

OPENBARE RAPPORTAGE

IEBB - INTEGRALE
ENERGIETRANSITIE
BESTAANDE BOUW

Eindrapport
deelproject 3.1

Gerobotiseerd installeren van PV op woningdaken

Referentie: TEUE919003

Subsidiereregeling: Meerjarig Missiegedreven Innovatie Programma

Datum: 25 februari 2021

Aantal pagina's: 49 (inclusief bijlagen)

Rapportnummer: TNO 2021 R10366

Auteurs: Stijn Speksnijder, Ellemieke Henquet, Stan Klerks, Jan de Jong, Robert Bezemer

TNO innovation
for life

BE Precision
Technology

SANKOMIJ
INSTALLATIETECHNIEK BV

VAN DEN **HOFF**
Installatiebedrijf

R.J. LOOTS
INSTALLATIEBEDRIJF

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, micrifilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van het consortium Integrale Energietransitie Bestaande Bouw.

Samenvatting

Inleiding

Er is in Nederland een forse opschaling nodig van het aantal woningrenovaties. Iedere winst qua financiën en doorlooptijd is dus welkom. Dit project “Gerobotiseerd installeren van PV op woningdaken” is er primair op gericht om monteurs die PV installeren op woningdaken te ontlasten, wat hun duurzame inzetbaarheid vergroot. Daarnaast is het doel het installeren te versnellen.

Doelstelling

Het doel van dit project is het ontwikkelen van een geoptimaliseerd installatieproces voor het installeren van PV-panelen op schuine woningdaken met dakpannen: productiviteitsverhoging en kostprijsverlaging door robotisering. Daarin speelt verbetering van de arbeids-/veiligheidsomstandigheden een grote rol.

Resultaten

Het werk dat buiten plaatsvindt bij het huidige PV-installatieproces is geïnventariseerd in een taakanalyse: handelingen, tijdsduur daarvan, beveiliging, fysieke belasting, etc. De procesvernieuwing is vergeleken met deze huidige situatie, leidend tot aandachtspunten op allerlei vlakken, waarbij veiligheid en fysieke belasting zwaar wegen. Dit geeft richting aan de vernieuwingen van het installatieproces; deze zijn weergegeven in de illustratie op het voorblad van dit rapport. Twee hoofdvarianten:

- ‘Panelenlift’, lichter dan een pannenlift, mogelijk met handbediening (voor de snelheid), met een platform op goothoogte en speciale ‘verreik-tools’. Zo hoeft de monteur het dakvlak niet te betreden. Ook bij obstakels (zoals schoorstenen en dakramen) is dit systeem toepasbaar.
- Kleine hoogwerker, met PV-installatie volledig vanuit de werkbak. Bij ontwikkeling van een lichtere variant dan nu gangbaar kan de werkbak op het dak afsteunen en is inzet minder tijdrovend dan nu gangbaar. Ook bij dit systeem horen hulpmiddelen voor de monteur als deeloplossingen.

De businesscases voor deze twee hoofdvarianten zijn uitgewerkt m.b.t. productiviteit (omgekeerde van het aantal uur per woning), resulterende kosten, veiligheid en fysieke belasting. De toe-/afname ten opzichte van de huidige situatie is als volgt:

	Panelenlift	Hoogwerker
Productiviteit	+30% à 40%	+40% à 50%
Kosten	-5% à 10%	+15% à 25%
Valrisico	-20%	-90%
Fysieke belasting	-30%	-40% à 50%

Bij deze getallen moet rekening gehouden worden met een onzekerheidsmarge, omdat ze zijn gebaseerd op tijdmetingen en detailinformatie van slechts drie installateurs, die in het project betrokken waren. Verder wordt opgemerkt dat de scope van de businesscase uitsluitend het buitenwerk betreft.

Verdere uitwerking van de oplossingen door kapitalisatie van veiligheid en fysieke belasting en het verzamelen van informatie bij meerdere installateurs zal de kwaliteit van de businesscases verbeteren.

Conclusies:

1. De resultaten van het ontwikkelproces en de businesscase geven voldoende aanknopingspunten om met succes een vervolgproject op te zetten.
2. Door in het installatieproces van PV-panelen deelprocessen anders in te richten, kan fysieke belasting van monteurs worden teruggedrongen en hun veiligheid verhoogd, leidend tot hogere duurzame inzetbaarheid en totale capaciteit.
3. De (ver)nieuw(d)e inrichting van deelprocessen lijkt niet tot een kostenverhoging per installatie te leiden, eerder tot een verlaging. Dat wordt sterker bij meer seriematig installeren.
4. Toepassing van één robotisch hulpmiddel voor het installeren van PV-panelen op hellende woningdaken ligt niet voor de hand, doordat het om diverse kleinere handelingen gaat.

Bijdrage MMIP doelstellingen

De belangrijkste impact zal een capaciteitstoename zijn van monteurs voor PV-installatie doordat zij minder vaak en korter op het dak hoeven werken. Het werk kan in minder uren per dak uitgevoerd worden. Dat leidt tot verhoging van veiligheid (kleiner valrisico) en verlaging van de fysieke belasting door langdurig in belastende houdingen te werken. Daardoor is er minder letsel en financiële schade, zijn monteurs duurzamer inzetbaar en wordt het vak aantrekkelijker.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Programma IEBB.....	6
1.1 Inbedding in programma IEBB	6
1.2 Impact	6
1.3 Leeswijzer.....	7
2 Projectgegevens	8
3 Inhoudelijk eindrapport	9
3.1 Inleiding.....	9
3.2 Doelstelling	9
3.3 Werkwijze	9
3.4 Resultaten	12
3.4.1 Procesbeschrijving PV-installatie; huidige situatie	12
3.4.2 Ontwikkeling en uitwerking van een nieuw installatieproces	17
3.4.3 Procesontwerp voor het gerobotiseerd installeren van PV.....	21
3.4.4 Scope.....	34
3.4.5 Programma van Eisen	34
3.4.6 Businesscase	34
3.5 Aandachtspunten vervolgproject.....	36
4 Conclusies, leerpunten en aanbevelingen.....	38
4.1 Conclusies	38
4.2 Leerpunten.....	38
4.3 Aanbevelingen	38
Bijlage A: Taakanalyse huidige proces, scenario 1 en 2	39
Bijlage B: Programma van Eisen (PvE)	42
Algemene eisen.....	42
Primaire systeem- en proceseisen	42
PV Module.....	43
Montage.....	44
Beheer en onderhoud	45
Proces-specifieke eisen: Panelenlift concept.....	46
Prestatie	46
Businesscase	46

Proces-specifieke eisen: Hoogwerker concept	47
Prestatie	47
Businesscase	47
Bijlage C: Businesscase	48

1 Programma IEBB

1.1 Inbedding in programma IEBB

Het consortium Integrale Energietransitie Bestaande Bouw heeft als ambitie het haalbaar, betaalbaar en opschaalbaar maken van de energietransitie in de bestaande (woning)bouw. Hierbij richten we ons specifiek op de opschaling naar 200.000 renovaties per jaar vóór het jaar 2030. Om dit te bereiken werken we verdeeld over 9 thema's aan innovaties op het gebied van industrialisatie van renovatieconcepten (thema 1-4; MMIP 3.1 en 3.2), het transitieproces (thema 5-7; MMIP 3.3) en warmtetechnologie (thema 8 en 9; MMIP 4.1 en 4.3).

Dit deelproject "Gerobotiseerd installeren van PV op woningdaken" maakt onderdeel uit van thema 3 "Industrialisatie", omdat de ontwikkeling van PV-installatie met robotische hulpmiddelen niet zozeer om innovatie van een product gaat, maar meer om innovatie van het installatieproces waarin robotica en industrialisatie een grote rol spelen.

Dit deelproject van innovatieplan Integrale Energietransitie Bestaande Bouw is uitgevoerd met subsidies van het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties en het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

1.2 Impact

Deelproject "Gerobotiseerd installeren van PV op woningdaken" is gericht op het inventariseren van de huidige praktijk en het ontwikkelen van een installatieproces waarin robotisering / industrialisatie een belangrijke rol speelt. Dat heeft geresulteerd in beschrijvingen van twee mogelijke installatieprocessen met bijbehorende Programma's van Eisen voor proces en product. In dit deelproject was nog geen eerste prototype voorzien. Daardoor is de impact te benoemen op vlakken die bij een laag TRL-niveau horen:

- Het project heeft één alomvattend onderzoeksrapport opgeleverd, het onderhavige rapport.
- TNO, drie installatiebedrijven en een bedrijf dat zich specialiseert in technische, elektronische en robotische ontwikkeling hebben gezamenlijk twee (ver)nieuw(d)e installatieprocessen gedefinieerd, met bijbehorende Programma's van Eisen. Deze zijn beschreven in paragraaf 3.4.4 en Bijlage B.
- De belangrijkste impact van deze ontwikkeling zal zijn dat er meer capaciteit (bijvoorbeeld in gewerkte uren per jaar) van monteurs beschikbaar komt voor werk op het dak (installatiewerk in huis blijft in dit project buiten beschouwing).
- Onderliggend komt dat doordat monteurs minder vaak en korter op het dak hoeven werken. Daardoor kan het werk in minder uren per dak uitgevoerd worden; eerste schatting is dat installatie op het dak in de helft of twee derde van de werktijd kan. Bovendien – en dit achten de installatiebedrijven nog belangrijker – leidt dat tot verhoging van veiligheid (kleiner valrisico) en verlaging van de fysieke belasting door langdurig in belastende houdingen te werken. Daardoor is er minder letsel en financiële schade, zijn monteurs duurzamer inzetbaar en wordt het vak aantrekkelijker.
- Er is geen sprake van een duidelijke kostenreductie bij inzet van de (ver)nieuw(d)e processen, ook niet van een duidelijk toename. Als de niet-financiële componenten (zie vorige bullet) gekapitaliseerd zouden worden, zullen één of beide processen een kostenreductie laten zien.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 noemt de algemene gegevens van dit IEBB-deelproject. Hoofdstuk 3 beschrijft de doelstelling, de gevolgde werkwijze en de resultaten van het project. Hoofdstuk 4 belicht het 'projectproces': dilemma's in de uitvoering, wijzigingen op het plan, financiële aspecten en kennisverspreiding. Hoofdstuk 5 bevat conclusies, leerpunten en aanbevelingen.

2 Projectgegevens

- Projectnummer: TEUE919003
- Titel deelproject: Gerobotiseerd installeren van PV op woningdaken
- Penvoerder en medeaanvragers: TNO (penvoerder), Van den Hoff Installatiebedrijf, Sankomij Installatietechniek, A.J. Loots Installatiebedrijf, BE Precision
- Uitvoeringsperiode: 1 januari t/m 31 december 2020

3 Inhoudelijk eindrapport

3.1 Inleiding

Er is in Nederland een forse opschaling nodig van het aantal woningrenovaties per jaar, gedreven vanuit de energietransitie. Dat gaat gepaard met een grote inspanning, zowel financieel als qua doorlooptijd. Iedere winst op deze gebieden is dus welkom. Dit project “Gerobotiseerd installeren van PV op woningdaken” is er primair op gericht om monteurs die PV installeren op woningdaken te ontlasten (verhoging veiligheid, verlaging fysieke belasting), wat hun duurzame inzetbaarheid vergroot. Daarnaast is het doel het installeren enigszins te versnellen. Beide doelen leiden tot vergroting van de beschikbare capaciteit voor installatie van PV-panelen op woningen.

3.2 Doelstelling

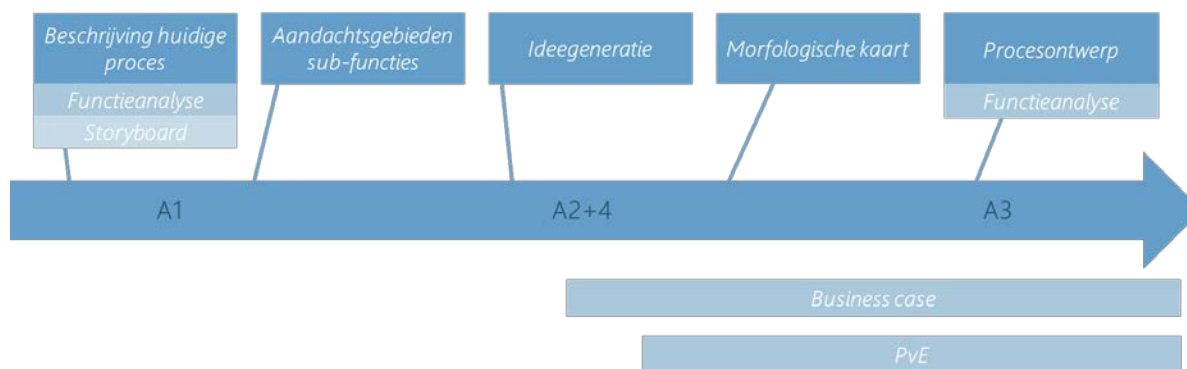
Het doel van dit project is het ontwikkelen van een geoptimaliseerd installatieproces voor het installeren van PV-panelen op schuine woningdaken met dakpannen. Door robotisering van (delen van) de installatie van PV op bestaande hellende daken wordt een vergroting van de productiviteit en verlaging van de integrale kostprijs beoogd voor het installatieproces. Niet in de laatste plaats worden de arbeids-/ veiligheidsomstandigheden van het installatieproces sterk verbeterd waardoor de toekomstige installatiecapaciteit gegarandeerd blijft en vergroot kan worden.

De projectpartners hebben in het eerste deel van dit deelproject de doelen in meer detail bepaald, in volgorde van belang:

1. Zo min mogelijk arbeid op het dak
2. Verbeterde veiligheid
3. Verlaagde fysieke belasting
4. Verhoogde productiviteit (wordt vooral gezien als een resulterende van 1 t/m 3)

3.3 Werkwijze

De activiteiten zijn schematisch als volgt uitgevoerd:



Activiteit 1: Beschrijving huidige proces PV-installatie

Het oorspronkelijke plan was om in de eerste maanden van 2020 door middel van observaties van installatieprojecten van de drie in het consortium betrokken installateurs tot een procesbeschrijving te komen. Dit is vanwege tegenvallende weersomstandigheden en de uitbraak van het Covid-19 virus niet gelukt. Als alternatief is door middel van de bronnen in de referenties (Beeldmateriaal YouTube, dakreflector, A-bladen, productinformatie fabrikanten) een opzet van een procesbeschrijving gemaakt, die met de installateurs in interviews is doorgesproken en is aangevuld met meer detailinformatie. Dit tezamen heeft geleid tot deze procesbeschrijving.

Activiteit 2+4: Ontwikkeling en uitwerking van het PV installatieproces

De resultaten van activiteit 1 waren het uitgangspunt voor activiteit 2. Op basis van het huidige installatieproces is een aantal brainstormsessies georganiseerd, waarvan twee met het hele consortium. Via een digitaal 'whiteboard' werden ideeën ingebracht vanuit de verschillende disciplines en in een mindmap geplaatst, Figuur 1 (volgende pagina; figuur is bedoeld om een indruk te krijgen; zie ook paragraaf 3.4.3). TNO heeft deze ideeën geclusterd en verder uitgewerkt in samenwerking met de partners. Met behulp van een morfologische kaart zijn ideeën geselecteerd en samengevoegd tot twee potentiële installatieprocessen.

Activiteit 4 richt zich op het verder uitwerken van het installatieproces en het opzetten van een eerste businesscase. Dit is deels parallel aan activiteit 2 uitgevoerd.

