



Глубокая энергетическая модернизация старых бетонных многоквартирных жилых домов до уровня практически нулевого потребления энергии с использованием деревянных модульных элементов

Исследовательская группа по вопросам зданий с практически нулевым потреблением энергии (nZEB Research Group)

Таллиннский технический университет

targo.kalamees@ttu.ee

Список литературы

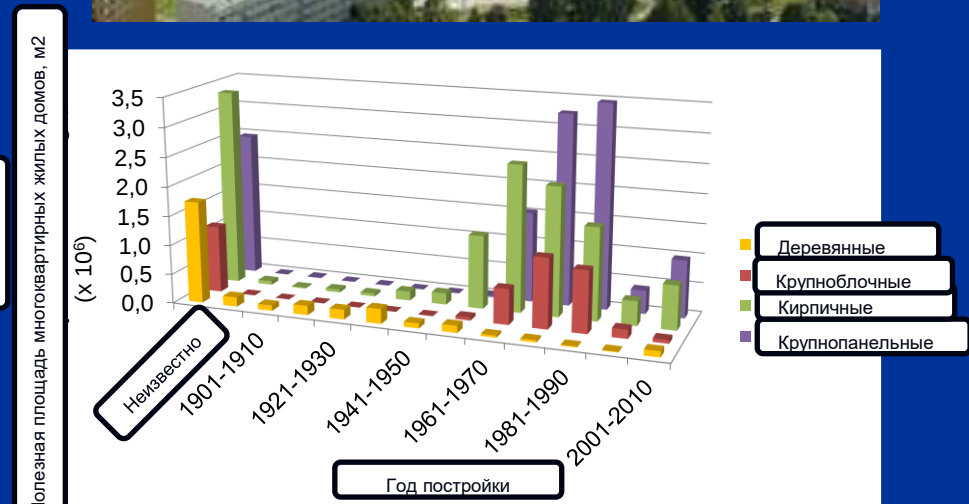
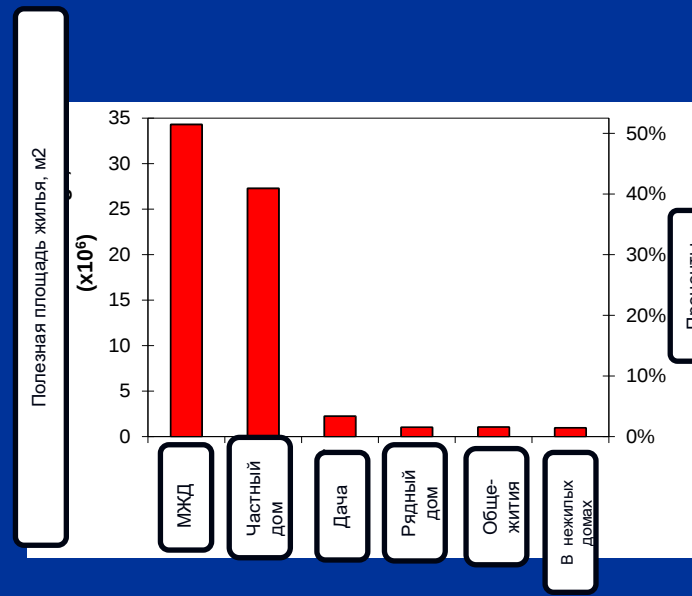
- Hamburg, A., Kuusk, K., Mikola, A., Kalamees, T. **Realisation of energy performance targets of an old apartment building renovated to nZEB**. Submitted to: Energy
- Pihelo, P., Kalamees, T. (2019) **Commissioning of moisture safety of nZEB renovation with prefabricated timber frame insulation wall elements**. Wood Material Science and Engineering. DOI: 10.1080/17480272.2019.1635206
- Kuusk, K., Pihelo, P., Kalamees, T. (2019) **Renovation of apartment buildings with prefabricated modular panels**. E3S Web of Conferences, 111, art. no. 03023. DOI: 10.1051/e3sconf/201911103023
- Pihelo, P., Kalamees, T., Kuusk, K. (2017) **NZEB Renovation with Prefabricated Modular Panels**. Energy Procedia, 132, pp. 1006-1011. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.708
- Pihelo, P., Kalamees, T., Kuusk, K. (2017) **NZEB Renovation of Multi-Storey Building with Prefabricated Modular Panels**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 251 (1), art. no. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/251/1/012056
- Pihelo, P., Kalamees, T. (2016) **The effect of thermal transmittance of building envelope and material selection of wind barrier on moisture safety of timber frame exterior wall**. Journal of Building Engineering, 6, pp. 29-38. DOI: 10.1016/j.jobbe.2016.02.002
- Pihelo, P., Lelumees, M., Kalamees, T. (2016) **Influence of Moisture Dry-out on Hygrothermal Performance of Prefabricated Modular Renovation Elements**. Energy Procedia, 96, pp. 745-755. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.137
- Kuusk, K., Kalamees, T. (2016) **Retrofit cost-effectiveness: Estonian apartment buildings**. Building Research and Information, 44(8), pp. 920-934 DOI: 10.1080/09613218.2016.1103117
- Kuusk, K., Kalamees, T. (2015) **nZEB retrofit of a concrete large panel apartment building**. Energy Procedia, 78, pp. 985-990 DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.038



Фоновая информация

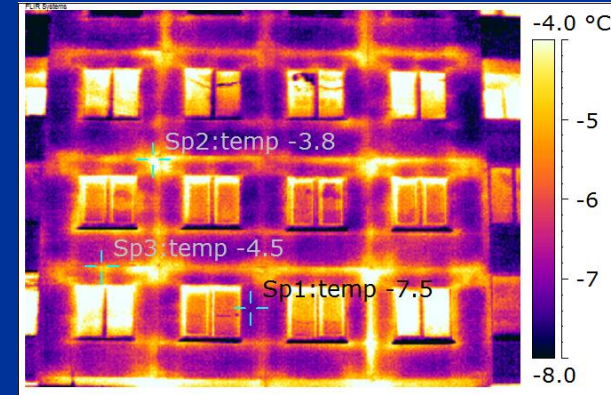
Многоквартирные жилые дома в Эстонии

- $\approx 27\,000$ зданий, ≈ 34 млн м^2
- 71% населения проживают в квартирах
- В основном построены в период: 1950–90
- Несущие конструкции:
 - кирпич: 37%,
 - бетон: 36%,
 - легкий бетон: 12%,
 - древесина: 8%



Основные проблемы многоквартирных жилых домов

- Структура оболочки здания
 - Высокие энергопотери: $U \approx 0.7-1.0 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 - Множество серьезных мостиков холода
 - Дegradaция фасадов (коррозия, морозоустойчивость)
- Обслуживающие системы
 - Естественная вентиляция: недостаточный приток воздуха, сквозняк
 - Системы отопления: нет термостатов, дисбаланс
 - Централизованное отопление: высокие энергопотери
- Расчетный срок службы истек

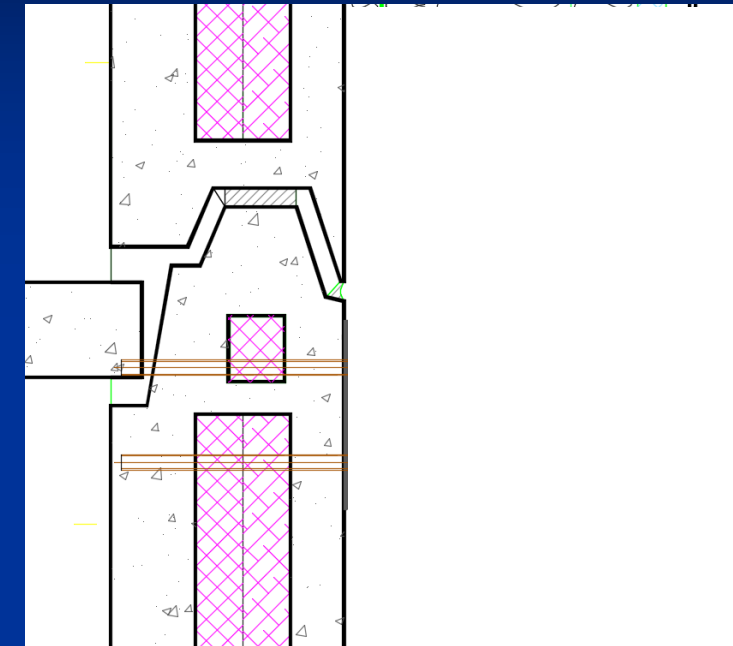




Глубокая энергетическая модернизация с
использованием заводских деревянных
элементов: **пилотный проект**

Ситуация до модернизации

- Год постройки: 1986
- 5 этажей, 80 квартир
- Бетонное крупнопанельное здание (серия 121)
- Потребление первичной энергии до модернизации ~ 300 кВтч/(м²в год)
- Плесень на мостиках холода

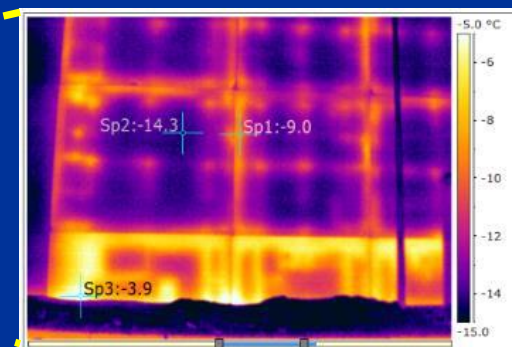
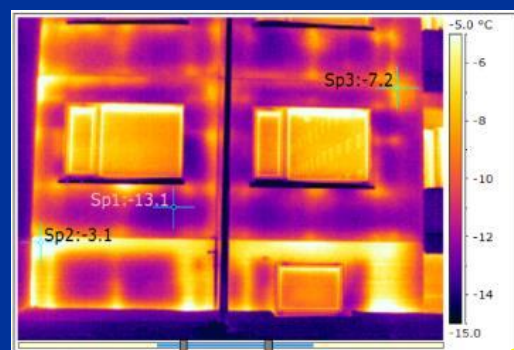


Мостики холода

■ EVS-EN ISO 13788: $f_{Rsi} \geq 0.80$

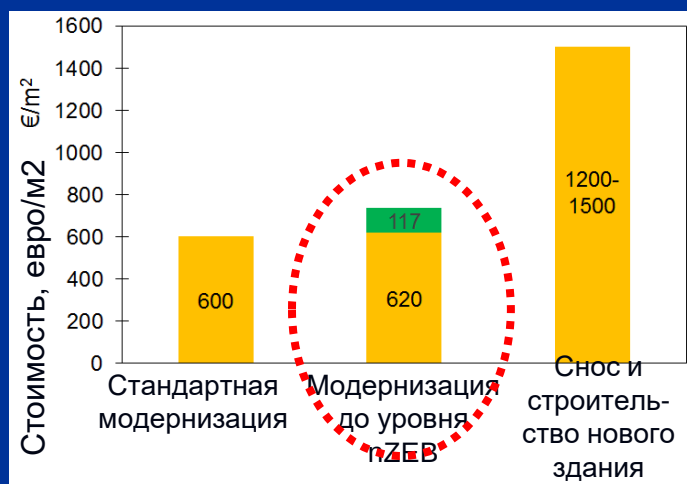
■ В реальности: $f_{Rsi} < 0.80$

$$f_{Rsi} = \frac{t_{si} - t_e}{t_i - t_e} = \frac{R_T - R_{si}}{R_T}$$



Сценарии

- Статус-кво, никаких изменений
- Концентрация только на климате в помещении
- Стандартная модернизация
- Глубокая энергетическая модернизация с использованием заводских деревянных элементов
- Снос существующего здания и возведение нового здания



Строительные работы в течение 2017 года

- Государственные закупки: 2 предложения (включая НДС 20%):
 - 3,456 млн евро
 - 3,560 млн евро
- Общие расходы
 - 822 евро/м² закрытая полезная площадь (все работы)
 - 372 евро/м² (внутренние и общие конструкции)
 - 334 евро/м² (энергетические характеристики и микроклимат в помещениях)
 - 116 евро/м² (практически нулевое потребление энергии (nZEB), исследовательская работа)
- Продолжительность
 - Подготовка и укрепление фасада: май
 - Монтаж элементов стен и крыши: июнь – август

Глубокая энергетическая модернизация здания до уровня практически нулевого потребления энергии (nZEB)

