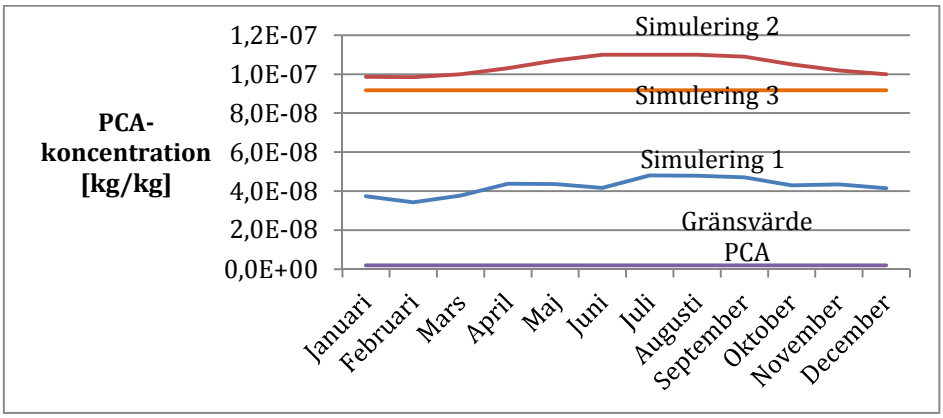


Diagram 5. PCA- koncentration i krypgrunden över ett år för Simulering 1-3 samt lukttröskelvärdet för PCA.

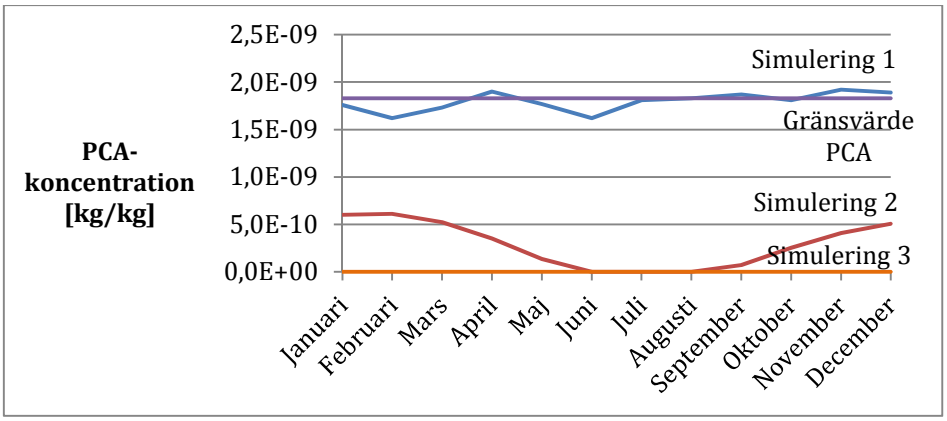


Diagram 6. PCA- koncentration i syslöjdssalen över ett år för Simulering 1-3 samt lukttröskelvärdet för PCA.

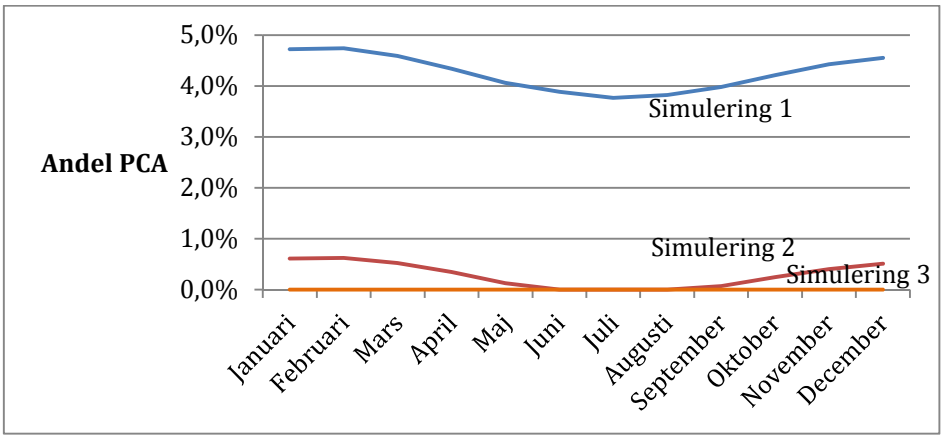


Diagram 7. Andel PCA som når syslöjdssalen från krypgrunden.

4.1.2 Simulering 2, krypgrundsfläkt med luftflöde 2,0 l/s

Försök visade att en frånluftsfläkt i krypgrunden med ett flöde på 2 l/s krävs för att skapa ett undertryck i krypgrunden gentemot inomhus i augusti månad. Diagram 3 visar att Simulering 2 ger ett undertryck i syslöjdssalen gentemot krypgrunden under hela året bortsett från sommarmånaderna då det istället är ett undertryck i krypgrunden gentemot syslöjdssalen. Analogt flödar luften upp från krypgrunden genom bjälklaget in till syslöjdssalen under hela året bortsett från sommarmånaderna då flödesriktningen är den motsatta, se Diagram 4. Största uppåtriktade flödet genom bjälklaget är 0,23 l/s och erhålls i februari medan det största nedåtriktade flödet är 0,04 l/s i juli. I krypgrunden varierar koncentrationen pentakloranisol (PCA) från $9{,}85 \times 10^{-8}$ kg/kg i februari månad till $1{,}10 \times 10^{-7}$ under sommarmånaderna. Koncentrationen PCA är som högst $6{,}12 \times 10^{-10}$ kg/kg och är under lukttröskelvärdet i syslöjdssalen hela året. Koncentrationen är noll under stora delar av sommarmånaderna då flödet går nedåt genom bjälklaget, se Diagram 6. Andelen PCA i krypgrunden som når syslöjdssalen varierar från 0,6 % i januari och februari till noll under sommarmånaderna, se Diagram 7.

4.1.3 Simulering 3, krypgrundsfläkt med luftflöde 2,4 l/s

För att åstadkomma ett undertryck i krypgrunden gentemot syslöjdssalen i februari månad krävs en frånluftsfläkt med flödet 2,4 l/s. Simulering 3 resulterar i undertryck i krypgrunden gentemot inomhus och ett luftflöde från syslöjdssalen genom bjälklaget till krypgrunden under hela året, se Diagram 3 och 4. Störst undertryck i krypgrunden och störst luftflöde genom bjälklaget fås i juli månad då luftflödet är 0,29 l/s nedåt genom bjälklaget och tryckskillnaden 0,26 Pa. Minst luftflöde genom bjälklaget är det i februari månad då flödet är 0,03 l/s. Halten pentakloranisol (PCA) i krypgrunden är $9{,}17 \times 10^{-8}$ kg/kg under hela året, se Diagram 5 och halten PCA i syslöjdssalen förbli i detta fall noll under hela året, se Diagram 6.