Activiteit 3: Opstellen van een programma van eisen voor de te ontwikkelen robot

Gedurende activiteit 2 zijn eisen verzameld, die worden gesteld aan (de hulpmiddelen in) het nieuwe installatieproces. Deze zijn samengevoegd in een programma van eisen. In het opzetten van het programma zijn de consortiumpartners betrokken: BE Precision vanuit het perspectief van de robotica en automatisering, de drie installateurs vanuit het perspectief van de uiteindelijke gebruiker.

Input Brainstorm Robo TV 20 mei 2020

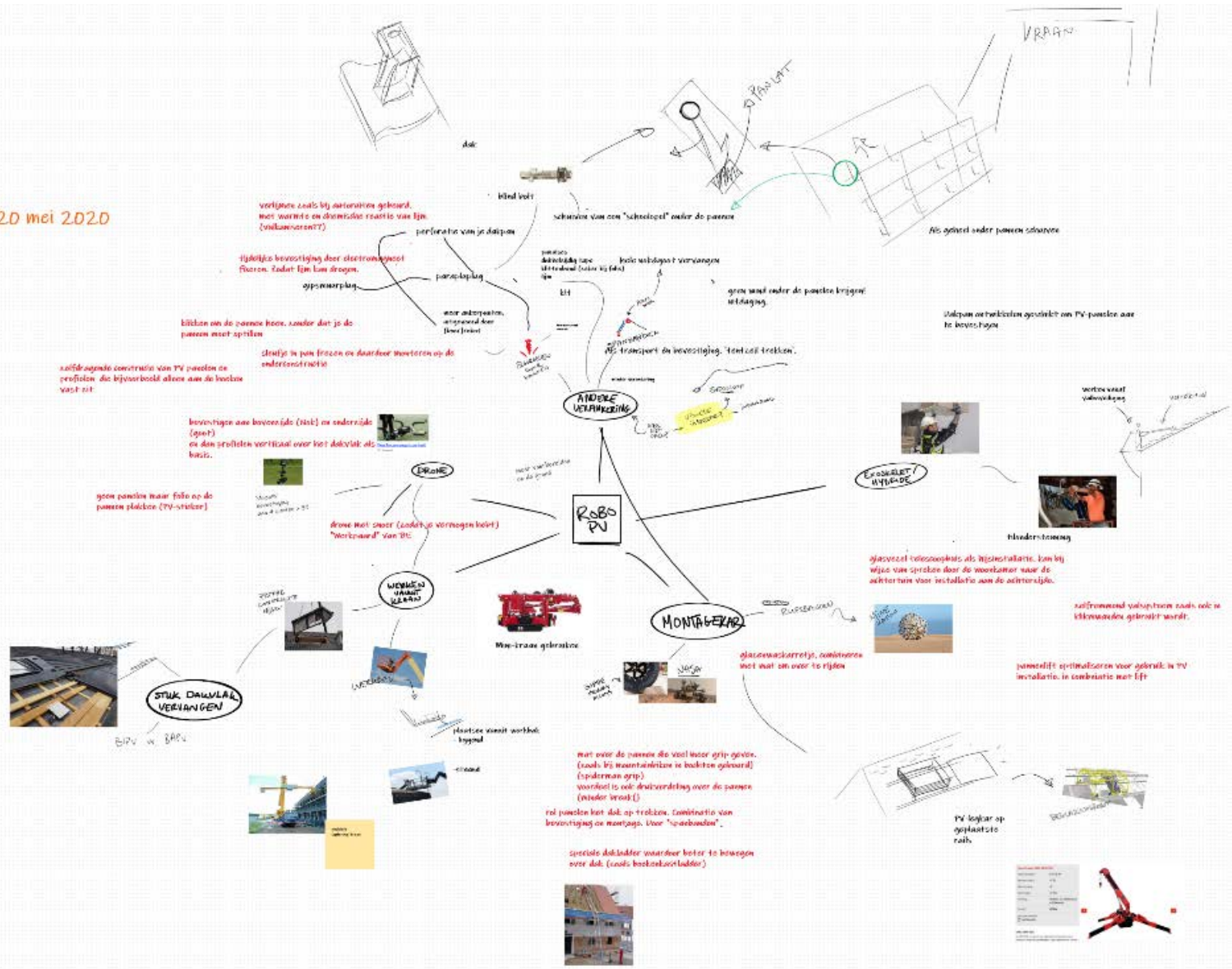
The Four Rules Of Brainstorming

1. Focus on quantity.
2. No criticism.
3. Encourage wild ideas.
4. Combine and improve ideas.

Opmerkingen

Veel bijzondere omstandigheden. Je wilt wel een oplossing voor bijna alle situaties

Standaardmaat 1,65x1,00m, ca. 20 kg. Ook 1,95x1,00m komt voor.



Figuur 1 Brainstormsessie 20 mei 2020 – Mindmap (bedoeld om een indruk te krijgen; niet alle details zijn leesbaar, zie ook paragraaf 3.4.3).

3.4 Resultaten

3.4.1 Procesbeschrijving PV-installatie; huidige situatie

De betrokken installateurs hebben een vergelijkbaar, maar op onderdelen afwijkend installatieproces, wat is te verklaren omdat de partijen deels een verschillend marktsegment bedienen. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen 'enkele' installaties voor particulieren en seriematige installaties, vaak voor een woningcorporatie.

De overeenkomsten en verschillen tussen deze twee segmenten worden hieronder besproken. Ook wordt er een algemeen installatieproces op hoofdlijnen opgesteld dat voor beide segmenten geldt.

3.4.1.1 "Gemiddelde" PV-installatie particulier

Bij particuliere woningeigenaren wordt typisch één woning per project aangepakt.

Eigenschap	Waarde	Opmerkingen
Aantal woningen	1	
Aantal dakvlakken	1 per woning	Soms meerdere, maar meestal 1 dakvlak. Achterzijde is complexer dan voorzijde
Hellingshoek	40 graden	
Type kapconstructie	Gordingenkap	
Type dakpan	Veel verschillende pantypen	
Grootte van het systeem	Tussen de 10 en 15 panelen.	
Type systeem	Opdaksysteem	
Bevestigingssysteem	Panhaak (type C)	
Type paneel	Geframede panelen, 60 cells/ 120 halfcells, 1,65 bij 1 m	Nu komt er weer meer variatie in cellen
Elektrisch systeem?	95% Solaredge power optimizer	Dat vormt de standaard in het 'luxere' segment (particuliere markt)

3.4.1.2 "Gemiddelde" PV-installatie seriematig

Voor corporaties worden woningen "bloksgewijs" voorzien van PV-panelen, dus een aantal woningen in één keer. Dit hoeft niet per se te betekenen dat alle woningen in een huizenblok worden voorzien, dit is afhankelijk van de afspraken tussen bewoner en corporatie. Onderstaande tabel geeft een aantal belangrijke eigenschappen van een dergelijke installatie.

Eigenschap	Waarde	Opmerkingen
Aantal woningen	20	In een rijtje/ straat
Aantal dakvlakken	1 per woning	Achterzijde complexer dan voorzijde i.v.m. bereikbaarheid & aanbrengen voorzieningen
Hellingshoek	30-40 graden	
Type kapconstructie	Gordingenkap	Vaak PV-installatie i.c.m. dakisolatie. Woningen meestal van binnenuit geïsoleerd
Type dakpan	Veel verschillende pantypen	Woningen uit jaren 70: betonnen sneldekkpannen. Daarvoor en daarna keramisch
Grootte van het systeem	Tussen de 6 en 10 panelen	
Type systeem	Opdaksysteem	
Bevestigingssysteem	Panhaak (type C)	Soms met hulphout
Type paneel	Geframede panelen, 60 cells, 1,65 bij 1 m	Nu komt er weer meer variatie in cellen.
Elektrisch systeem?	Power optimizer komt heel veel voor naast string-systeem	

3.4.1.3 Het installatieproces op hoofdlijnen

Op basis van de bronnen en interviews is het volgende installatieproces op hoofdlijnen opgesteld. De handelingen die door de installateur worden uitgevoerd zijn weergegeven als een storyboard. De volgorde van handelingen kan verschillen per installateur en per situatie en sommige stappen worden ook wel parallel uitgevoerd.

- 1) **Werkvoorbereiding:** alle projectactiviteiten voorafgaand aan de installatie. Hier worden ook de keuzes gemaakt m.b.t. het in te zetten materieel.
- 2) **Voorbereiden werkplaats:** inrichten van de locatie zoals het opbouwen van steigers, ook het aanleveren van de materialen.



1. Transport



2. Plaatsen steiger waar mogelijk



3. Plaatsen dakrandbeveiliging waar nodig



4. Bevestigen valbeveiliging (anker)

- 3) **Uitzetten/maatvoeren:** bepalen exacte positie en details van het systeem.



1. Uittekenen panelenveld



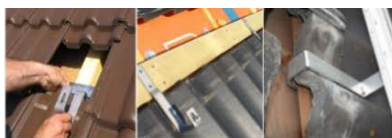
2. Uittekenen plaatsing haken

- 4) **Opperen:** het verplaatsen van de te installeren materialen op de bouwplaats (horizontaal, verticaal en over het dak). Deze taak loopt parallel met taken 5, 6, en 7.

- 5) **Plaatsen draagconstructie:** het plaatsen van de haken en profielen aan het dak.



1. Omhoog schuiven pannen

2. Plaatsen haken (meestal panhaak)
A op tengel B op hulphout C panhaak

2b. Bevestigen hulphout (zelden)



3. Verstellen haken (zelden)



4. Bijwerken dakpan (zelden)



5. Sluiten dak



6. Klemmen plaatsen op profielen



7. Koppelen profielen



8. Opperen profielen



9. Plaatsen profielen op beugels



10. Stellen profielen

6) **Elektrische aansluiting:** verbinden van de PV-panelen, evt. micro-omvormers en maken doorvoer.

1. Kabels trekken onder pannen



2. Bevestigen kabels aan beugels



3. Plaatsen optimizers/micro invertors



4. Bevestigen aardendraad aan profielen



5. Maken doorvoer (binnen > buiten)

7) **Plaatsen PV panelen:** Deze taak loopt gedeeltelijk parallel aan taak 6.

1. Opperen panelen



2. Plaatsen panelen op profielen



3. Stellen panelen



4. Vastzetten panelen



5. Verbinden panelen

8) **Afwerken systeem:** afdoppen profielen, vastzetten kabels etc.

1. Afdoppen

9) **Afbouwen werkplaats:** verwijderen steiger / lift, opruimen, herstellen evt. schade door lift / kraan / hoogwerker, etc.

1. Loskoppelen valbeveiliging (anker)



2. Demonteren dakrandbeveiliging



3. Demonteren steiger



4. Transport

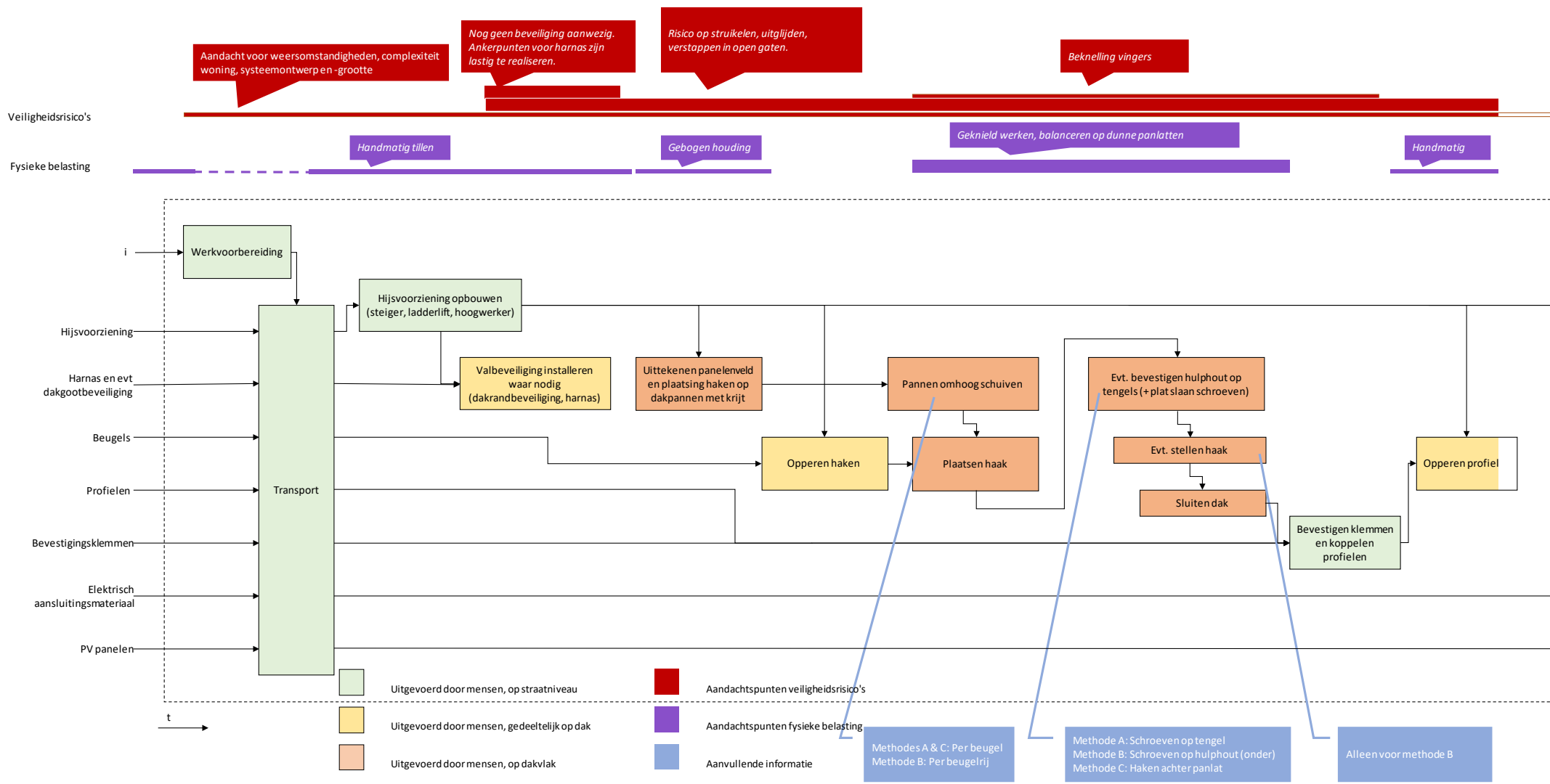
Het storyboard is samengesteld uit screenshots van verschillende YouTube video's.¹²³

Het installatieproces is schematisch weergegeven in onderstaande flowchart. Hierin staan de aandachtspunten wat betreft fysieke belasting en veiligheid respectievelijk in het paars en rood aangegeven.