■ Пилотное здание: Общежитие Таллиннского технического университета

■ Здание с практически нулевым потреблением энергии

■ Потребность в энергии:

- Потребность в энергии для отопления и вентиляции: $16 \text{ кВтч}/(\text{м}^2 \text{ в год})$
- Бытовая горячая вода: $30 \text{ кВтч}/(\text{м}^2 \text{ в год})$
- приборы, освещение, вентиляторы, насосы : $34 \text{ кВтч}/(\text{м}^2 \text{ в год})$

■ Производство энергии на месте, ВИЭ:

- Солнечные коллекторы и рекуперация тепла канализации для бытовой горячей воды: $14 \text{ кВтч}/(\text{м}^2 \text{ в год})$
- Фотоэлектрические (PV)-панели для электроэнергии: $2 \text{ кВтч}/(\text{м}^2 \text{ в год})$

■ Проектное потребление первичной энергии: $92 \text{ кВтч}/(\text{м}^2 \text{ в год})$



Глубокая энергетическая модернизация здания до уровня практически нулевого потребления энергии (nZEB)

■ Пилотное здание: Общежитие Таллиннского технического университета

■ Здание с практически нулевым потреблением энергии

■ Деревянные элементы для дополнительной изоляции:

- Фасад $U\ 0.11\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Окна $U\ 0.85\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Крыша $U\ 0.10\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

■ Эффективные сервисные системы:

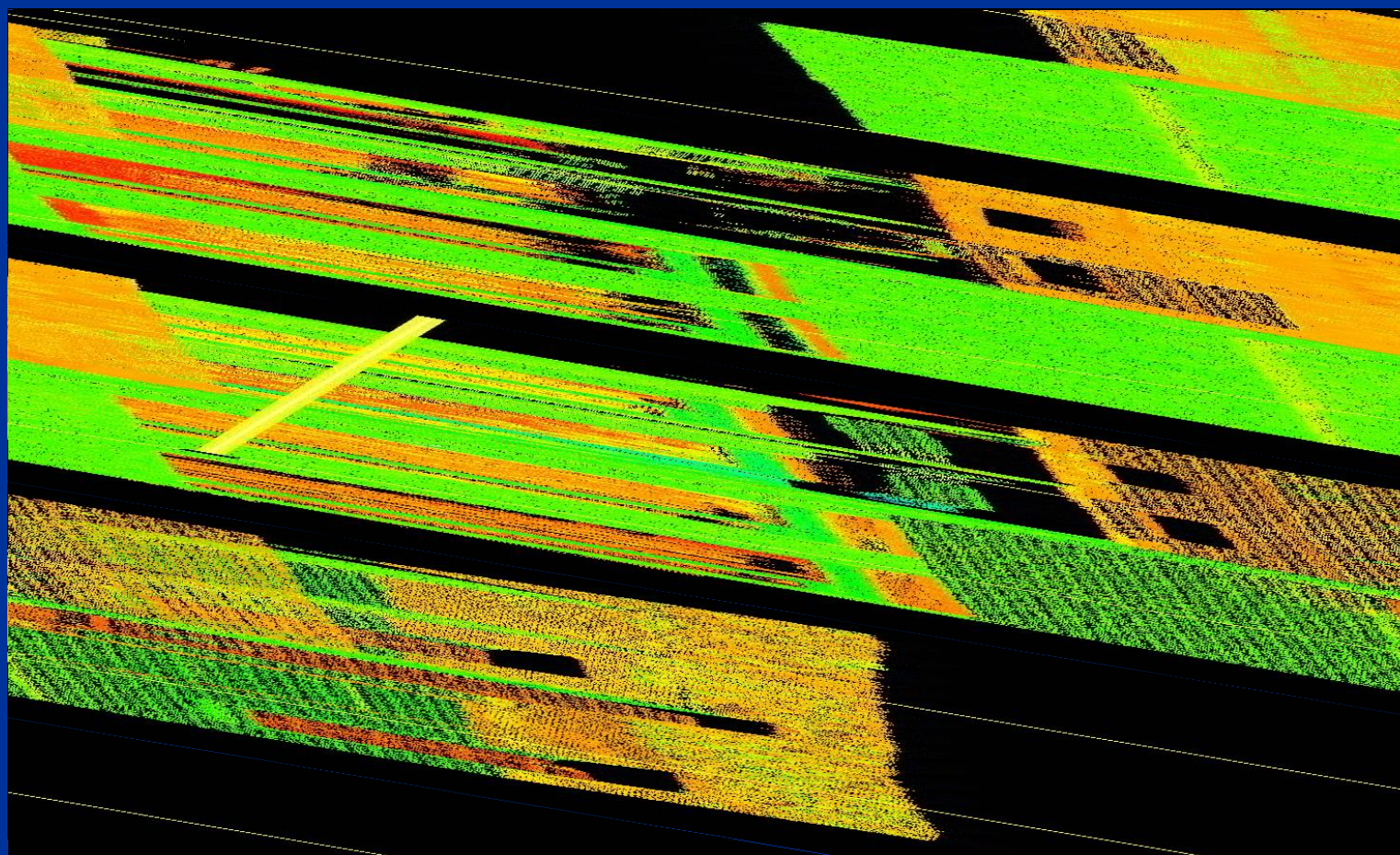
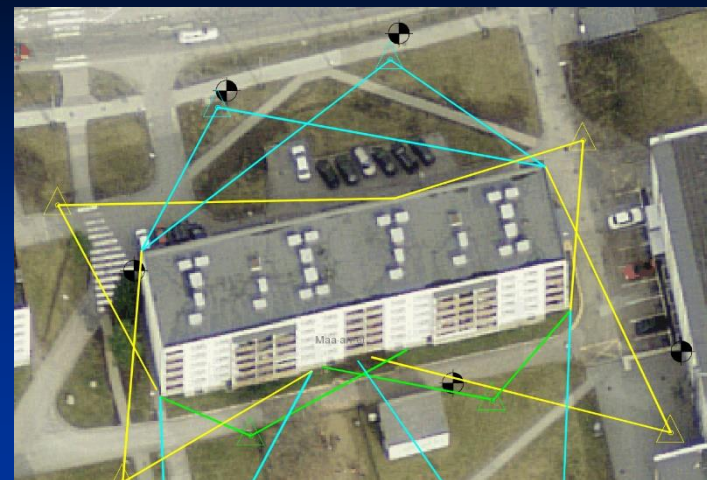
- Мех. приточно-вытяжная вентиляция с рекуперацией тепла
- Новая двухтрубная система отопления с радиаторами и термостатами
- Фотоэлектрические (PV) панели, солнечные коллекторы
- Рекуперация тепла канализации



Проектирование и разработка заводских ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

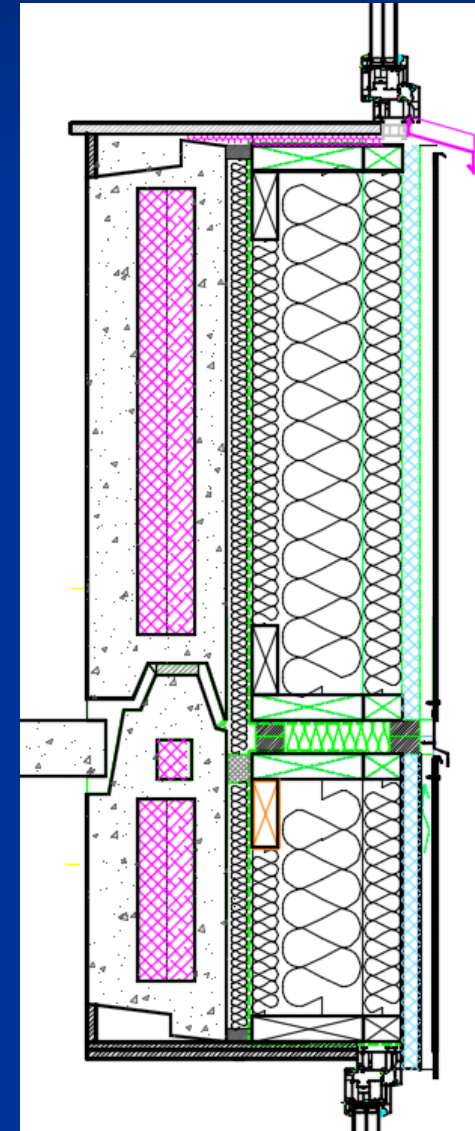
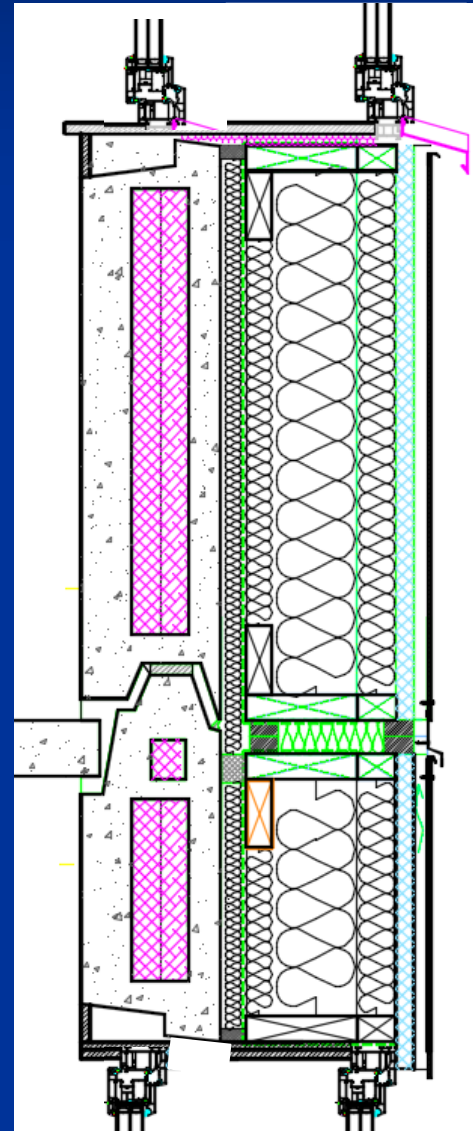
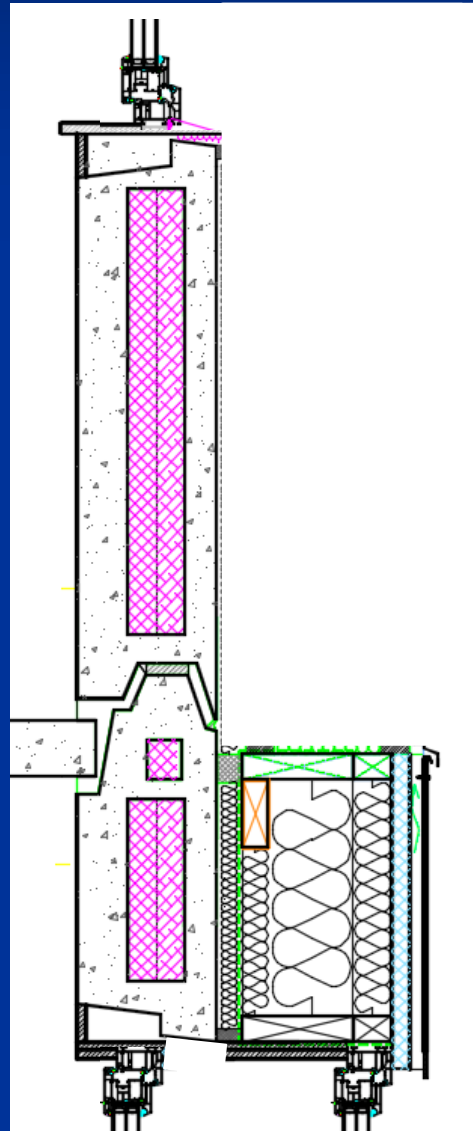
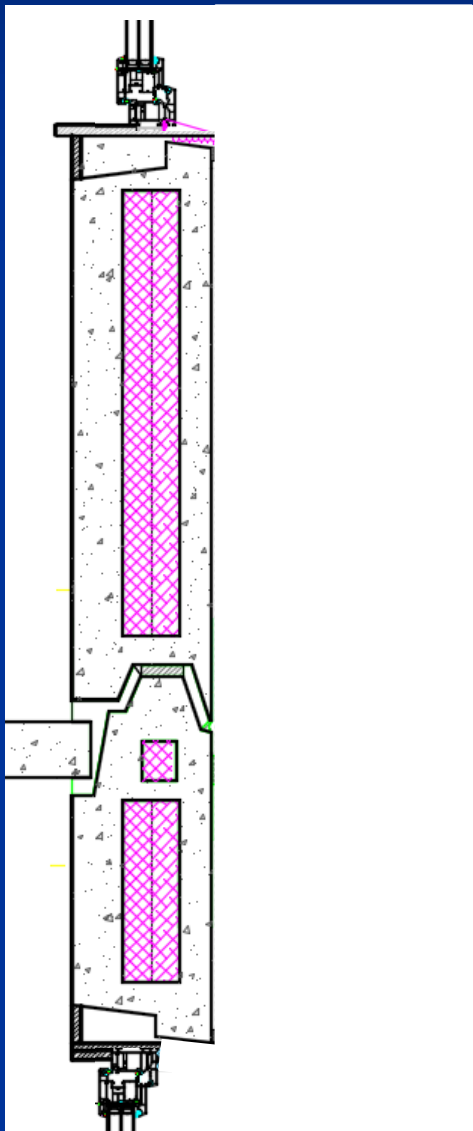
Лазерное сканирование