4.1.4 Simulering 4, minimum temperatur samt vind

När temperaturen sätts till ett extremt lågt värde, - 26,4 °C, vinden definieras till noll och ett flöde på 2,4 l/s hos frånluftsfläkten ansätts i krypgrunden fås ett uppåtriktat luftflöde genom bjälklaget på 0,41 l/s, se Diagram 8. Halten pentakloranisol (PCA) i krypgrunden blir i detta fall $7{,}83 \times 10^{-8}$ kg/kg och i syslöjdssalen $8{,}55 \times 10^{-10}$ kg/kg, det vill säga 1,1 % av PCA:n i krypgrunden når sysslöjdssalen. För att skapa ett undertryck i krypgrunden även vid detta extrema förhållande krävs ett frånluftsfläktflöde i krypgrunden på 3,1 l/s.

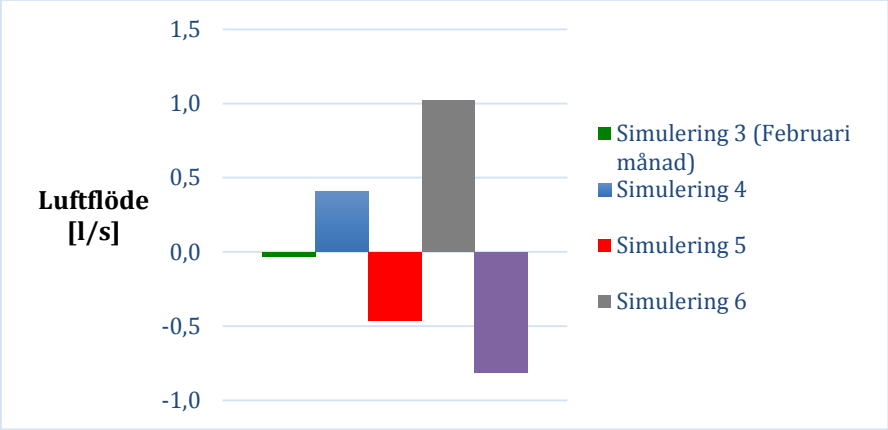


Diagram 8. Luftflöde genom bjälklag. För positivt luftflöde strömmar luften från krypgrunden in i inomhusluften och vice versa.

4.1.5 Simulering 5, maximum temperatur samt vind

När temperaturen och vinden sätts till ett extremt höga värden, 34,1°C och 35 m/s och med ett flöde på 2,4 l/s hos frånluftsfläkten i krypgrunden fås ett nedåtriktat luftflöde genom bjälklaget på 0,46 l/s, se Diagram 8. Halten pentakloranisol i klassrummet blir i detta fall noll.

4.1.6 Simulering 6, stor tryckskillnad mellan till- och frånluftsventilation

När frånluftsventilationen i klassrummet ges 10 l/s högre flöde än tilluftsventilationen bidrar den mekaniska ventilationen med ett undertryck på 8,59 Pa i syslöjdssalen gentemot utomhus. Om flödet på frånluftsfläkten är 2,4 l/s fås då ett uppåtriktat flöde genom bjälklaget på ca 1,02 l/s, se Diagram 8. Halten pentakloranisol (PCA) i krypgrunden blir i detta fall $6{,}43 \times 10^{-8}$ kg/kg och i sysslöjdssalen $1{,}54 \times 10^{-10}$ kg/kg. Det innebär att vid simulering 8 når 2,4 % av PCA i krypgrunden syslöjdssalen, se Diagram 9. Flödet på frånluftsfläkten behöver i detta fall vara 4,2 l/s för att skapa ett undertryck i krypgrunden gentemot sysslöjdssalen.

4.1.7 Simulering 7, ingen mekanisk ventilation inomhus

När ventilationen i klassrummet simuleras som avstängd och frånluftsfläkten i krypgrunden har ett flöde på 2,4 l/s, erhålls ett nedåtriktat flöde genom bjälklaget på 0,81 l/s, se Diagram 8. Andelen pentakloranisol i klassrummet blir i detta fall noll.

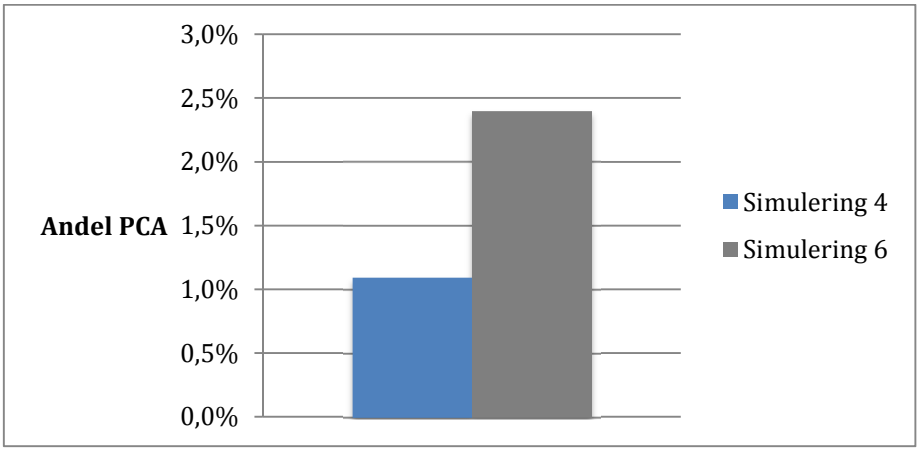


Diagram 9. Andel PCA som når syslöjdssalen från krypgrunden. För simulering 3 i februari månad samt för simulering 5 och 7 är andelen PCA noll.

4.2 Resultat från partikelhaltmätningen

För att analysera hur och vilka partiklar i krypgrunden som når inomhusluften genomfördes partikelhaltmätningar i skolan under en dag.

Ett övertryck visade sig, med hjälp av att puffa rök vid en otäthet i bjälklaget, finnas i krypgrunden relativt inomhus. Värmekamera visade tillsammans med sökning av läckage med händerna otätheter vid såväl tak, bjälklag som väggar och skarvar. Partikelhaltmätningen gjordes för fyra storleksintervall; > 0,3 µm, > 0,5 µm, > 1,0 µm och > 5,0 µm. Resultatet uppvisade störst koncentration av storleksintervallet 0,3 - 0,5 µm, följt av 0,5 - 1 µm och därefter 1,0 – 5,0 µm.

Högst andel partiklar då Blower Door ej var igång förekom utomhus, med undantag för partiklar av storlek > 5,0 µm, se Diagram (10 – 13). Resultaten visar störst koncentration av partiklar med storlek > 5,0 µm i byggnaden i omklädningsrummet, medan lägsta koncentrationen av samma storlek hittas i krypgrunden. Andelen partiklar av resterande storlekar var högre i krypgrunden än inomhus.

Förhållandet mellan partikelstorlekarna skiljde sig avsevärt för mätningarna utomhus, i krypgrunden och i omklädningsrummet. Halten av storlek > 0,3 µm kunde som mest förekomma upp till 50 gånger mer än halten av storlek > 5,0 µm i omklädningsrummet, se Diagram 14.