¹ Installatievideo: het monteren van zonnepanelen - Geas Energiewacht. <https://youtu.be/7SVHjnb649U>

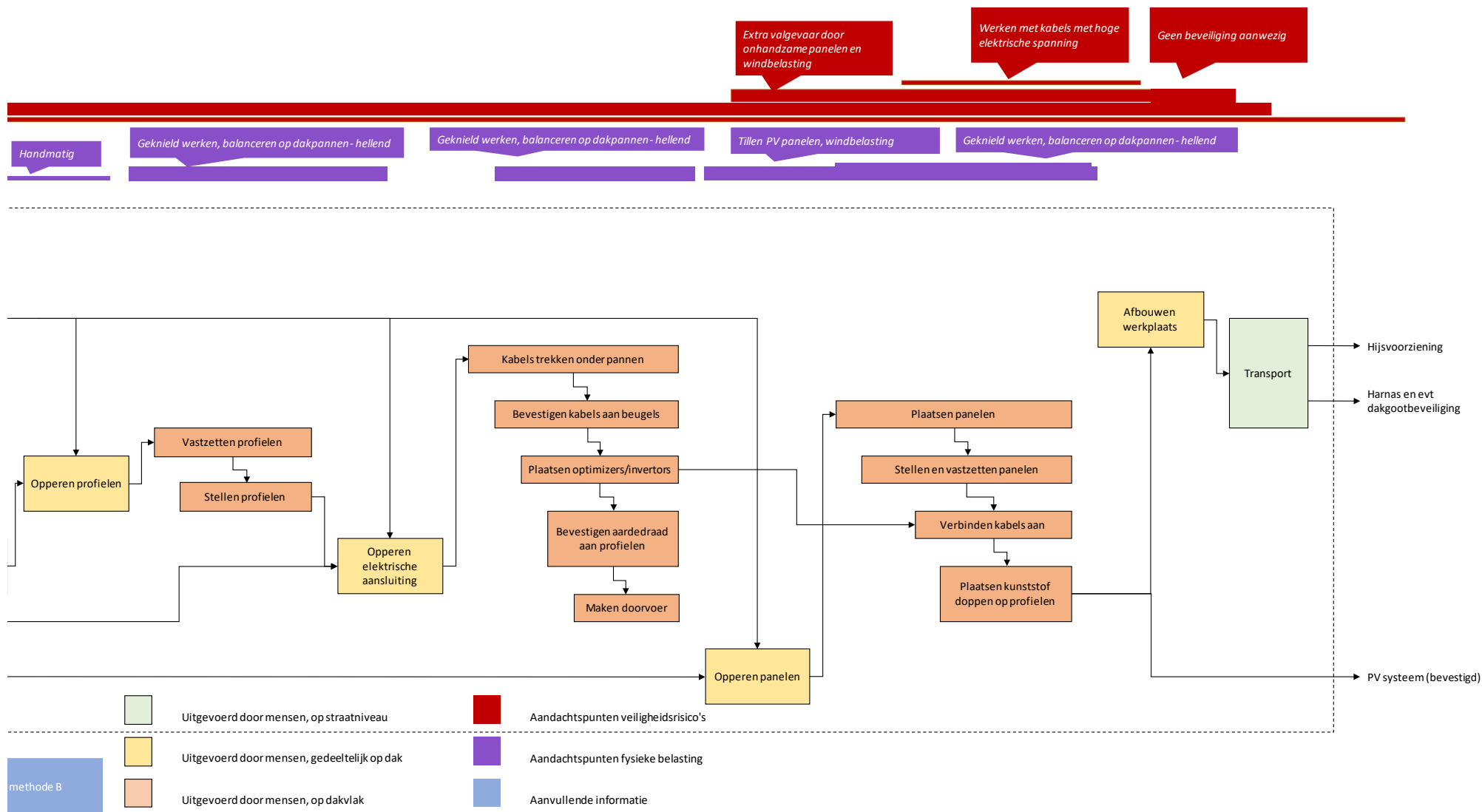
² Instructievideo: Monteren zonnepanelen schuin dak. <https://youtu.be/C0tECeE6p8o>

³ Protect Valbeveiliging; Dakhaas tijdelijk ankerpunt. https://youtu.be/w3ARK_d4VYc



Figuur 2a: Flowchart (linkerdeel) bestaand PV installatieproces

INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW



Figuur 2b: Flowchart (rechterdeel) bestaand PV installatieproces

3.4.1.4 Resultaten taakanalyse

In de interviews met de installateurs is de taakanalyse opgezet. Hierbij zijn de verschillende taken onderverdeeld in subtaken om meer begrip te krijgen voor (de overeenkomsten en verschillen tussen) de twee casussen. Vervolgens is per subtaak gekeken naar de volgende facetten:

Tijd, onderdelen (steigerdelen, PV panelen), benodigdheden (boormachines, valbeveiliging), fysieke belasting (knielen, bukken), veiligheid (valgevaar, beknelling van vingers), kwaliteit (beschadiging van dak), vakmanschap (systeemontwerp), werkinstructies en gedachten richting robotisering. Daaruit is een compleet beeld van de taken in die processen ontstaan, gekwantificeerd (bv. tijd) waar dat mogelijk is. Deze input is gebruikt om bovenstaande flowcharts te maken en ook de oplossingsrichtingen te toetsen.

De tijd die verschillende handelingen vragen in de huidige situatie en ook in de nieuwe processen (zoals toegelicht in paragraaf 3.4.2), zijn opgenomen in Bijlage A.

3.4.1.5 Overeenkomsten en verschillen tussen de installatieprocessen

De twee processen (één woning of een serie woningen) zijn wat betreft de gebruikte producten en de processtappen zeer vergelijkbaar. Beide maken gebruik van standaard PV-panelen, een op-dak montagesysteem met panhaken (type C), en laten de dakbedekking (pannen) zo veel mogelijk intact. Daaruit volgt dat de processtappen in hoofdlijnen ook erg op elkaar lijken.

De invulling van die stappen is wel afwijkend, vooral wat betreft de gebruikte hulpmiddelen. Bij de seriematige installatie loont het vaker om hulpmiddelen zoals een hoogwerker of een lift in te zetten, terwijl dit bij de installatie bij een particulier vaak niet efficiënt is. Ook in de wijze waarop de werkzaamheden worden ingericht is bij de seriematige installatie meer variatie. De teams zijn groter, waardoor meer specialisatie (dakwerk, opperen, elektrische installatie) mogelijk is, met meer repetitie en daardoor mogelijk hogere fysieke belasting voor bepaalde personen tot gevolg.

3.4.2 Ontwikkeling en uitwerking van een nieuw installatieproces

3.4.2.1 Aandachtspunten met betrekking tot veiligheid en fysieke belasting

De belangrijkste redenen voor robotisering van het installeren van PV-panelen betreffen het wegnemen van de risico's die door het werken op hoogte worden veroorzaakt. Deze risico's zijn geïdentificeerd in (gedeeltes van) stappen 3 t/m 8 (zie paragraaf 3.4.1.3). Voor deze (deel)stappen zou, in een ideaal scenario, een alternatieve, gerobotiseerde, werkwijze kunnen worden ontwikkeld. Naast veiligheidsrisico's is ook geïdentificeerd dat er diverse (deel)stappen zijn waar fysieke belasting een aandachtspunt is. Deze vinden plaats in dezelfde hoofdstappen, maar in de deelstappen zijn er verschillen. Bij de uitwerking van oplossingen zal gezocht moeten worden naar oplossingen die ook de belasting voor de monteur verlichten. In de tabel hieronder zijn per hoofd- en subtaak het veiligheidsrisico en de belasting kwalitatief weergegeven. Hoe donkerder de kleur, hoe groter het risico / de belasting:

- Groen: geen verhoogd risico op klachten aan het bewegingsapparaat / veiligheid (geen maatregelen nodig)
- Geel: licht verhoogd veiligheidsrisico (geen directe maatregelen nodig)
- Oranje: verhoogd risico op klachten aan het bewegingsapparaat / veiligheid (maatregelen op termijn nodig)
- Rood: sterk verhoogd risico op klachten aan het bewegingsapparaat / veiligheid (directe maatregelen nodig)

In Tabel 1 staat de kleurcodering weergegeven.

taak nr.	beschrijving	fysieke belasting	risico veiligheid
1	werkvoorbereiding		
1.1	engineering van project (plan voor plaatsing, oriëntatie, werkorganisatie, elektra...)		
1.2	uitvoeringsplan opzetten(werkvergunning) .Hoe werkzaamheden uitvoeren (veilig, maar ook opperen etc.)		
1.3	bestellen materialen		
1.4	huren/ reserveren van hulpmiddelen (kraan/ lift/...)		
1.5	capaciteitsplanning		
2	voorbereiden werkplaats		
2.1	Materialen en gereedschappen controleren		
2.2	Inladen materialen in bus/vrachtwagen		
2.3	Werkplaats opbouwen		
2.3.1	Kraan / ladderlift / hoogwerker plaatsen		
2.3.2	Werkplaats afzetten		
2.3.3	Steiger plaatsen		
2.3.4	Valbeveiliging aanbrengen		
3	uitzetten/ maatvoeren		
3.1	Bepalen positie panelenveld		
3.2	Visueel inspecteren mogelijkheden		
3.3	Positie doorvoer naar binnen bepalen		
4	opperen		
4.1	horizontaal transport (van bus naar lift/ steiger; ongeveer 70% gebeurt handmatig/ 30% direct op pannelif)		
4.1.1	profielen en bevestiging		
4.1.2	PV-panelen		
4.2	verticaal transport		
4.2.1	profielen en bevestiging		
4.2.2	PV-panelen		
4.3	transport over dak		
4.3.1	profielen en bevestiging		
4.3.2	PV-panelen		
5	plaatsen draagconstructie		
5.1	plaatsen panhaken		
5.1.1	openen dak		
5.1.3	plaatsen panhaken		
5.1.4	stellen panhaken		
5.1.5	sluiten dak		
5.2	plaatsen profielen		
5.2.1	vastzetten profielen aan haken		
5.2.2	koppelen profielen		
5.2.3	stellen profielen (3 richtingen)		
6	elektrische aansluiting		
6.1	maken doorvoer		
6.2	doorvoeren kabels naar omvormer en aanzetten connectoren		
6.3	ev.t plaatsen optimizers/micro omvormers		
6.4	doorverbinden panelen		
6.5	aarden van draagconstructie.		
7	plaatsen PV panelen		
7.1	plaatsen paneel 1 op profielen		
7.2	stellen paneel 1		
7.3	plaatsen overige panelen op profielen		
8	afwerking systeem		
	vervangen pannen, foto's maken, checklists invullen, (materieel verplaatsen naar volgende woning hoort bij opperen voor volgende woning).		

Tabel 1: Veiligheidsrisico's en fysieke belasting voor taken

3.4.2.2 Kanttekening met betrekking tot de procesomschrijving

De beschrijving van het huidige proces in paragraaf 3.4.1 geeft een overzicht van de processtappen en op welke van deze stappen de focus van de robotisering zal moeten liggen om het beoogde doel te bereiken. Bij de ontwikkeling van een proces voor robotisering moet een aantal aandachtspunten in acht genomen worden:

- Er zijn twee installateurs geïnterviewd en hun ervaringen zijn als basis genomen. Beide partijen werken met hetzelfde montagesysteem gebaseerd op panhaken. Dat wil niet zeggen dat dit de enige bevestigingsmethode is; er worden ook andere montagesystemen gebruikt in de markt. Hetzelfde geldt mogelijk voor de overige gebruikte materialen en hulpmiddelen.
- De huidige werkwijze is in kaart gebracht en op functioneel niveau vormt het ook het uitgangspunt voor de robotisering. De invulling daarvan is nu ontwikkeld op handmatige installatie. Bij de ontwikkeling van een gerobotiseerd proces zal die invulling (gedeeltelijk) losgelaten moeten worden om een efficiënt te robotiseren proces te ontwikkelen.

Er kan van uitgegaan worden dat de mens toch een rol blijft spelen in het proces van installeren van PV installaties. Bij de uitwerking van dit vernieuwde proces moet aandacht blijven voor fysieke belasting en veiligheid, zodat er geen nieuwe grote risico's worden geïntroduceerd.

3.4.2.3 Aandachtspunten systeem- en procesontwerp

Obstakels op het dak

De vorm van het dak, aanbouwen, dakkapellen, ramen, schoorstenen en andere obstakels zorgen ervoor dat PV systemen vaak niet als gelijkmatige rijen en kolommen uitgevoerd kunnen worden. Dit heeft als gevolg dat een industrieel installatieproces flexibel moet zijn om breed inzetbaar te zijn.



Figuur 3: Voorbeelden van inpassing van zonnepanelen op een bestaand schuin dak, waarbij de invloed van diverse belemmeringen in het dak zichtbaar wordt (foto's Flip ten Cate, Thuis Kurstjens).⁴

Verankering dakpannen

Het wijzigen van de eurocode NPR 6708 in 2013 heeft ervoor gezorgd dat vaak over het hele dak panhaken worden toegepast, volgens een dambordpatroon. Sommige zones worden zelfs volledig

⁴ "Inventarisatie esthetische inpassing zonnepanelen; Een onderzoek naar mogelijkheden en belemmeringen voor esthetische inpassing van zonnecelpanelen in de bestaande bouw", W/E Adviseurs in opdracht van RVO, Utrecht, juni 2015.

verankerd en in sommige gevallen worden de pannen ook vastgeschroefd. Deze verankering zorgt voor extra handelingen bij het wegschuiven/verwijderen van dakpannen in het installatieproces.

Waterkerende functie

Gezien de waterkerende functie is het niet wenselijk om een dakpan te perforeren. Met name in het 'dal', waar het water natuurlijk heen wordt geleid, moet dit vermeden worden. Bij het hogere gedeelte van de pan stroomt minder water, met name bovenin het dakvlak. Dit biedt meer mogelijkheden voor het perforeren van de pan, maar wordt ook bij voorkeur vermeden.

Kwaliteitscontrole panlatten

Een belangrijke factor voor de integriteit van de PV constructie is de kwaliteit van de panlatten. Wanneer een PV systeem wordt toegepast op een bestaand dak is het daarom van belang om een kwaliteitscontrole uit te voeren op de panlatten. Het is gebruikelijk om een visuele inspectie te doen tijdens het installeren. Wanneer een nieuw ontworpen systeem wordt geïnstalleerd zonder dat daarbij een installateur op het dak is, moet er een alternatieve methode worden ontwikkeld om de kwaliteitscontrole uit te voeren.

Bevestiging beugels

De bevestiging van de beugels aan het dak kan volgens drie verschillende principes worden gedaan:

Methode A	Methode B	Methode C
Beugel geschroefd op tengel	Beugel aangebracht op onderconstructie van hout	Beugel om pan en panlat
		

Tabel 2: de belangrijkste methoden voor bevestiging van PV-systemen op hellende daken⁵

Het is niet duidelijk hoe vaak elke methode wordt toegepast maar uit gesprekken met marktpartijen is gebleken dat methode C in het merendeel van de situaties wordt toegepast. Voor gebieden in Nederland waar hogere windstuwdrukken voorkomen (kustplaatsen) wordt vaak gekozen voor methode A of B, omdat deze constructief beter zijn.

Integriteit en garantie van de constructie

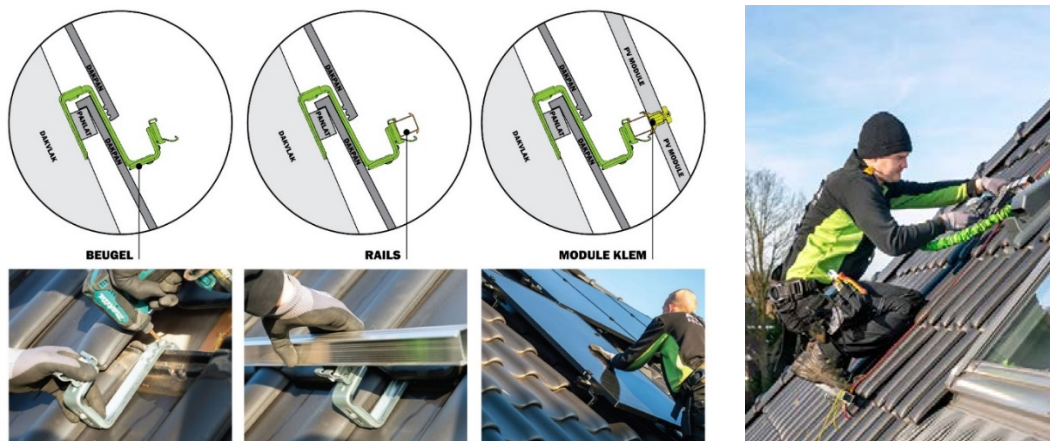
Bij het installeren is het van belang dat de structurele integriteit van zowel de PV installatie als het dak zelf wordt gewaarborgd. Bij foutief installeren kunnen hier problemen ontstaan. Dakpannen, bijvoorbeeld, kunnen breken wanneer installateurs bij installatie van het PV systeem op de rails staan, omdat hierdoor een grote belasting wordt doorgegeven aan de dakpannen (via de beugels). Hiermee verliest de dakpan haar waterkerende functie, wat tot problemen kan leiden. In de praktijk gebeurt dit echter vaak.