- 10 сканирующих установок; 7 контрольных точек
- Среднее разрешение – 8300 п/м²
- Длительность: 1-2 дней



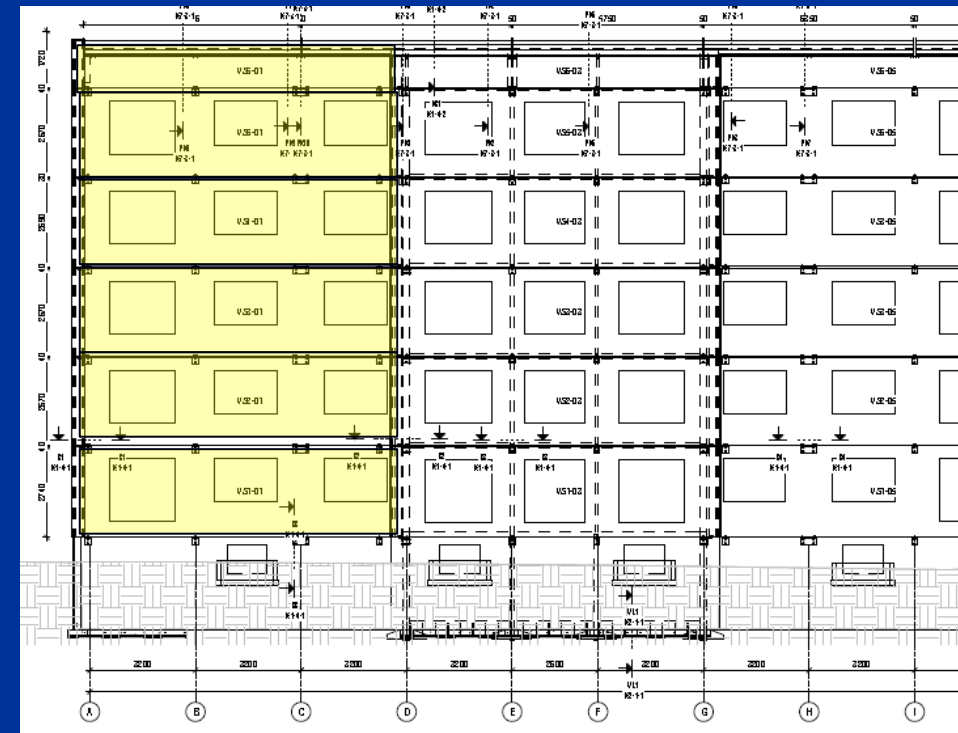
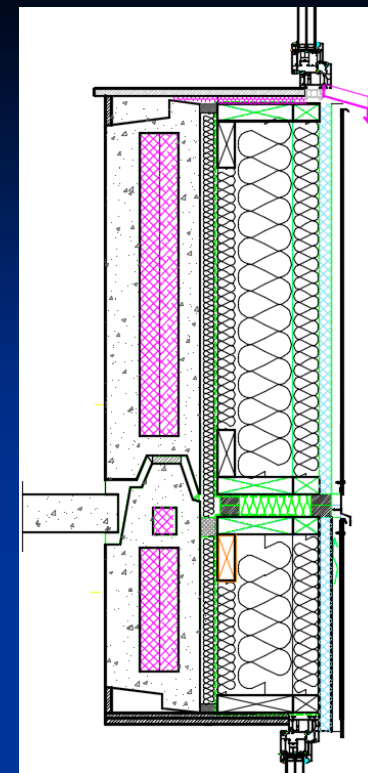
Фасад

Первоначальный фасад



Фасад

- Размеры элементов ~9.3 x 2.7m
- 2-3 окна предустановлены на заводе
- Установка элементов: в идеале – 15...20 минут

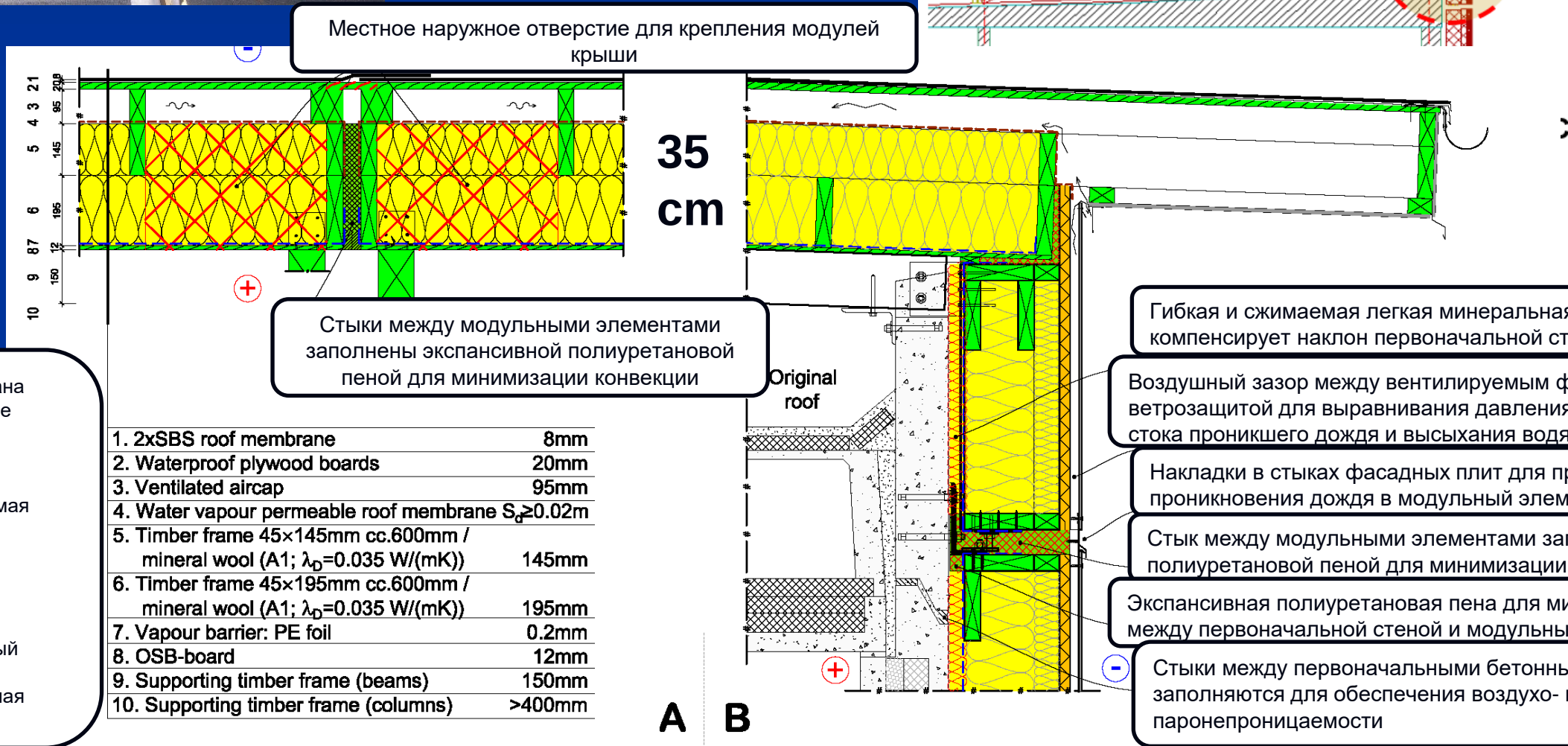
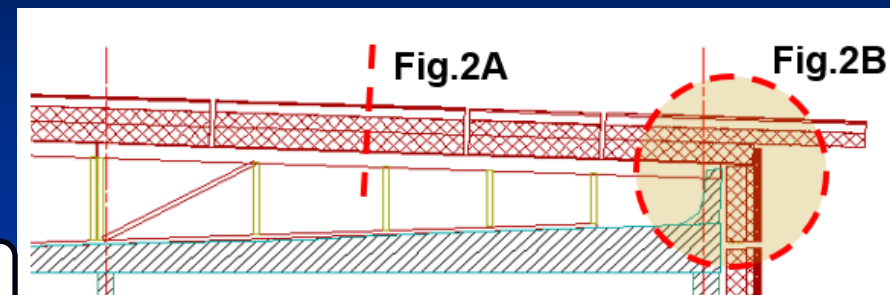


Прямая трансляция в Youtube



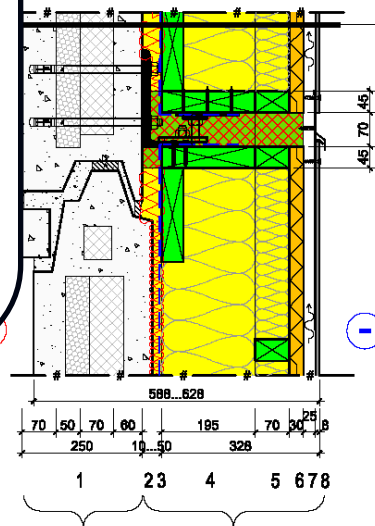


Конструктивное решение: крыша



Конструктивное решение: **СТЕНЫ**

1. Существующая бетонная панель
2. Заполнение минеральной ватой
3. Воздухо- и пароизоляция (пароизолятор)
4. Деревянный каркас / минеральная вата
5. Деревянный каркас / минеральная вата
6. Полужесткая минераловатная плита со специальной ветрозащитной облицовкой (паропроницаемость; проклеенные швы)
7. Вентилируемый воздушный зазор
8. Фасадная плита - вентилируемый фасад

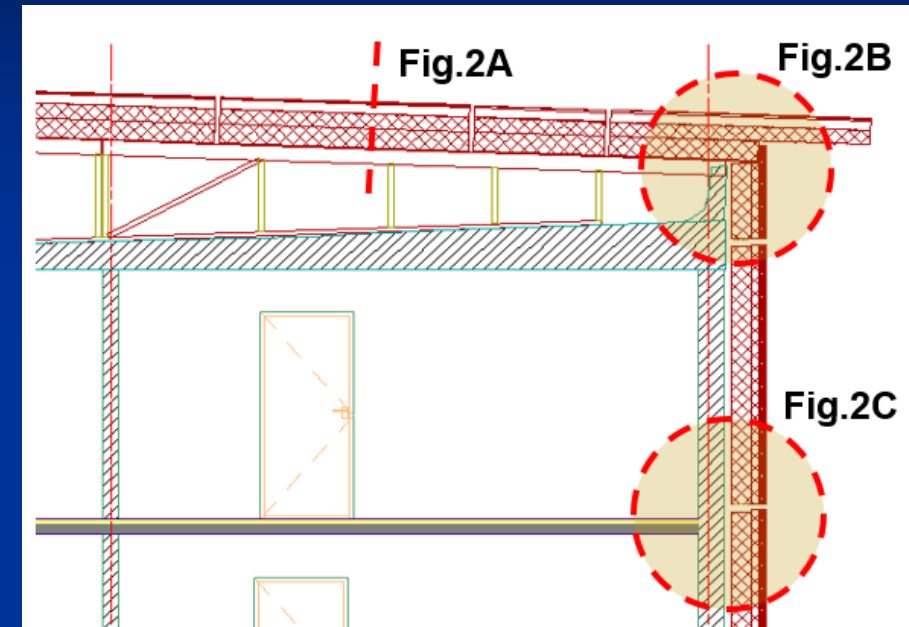


1. Existing concrete panel	250mm
2. Filling mineral wool (A1; $\lambda_D=0.035$ W/(mK))	10...50mm
3. Air&vapor retarder (vapor resistance $Z_p=1.6...27 \times 10^9$ (m ² sPa)/kg)	
4. Timber frame 45x195mm cc.600mm / min.wool (A1; $\lambda_D=0.035$ W/(mK))	195mm
5. Timber frame 45x70mm cc.600mm / min.wool (A1; $\lambda_D=0.035$ W/(mK))	70mm
6. Semi-rigid mineral wool slab with special wind barrier facing (vapor permeability $\delta_p=150 \times 10^{-12}$ kg/(msPa); taped joints, A2-s1,d0; $\lambda_D=0.031$ W/(mK))	30mm
7. Ventilated airgap	25mm
8. Facade board - rainscreen	8mm