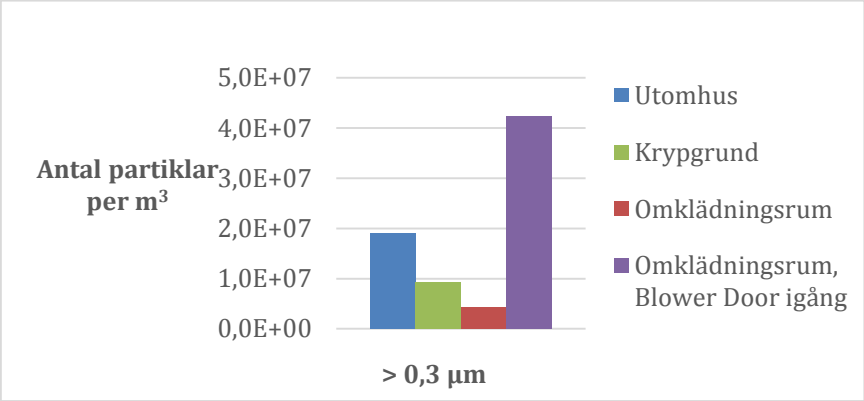


Diagram 10. Mätning av partikelhalt, större än 0,3 µm, i olika miljöer.

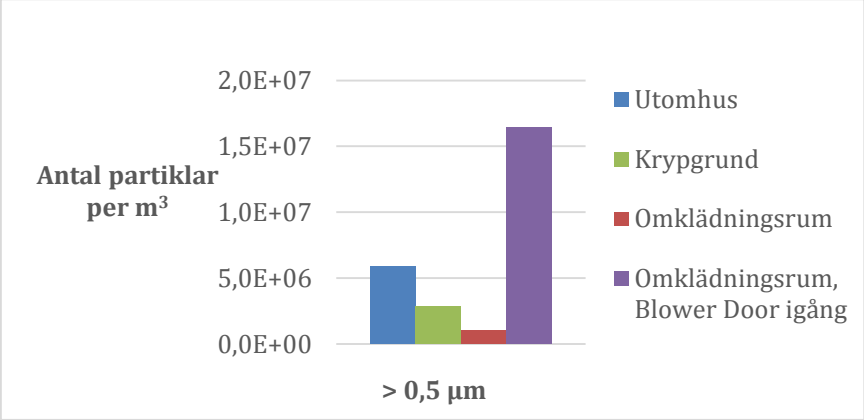


Diagram 11. Mätning av partikelhalt, större än 0,5 µm, i olika miljöer.

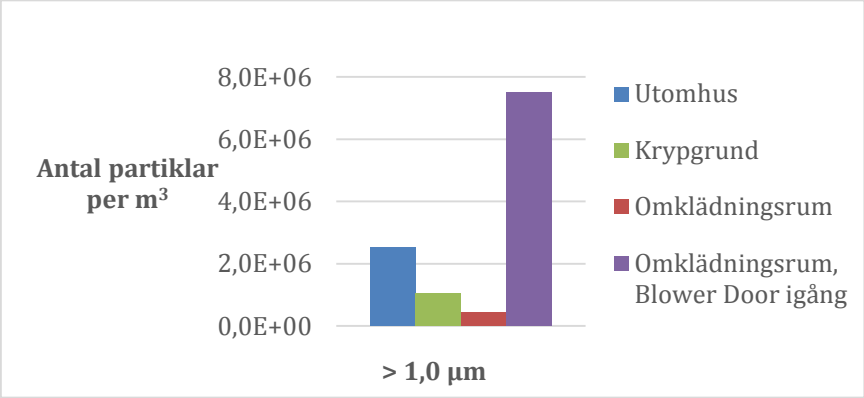


Diagram 12. Mätning av partikelhalt, större än 1,0 µm, i olika miljöer.

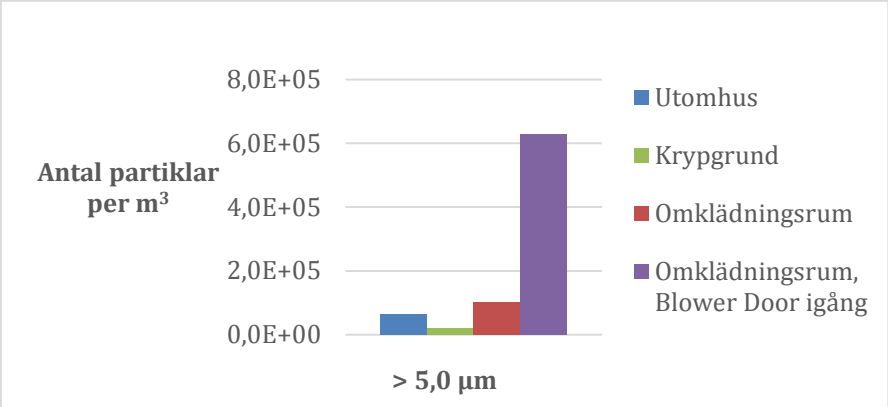


Diagram 13. Mätning av partikelhalt, större än 5,0 µm, i olika miljöer.

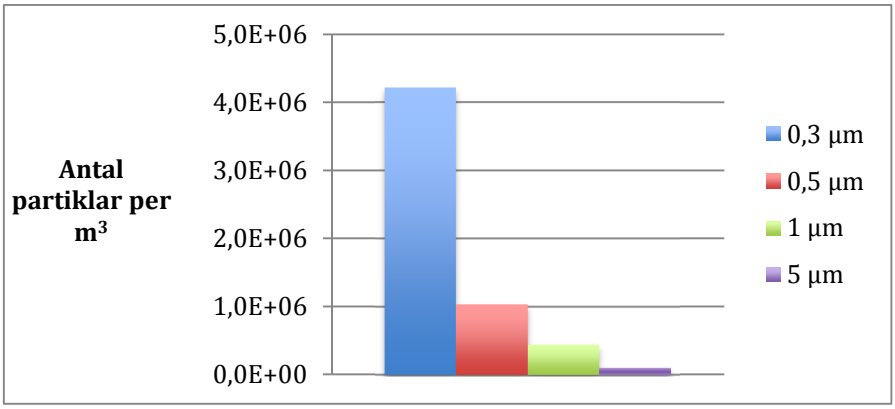


Diagram 14. Partikelförhållande i omklädningsrummet mellan storlekarna 0.3, 0.5, 1 och 5 µm.

Partikelhalten i inomhusluften ökade för alla storlekar då Blower Door sattes igång. Den största ökningen representerades av partiklar av storlek > 1,0 µm där halten ökade med mer än 17 gånger. Ökningen som motsvaras av partiklar av storlek > 5,0 µm ökade med cirka 6 gånger, se Tabell 3.

Tabell 3. Partikelförhållandet inne i omklädningsrummet innan och efter skapat undertryck inne.

Storlek partikel	**Förhållande av antal partiklar i flickornas omklädningsrum före och efter Blower Door satts igång**
> 0,3 µm	10
> 0,5 µm	16
> 1,0 µm	17
> 5,0 µm	6

5 Diskussion

Simuleringen av skolan är en förenkling av verkligheten och innebär att antaganden som gjorts påverkar resultatet. Att partikelmätningarna endast gjorts vid ett tillfälle i skolan gör att halterna ej bör ses som indikator på hur mycket partiklar det finns i och kring skolan. Snarare erhålls en indikation på hur partikelstorlekar och partikelhalter förhåller sig mellan krypgrund, omklädningsrum och utomhus.