Een ander voorkomend probleem is het ontstaan van brand, waarschijnlijk veroorzaakt door het verkeerd aansluiten van connectoren en/of het combineren van verschillende soorten en merken connectoren.⁶

⁵ Van der Knaap L., de Jong, J., Geurts, C. (2016). Technologiecluster "Bevestiging van zonne-energiesystemen op hellende daken". TNO-rapport.

⁶ Bende, E.E., Dekker, N.J.J. (2019). Brandincidenten met fotovoltaïsche (PV) systemen in Nederland. TNO-rapport

De verzekerbaarheid van PV constructies en de relatie met het dak wordt op het moment kritisch bekeken met betrekking tot dit soort constructieve problemen en brandveiligheid. Bij het ontwikkelen van een nieuw installatieproces en PV systeem zijn dit dan ook relevante invloedsfactoren.



Figuur 4 (links): Conventioneel PV systeem pannendak⁷

Figuur 5 (rechts): Een installateur staat op de rails⁸

Latafstand

De afstand tussen de tengels onderling en de panlatten onderling heeft invloed op de mogelijkheid om hierop te bevestigen. De tengels (verticaal geplaatst) liggen onder de panlatten en zijn niet gedimensioneerd op de dakpannen. Het is van buitenaf moeilijk/niet te zeggen waar de tengels liggen.

De panlatten (horizontaal geplaatst) zijn gedimensioneerd op de hoogte van de dakpannen. De afstand tussen deze latten kan echter variëren (tot zo'n 3 cm verschil) en de latten kunnen iets schuin geplaatst zijn. In het dakpanontwerp wordt rekening gehouden met deze marge. Ook voor een PV systeem geldt dat hiermee rekening moet worden gehouden.

Weersomstandigheden

Vorst – Bij matige of strenge vorst is geen PV installatie mogelijk i.v.m. beschadiging van pannen

Sneeuw – Geen aanleg mogelijk i.v.m. onveiligheid van werkzaamheden op het dak

Regen – Doorgaans geen belemmering

Wind – Vanaf windkracht 6 (afhankelijk van o.a. de ligging) is doorgaans geen aanleg mogelijk

Zon/warmte – DC kabeleinden moeten van elkaar worden gehouden; dan is er geen belemmering

3.4.3 Procesontwerp voor het gerobotiseerd installeren van PV

Ideegeneratie

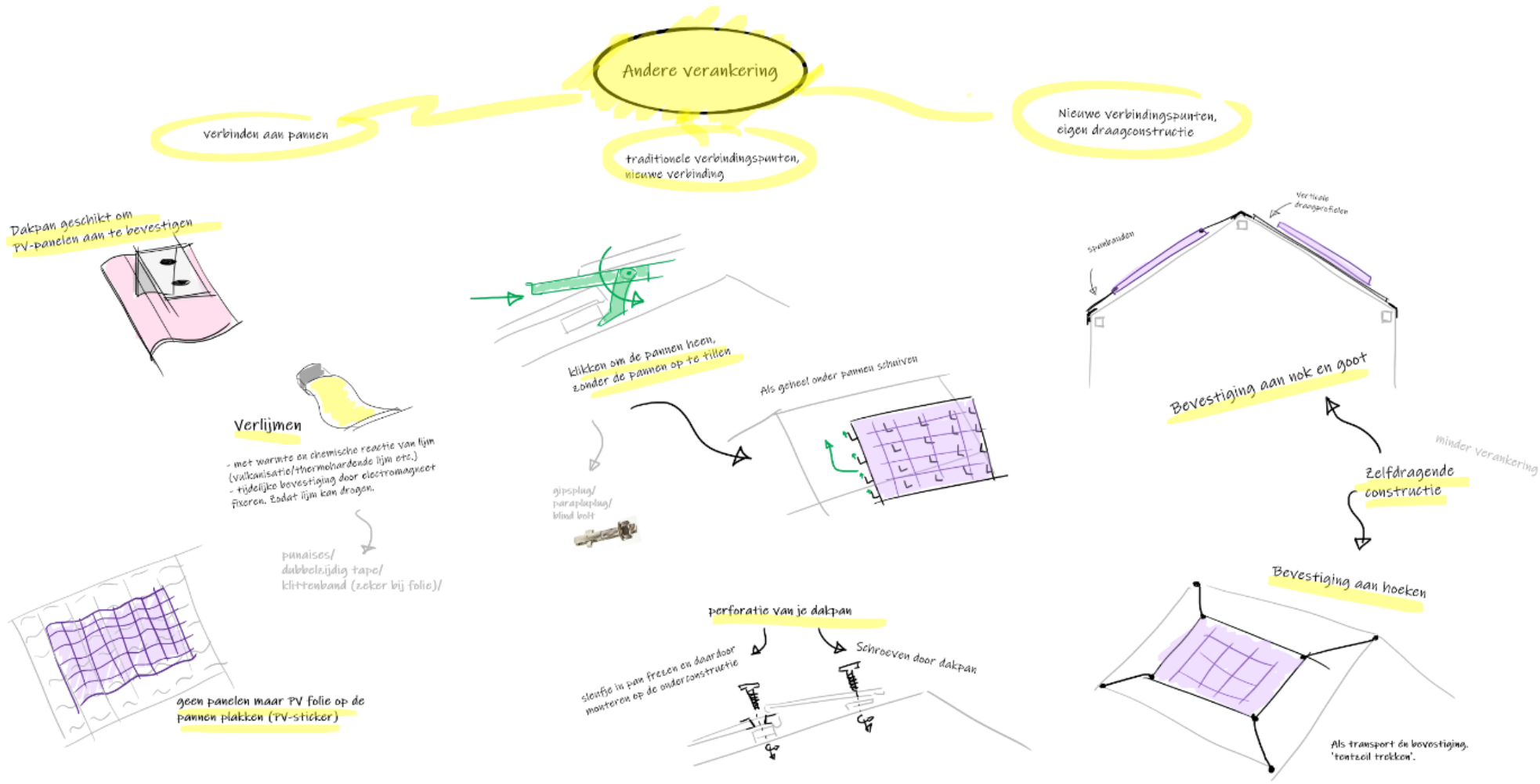
Het maken van clusters helpt bij het aanvullen en vergelijken van deeloplossingen. Tijdens de brainstorm-/ontwerpsessies zijn de volgende ideeclusters geïdentificeerd:

- Andere verankering
- Ondersteunende hulpmiddelen
- Montagekar
- Hijsmiddelen verkenning

De clusters en bijbehorende ideeën zijn grafisch weergegeven in de volgende figuren.

⁷ Samengesteld met afbeeldingen van <https://eu.esdec.com/en/clickfit-evo-tiled-roof/>

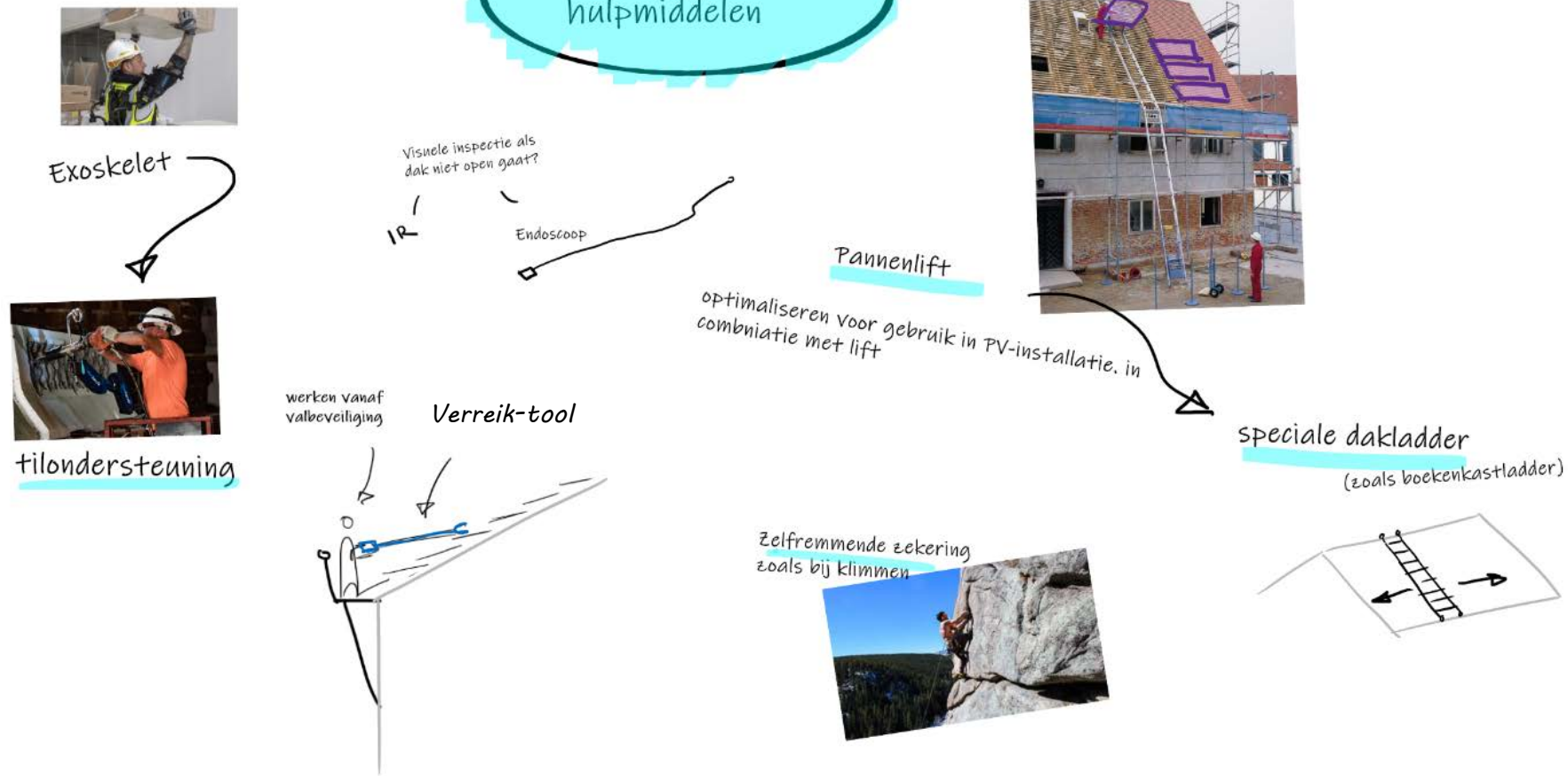
⁸ <https://eu.esdec.com/en/home-owner/>



Figuur 6: Ideecluster 'andere verankering'

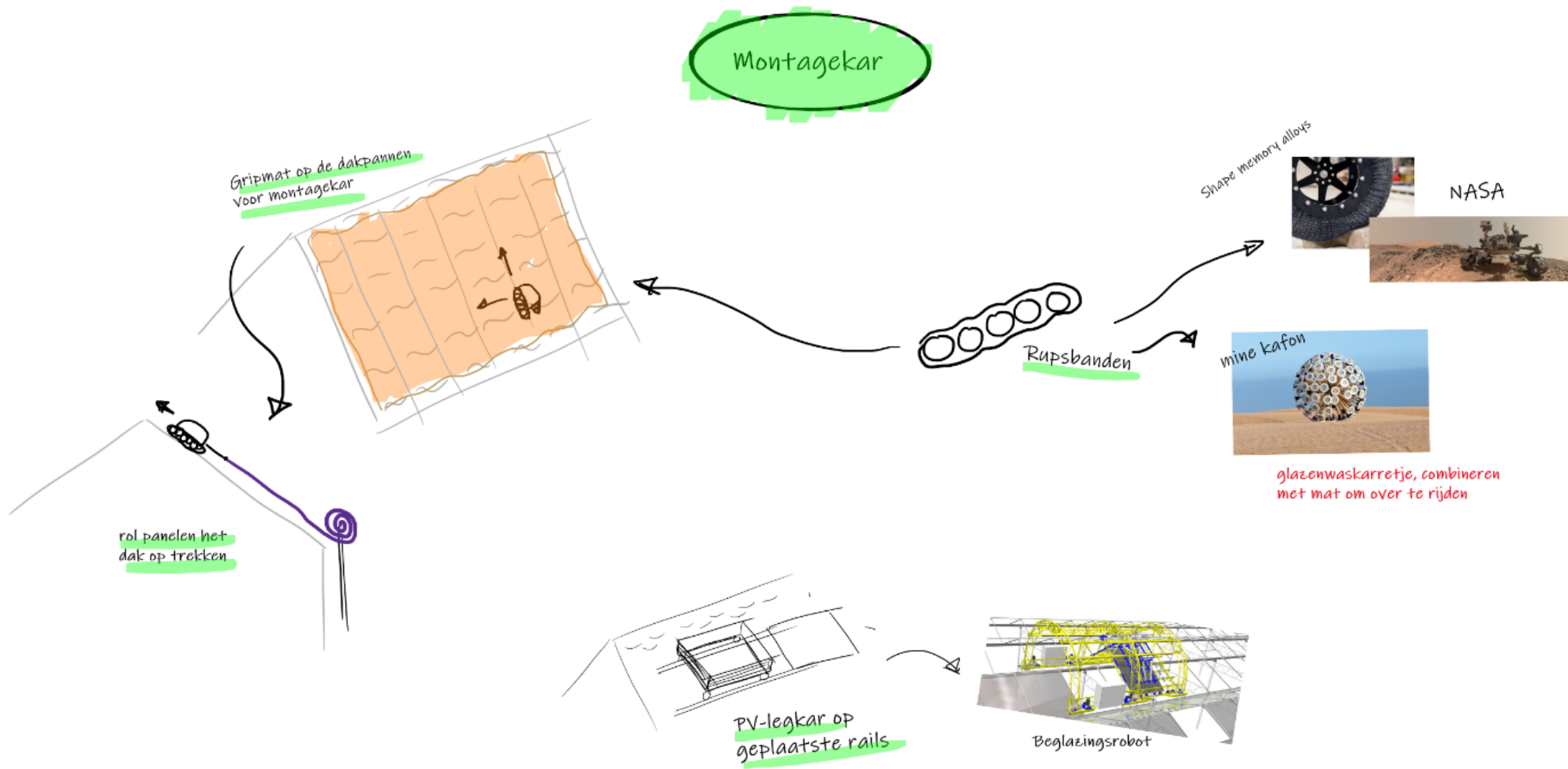
INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

ondersteunende hulpmiddelen



Figuur 7: Ideecluster 'ondersteunende hulpmiddelen'

INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

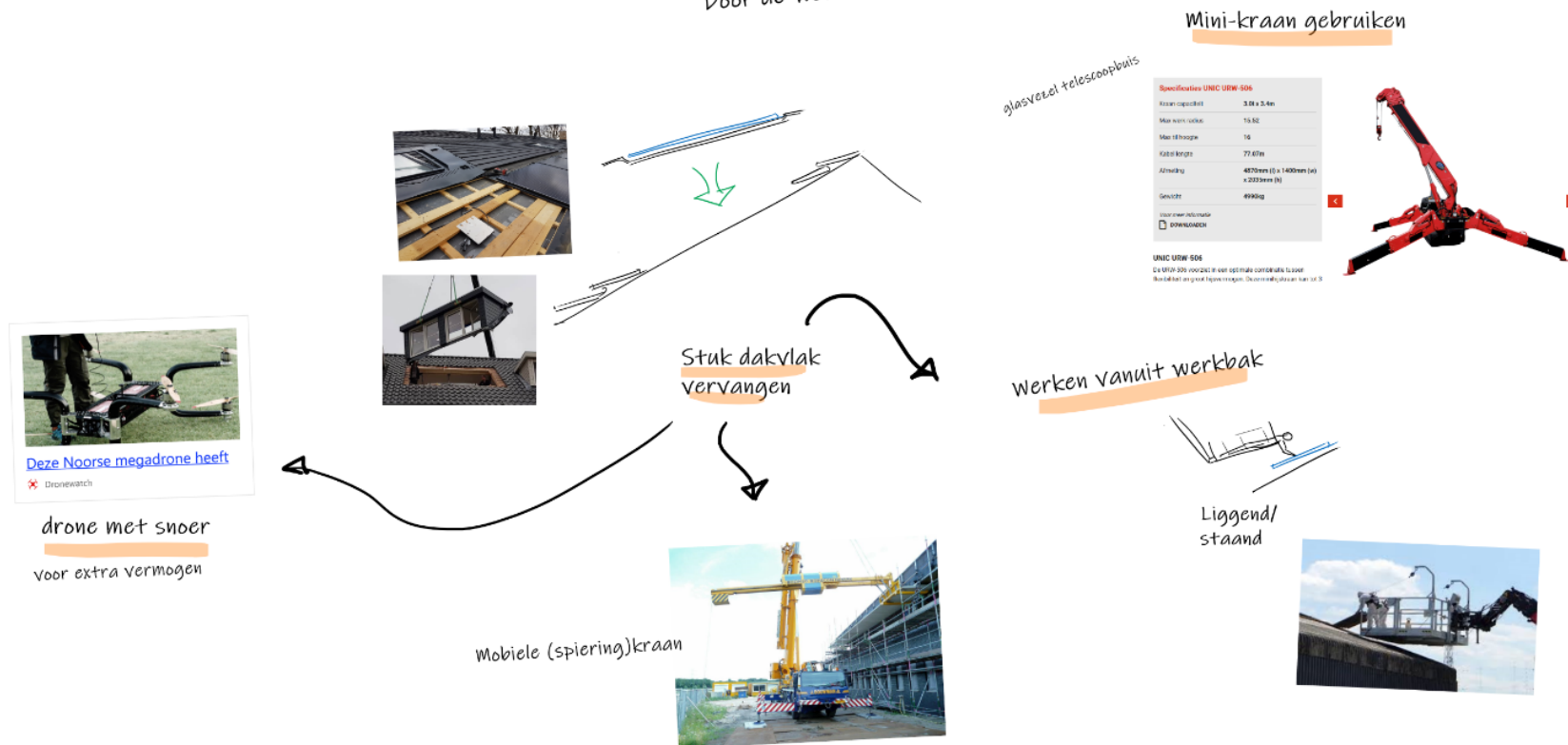


Figuur 8: Ideecluster 'montagekar'

INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

Hijsmiddelen
verkenning

Door de woonkamer naar achtertuin?



Figuur 9: Ideecluster 'hijsmiddelen verkenning'

Kansrijke ideeën

De brainstormsessies en discussies over de verschillende oplossingsmogelijkheden hebben geleid tot een aantal kansrijke ideeën. Deze zijn verwerkt in een morfologische kaart, Figuur 10 (volgende pagina). In de morfologische kaart zijn op de Y-as een aantal categorieën van de deeloplossingen te vinden. Over de X-as worden de verschillende ideeën binnen doe deelcategorie uitgezet. Door een selectie van deeloplossingen te combineren, kan een systeem- en procesontwerp worden bepaald.

Voor elk van de kansrijke ideeën zijn de voor- en nadelen geëvalueerd en genoteerd in de morfologische kaart. Twee ideerichtingen zijn geformuleerd door een selectie van de deeloplossingen te combineren (blauwe en groene lijn). Deze 2 richtingen hebben geleid tot 2 varianten van het uiteindelijke procesontwerp (A en B).

Procesontwerp










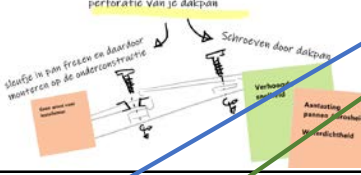

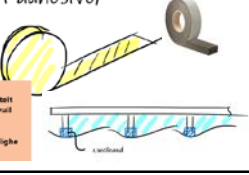





De basis van het uiteindelijke procesontwerp bestaat voor beide richtingen uit 4 deeloplossingen, Figuur 11:

1. Het plaatsen van de beugel achter de panlat gebeurt op nieuwe wijze, niet door de dakpannen te verschuiven, maar door deze licht op te tillen. Een nieuwe beugel en een gereedschap moet ontwikkeld worden om deze handeling mogelijk te maken. Hiermee wordt het plaatsen van de beugels versneld en wordt het mogelijk gemaakt om dit vanaf een afstand te doen.
2. De verticale verplaatsing van PV modules mag niet meer met de hand gebeuren. Dit zorgt voor grote fysieke belasting en gevaarlijke situaties. Voor deze verplaatsing zijn verschillende oplossingen mogelijk en deze zijn uitgewerkt in 2 ontwerpvarianten (plus 1 die mogelijk interessant is in de toekomst).
3. De mechanische bevestiging wordt in het nieuwe montagesysteem gedaan met klik- en schuifverbindingen. Dit is bij voorkeur volledig uit te voeren zonder gereedschap. Door de bevestiging op deze manier aan te passen wordt het proces versneld en wordt het mogelijk gemaakt om dit van een afstand uit te voeren.
4. Bij het maken van de mechanische bevestiging zal de elektrische bevestiging ook direct worden gemaakt met een klikverbinding. Hier hoeft dus geen aparte (kabel)verbinding meer voor worden gemaakt tussen de panelen. Er lopen alleen nog kabels door de dakdoorvoer naar de omvormer. Dit zorgt eveneens voor een sneller proces en maakt het mogelijk om dit van een afstand uit te voeren.

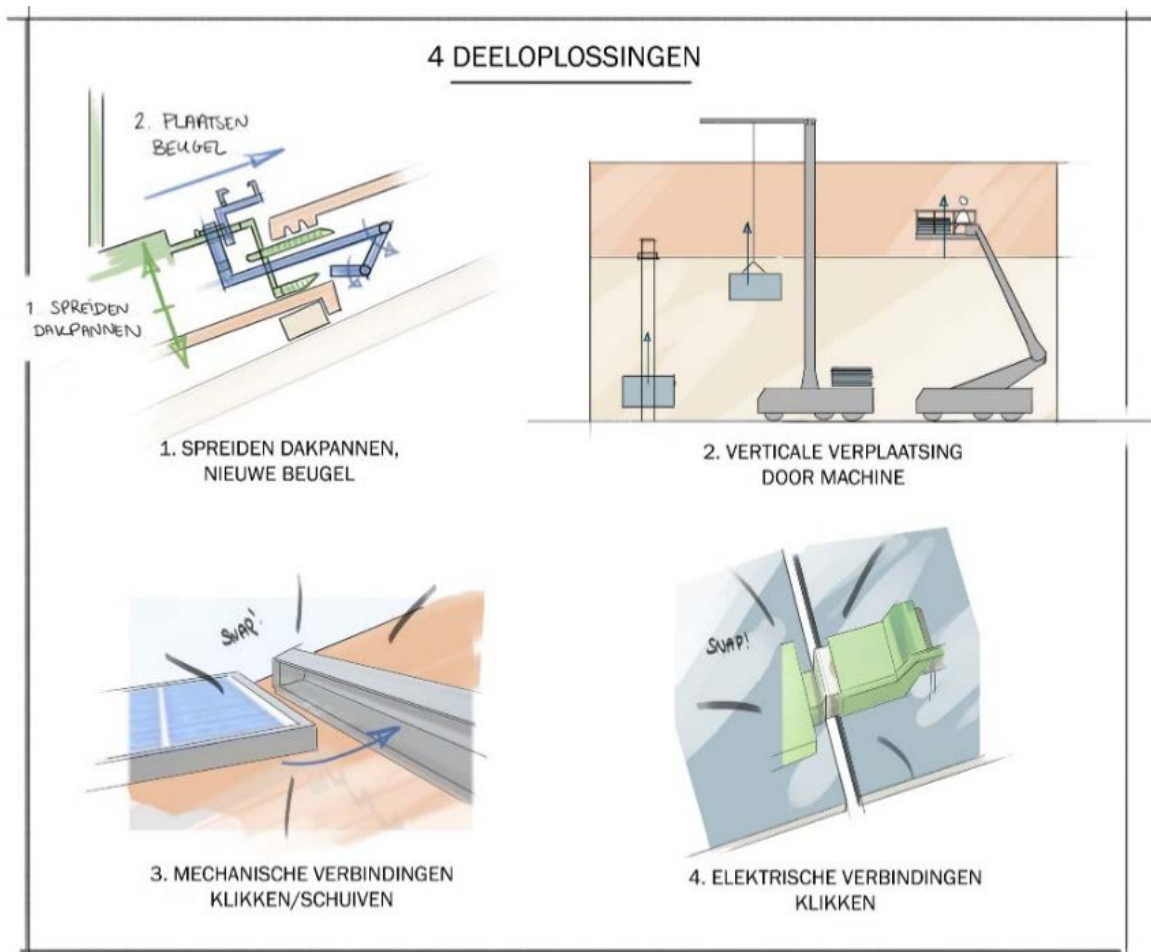
Het procesontwerp gaat uit van een aantal belangrijke uitgangspunten. Deze maken het proces mogelijk en zorgen ervoor dat (de installatie van) het PV systeem beter presteert dan een conventioneel systeem.

- Panelen worden niet meer met de hand omhoog getild.
- Snelle, goede zekering van de installateur.
- De elektrische en mechanische koppelingen worden gecombineerd.
- Samenwerking tussen leveranciers: paneel, optimizers/elektra, bevestigingssysteem.
- Aanpassing/toevoeging aan de standaard panelen.

Binnen het procesontwerp zijn twee varianten opgesteld, volgens de uitkomst van de morfologische kaart. Er wordt uitgegaan van hetzelfde montagesysteem, met de deeloplossingen zoals hierboven beschreven, maar met andere hijsvoorzieningen en installatiegereedschappen.

	1	2	3	4	5
Materialen hijsen	<p>Kan zeer lichtgewicht worden uitgevoerd Sterk verminderde belasting</p> <p>Pannelifft</p> 	<p>hoeft maar 20 kg te tillen</p> <p>Ivm groot bereik waarschijnlijk toch een grote/zware kraan nodig</p> <p>micro kraan</p> 	<p>Werken vanuit werkbak</p> <p>liggend is ook belastend. Werken vanuit bak is aan de achterzijde moeilijk inzetbaar</p> <p>Icm verrekker kan het aan de voorkant goed toepasbaar zijn</p> <p>Sterk verminderde belasting (staand) en makkelijke verankering.</p> 	<p>als ondersteuning van andere proces mogelijk interessant, is afsteunen op dak niet praktischer?</p> <p>Zwaar Duur stele andere opleiding personeel nodig</p> <p>Deze Noorse megadrone heeft</p> <p>drone met snoer</p> <p>voor extra vermogen</p> 	
Panelen plaatsen/uitlijnen	<p>werken vanaf valbeveiliging</p> <p>verrijk-tool</p> <p>Sterk verbeterde veiligheid, niet meer het dakvlak op, verbeterde valbeveiliging</p> 	<p>speciale dakladder (zoals boekenkastladder)</p> <p>Verbeterde veiligheid</p> <p>Moeilijk te verankeren & verplaatsen</p> 	<p>Geheel dakvlak</p> <p>alle gebied onder paneel schermen</p> <p>Snelle installatie</p> <p>te complex vanwege maatvoeringsverschillen op dak</p> 	<p>werken vanuit werkbak</p> <p>liggend is ook belastend. Werken vanuit bak is aan de achterzijde moeilijk inzetbaar</p> <p>Icm verrekker kan het aan de voorkant goed toepasbaar zijn</p> <p>Sterk verminderde belasting (staand) en makkelijke verankering.</p> 	
Ophanging bevestigen	<p>Dakpan geschikt om PV-panelen aan te bevestigen</p> <p>Weinig gewicht voor de installateur Verschillende soorten panelen</p> <p>zowel vastzetten op tangel als bevestiging voor PV</p> 	<p>perforatie van je dakpan</p> <p>sluifje in pan frezen en daar door moertoren op de onderconstructie</p> <p>Schroeven door dakpan</p> <p>Verhoogde veiligheid</p> <p>Aanlasting paneel afwezigheid</p> <p>Verstriktheid</p> 	<p>kanerijk, meer ankerpunten per module kan constructieve voordelen bieden.</p> <p>Klikken om de pannen heen, zonder de pannen te schuiven</p> 	<p>Contact adhesive/ tape</p> <p>snel, goed te mechaniseren.</p> <p>Moeilijk kwaliteit waarborgen (ruil op pannen, valseerde vreesomstandigheden)</p> 	<p>niet flexibel genoeg inzetbaar Lastig uitvoerbaar</p> 
Panelen bevestigen	<p>werken vanaf valbeveiliging</p> <p>verrijk-tool</p> <p>Sterk verbeterde veiligheid, niet meer het dakvlak op, verbeterde valbeveiliging</p> 	<p>Sneller proces Verminderde belasting Trend is al zichtbaar, ook voor huidige proces</p> <p>Kliksysteem</p>  			
Elektrische aansluiting	<p>Sneller proces Verminderde belasting</p> <p>Vereist ingrijpende samenwerking van keten</p> <p>kliksysteem</p> 				