Первоначальная стена

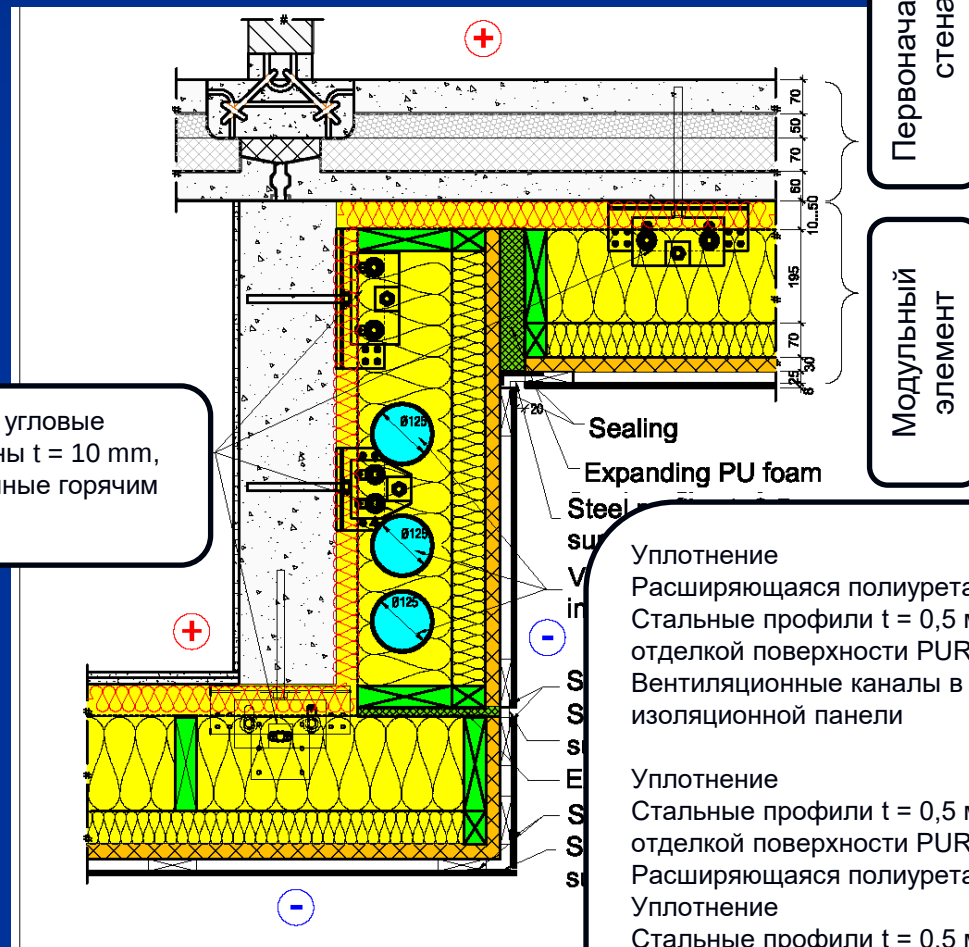
Модульный элемент

**30-35
cm**



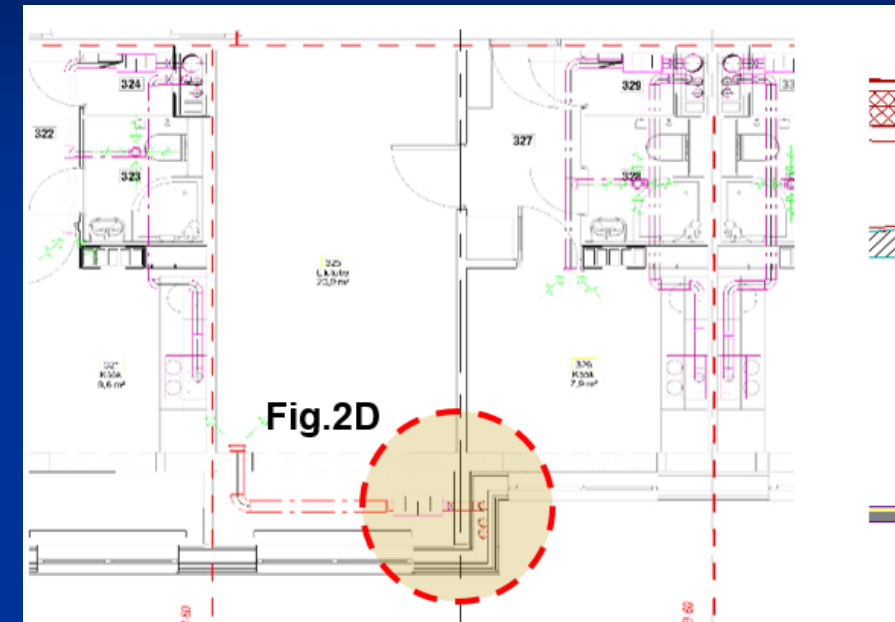
Конструктивное решение: вентиляционные каналы в стене

Стальные угловые кронштейны $t = 10 \text{ mm}$, оцинкованные горячим способом



Уплотнение
Расширяющаяся полиуретановая пена
Стальные профили $t = 0,5 \text{ mm}$ с отделкой поверхности PURAL
Вентиляционные каналы в изоляционной панели

Уплотнение
Стальные профили $t = 0,5 \text{ mm}$ с отделкой поверхности PURAL
Расширяющаяся полиуретановая пена
Уплотнение
Стальные профили $t = 0,5 \text{ mm}$ с отделкой поверхности PURAL



Системы отопления, вентиляции и кондиционирования: общие сведения

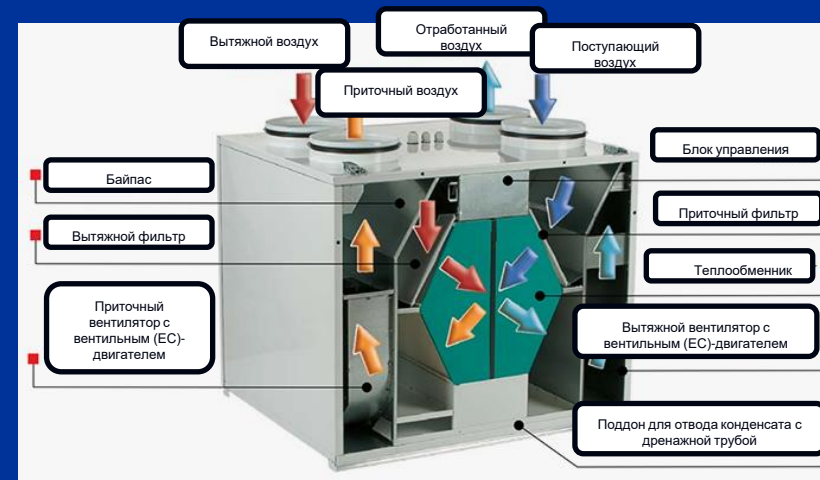
■ Внутриквартирная воздухообрабатывающая установка (АНУ) с вентиляцией с рекуперацией тепла (VHR)

■ Плюсы:

- Высокая эффективность
- Гарантированная производительность
- Пользователь может регулировать скорость

■ Минусы:

- Монтаж воздуховодов в квартирах
- Высокая цена; занимает много места



Системы отопления, вентиляции и кондиционирования: общие сведения

■ Внутриквартирная воздухообрабатывающая установка (АНУ) с вентиляцией с рекуперацией тепла (VHR)

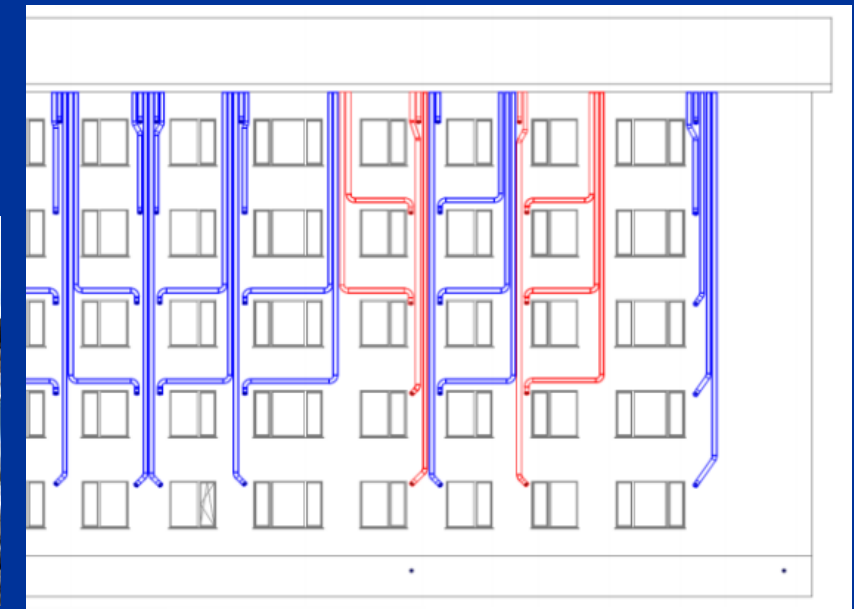
■ Централизованная АНУ с VHR

■ Плюсы:

- Высокая эффективность и гарантированная производительность
- Минимальный объем монтажных работ в квартире
- Наиболее распространенное решение в Эстонии

■ Минусы:

- Трудно использовать в зданиях выше 5 этажей (слишком большие воздуховоды на фасаде)



Системы отопления, вентиляции и кондиционирования: общие сведения

- Внутриквартирная установка АНУ с VHR
- Централизованная установка АНУ с VHR
- **Вытяжная установка АНУ с теплонасосом с рекуперацией тепла**

- **Плюсы:**

- Минимальный объем монтажных работ в квартире
- Главное решение в 9-этажных зданиях

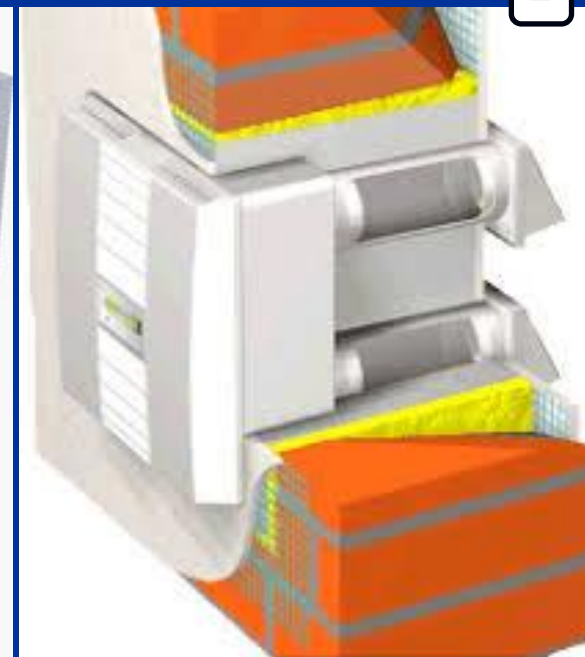
- **Минусы:**

- Электроэнергия от теплонасоса
- Параллельное отопление в целях централизованного отопления
- Вентиляционные радиаторы, используемые для предварительного нагрева приточного воздуха