5.1 CONTAM- simuleringar

I simulering 1 erhölls ett luftflöde uppåt genom bjälklaget under hela året och ett undertryck på ovansidan av bjälklaget gentemot undersidan av bjälklaget hela året, se Diagram 3 och 4. Undertrycket på ovansidan bjälklaget beror framför allt på mekaniska ventilationen inomhus, som är simulerad att skapa ett undertryck på 2,9 Pa relativt utomhus. Luftflödets storleksvariation beror på skorstenseffekten, som har störst inverkan på trycket då det är stora temperaturskillnader. I simulering 1 bidrar det till ett större luftflöde genom bjälklaget på vintern. Storleksvariationen på luftflödet är 0,37 l/s under året och variationen på tryckskillnaden är 1,06 Pa. Det är alltså relativt små förändringar över året, vilket delvis kan förklaras med att byggnaden är låg vilket gör att skorstenseffektens inverkan inte blir särskilt stor.

Skorstenseffektens påverkan framkommer i simulering 4 och 5. I simulering 4, när temperaturen utomhus och i krypgrunden sätts extremt låg, -26,4 °C, blir luftflödet 0,41 l/s uppåtriktat och det krävs en frånluftsfläkt med flödet 3,1 l/s, det vill säga 0,6 l/s större flöde för att förhindra ett undertryck i krypgrunden gentemot inomhus, se Diagram 8. Att temperaturen är -26,4 °C är självfallet inget normalt och det kan även tänkas att de gånger det är extremt kallt handlar det om korta perioder. Däremot kommer det vid flertalet tillfällen vara kallare än det kallaste månadsmedel i februari, -1,2 °C. Det skulle alltså potentiellt kunna leda till ett uppåtriktat flöde under kortare perioder. När det som i simulering 5 är högre temperatur i utomhusluften och krypgrunden än inomhus får skorstenseffekten omvänd inverkan. Det vill säga skorstenseffekten bidrar till ett nedåtriktat flöde genom bjälklaget, se Diagram 8 samt ekvation (1), och det blir därför lättare att skapa ett undertryck i krypgrunden gentemot inomhusluften. Dessutom är vinden satt till ett extrem högt värde och med riktning rakt mot fasaden i simulering 5 vilket även det bidrar till ett övertryck inomhus gentemot såväl utomhus som i krypgrunden.

Vinden påverkar tryckbilden och därmed luftflödet genom bjälklaget, se Kapitel 2.1.3. Diagram 4 visar hur det simulerade luftflödet varierar under året. Luftflödet påminner om en sinusformad kurva medan vinden varierar på ett mer oregelbundet sätt över året, se figur 10. Det verkar alltså som att vinden inte har någon större inverkan på luftflödet då en frånluftsfläkt är installerad. Däremot framgår det att vinden påverkar halten pentakloranisol (PCA) i desto större utsträckning. Mängden PCA i krypgrunden varierar med vindförhållandet, vilket syns i Simulering 1, jämför Diagram 2 med Diagram 6. Mycket vind ger en mindre mängd PCA i krypgrunden som i sin tur ger en mindre mängd PCA i syslöjdssalen. Orsaken till att ökad vind leder till en minskad mängd PCA i krypgrunden är att ökad vind innebär en ökad ventilation, och därmed en utspädning, av den förorenade krypgrundsluften, vilket leder till att koncentrationen av emissioner, i det simulerade fallet PCA, blir mindre i krypgrunden.

PCA är en biprodukt av pentaklorfenol som förr användes i impregneringsmedel för bland annat träprodukter, se Kapitel 2.4.2. Pentaklorfenols uppgift är att förhindra mikrobiell påväxt och är således mycket giftig för organismer. En installation av en frånluftsfläkt i krypgrunden kan hindra PCA från att nå inomhusluften men inte från att nå utomhusluften. Möjligtvis skulle en installation av frånluftsfläkt till och med kunna leda till ökat lokalt utsläpp av PCA till utomhusluften med potentiell risk att skada organismer i närheten av byggnaden. Det kan därför tänkas att det är av vikt att kontrollera hur mycket PCA som finns i krypgrunden innan en åtgärd som hindar PCA att nå inomhusluften vidtas. Vilken mängd PCA som kan anses acceptabel att släppa ut från krypgrunden är dock inget som studerats.

PCA-halten i syslöjdsalen har inte ett linjärt förhållande med luftflödet genom bjälklaget i Simulering 1, se Diagram 6. Det är en liten skillnad mellan största och minsta mängd PCA i syslöjdsalen under året men koncentrationen ligger runt lukttröskelvärdet hela året. Det tyder på att om PCA är orsaken till dålig innemiljö är det ett problem som finns året om. Koncentrationen beror på den alstring av ämnet som definierats i simuleringen. Då inga värden på mängden PCA som alstras i krypgrunden på skolan har kunnat tas fram är det framför allt förhållandet mellan mängden PCA i krypgrunden och syslöjdssalen som är intressant. Kurvan över andelen PCA i krypgrunden som når sysslöjdssalen varierar på samma sätt som luftflödet genom bjälklaget, jämför Diagram 4 med Diagram 7. Diagram 7 visar att mellan 3,8 och 4,7 % av PCA i krypgrunden når syslöjdssalen i simulering 1. Som nämnts i kapitel 2.4.2 krävs en väldigt hög koncentration PCA än den högst uppmätta i Lorentzens (2015) studie för att det skall vara toxiskt farligt. Det är därför osannolikt att PCA i den undersökta skolan skulle vara toxiskt farlig, då det även är en så liten andel som tar sig upp från krypgrunden till syslöjdssalen.

I simulering 2 följer luftflödeskurvan samma mönster som i simulering 1, med förändringen att storleken på flödet genom bjälklaget under de delar av året det är uppåtriktat har minskat i storlek och sommarmånaderna har nedåtriktat värde, se Diagram 4. Det minskade flödet beror på att frånluftsfläkten i krypgrunden minskat tryckskillnaden över bjälklaget, se Diagram 3. Även luftflödeskurvan till simulering 3 följer samma mönster som kurvorna i simulering 1 och 2. Vid simulering 3 erhålls dock ett nedåtriktat luftflöde hela året. Förutom att luftflödet har bytt riktning i simulering 3 jämfört med simulering 1 är det totala flödet genom bjälklaget mindre i såväl simulering 3 som i simulering 2.

Att skapa ett övertryck inomhus gentemot i krypgrunden kan vara det som krävs för att lösa problemet till dålig lukt i skolan. Däremot kan ett luftflöde nedåt orsaka fuktproblem i bjälklaget eftersom den fuktiga inomhusluften kan kondensera i bjälklaget. Detta är troligast att skapa problem under vintern då krypgrundstemperaturen, och därmed bjälklagets temperatur, är som lägst under den här perioden. På grund av detta är det rimligt att tro att ett så litet luftflöde nedåt som möjligt genom bjälklaget är att föredra.