Figuur 10: Morfologische kaart

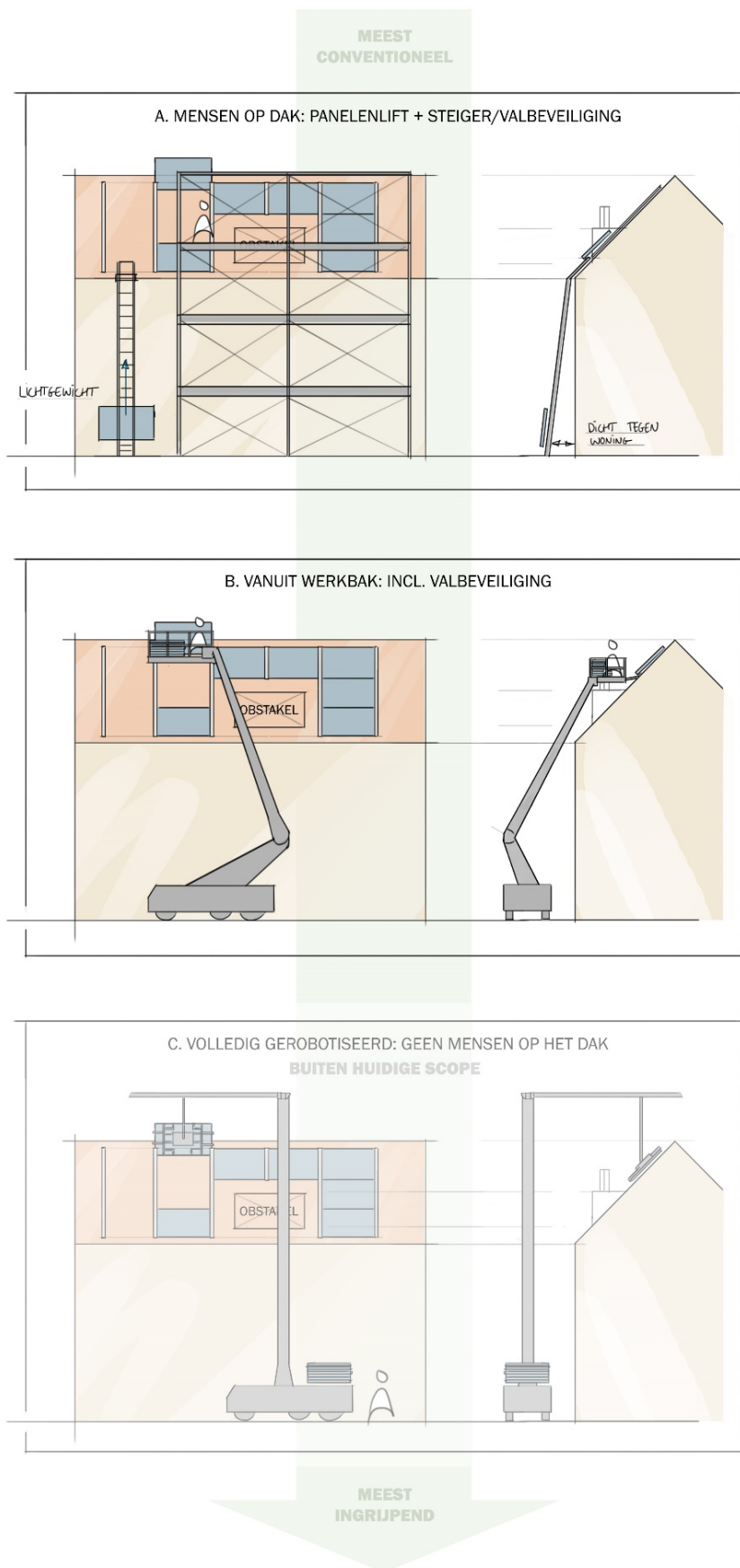


Figuur 11: Procesontwerp, gebaseerd op 4 deeloplossingen

Voor variant A wordt een 'panelenlift' ontwikkeld die de panelen naar het dak verplaatst. Deze lijkt op een pannenlift, maar is lichter en kan dichter tegen de gevel worden geplaatst. Bovendien kan het platform met de hand (met katrollen) worden gehesen, wat het hijsen flink versnelt. De installatie wordt uitgevoerd vanuit een platform op goothoogte (steiger), met behulp van speciale gereedschappen ('verreik-tools'), waardoor de installateur niet meer het dakvlak op hoeft. Deze variant kan worden toegepast in veel situaties, aan de achterzijde van woningen en bij woningen met veel 'obstakels'.

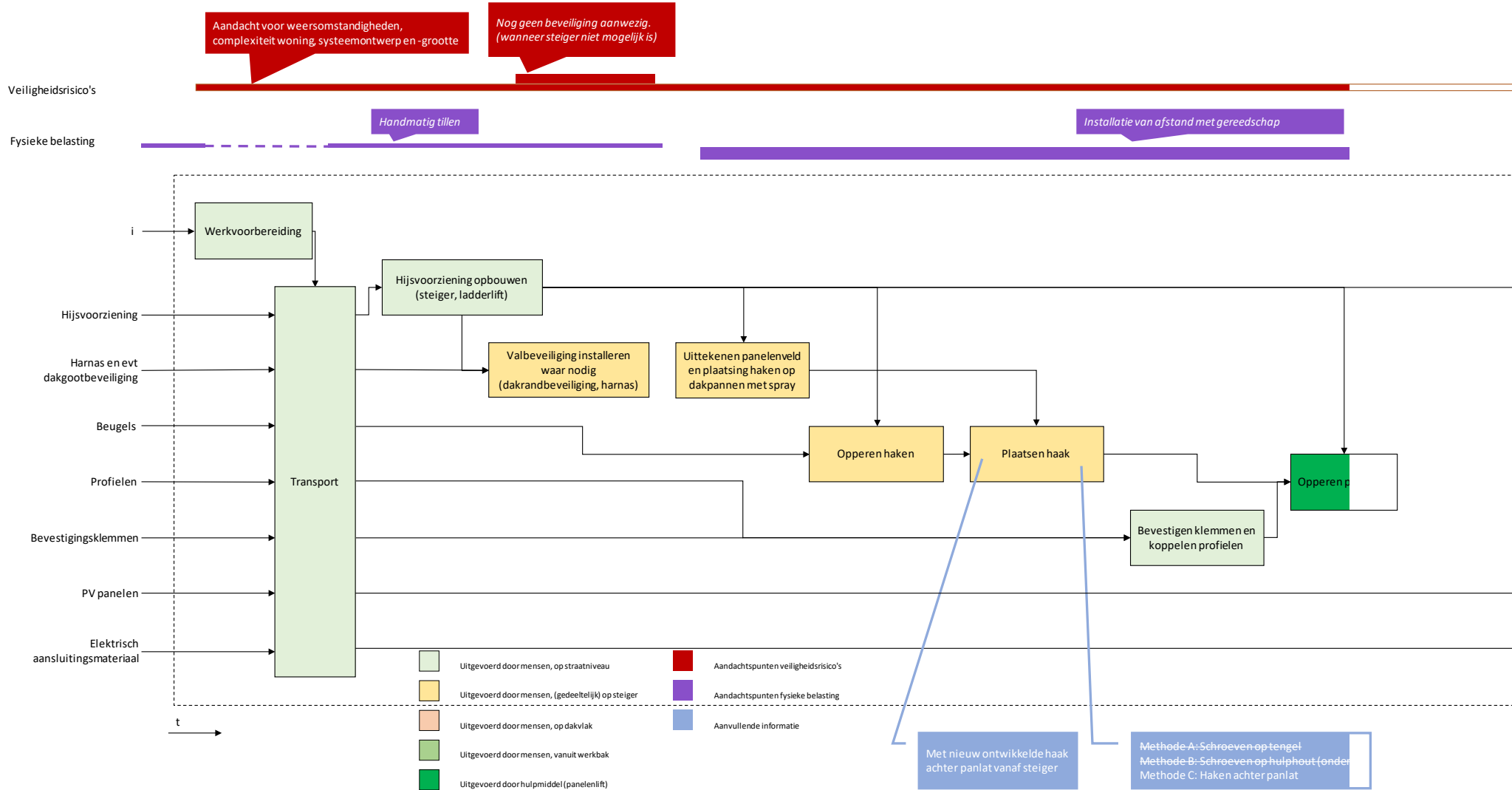
Bij variant B wordt de installatie volledig uitgevoerd vanuit een werkbak op een hoogwerker. De installateur is gezekerd aan de werkbak en hoeft het dakvlak niet te betreden. Door de voordelen van de deeloplossingen te benutten wordt het installatieproces flink versneld en worden de huurkosten en het ongemak van de hoogwerker verkleind. Deze variant is in principe niet toepasbaar aan de achterkant van woningen. Wel zou er in het vervolg eventueel nog gekeken kunnen worden naar de ontwikkeling van een nieuw soort hoogwerker, die door te steunen op het dak zo klein en licht uitgevoerd kan worden dat deze door de woning te verplaatsen is. Dit zou ook mogelijkheden bieden voor andere werkzaamheden op het dak.

Tenslotte is er ook een variant C gedefinieerd, waarbij de installatie volledig is gerobotiseerd en er geen mensen op het dak aanwezig zijn. De robotische installatie wordt mogelijk gemaakt door de eerder genoemde deeloplossingen. Deze richting is nog niet realistisch op korte termijn, maar kan in de toekomst wellicht kansen bieden. De verschillende deeloplossingen zijn weergegeven in Figuur 12.



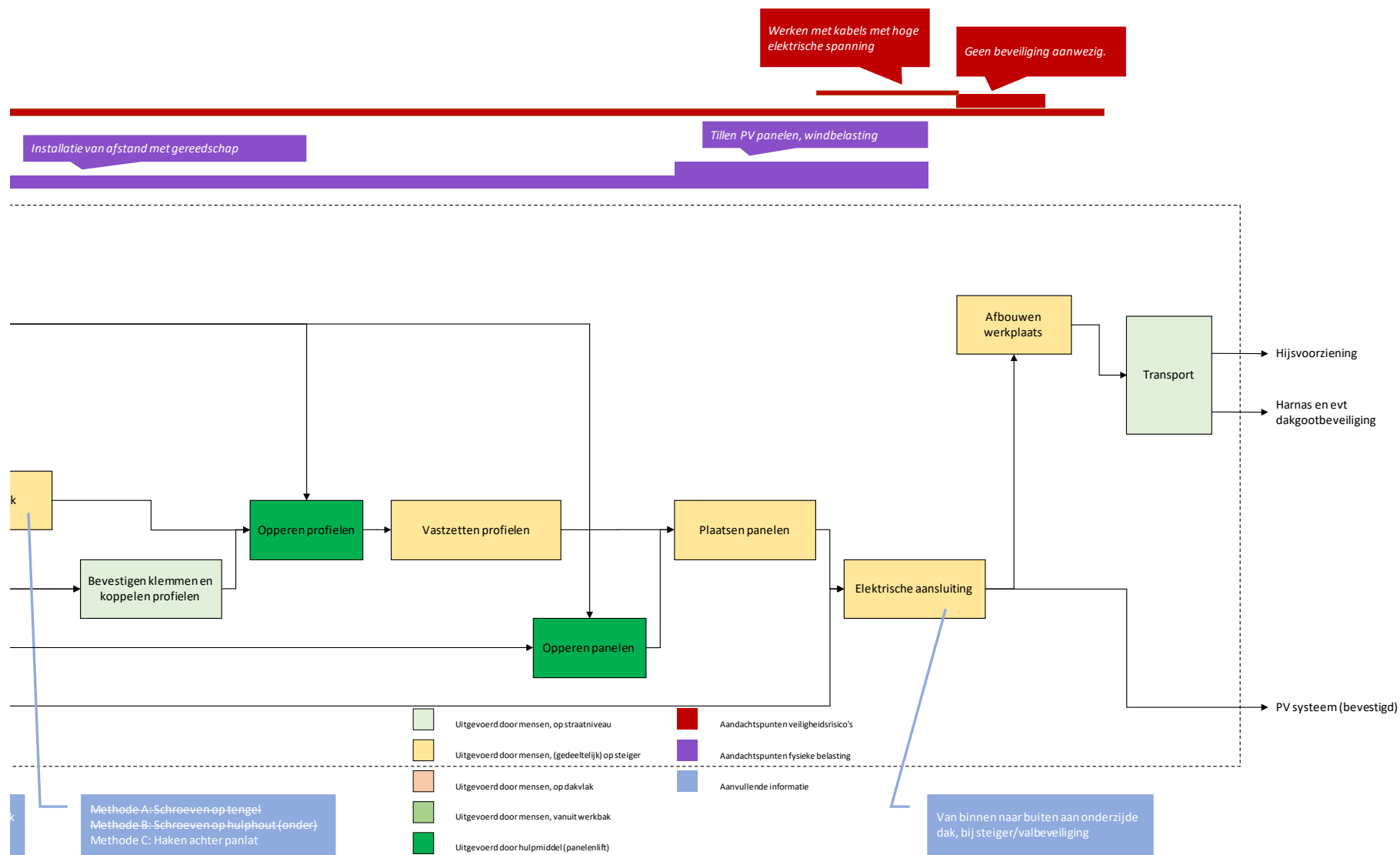
Figuur 12: Verbeterde installatie: 3 varianten

Op basis van het nieuwe procesontwerp zijn nieuwe flowcharts opgesteld voor beide varianten. Wanneer deze worden vergeleken met de flowchart voor het conventionele installatieproces, is te zien dat deze de fysieke belasting en veiligheidsrisico's sterk verlagen.



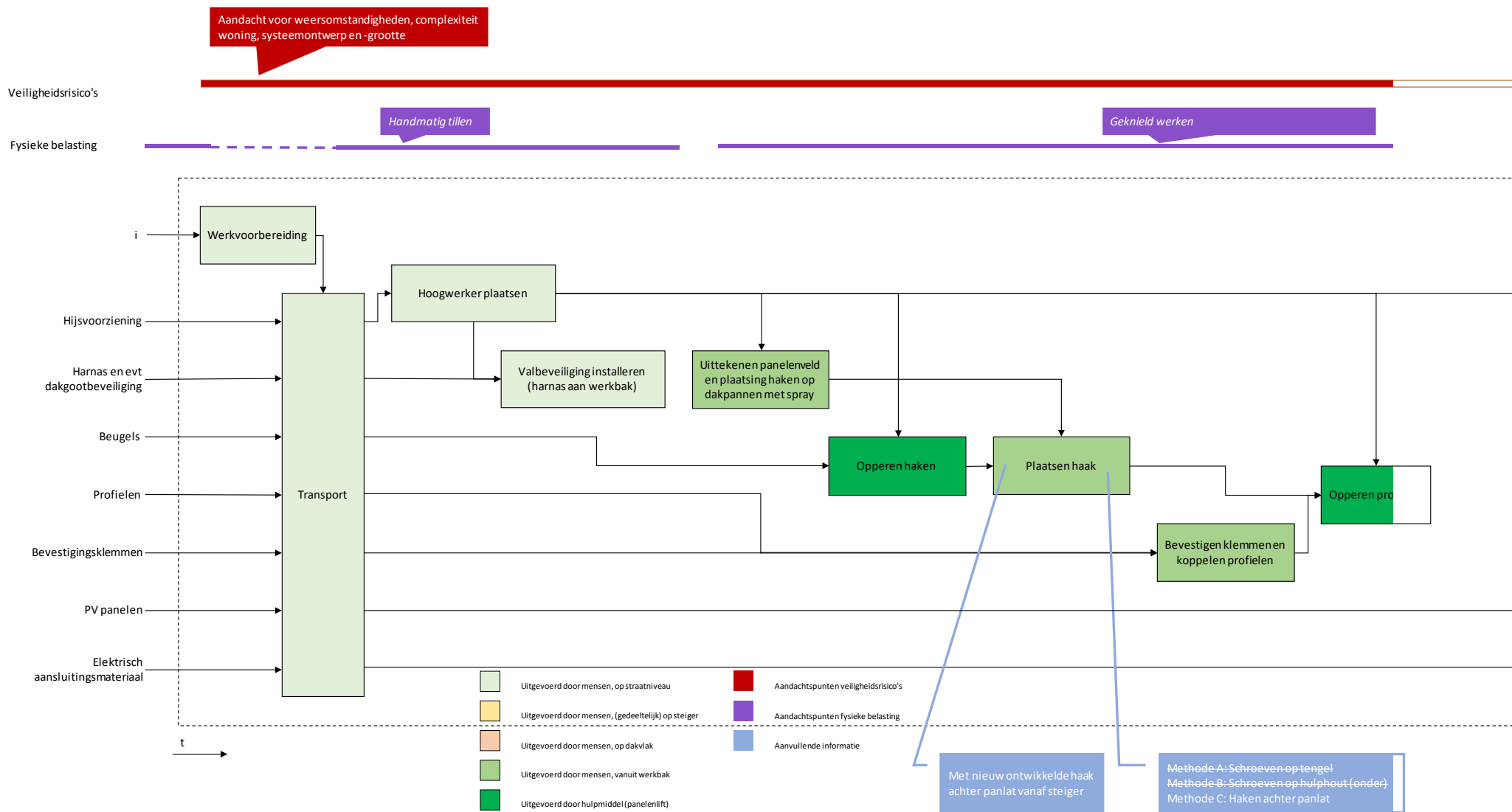
Figuur 13a: Flowchart (linker deel) nieuw scenario 1: Panelenlift

INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW



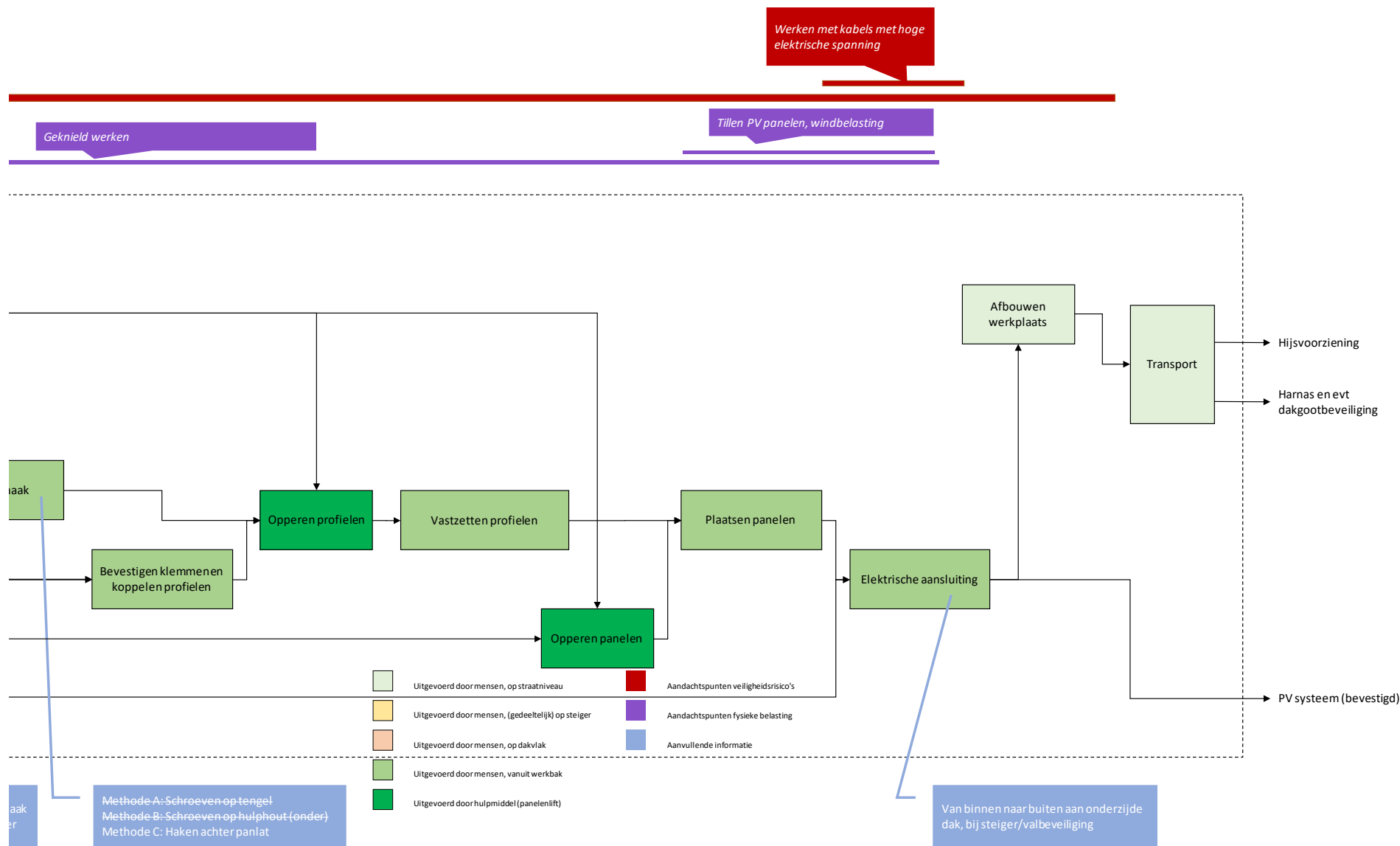
Figuur 13b: Flowchart (rechterdeel) nieuw scenario 1: Panelenlift

INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW



Figuur 14a: Flowchart (linkerdeel) nieuw scenario 2: Werkbak

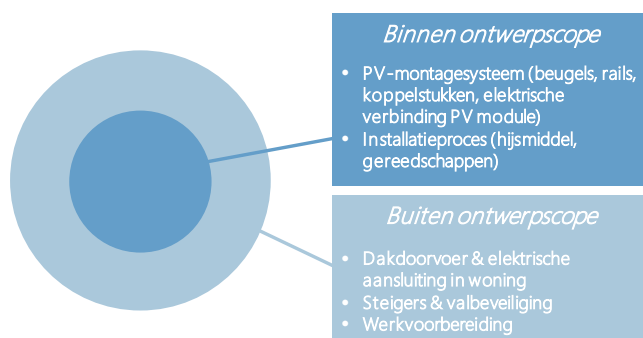
INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW



Figuur 14b: Flowchart (rechterdeel) nieuw scenario 2: Werkbak

3.4.4 Scope

Het wijzigen van een dergelijk ontwerp is heel omvangrijk. Naast de directe ontwerpkeuzes die worden gemaakt, worden er indirect ook andere factoren beïnvloed. In Figuur 15 is te zien welke onderdelen wel worden meegenomen in het ontwerp, en welke relevante aspecten niet (direct) worden herontworpen.



Figuur 15: Scope

3.4.5 Programma van Eisen

Om een dergelijk systeem- en procesontwerp uit te kunnen voeren en te laten voldoen aan de gestelde uitgangspunten is een Programma van Eisen (PvE) opgesteld. Dit PvE is parallel aan het ontwerpproces opgezet, om zo de inzichten die gedurende het project naar voren kwamen mee te nemen. Omdat het huidige systeemontwerp zich nog in een zeer vroeg stadium bevindt (lage TRL) en nog enigszins abstract is, is het PvE nog niet in groot detail uitgewerkt. Bij het verder ontwikkelen van het systeem- en procesontwerp, kan het PvE worden gebruikt als richtlijn. Tegelijkertijd kunnen de eisen gedurende een vervolproces verder worden aangescherpt en aangevuld. Zo groeit het PvE mee met het uitwerkingsniveau.

Het PvE is opgedeeld in drie delen: Ten eerste de algemene eisen die van belang zijn bij de verbeterde installatie, en vervolgens twee delen met eisen die specifiek gelden per variant. De volledige lijst met eisen is te vinden in Bijlage B.

3.4.6 Businesscase

Op basis van de taakanalyse (zie paragraaf 3.4.2) zijn de twee ontwerpvoorstellen getoetst t.o.v. het huidige installatieproces. Per (deel) taak is de afweging gemaakt hoeveel winst of verlies kan worden verwacht, weergegeven in percentages. Dit is gedaan t.a.v. onderstaande doelstellingen:

1. Toe- of afname van productiviteit (o.b.v. personeelskosten per woning)
2. Toe- of afname van veiligheid (hoofdzakelijk valgevaar)
3. Toe- of afname van fysieke belasting

De businesscase kent een financiële component (productiviteit, kosten voor materialen en huur) en een maatschappelijke component (minder ongevallen en letsel van monteurs, duurzame inzetbaarheid, minder ziekteverzuim, aantrekkelijkheid werkgever, e.d.). De scope van de businesscase – evenals van dit project – omvat het werk dat buiten plaatsvindt; het werk binnen is daarvan geen onderdeel.

Financiële kosten bestaan uit personele lasten (bruto uurloon maal aantal uren per woning) en kostenposten of stuksprezen die toe te kennen zijn aan een aantal deeloplossingen:

- Deeloplossing - panelen lift
- Deeloplossing - inzet hoogwerker
- Deeloplossing - beugel
- Deeloplossing - elektrische klikverbinding
- Deeloplossing - mechanische klikverbinding

Maatschappelijke kosten zijn niet gekapitaliseerd. Deze businesscase is dus ondersteunend bij het nemen van beslissingen over (financiële) investeringen ten behoeve van (maatschappelijke) voordelen.

Dit resulteert in de businesscases in Figuur 16, waarin deze beide soorten kosten zijn samengevat. Opgemerkt wordt dat de gegevens zijn gebaseerd op detailinformatie die verkregen is van de drie in het project betrokken installateurs. Daarom moet rekening gehouden worden met een onzekerheidsmarge in de getallen.

Scenario 0: huidig	Installateur 1	Installateur 2	Installateur 3
Kosten totaal	€ 841	€ 818	€ 955
Kosten personeel	€ 832	€ 810	€ 945
Inzetbaarheid personeel			
<i>productiviteit</i>	100%	100%	100%
<i>valgevaar</i>	100%	100%	100%
<i>fysieke belasting</i>	100%	100%	100%
Investering/ afschrijving per woning			
Dakrandbeveiliging	€ 9	€ 8	€ 10
<i>Investering</i>	€ 2.000	€ 2.000	€ 2.000
<i>inzet per woning (uren)</i>	7	7	8
<i>afschrijfperiode (uren)</i>	1600	1600	1600
Scenario 1: panelenlift, beugel, klikverbindingen	Installateur 1	Installateur 2	Installateur 3
Financiële baten t.o.v. scenario 0	€ 94	€ 61	€ 55
Kosten personeel	€ 489	€ 500	€ 641
Inzetbaarheid personeel			
<i>productiviteit</i>	141%	138%	132%
<i>valgevaar</i>	78%	84%	79%
<i>fysieke belasting</i>	68%	73%	70%
Investering/ afschrijving per woning	€ 258	€ 258	€ 259
Scenario 2: verreiker, beugel, klikverbindingen	Installateur 1	Installateur 2	Installateur 3
Financiële baten t.o.v. scenario 0	-€ 163	-€ 196	-€ 166
Kosten personeel	€ 447	€ 458	€ 563
Inzetbaarheid personeel			
<i>productiviteit</i>	146%	144%	140%
<i>valgevaar</i>	13%	12%	11%
<i>fysieke belasting</i>	48%	56%	58%
Investering/ afschrijving per woning	€ 548	€ 548	€ 548

Figuur 16: Businesscases voor de twee oplossingen (scenario's 1 en 2) ten opzichte van scenario 0. Bedragen zijn aangegeven per woning en betreffen uitsluitend het werk buiten. Installatie-activiteiten binnen worden hier niet meegenomen.

Per te ontwikkelen deeloplossing worden verschillende doelstellingen gerealiseerd. In bijlage C is de businesscase in meer detail opgenomen door de aannamen voor afschrijvingen en de materiaalkosten (stuksprijzen klikverbindingen) nader toe te lichten.

Productiviteitswinst voor het buitenwerk is 30-50% en met name te verwachten door de inzet van:

- Deeloplossing - beugel
- Deeloplossing - elektrische klikverbinding
- Deeloplossing - mechanische klikverbinding

Afname valgevaar is met name te verwachten door de inzet van:

- Deeloplossing - inzet panelenlift (-20%)
- Deeloplossing - inzet hoogwerker (-90%)

Afname fysieke belasting is 30-50% en met name te verwachten door de inzet van:

- Deeloplossing - panelenlift
- Deeloplossing - inzet hoogwerker
- Deeloplossing - beugel

De deeloplossing “inzet hoogwerker” bepaalt voor een groot deel de toename (15-25%) van kosten bij het tweede ontwerpvoorstel. Echter, deze economische kosten moeten afgezet worden tegen de maatschappelijke winst die te behalen valt door het beperken van het valgevaar en de afname van fysieke belasting van de monteurs.

Niet-directe financiële baten

Er zijn ook kosten en baten die minder gemakkelijk financieel zijn uit te drukken, maar wel belangrijk zijn voor de besluitvorming over een interventie voor verlaging van fysieke belasting. Deze zijn:

- Arbeidsparticipatie
- Kwaliteit van leven
- Imago van het bedrijf

De effecten van de deeloplossingen op bovenstaande aspecten zijn verder niet onderbouwd in dit project, maar aangenomen mag worden dat deze bijdragen. Meer informatie hierover is terug te vinden in de checklist kosten en baten, onderdeel van de [TNO wegwijzer fysieke belasting⁹](#).

3.5 Aandachtspunten vervolproject

De resultaten van het ontwikkelproces en de businesscase geven voldoende aanknopingspunten om met succes een vervolproject op te kunnen zetten, waarin de nu nog lage TRL een flinke stap verder kan worden gebracht.

In een vervolproject zullen meer partners worden betrokken die zijn gericht op de technische ontwikkeling: mechanisch, elektronisch en robotisch. De nadruk zal dus verschuiven van installatiebedrijven naar ontwikkelbedrijven, maar eerstgenoemden blijven wel betrokken, om het perspectief van de gebruiker voldoende te borgen.

De businesscase richt zich op de financiële kant van het installatieproces en op niet-financiële aspecten zoals ziekteverzuim, onveiligheid, en beperking van duurzame inzetbaarheid door fysieke (over)belasting. De volgende stap is het kapitaliseren van de niet-financiële aspecten en verder detailleren van de businesscase, om een eenduidiger afweging te kunnen maken tussen de verschillende oplossingen.

Mogelijkheden zijn verkend om met een vervolproject aan te sluiten bij TKI Urban Energy. Daar lijken kansen te liggen, dus op dat spoor zal doorgegaan worden.

⁹https://www.fysiekebelasting.tno.nl/cms/content/assets/uploads/2019/12/WegwijzerFysiekeBelasting_V10_DEF-site.pdf

In een vervolg gaat het om het gehele systeem en proces voor PV-installatie. Daarbinnen ligt de focus op de innovatieve elementen zoals het kliksysteem. In het geheel van de oplossingen wordt ook een plaats gezien voor een hoogwerker en/of een panelenlift, maar die onderdelen zijn niet de meest vernieuwende, dus krijgen naar verwachting niet veel eigenstandige aandacht.

4 Conclusies, leerpunten en aanbevelingen

4.1 Conclusies

1. De resultaten van het ontwikkelproces en de businesscase geven voldoende aanknopingspunten om met succes een vervolgproject op te kunnen zetten, waarin de nu nog lage TRL een stap verder kan worden gebracht.
2. Door in het installatieproces van PV-panelen op hellende woningdaken een aantal deelprocessen anders in te richten, namelijk via de inzet van een hoogwerker of een panelenlift in combinatie met een kliksysteem voor PV-panelen, kan de fysieke belasting van monteurs worden teruggedrongen en hun veiligheid verhoogd. Zo kan de duurzame inzetbaarheid van monteurs en daarmee de totale capaciteit worden verhoogd. Bovendien lijkt ook het aantal metingen per installatie te kunnen worden verlaagd.
3. De (ver)nieuw(d)e inrichting van deelprocessen lijkt niet tot een kostenverhoging per installatie te leiden, eerder tot een verlaging. Naarmate het seriematige installeren vaker voorkomt, zal de inzet van een hoogwerker financieel efficiënter kunnen plaatsvinden.
4. Toepassing van één robotisch hulpmiddel voor het installeren van PV-panelen op hellende woningdaken ligt niet voor de hand, doordat het om diverse kleinere handelingen gaat.

4.2 Leerpunten

1. Een proces zoals installatie van PV-panelen is al in hoge mate routine. Dat betekent dat er snel en efficiënt wordt gewerkt. Het vraagt veel van nieuwe hulpmiddelen of nieuwe werkprocessen om daarin een verdere verbetering te brengen. Daarom kan de vernieuwing zich soms beter richten op 'secundaire' vernieuwingen, die indirect wel de efficiëntie van het gehele proces verbeteren.