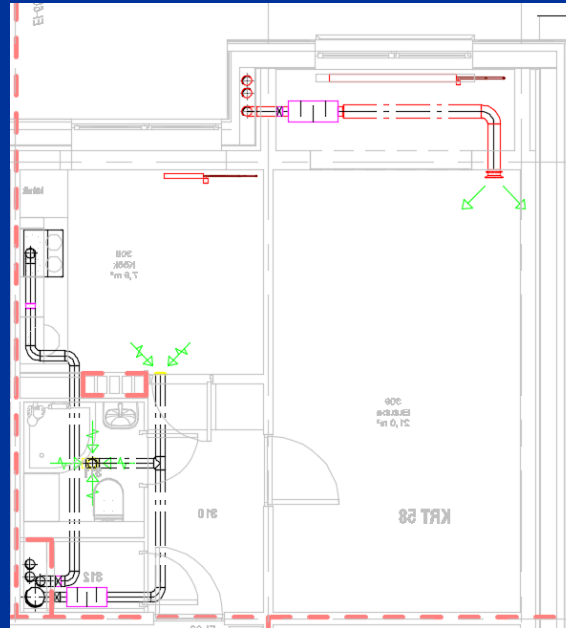
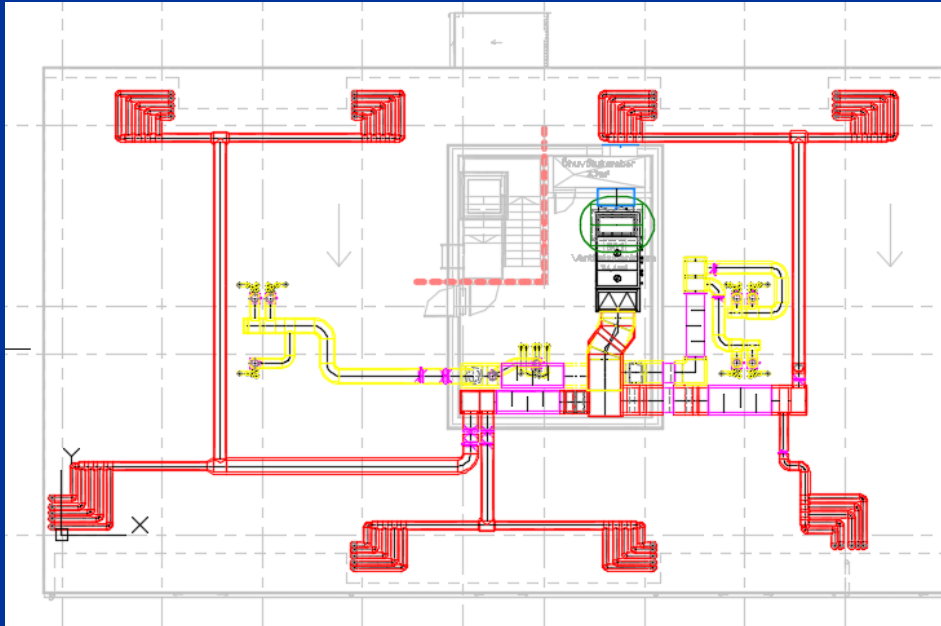
Системы отопления, вентиляции и кондиционирования: общие сведения

- Внутриквартирная установка АНУ с VHR
- Централизованная установка АНУ с VHR
- Вытяжная установка АНУ с теплонасосом HR
- Внутрикомнатная установка АНУ с VHR
 - Плюсы: легкость монтажа
 - Минусы:
 - Не решается проблемы влажности в комнатах
 - Несбалансированность, низкая рекуперация тепла,
 - Слишком большой шум, проблемы с замерзанием
 - Слишком маленький перепад давления
(ветер и воздух из-за эффекта стека проходят через систему),
 - Слишком маленький воздухопоток
(для главной спальник нужно несколько блоков),
 - Не допускается для использования в рамках гранта на модернизацию



Системы отопления, вентиляции и кондиционирования: вентиляция

- 1/2: централизованная сбалансированная вентиляция с рекуперацией тепла (VHR)
 - Вентиляционный модуль на крыше,
 - Вентиляционные каналы в изолирующих элементах
- 1/2 внутриквартирная сбалансированная вентиляция с рекуперацией тепла (VHR)
 - Установка агрегата АНУ на балконе или в гардеробе



Системы отопления, вентиляции и кондиционирования: отопление помещений

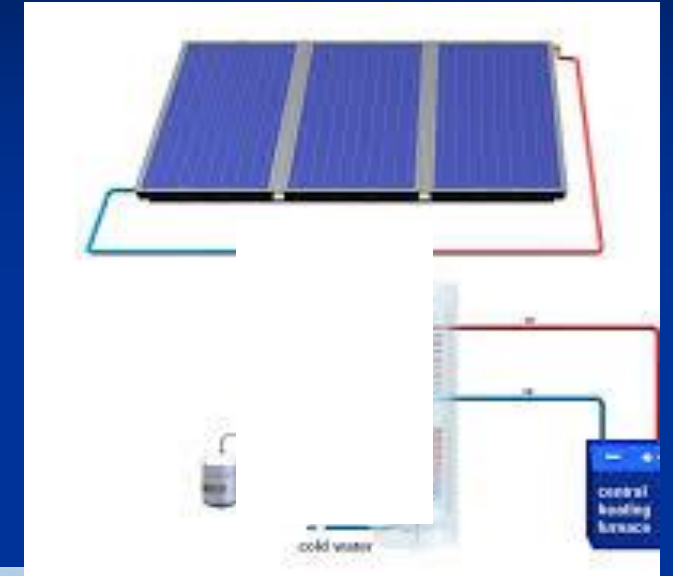
- Централизованное отопление
- Гидравлические радиаторы
- Комнатные термостаты
- Двухтрубная система



Системы отопления, вентиляции и кондиционирования: горячая вода для бытовых нужд

■ 1/2 солнечные коллекторы

- 50 пластинчатых коллекторов, 100м²
- 4х1.5м³ накопительных емкостей в подвале



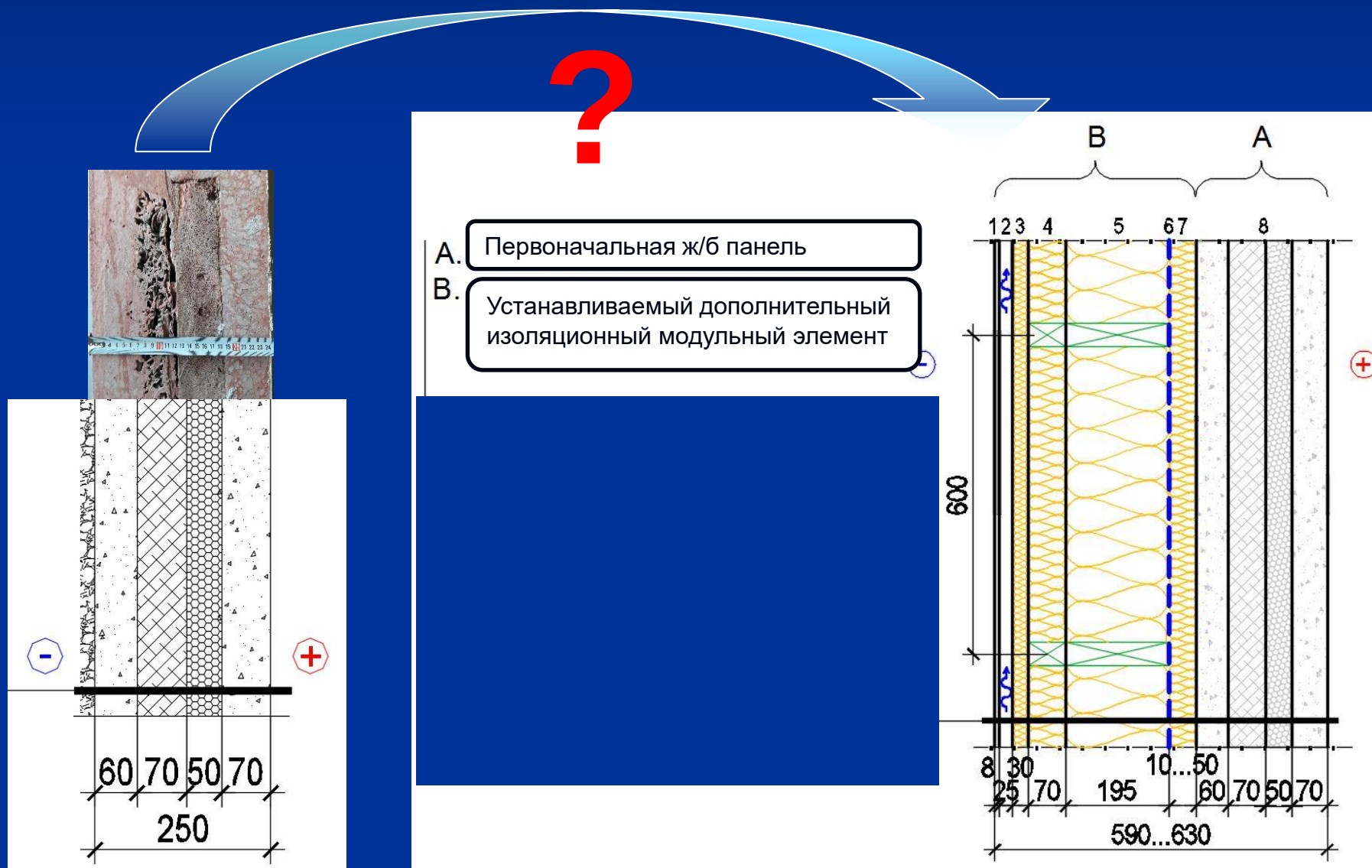
Системы отопления, вентиляции и кондиционирования: горячая вода для бытовых нужд

- 1/2 солнечные коллекторы на крыше
- 1/2 рекуперация тепла канализации
 - 2 пассивных модуля в подвале