Det minskade luftflödet genom bjälklaget i simulering 2 jämfört med i simulering 1 leder också till att mängden PCA i syslöjdssalen är mindre i simulering 2, se Diagram 4 och 6. Diagram 5 visar att koncentrationen PCA i krypgrunden vid simulering 2 är som störst de månader som det råder undertryck i krypgrunden gentemot inomhus, det vill säga i juni, juli och augusti. Ingen PCA når syslöjdsalen under den perioden vilket resulterar i att en större mängd PCA blir kvar i krypgrunden. Eftersom krypgrundens ventiler är igentäppta i simulering 2 påverkar inte vinden mängden PCA i krypgrunden, till skillnad från i simulering 1. Dessutom har vinden antagits blåsa vinkelrätt fasaden vilket resulterar i att ventilationen av krypgrunden i simulering 1 blir större än om vinden legat på snett mot fasaden. Vidare påverkas heller inte koncentrationen PCA i syslöjdssalen av vinden i särskilt stor utsträckning

i simulering 2, utan halten PCA i syslöjdssalen varierar istället likt luftflödeskurvorna, se Diagram 6. Mängden PCA i krypgrunden är vid simulering 2 högre än vid simulering 1 under hela året, se Diagram 5. Det har sin förklaring i att mindre andel PCA från krypgrunden tränger sig upp genom bjälklaget till sysslöjdssalen på grund av det minskade luftflödet, vilket framkommer av Diagram 7. Anledningen till detta är att luftomsättningen i krypgrunden är mindre när en frånluftsfläkt med flödet 2 l/s simuleras och ventilerna täpps igen (simulering 2) än då krypgrunden simuleras med ventiler och utan frånluftsfläkt (simulering 1).

Det kan tänkas att en högre koncentration PCA i krypgrunden leder till att en större mängd PCA även tas upp av material i krypgrunden som från början inte är avgivare av emissionerna. Det skulle kunna innebära att en krypgrund som har undertryck gentemot inomhus lagrar mer PCA än en krypgrund med det omvända tryckförhållandet lagrar. Vidare kan det tänkas att en krypgrund med undertryck potentiellt sätt skulle kunna avge mer emissioner till inomhusluften om tryckförhållandet av någon anledning ändras till att det är undertryck inomhus gentemot krypgrunden, till skillnad ifrån vad som hade varit fallet om det var undertryck inomhus konstant. Då CONTAM- simuleringarna inte hanterar denna lagring av emissioner i andra material är det inget som framgår i våra resultat.

I simulering 3 når ingen PCA syslöjdssalen eftersom luftflödet genom bjälklaget är nedåtriktat under hela året, se Diagram 4. Det nedåtriktade flödet bidar även till att koncentrationen PCA i krypgrunden är konstant under hela året. Det är alltså endast frånluftsfläkten, som hålls konstant, som påverkar mängden PCA i krypgrunden vid simulering 3. Ventilerna har tätats och de simulerade otätheterna är förmodligen inte tillräckligt stora för att vind ska påverka luftomsättningen i sådan grad att mängden PCA förändras. Eftersom temperaturen i krypgrunden förenklat antagits vara samma som utomhustemperaturen bidrar heller inte skorstenseffekten till luftomsättning genom otätheterna.

Krypgrundens väggar har simulerats med otätheter. Luftflödet genom bjälklaget påverkas av otätheternas storlek. Skulle dessa otätheter göras mindre så skulle vindens påverkan i simulering 1 bli mindre. Det innebär att halten PCA i krypgrunden skulle bli mindre. Vid installation av en krypgrundsfläkt skulle det innebära att det blir lättare att skapa ett undertryck i krypgrunden då luftflödet genom bjälklaget blir mindre beroende av otätheter och mer beroende av krypgrundsfläkten. Därför hade en noggrannare bedömning av skolans otätheter varit att föredra. Att krypgrunden skulle göras helt tät är däremot inte rimligt då imperfektioner hos material och under byggskedet alltid uppstår.

I simulering 7 antas den mekaniska ventilationen inomhus vara avstängd, vilket till exempel skulle kunna vara fallet i skolor under längre skollov. Det blir då enklare att skapa ett undertryck i krypgrunden och det leder till ett större flöde ner genom bjälklaget vilket, som tidigare nämnts, inte alltid är helt problemfritt.

Den simulerade mekaniska ventilationen i simulering 1-3 har till syfte att skapa ett undertryck på 2,9 Pa i syslöjdssalen gentemot krypgrunden. Förmodligen är det en tryckskillnad som är lite större än vad som är normalfallet för ett till- och frånluftssystem. Om ventilationssystem ej underhålls regelbundet bör tryckskillnad på grund av mekanisk ventilation bli högre och på så vis ökar även luftflödet upp genom bjälklaget. Detta är vad simulering 6 illustrerar. Det krävs alltså ett större flöde på frånluftsfläkten i krypgrunden för att skapa ett undertryck i krypgrunden vid simulering 6.

Resultatet visar att det krävs ett flöde på 4,2 l/s på frånluftsfläkten i krypgrunden för att säkerställa att ingen PCA når krypgrunden vid något av extremfallen. Samtidigt kommer en frånluftsfläkt med ett flöde på 4,2 l/s under stora delar leda till ett större flöde ner genom bjälklaget än en frånluftsfläkt med ett flöde på 2,4 l/s. Ett högt flöde på frånluftsfläkten, som säkerställer att undertryck i krypgrunden även för extremfallen riskera resultera i att bjälklaget utsättas för en onödigt hög mängd fuktig luft som potentiellt skulle kunna skada bjälklaget. Å andra sidan bör en installation av frånluftsfläkt ses som en kortsiktig åtgärd då det inte löser problemet som finns i krypgrunden. Är orsaken till en installation av en frånluftsfläkt i krypgrunden tagen på basis av att byggnaden ska rivas inom kort är knappast risken att bjälklaget blir fuktskadat något som är av avgörande betydelse. Dessutom blir det en fråga om hur mycket energi de olika flödena kräver, en fråga som dock inte studeras närmre i detta projekt. Vidare måste även hänsyn tas till Boverkets Bygg Regler om att mikroorganismer inte får påverka inomhusluften så att människor känner dålig lukt eller besvär.

Vid förändring av krypgrundens area, och därmed volym, blir tryckskillnaden över bjälklaget, samt luftflödet igenom bjälklaget detsamma. Den framtagna frånluftsfläktens effekt för krypgrundsvolymen under syslöjdssalen kommer vara densamma om beräkningar istället utförs med hela skolans krypgrundsvolym. Skillnaden kommer vara att, vid en större krypgrundsvolym, så kommer frånluftfläkten behöva mer tid för att skapa ett stationärt tillstånd mellan krypgrund och utomhus. På grund av detta spelar det ingen roll om krypgrundfläkten placeras i nära anslutning till syslöjdssalen eller inte. Däremot är placeringen av krypgrundfläkten viktig i det avseende att den inte bör placeras så att den är riktad mot en plats där människor befinner sig och inte heller bör den placeras i närheten av tilluftsventiler.

5.2 Partikelhaltmätningar

Partikelmätningarna på skolan utfördes endast under en dag. Detta innebär att halterna ej bör ses som indikator på hur mycket partiklar det finns i och kring skolan. Snarare erhålls en indikation på hur partikelstorlekar och partikelhalter förhåller sig mellan krypgrund, omklädningsrum och utomhus.

Under fältundersökning av skolan installerades en Blower Door för att skapa ett undertryck i omklädningsrummet. Det resulterade i att samtliga partikelstorlekar ökade i antal. Otätheter finns inte enbart i bjälklaget utan även i tak, väggar och skarvar. Det går därför inte säkert säga vart de partiklar som gav en höjd partikelhaltökningen i omklädningsrummet, då undertryck skapades med hjälp av Blower Door, har sitt ursprung. Partiklarna som orsakar höjningen har förmodligen sitt ursprung i såväl intilliggande klassrum, krypgrunden och utomhusluften. Resultatet visar att partikelhalten är störst utomhus för storleken 0,3 - 5 µm vilket tyder på att det är den störst potentiella källan till ökad partikelhalt inomhus.