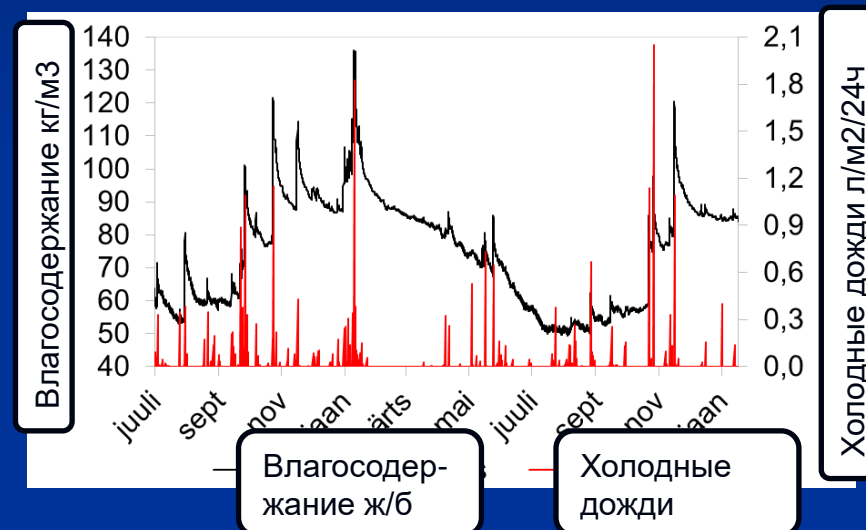
Проектирование элементов

Исследование

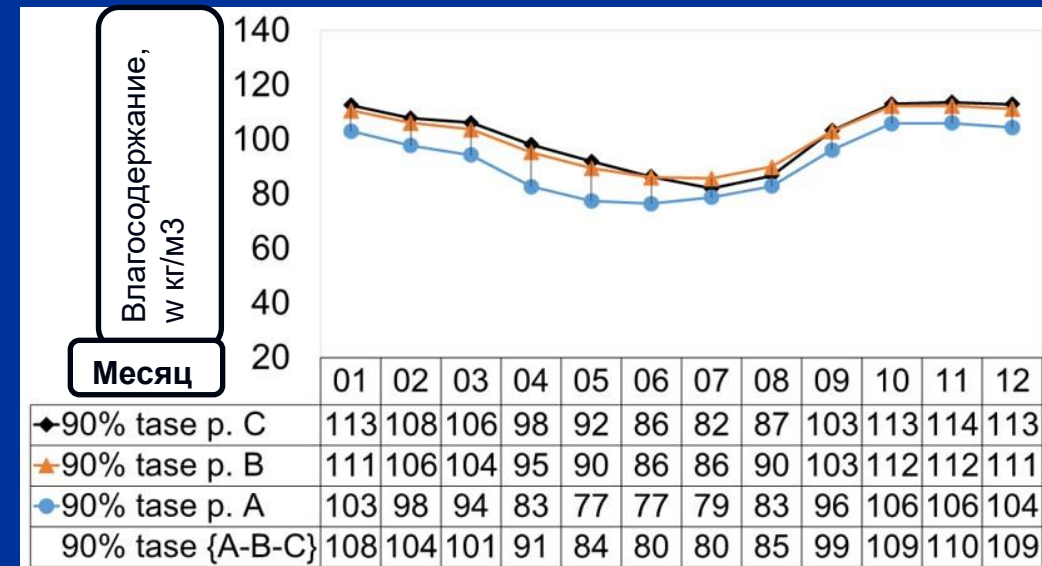
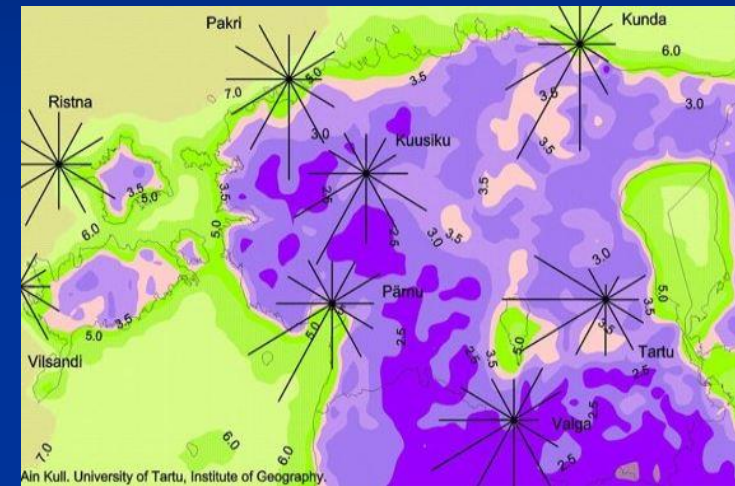


Анализ влагосодержания конструкций

- Содержание влаги в ж/б оболочке здания (кг/м³) и воздействие влаги в результате ливней

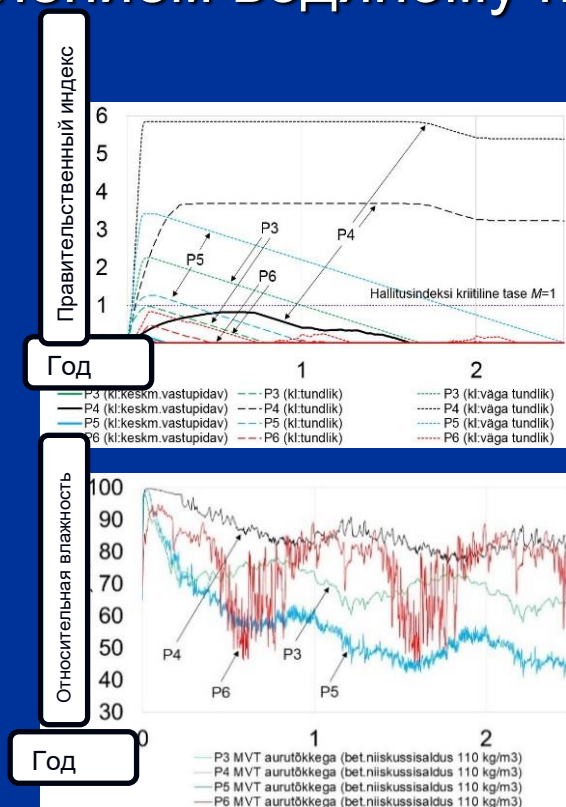


- Критическое направление: юго-запад
- Критические месяцы: октябрь, ноябрь, декабрь, январь
- Критический уровень влажности ж/б конструкции: $w=110$ кг/м³

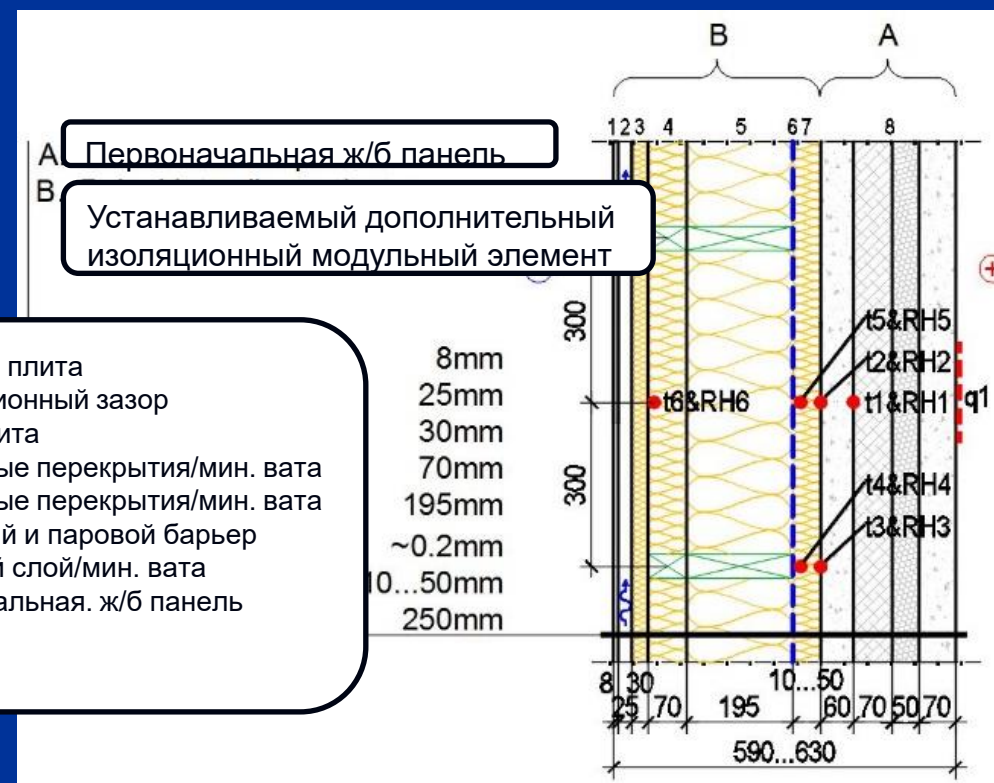


Результаты анализа влагосодержания конструкций

- Изделие считается функциональным, если:
 - Влагосодержание материала (ж/б) составляет $w \leq 110 \text{ кг/м}^3$
 - ветрозащитный барьер представляет собой минеральную вату с жестким поверхностным покрытием толщиной 30 мм, $R \geq 0.8 \text{ м}^2 \cdot \text{К/В}$ и $\delta p \geq 150 \times 10^{-12} \text{ кг/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па)}$
 - воздушно-паровой барьер представляет собой мембрану с переменным сопротивлением водяному пару ($0.2 \text{ м} < S_d < 5 \text{ м}$)

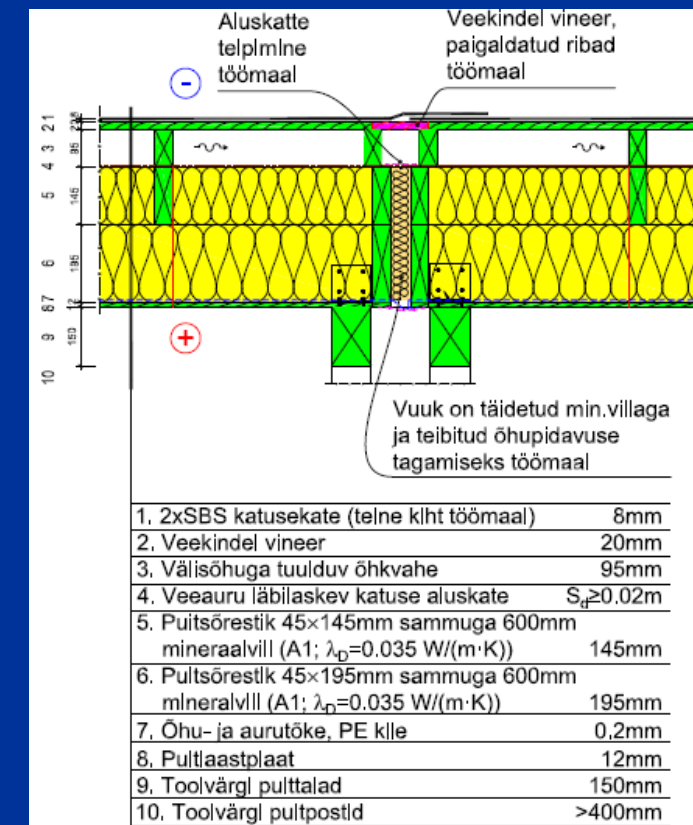


1. фасадная плита
2. вентиляционный зазор
3. ветрозащита
4. деревянные перекрытия/мин. вата
5. деревянные перекрытия/мин. вата
6. воздушный и паровой барьер
7. буферный слой/мин. вата
8. первоначальная. ж/б панель



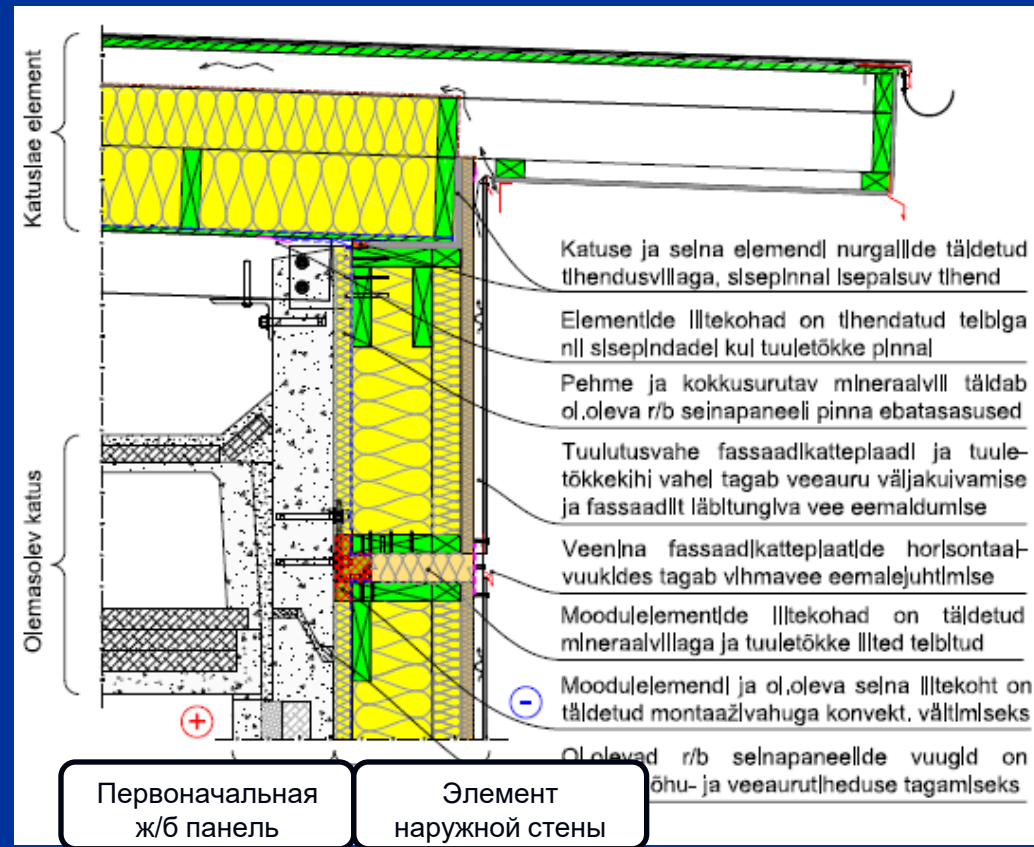
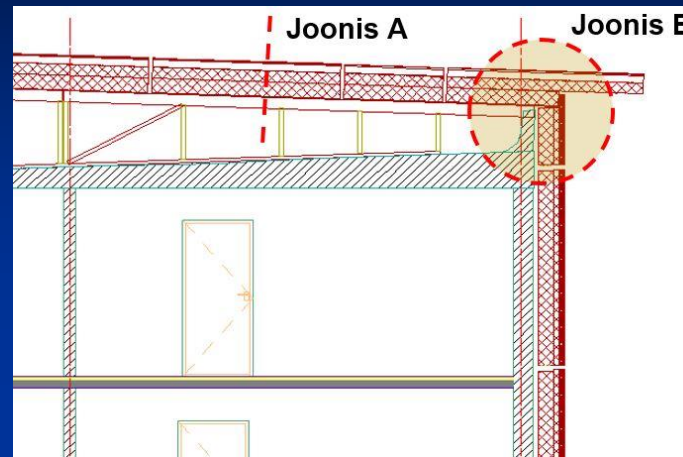
Решения по сборке модульных панелей