Den partikelstorlek med lägst ökning av antalet partiklar när Blower Door-testet gjordes var storleksintervallet > 5 µm. En möjlig orsak till detta är att penetrationen genom bjälklaget försvåras för partiklar större än 2,5 µm. Både fältundersökningen och CONTAM-simuleringarna visade många möjliga faktorer till en genomträngning av partiklar genom bjälklaget. Bland annat att den största ökningen av partikelkoncentrationen var för partiklar av storlek > 0,5 µm och > 1,0 µm (se Tabell 3). Dessa storlekar är väldigt lättgenomträngliga genom bjälklaget och det är möjligt att partiklar som kommit in kan ha sitt ursprung i krypgrunden, men de kan även ha tagit sig in från utomhusluften. Typiska mikroorganismer av denna storlek är, som nämnts i kap 2.3.2, vissa svampsporer så som Aspergillus som enligt

utredningsrapporten för skolan uppmätts i krypgrunden. Det är alltså ingen omöjlighet att en del av partikelökningen inomhus vid Blower Door-testet består av Aspergillus sporer.

Högst koncentration av partikelstorlek var för storleken > 0,3 µm. Koncentrationen ökade tiofaldigt efter att Blower Door testet satts igång, till skillnad från storlekarna > 0,5 µm och > 1 µm som ökade 16 respektive 17 gånger. Detta på grund av, som tidigare nämnt, att partikelstorleken 0,5 - 2,5 µm har lättare att ta sig igenom bjälklaget än andra storlekar. Även om det är dessa storlekar som ökar mest finns det från början mest partiklar av storlek > 0,3 µm och de är även flest efter skapandet av undertryck. Att partikelmätaren mäter i intervall påverkar inte resultatet då det går att vikta resultaten mot varandra. Storlek > 1 µm ökade mest. Då alla partiklar med storlek större än 1 µm mättes, och partiklar, enligt litteraturstudien, större än 2,5 µm har svårare än att tränga igenom bjälklaget än intervallet 0,5 - 2,5 µm, hade det varit intressant att utföra ytterligare mätningar för intervallet 2,5 – 5,0 µm. Det är sannolikt att tro att koncentrationen av storleken > 1 µm, som ökar 17 gånger, har sin största ökning i intervallet 1,0 - 2,5 µm.

Mätningarna i salen pågick under drygt två timmar. Därför är de första mätvärdena, i omklädningsrummet, mindre beroende av den mänskliga partikelpåverkan än senare uppmätta partikelvärden då Blower Door var igång.

Med en fluktuerande tryckskillnad, som bland annat beror på klimatförhållanden, varierar infiltrationen över tid och kan därmed medföra varierande partikelhalter i inomhusmiljön. Vid större tryckskillnader över klimatskärmen ökar därmed partikelinfiltrationen, jämför Diagram 3 och 4. Därför kan det tänkas att om orsaken till dålig luftkvalitet i inomhusluften beror på att partiklar i krypgrunden tar sig in i inomhusluften kommer luftkvaliteten variera beroende på luftflödet genom bjälklaget. Samtidigt varierar mängden av de ohälsosamma partiklarna under året eftersom tillväxten av mikroorganismer beror på bland annat fukthalt och temperatur. Simulering 1 visar att luftflödet upp genom bjälklaget är som störst på vintern, medan klimatet i krypgrunden är som mest gynnsam för mikroorganismer under sommaren.
Vidare kan tänkas att variationen av luftflödets genom bjälklaget leder till att problem med mikroorganismer i krypgrunden inte upptäcks omedelbart om krypgrunden inte underhålls och inspekteras kontinuerligt. Detta då risken för påväxt av mikroorganismer ökar om krypgrunden flera gånger utsatts för fuktiga förhållanden. Starten av tillväxten av mikroorganismer blir då mindre beroende av temperatur och fuktighet, även om ökad temperatur och fuktighet leder till ännu mer tillväxt. Sänks ribban för tillväxten kan det då under större perioder under året finnas mer mikroorganismer i krypgrunden och då krävs ett mindre luftflöde genom bjälklaget för att innemiljön ska ta skada.

Storlekarna > 0,5 µm och > 1,0 µm, som tidigare nämnts är de storlekar som ökar mest då undertryck skapas i omklädningsrummet, är viktiga ur hälsosynpunkt då dessa storlekar lätt tar sig in i alveolerna vilket kan orsaka framtida lungbesvär. Att de storlekarna letar sig in i krypgrunden påverkar alltså innemiljön, det är dock inte möjligt att säkerställa att de kommer från krypgrunden då undertrycket under Blower Door testet även var relativt utomhus.

En annan metod som hade gjort det lättare att indikera mikroorganismers ursprung hade varit om man kunnat mäta enskilda mikroorganismer partikelstorleksfördelningen inomhus, utomhus och i krypgrunden. Och jämföra de olika storleksfördelningarna mellan varandra, och se om det finns kopplingar mellan de olika storleksfördelningar och de olika mikroorganismerna.

6 Slutsats

Utförda simuleringar av den undersökta skolan visar att luftflödet genom bjälklaget går från krypgrunden upp till inomhusmiljön under hela året då temperatur och vind sätts till månadsmedelvärde. Flödet är som störst under vintern och som minst under sommaren på grund av att skorstenseffekten är som störst under vintern. Det uppåtriktade luftflödet genom bjälklaget resulterar i att pentakloranisol (PCA) som finns i krypgrunden når inomhusluften under hela året. Andelen PCA i krypgrunden som når inomhusluften varierar lite och är som störst under sommaren då luftflödet är som störst och som minst under vintern då luftflödet är som minst. Mängden PCA i inomhusluften är dock i det närmaste konstant under året. Koncentrationerna av PCA i skolans inomhusluft är förmodligen i storleksordningen att den inte är toxiskt giftig. Däremot är koncentrationen sannolikt så pass stor att PCA orsakar dålig lukt i skolan. För att säkert kunna konstatera hur stor mängd som når inomhusluften hade dock mätningar på hur stor mängd PCA som avges från material i krypgrunden behövts genomföras. Däremot går det att konstatera att om PCA orsakar dålig lukt i skolan, orsakar den det året om eftersom koncentrationen nästintill är konstant under året. Det som påverkar koncentrationen PCA i syslöjdssalen mest är vinden. Blåser det mycket kommer koncentrationen PCA i krypgrunden att bli mindre och därmed också i syslöjdssalen.

Utöver PCA så tränger sig även partiklar i krypgrunden upp genom bjälklaget till inomhusmiljön på grund av det uppåtriktade flödet. Framför allt kommer partiklar i storleken 0,5 – 2,5 µm, det vill säga bland annat mikroorganismer, i krypgrunden tränga sig igenom bjälklaget och nå inomhusmiljön. Mikroorganismer i skolans inomhusluft kan leda till besvär med slemhinnorna och allergier för människor som vistas i miljön. Det är dock inte möjligt, att genom mätningar utförda i detta projekt, bestämt säga hur mycket partiklar från krypgrunden som når inomhusmiljön och heller inte hur antalet partiklar som når inomhusmiljön varierar över året. För att konstatera hur partikelhalterna varierar över året hade fler mätningar behövts göra, fördelade under ett helt år. För att konstatera att partiklar i inomhusluften härstammar från krypgrunden hade det behövts utföras mätningar för till exempel enskilda mikroorganismers partikelstorleksfördelning inomhus, utomhus och i krypgrunden.