■ Несущие конструкции крыши



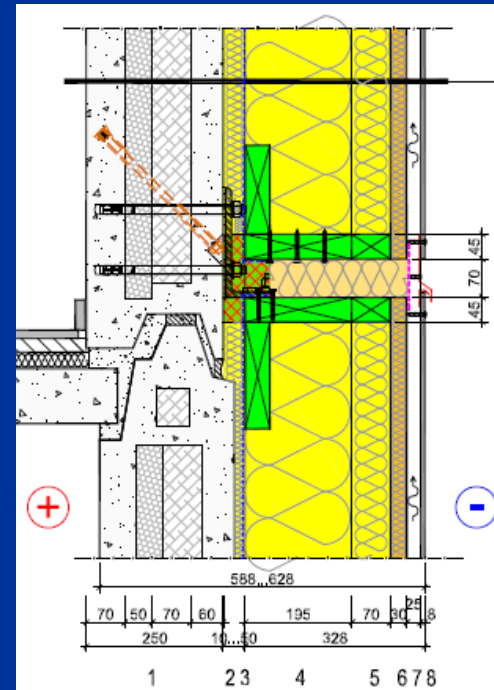
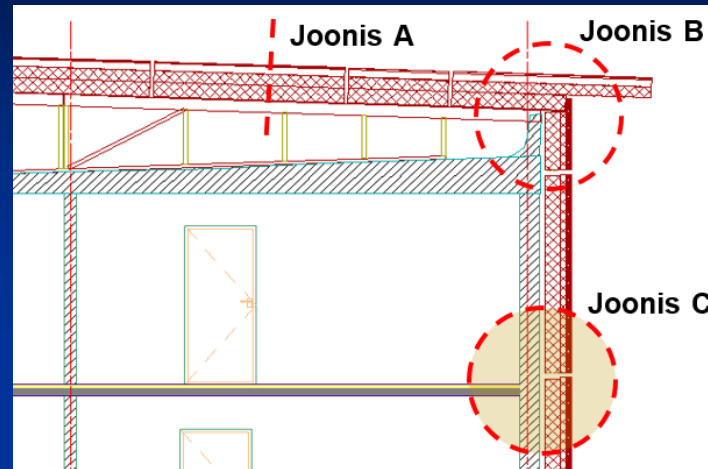
Решения по сборке модульных панелей

■ Карнизы



Решения по сборке модульных панелей

■ Наружные стены



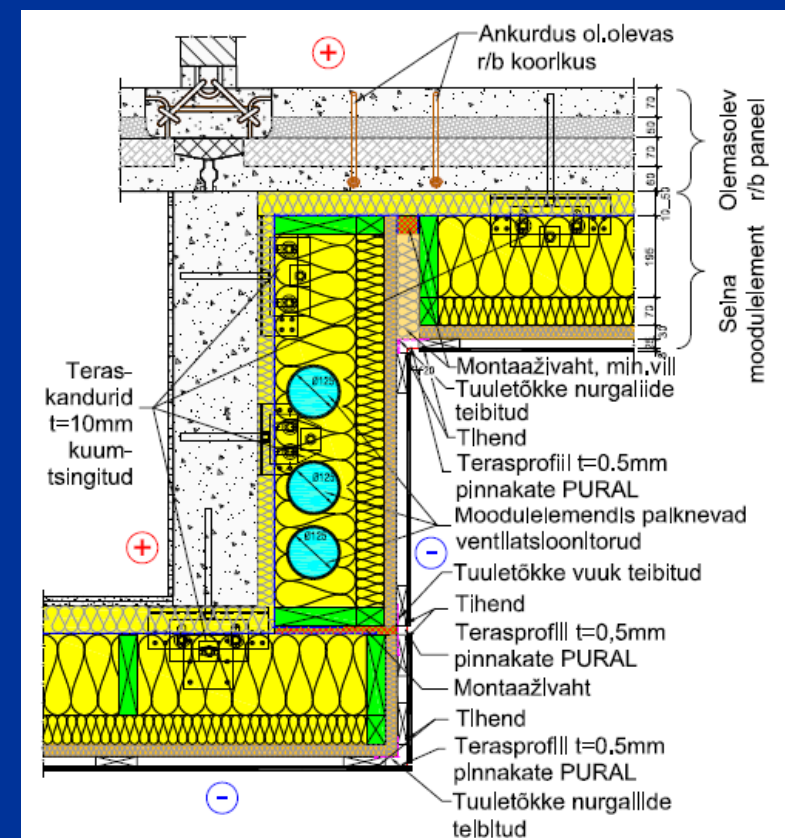
1. Olemasolev r/b seinapaneel	250mm
2. Pehme mineraalvill ebatasasuste tähteks (A1; $\lambda_D=0.035$ W/(m·K))	10...50mm
3. Õhu- ja aurutõke (veeaurutakistus $Z_p=1.6...27 \times 10^9$ (m ² ·s·Pa)/kg)	0.2mm
4. Puitsõrestik 45×195mm sammuga 600mm min.vill (A1; $\lambda_D=0.035$ W/(m·K))	195mm
5. Puitsõrestik 45×70mm sammuga 600mm min.vill (A1; $\lambda_D=0.035$ W/(m·K))	70mm
6. Jäik mineraalvillaplaat spetsiaalse tuuletõkke pealiskihiga (veeauruläbilaskvus $\delta_p=150 \times 10^{-12}$ kg/(m·s·Pa); telbltud III tled A2-s1,d0; $\lambda_D=0.031$ W/(m·K))	30mm
7. Tuulutatav õhkvahe	25mm
8. Fassaadkatteplaat	8mm

Первоначальная
ж/б панель

Элемент
наружной стены

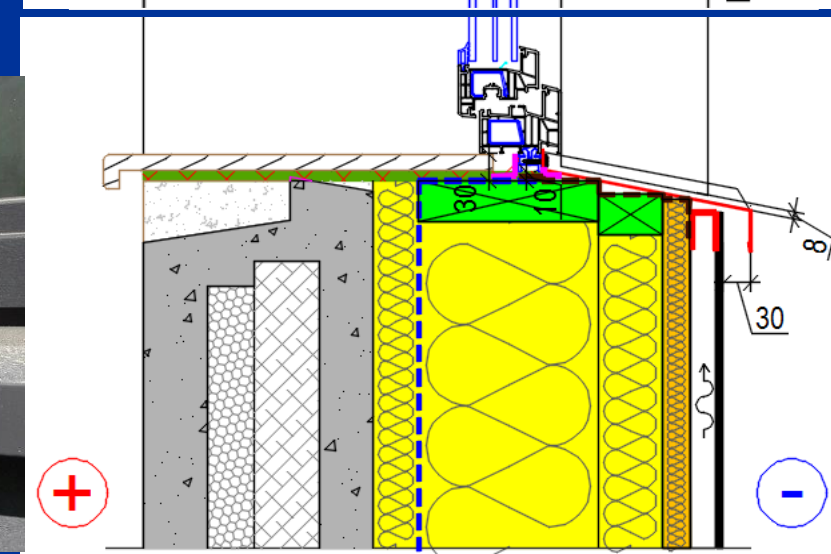
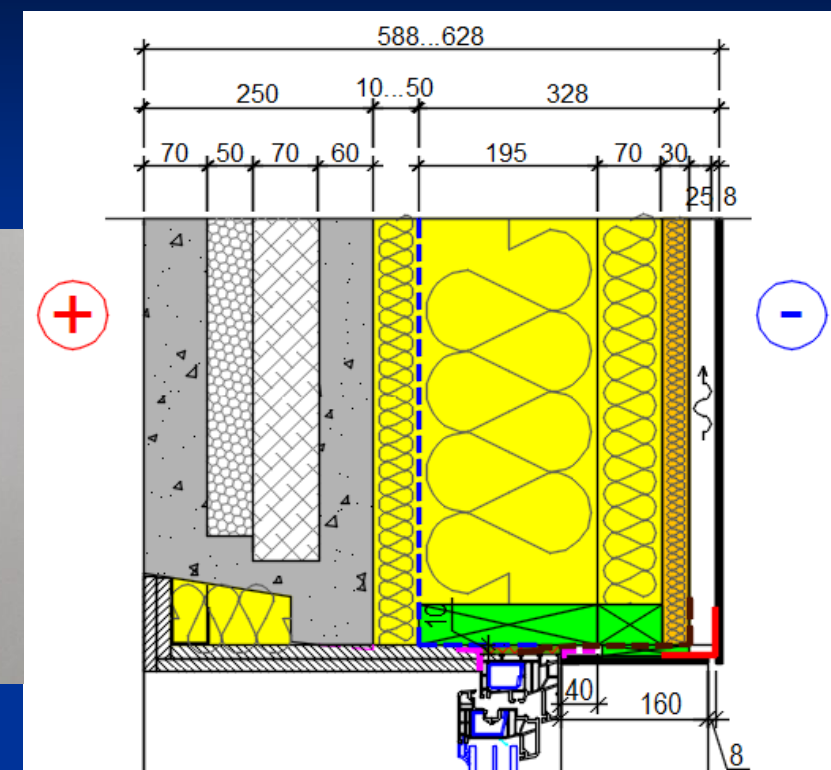
Решения по сборке модульных панелей

- Наружная стена
- Внешний угол
- с вентиляционными каналами



Решения по сборке модульных панелей

■ Места с открытым доступом



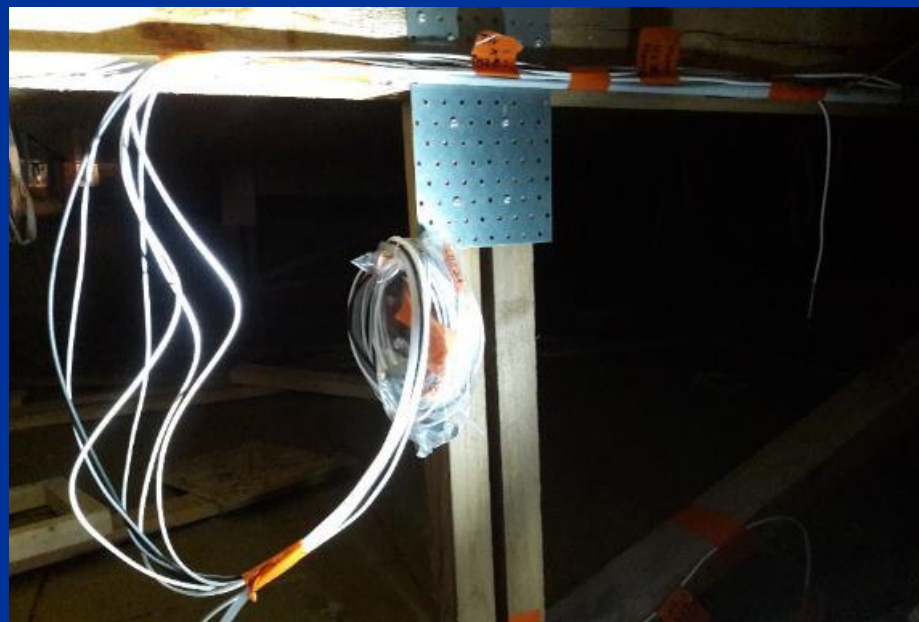
Изготовление модульных элементов AS Matek