Vid simulering av en installerad frånluftsfläkt i krypgrunden med flödet 2,4 l/s fås ett nedåtriktat flöde genom bjälklaget under hela året. Detta då temperatur och vind sätts till månadsmedelvärde. Flödet nedåt blir störst under sommaren och minst under vintern eftersom skorstenseffekten transporterar luften uppåt. Om ventilationen på skolan stängs av under sommaren kommer en frånluftsfläkt med flödet 2,4 l/s skapa ett ännu större flöde ner genom bjälklaget. Detsamma gäller om temperaturen och vinden är högre än månadsmedel.

Om den mekaniska inomhusventilationen bidrar till ett större undertryck inomhus än vad som ursprungligen är installerat, på grund av bristande underhåll av tilluftsfläkten, kommer ett flöde på 2,4 l/s inte räcka för att skapa ett nedåtriktat flöde genom bjälklaget. Under ett år kommer det även förekomma dygn med lägre temperatur och vind än månadsmedel. Ett flöde på 2,4 l/s på frånluftsfläkten i krypgrunden kommer då inte räcka för att skapa ett nedåtriktat flöde genom bjälklaget. För att säkerställa ett nedåtriktat flöde genom bjälklaget även dagar som är kallare och med mindre vind än månadsmedel behövs ett större flöde på frånluftsfläkten än 2,4 l/s. Däremot kommer det ökade flödet på krypgrundsfläkten under stora delar av året leda till ett större nedåtriktat flöde genom bjälklaget än vad som är nödvändigt.

Syftet med en installation av en frånluftsfläkt är att säkerställa att dålig lukt inte når inomhusluften och för att göra det krävs att ett nedåtriktat flöde genom bjälklaget säkerställs. Därför är det rimligt att installera en frånluftsfläkt med ett flöde som säkerställer ett nedåtriktat flöde även under kalla dagar. Det är dock viktigt att vara medveten om att ett stort nedåtriktat flöde kan leda till ökade fuktproblem i bjälklaget. Detta på grund av att inomhusluften är fuktig och temperaturen hög. Om då bjälklaget är kallare än inomhusluften, vilket kan vara fallet under vintern, kan det leda till kondens i bjälklaget. Av den anledningen är det viktigt att även kontrollera storleken på flödet ner genom bjälklaget samt temperaturen i bjälklaget innan en frånluftsfläkt i krypgrunden sätts in som åtgärd. Betydelsen av att bjälklaget blir ytterligare fuktskadat beror på hur länge byggnaden är planerad att fortsätta användas efter åtgärden.

Källförteckning

Abel, E, Elmroth, A. (2012). *Byggnaden som system*. 3:3. Lund: Studentlitteratur AB.

AFS 2011:18: *Hygieniska gränsvärden: Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om hygieniska gränsvärden.* Hämtad 13 april, 2016, från https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/publikationer/foreskrifter/hygieniska-gransvarden-afs-201118-foreskrifter/

Airaksinen. M, Pasanen. P, Kurnitski. J, Seppänen. O. (2003). *Fungal spore transport through a building structure.* Indoor Air. doi:10.1046/j.1600-0668.2003.00215.x

Airaksinen. M, Pasanen. P, Kurnitski. J, Seppänen. O. (2003). *Microbial contamination of indoor air due to leakages from crawl space: a field study.* Indoor Air. doi:10.1046/j.1600-0668.2003.00210.x

Alexandersson, H. (2006). *Vindstatistik för Sverige 1961-2004*. SMHI (Meteorologi, Nr 121). Hämtad från http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.1895!meteorologi_121-06%5B1%5D.pdf

Alsmo, T. (2012). *Rensa luften - Bättre luftkvalité I skolan med färre partiklar.* Sveriges Kommuner och Landsting. Hämtad från http://webbutik.skl.se/internt/artiklar/7164-785-6/Rensaluften.pdf

Annesi-Maesano I., Baiz N., Banerjee S., Rudnai P and Rive S. (2013). *Indoor Air Quality and Sources in Schools and Related Health Effects. Journal of Toxicology and Health, Part B*. doi: 10.1080/10937404.2013.853609

Bankvall.C, (2013), *Luftboken -Luftrörelser och täthet i byggnader*. Lund: Studentlitteratur AB.

BFS 2011:6 - BBR 18. *Boverkets byggregler (föreskrifter och allmänna råd).* Karlskrona, Boverket. Hämtad den 11 maj 2016, från https://rinfo.boverket.se/BBR%5CPDF%5CBFS2011-6-BBR18.pdf

Boverket (2010) *God bebyggd miljö - förslag till nytt delmål för fukt och mögel. Resultat om byggnaders fuktskador från projektet BETSI.* Boverket, (978-91-86559-79-3). Hämtad från *http://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2011/betsi-fukt-och-mogel.pdf*

Boverket (2009) *Så mår våra hus – Redovisning av regeringsuppdrag beträffande byggnaders tekniska utformning m.m.* Boverket. Hämtad från http://www.fuktcentrum.lth.se/fileadmin/fuktcentrum/Publikationer/sa_mar_vara_hus_Boverket2009_BETSI.pdf

Burström P, G. (2007), *Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. 2:12. Lund: Studentlitteratur AB.

Camfil Svenska AB. (2016). *Luftkvalitet inomhus (IAQ)*. Hämtad från http://www.camfil.se/filterteknik/Luftkvalitet-inomhus-IAQ/

Elmroth, A. Harderup, L E. Hedström, J. Samuelson, I. Svengsson Tengberg, C. (2007). *Går det att bygga fuktsäkra krypgrunder?* Hämtad från http://www.fuktcentrum.lth.se/fileadmin/fuktcentrum/Publikationer/Bygg-Teknik/5_02_20.pdf

Ericsson, C-G (2006). *Partiklar i inomhusmiljön - en litteraturgenomgång.* Uppsala. Artikelnr: 2006-123-1.

Folkhälsomyndigheten (2015). *Inomhusmiljön i skolan. Ett nationellt tillsynsprojekt 2014–2015*. Hämtad från http://www.folkhalsomyndigheten.se/pagefiles/22105/inomhusmiljon-skolan-15128-webb.pdf

Folkhälsomyndigheten. (2016). *Luftkvalitet*. Hämtad från http://www.folkhalsomyndigheten.se/amnesomraden/halsoskydd-och-miljohalsa/inomhusmiljo/luftkvalitet/

Fuktcentrum – Lunds Tekniska Högskola. (2015). *Myt eller fakta – Krypgrund är en fuktsäker grundläggning?* http://www.fuktcentrum.lth.se/verktyg-och-hjaelpmedel/byggnadsdelar/myt-eller-fakta/myt-eller-fakta-krypgrund-aer-en-fuktsaeker-grundlaeggning/

Göteborgs Stad. (2003). *Temperaturskillnader.* Hämtad från http://www.vartgoteborg.se/prod/sk/vargotnu.nsf/1/goteborg_i_siffror,temperaturskillnader

Hagentoft, C-E. (2001). *Introduction to building physics*. Lund: Studentlitteratur AB.

Holmberg, S, Chen, Q. (2003). *Air flow and particle control with different ventilation systems in a classroom.* (INDOOR AIR, ISSN 0905-6947). Hämtad från http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1034/j.1600-0668.2003.00186.x/epdf

Johannesson, S, Barregård, L(2013) *Miljömedicinsk bedömning av pentaklorfenolimpregnerat trämaterial i bostäder.* Västra Götalandsregionens Miljömedicinska Centrum (VMC). Hämtad från https://www2.sahlgrenska.se/upload/SU/omrade_6/Arbets-%20och%20Milj%C3%B6medicin/VMC/VMC/%C3%84renden/Pennygangen_130919.pdf

Johansson, P. (2006). *Mikroorganismer i byggnader. En kunskapsöversikt.* (SP Rapport 2006:22). Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut. Hämtad från https://www.sp.se/sv/units/energy/eti/Documents/SPrapp%202006_22.pdf

Kumlin À, Robertson O, Åkerlind L, (1996). *Varför blir vi sjuka i fuktiga byggnader?* Hämtad från http://www.byggnadskontroll.se/?page_id=69

Lorentzen,J,C. (2015). *Chloroanisoles may explain mold odor and represent a major indoor environment problem in Sweden.* Indoor Air, Volym (26). DOI:10.1111/ina.12207
National Institute of Standards and Technology. (2013). *CONTAM*. Hämtad från http://www.nist.gov/el/building_environment/contam_software.cfm

Nilsson, L-O. (2006). *Fuktskadeorsaker i golv & grunder: - Vad har vi lärt av historien? Väg- och vattenbyggaren. Volym (3), s 14-18*. Hämtad från http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=1536217&fileOId=1671985

Olsson, L (2009) *Den riskfyllda krypgrunden.- Inomhusklimat* , Hämtad från https://www.sp.se/sv/index/services/moist/crawl_space/Sidor/default.aspx

Particle Engineering Research Center, University of Florida. (2014). *What is a particle?* Hämtad från *http://perc.ufl.edu/particle.asp*

Petersson, B-Å. (2012). *Byggnadens Klimatskärm - Fuktsäkerhet, energieffektivitet, beständighet.* 2:2. Lund: Studentlitteratur AB.

Sahlgrenska Universitetessjukhuset.(2013). Faktablad om Byggnadsrelaterad ohälsa. Hämtad från; https://www2.sahlgrenska.se/upload/SU/omrade_6/Arbets-%20och%20Milj%C3%B6medicin/faktablad/Faktablad_Byggnadsrelaterad_ohalsa.pdf

Sandberg,P.I. Sikander, E. Wahlgren, P. Larsson, B.(2007). *Lufttäthetsfrågorna i byggprocessen: Etapp B. Tekniska konsekvenser och lönsamhetskalkyler. (*SP Rapport 2007:23) SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. Hämtad från https://www.sp.se/sv/units/energy/eti/Documents/Slutversion%20Word%20rev%20juni%20lagguppl.pdf

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. (2016). *Fukt: Fukttransport.* Hämtad från http://www.fuktsakerhet.se/sv/fukt/fukttransp/Sidor/default.aspx

Stafford, T, M.. (2015). Indoor air quality and academic performance. *Journal of Enviromental Economics and Managment. Volym*(70), 34-50. doi:10.1016/j.jeem.2014.11.002
Sikander. ES. (2010). ByggaL: *Metod för bygande av lufttäta byggnader* (SP Rapport, 2010:73). SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. Hämtad från http://lufttathet.se/sv/Documents/ByggaL%20SP%20Rapport%202010-73.pdf

Ståhlbom, B. (2015). *Emissioner som påverkar miljön inomhus.* Hämtad från *http://arbetsochmiljomedicin.se/emissioner-som-paverkar-miljon-inomhus/*

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (2015). *Vind i Sverige. Vindriktning.* Hämtad från http://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/vind-i-sverige-1.31309

Träguiden. (2003). *Uteluftsventilerad krypgrun*d. Hämtad från: http://www.traguiden.se/konstruktion/konstruktiv-utformning/grundlaggning/grundlaggning/uteluftsventilerad-krypgrund/

Bilagor

Bilaga 1:

Tabell 4. Tabellen visar att luftflödet genom bjälklaget och halten pentakloranisol i syslöjdssalen i liten grad påverkas av att temperaturen i krypgrunden och utomhusluften sätts olika.

Månad	T_e [°C]	T_{kg} [°C]	T_i [°C]	Luftflöde genom bjälklag [l/s]	Andel PCA i krypgrund som når inomhusluften [%]
Januari	-0,9	0,9	20	1,774	4,7
Januari	-0,9	4,1	20	1,771	4,7
Juli	17,5	17,5	20	1,418	3,8
Juli	17,5	12,5	20	1,418	3,8

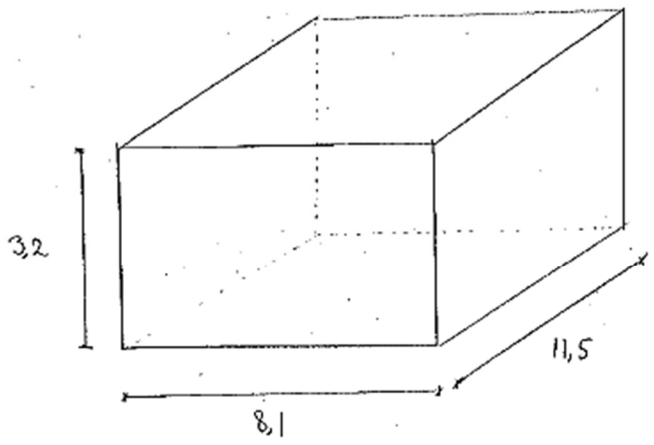
Bilaga 2:

Beräkning av molekylmassa för PCA

$$M(PCA) = [O + C + 3 \cdot H + 5 \cdot Cl]$$
$$= 16 + 12{,}01 + 3 \cdot 1{,}008 + 5 \cdot 35{,}45$$
$$= 208\ g/mol$$

Figur 11 Beräkning av molmassan för pentakloranisol (PCA).

Bilaga 3:



Total omslutningsarea

$$A_{oms,tot} = 2 \cdot 8{,}1 \cdot 3{,}2 + 2 \cdot 8{,}1 \cdot 11{,}5 + 2 \cdot 11{,}5 \cdot 3{,}2 = 311{,}74\,m^2$$

Ytterväggarnas omslutningsarea

$$A_{oms,ytterv} = 2 \cdot 8{,}1 \cdot 3{,}2 = 51{,}84\,m^2$$

Förhållande mellan ytterväggarnas och den totala omslutningsarean

$$\Delta A = \frac{51{,}84}{311{,}74} = 0{,}166$$

Det ursprungliga tätheskravet på 2,0 l/sm² reduceras till:

$$2{,}0 \cdot 0{,}166 = 0{,}33\,l/sm^2$$

Figur 12 Justering av klimatskärmens täthet för 70-tals skolor.