Изготовление модульных элементов AS Matek



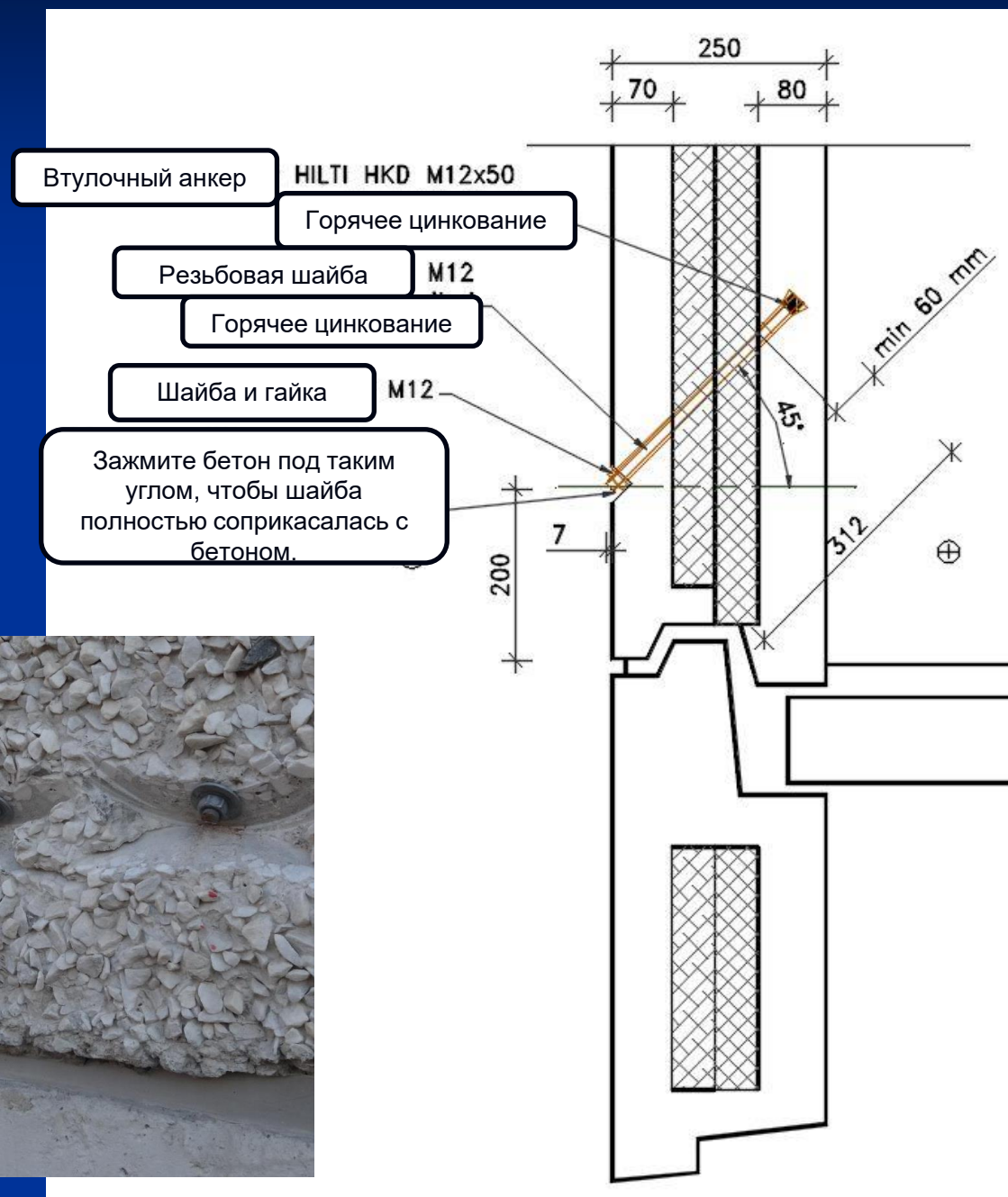
Установка датчиков на заводе и на объекте



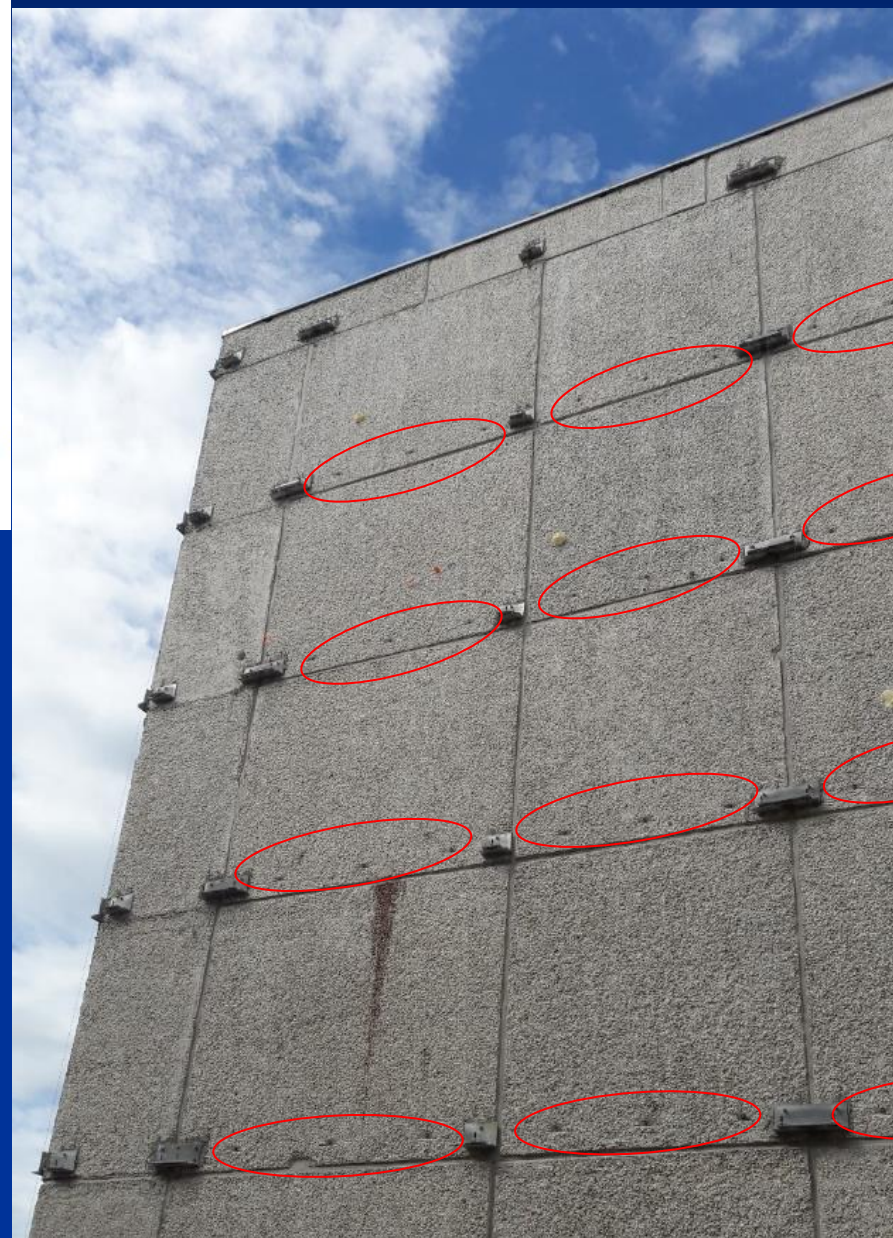
Вентиляционные каналы в модульных элементах



Крепление ж/б панелей



Крепление ж/б панелей и несущие элементы для модулей



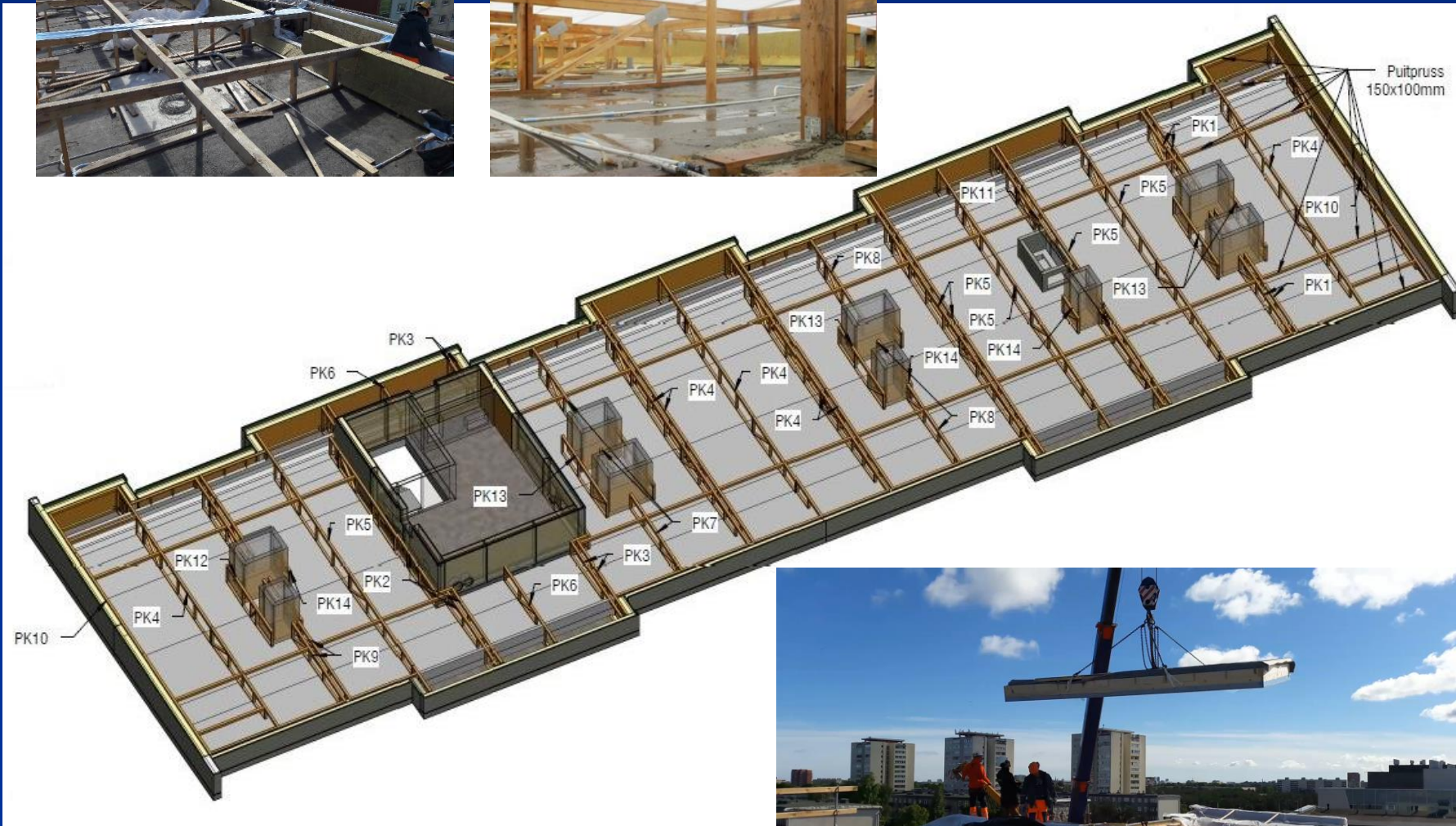
Изоляция фундамента и цоколя



Установка модульных элементов, весна-лето 2017 года



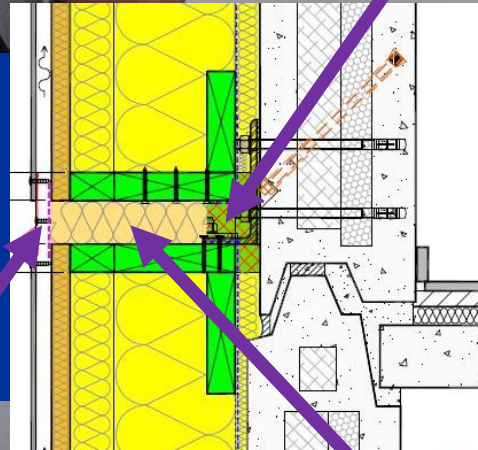
Монтаж кровельных стропил и модульных элементов



Детали и решения для стыков



Герметизация желобов



Системы отопления, вентиляции и кондиционирования: возобновляемая электроэнергия

- Фотоэлектрические (PV)-панели на крыше
 - 45 градусов, южное направление
 - 2 инвертора



- Более простой и дешевый элемент и материал фасада (вентилируемый фасад)
- Более простое крепление элементов к фасаду
- Более быстрый монтаж, улучшенная логистика на объекте
- Более быстрая изоляция и герметизация стыков элементов
- Больше пространства между элементами (допуск)
- Более автоматизированное проектирование и производство
- Больше разработок и испытаний во время проектирования и перед монтажом
- Дополнительные этажи
- Модернизация системы циркуляции
- Проблемы влажности!!!