4.3 Aanbevelingen

1. De resultaten geven voldoende aanknopingspunten om een vervolgproject uit te voeren waarin de ontworpen oplossingen verder worden uitgewerkt tot een werkend prototype. Aanbevolen wordt zo'n project te definiëren samen met een aantal (technische) ontwikkelbedrijven, toeleveranciers, producenten van bestaande (PV-)systemen en met betrokkenheid van eindgebruikers zoals installatiebedrijven.
2. Met name de ontwikkeling van een beugel en een mechanische en elektrische klikverbinding die worden omschreven in paragraaf 3.4.3 bieden perspectief om de installatie van panelen zowel vanuit een hoogwerker als staand op het dak eenvoudiger en sneller uit te kunnen voeren en productiviteitswinst te maken.
3. Aanbevolen wordt de businesscase verder uit te werken, zodat de niet-financiële aspecten (veiligheid en fysieke belasting) gekapitaliseerd kunnen worden, en zo vergeleken met de financiële aspecten. Vooral bij verdere uitwerking van het (ver)nieuw(d)e installatieproces is dit relevant.

Bijlage A: Taakanalyse huidige proces, scenario 1 en 2

Taakanalyse in combinatie met productiviteit / valgevaar / fysieke belasting toe- en afname in percentages ten opzichte van 100%.
Voor het huidige proces (scenario 0) zijn ter illustratie de tijden van één installateur toegevoegd.

Huidige proces -0		Uurtarief €		60,00	
<u>Functies uitvoering</u>	<u>Taken</u>	<u>Aantal personen</u>	<u>Tijd (uren)</u>	<u>Totaal (uren)</u>	<u>Opmerking</u>
				<u>13,9</u>	
Hijsvoorziening	Hijsvoorziening opbouwen (steiger, ladderlift, verreiker)	2	0,5	1,0	
	Afbouwen werkplaats	2	0,5	1,0	
Harnas en evt dakgootbeveiliging	Valbeveiliging installeren				standaard wordt steiger toegepast
Dak	Uittekenen panelenveld	2	0,1	0,3	
	Pannen omhoog schuiven	2	0,6	1,3	uren zijn opgenomen als onderdeel van uittekenen
	Evt. bevestigen hulphout op tengels (+ plat slaan schroeven)				niet toegepast
	Sluiten dak (toegevoegd)				onderdeel beugel plaatsen
Beugels	Opperen haken				nvt
	Plaatsen haken	2	0,5	1,0	
	Evt stellen haken	2	0,2	0,3	10 min
Profielen	Opperen profielen	2	0,1	0,2	
	Vastzetten profielen	2	0,5	1,0	
	Stellen profielen				
Bevestigingsklemmen	Bevestigen klemmen en koppelen profielen				40 min
PV Panelen	Opperen panelen	2	0,5	1,0	
	Plaatsen panelen	2	0,7	1,3	
	Stellen en vastzetten panelen				onderdeel plaatsen panelen
	Verbinden kabels aan panelen			0,5	totaaltijd
	Plaatsen kunststof doppen op profielen				
Elektrisch aansluitingsmateriaal	Opperen elektrische aansluiting				
	Bepalen positie elektrische doorvoer (toegevoegd tov flowchart)	1	0,5	0,5	
	Kabels trekken onder pannen	2	1,0	2,0	
	Bevestigen kabels aan beugels				onderdeel kabels trekken
	Plaatsen optimizers/ invertors	2	1,0	2,0	
	Bevestigen aardendraad aan profielen				onderdeel kabels trekken
	Maken doorvoer	1	0,5	0,5	onderdeel bepalen doorvoer

INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

Scenario 1					
Functies uitvoering	Taken		Productiviteit (uren totaal)	Valgevaar (tov 100%)	Fysieke belasting (tov 100%)
			8,15	78%	68%
Hijsvoorziening	Hijsvoorziening opbouwen (steiger, ladderlift, verreiker)	Neemt toe, extra voorziening (lift) plaatsen	110%	100%	100%
	Afbouwen werkplaats	Neemt toe, extra voorziening (lift) plaatsen	110%	100%	100%
Harnas en evt dakgootbeveiliging	Valbeveiliging installeren				
Dak	Uittekenen panelenveld	Blijft gelijk	100%	100%	100%
	Pannnen omhoog schuiven	Vervalt door deeloplossing nieuwe beugel	0%	0%	0%
	Evt. bevestigen hulphout op tengels (+ plat slaan schroeven)				
	Sluiten dak (toegevoegd)				
Beugels	Opperen haken				
	Plaatsen haken	Deeloplossing nieuwe beugel	25%	100%	75%
	Evt stellen haken	Blijft gelijk	100%	100%	100%
Profielen	Opperen profielen	Blijft gelijk	100%	100%	100%
	Vastzetten profielen	Deeloplossing klikverbinding	50%	100%	75%
	Stellen profielen				
Bevestigingsklemmen	Bevestigen klemmen en koppelen profielen				
PV Panelen	Opperen panelen	Met lift	75%	75%	0%
	Plaatsen panelen	Klikverbinding	50%	100%	75%
	Stellen en vastzetten panelen				
	Verbinden kabels aan panelen	Deeloplossing elektrische klikverbinding	0%	0%	0%
	Plaatsen kunststof doppen op profielen				
Elektrisch aansluitingsmateriaal	Opperen elektrische aansluiting				
	Bepalen positie elektrische doorvoer (toegevoegd tov flowchart)	Blijft gelijk	100%	100%	100%
	Kabels trekken onder pannen	Deeloplossing elektrische klikverbinding	0%	0%	0%
	Bevestigen kabels aan beugels				
	Plaatsen optimizers/ invertors	Blijft gelijk	100%	100%	100%
	Bevestigen aardendraad aan profielen				
	Maken doorvoer	Blijft gelijk	100%	100%	100%

INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

Scenario 2					
Functies uitvoering	Taken		Productiviteit (uren totaal)	Valgevaar (tov 100%)	Fysieke belasting (tov 100%)
			7,45	13%	48%
Hijsvoorziening	Hijsvoorziening opbouwen (steiger, ladderlift, verreiker)	Deeloplossing verreiker plaatsen	75%	50%	0%
	Afbouwen werkplaats	Deeloplossing verreiker plaatsen	75%	50%	0%
Harnas en evt dakgootbeveiliging	Valbeveiliging installeren				
Dak	Uittekenen panelenveld	Deeloplossing vanuit verreiker	100%	0%	50%
	Pannen omhoog schuiven	Vervalt door deeloplossing nieuwe beugel	0%	0%	0%
	Evt. bevestigen hulphout op tengels (+ plat slaan schroeven)				
	Sluiten dak (toegevoegd)				
Beugels	Opperen haken				
	Plaatsen haken	Deeloplossing nieuwe beugel	25%	0%	75%
	Evt stellen haken	Blijft gelijk	100%	0%	100%
Profielen	Opperen profielen	Deeloplossing verreiker	100%	0%	0%
	Vastzetten profielen	Deeloplossing klikverbinding	50%	0%	75%
	Stellen profielen				
Bevestigingsklemmen	Bevestigen klemmen en koppelen profielen				
PV Panelen	Opperen panelen	Deeloplossing verreiker	75%	0%	0%
	Plaatsen panelen	Deeloplossing klikverbinding/ vanuit verreiker	50%	0%	125%
	Stellen en vastzetten panelen				
	Verbinden kabels aan panelen	Deeloplossing elektrische klikverbinding	0%	0%	0%
	Plaatsen kunststof doppen op profielen				
Elektrisch aansluitingsmateriaal	Opperen elektrische aansluiting				
	Bepalen positie elektrische doorvoer	Blijft gelijk	100%	0%	100%
	Kabels trekken onder pannen	Deeloplossing elektrische klikverbinding	0%	0%	0
	Bevestigen kabels aan beugels				
	Plaatsen optimizers/ invertors	Deeloplossing vanuit verreiker	100%	0%	100%
	Bevestigen aardendraad aan profielen				
	Maken doorvoer	Blijft gelijk	100%	100%	100%

Bijlage B: Programma van Eisen (PvE)

Dit Programma van Eisen (PvE) heeft tot doel een maatgevend prestatieniveau te definiëren voor de verbeterde installatie van het PV-systeem. Het PvE kan op 2 manieren worden benut:

- Voor gebruik tijdens het ontwerpproces, bij het maken van keuzes tussen product/procesontwerpen en het detailleren van het ontwerp.
- Ter verificatie en validatie van een ontworpen product/proces.

Gezien het lage TRL waarin het huidige ontwerp zich bevindt, is deze lijst nog onvolledig en zijn sommige eisen nog niet in detail uitgewerkt. In een vervolgproject kunnen deze eisen verder worden aangescherpt en aangevuld. Zo groeit het PvE mee met het uitwerkingsniveau van het product/procesontwerp.

In het huidige systeemontwerp zijn twee werkprocessen opgesteld: één met panelenlift en één met hoogwerker. Deze tweedeling is meegenomen in het PvE: De lijst met eisen is opgedeeld in een algemeen deel en twee proces-specifieke delen.

Algemene eisen

Primaire systeem- en proceseisen

Veiligheid & fysieke belasting

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
A.1	Eis	Het PV systeem en het bijbehorende installatieproces maken het mogelijk om op het dak te werken zodanig dat aan arbeidsomstandigheden wetgeving voldaan wordt	Arbobesluit Cao Bouw & Infra A-blad Hellende daken
A.2	Eis	Het verbeterde installatieproces is veiliger dan een conventioneel proces.	Risico-inventarisatie & -evaluatie (RI&E)
A.3	Eis	Het verbeterde installatieproces levert minder fysieke belasting op dan met een conventioneel systeem	Arbobesluit
A.4	Wens	De installateur kan de installatie uitvoeren zonder het dakvlak te betreden	

Business case

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
A.5	Eis	Bij installatie van het ontworpen PV systeem is er minder arbeid (tijd) vereist op het dak dan bij een traditioneel systeem	
A.6	Wens	Bij installatie van het ontworpen PV systeem zijn er minder handelingen uit te voeren op het dak	
A.7	Wens	Installatie met het PV systeem en installatieproces is sneller dan met een conventioneel systeem	
A.8	Wens	Installatie met het PV systeem en installatieproces is goedkoper dan met een conventioneel systeem	
A.9	Eis	Het PV systeem moet toepasbaar zijn op 75-80% van de opdrachten die bij de installateur binnen komen	
A.10	Wens	De werkvoorbereiding moet minstens zo snel kunnen worden uitgevoerd als met een conventioneel systeem	
A.11	Wens	Het werkingsprincipe van het PV systeem en installatieproces kan ook toegepast worden in andere vergelijkbare toepassingen (denk	

		aan dakonderhoud, warmtepompen buitenunits, dakdekkers, glazenwasser etc.)	
--	--	--	--

Prestatie

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
A.12	Wens	Alle componenten van het PV systeem zijn geschikt om gerobotiseerd geplaatst te worden	
A.13	Wens	Installatie van het PV systeem kan zonder gereedschap worden uitgevoerd	
A.14	Eis	Het PV systeem is sterk en stijf genoeg om (herhaaldelijke) belastingen door windzuiging, sneeuw en ijs te weerstaan en beschadigd hiermee niet de dakconstructie	
A.15	Eis	Het PV systeem moet voldoen aan de geldende eisen voor elektrische en bouwkundige installaties	Bouwbesluit, IEC 62446 NEN 7250
A.16	Eis	Bij het uitvoeren van de installatie moet de installateur kunnen voldoen aan de voor hem/haar geldende eisen	NEN 1010
A.17	Wens	Het PV systeem is net zo compact en efficiënt te transporteren naar de bouwlocatie als een conventioneel systeem. (Maximale transportafmetingen en gewicht <n.t.b.>)	
A.18	Eis	Dynamische opslingering en sterke materiële vermoeiing als gevolg van trillingen veroorzaakt door wind moet voorkomen worden	Eigenfrequentie van het systeem > 5 Hz, Of bij < 5 Hz, schat het effect in met NEN EN 1991-1-4 hoofdstuk 6.

PV Module

PV Module

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
A.19	Eis	Een eventueel nieuw te ontwikkelen PV module moet voldoen aan de internationaal geldende normen	IEC 61215, IEC 61730-1, IEC 61730-2, IEC 61701, IEC 62716, Safety class II
A.20	Eis	De fabrikant dient in het bezit te zijn van relevante certificaten	ISO9001 ISO14001
A.21	Eis	De bevestiging van de elektrische componenten op de PV modules is bestand tegen gangbare weers- en andere invloeden (temperatuur, vocht, veroudering, UV, ...)	
A.22	Eis	De PV module is na assemblage en integratie met eventuele elektrische componenten robuust genoeg voor transport	Trilling test?
A.23	Wens	De PV module is na assemblage net zo compact en efficiënt te transporteren naar de bouwlocatie als een gangbare PV module.	Ontwerpkeuzes
A.24	Eis	De PV module voldoet ten minste aan brandklasse B	Testen volgens NEN-EN-IEC 61730-2

Elektrische connectie

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
A.25	Eis	Het product maakt automatisch een elektrische verbinding wanneer de panelen worden geplaatst. Hiervoor is geen afzonderlijke handeling nodig door de installateur.	
A.26	Eis	De elektrische connectie voldoet aan de veiligheidseisen en tests, met tenminste klasse IP65	IEC 62852
A.27	Eis	De elektrische connectie voldoet aan de brandveiligheidseisen en is gelijk aan of lager dan bij huidige verbinding MC4	NEN 8012
A.28	Eis	Alle bekabeling die de woning in gaat voldoet aan de geldende normen	IEC 60364-7-712 IEC 60332-1-2 (brand), EN 50396 (tests) NEN 1010 (dimensionering)
A.29	Eis	De elektrische verbindingen en geleidende strips hebben een theoretische levensduur van tenminste 25 jaar (geen corrosie)	
A.30	Eis	De elektrische verbinding mag geen schade oplopen door (herhaaldelijke) vervormingen van het paneel als gevolg van windbelasting, sneeuw en ijs	
A.31	Eis	De gevoeligheid van de verbonden PV-modules voor elektrostatische ontlading (ESD) voldoet aan de geldende norm	IEC/TS 62916:2017
A.32	Eis	De verbonden PV-modules voldoen aan de eisen voor elektromagnetische compatibiliteit (EMC) in de geldende norm	NEN-EN-IEC62920:2017

Montage

Beugel-dak verbinding

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
A.33	Wens	Bevestiging van de beugel vindt plaats zonder nagels en schroeven	
A.34	Eis	De beugel dient eenvoudig te monteren zijn, minimaal kracht nodig	
A.35	Wens	De beugel is minstens zo snel te bevestigen als conventionele beugels	
A.36	Wens	De beugels zijn vanaf een platform op goothoogte (steiger) te plaatsen met <hulpmiddel X, n.t.b.>	
A.37	Wens	Het uittekenen van de beugelposities is te doen vanaf een platform op goothoogte (bijv steiger) met <hulpmiddel Y, n.t.b.>	
A.38	Eis	De beugel is sterk en stijf genoeg bevestigd om (herhaaldelijke) belastingen door windzuiging, sneeuw en ijs te weerstaan	
A.39	Eis	Het systeem is flexibel genoeg om variatie in de afstand tussen panlatten op te vangen	
A.40	Eis	Het systeem is flexibel genoeg om variatie in de dikte van panlatten op te vangen	
A.41	Wens	Het is makkelijk om na installatie één of enkele beugels te vervangen tegen (t.o.v. de huidige situatie) redelijke kosten en doorlooptijd/inspanning.	
A.42	Eis	Eventuele beschadiging door de bevestigingsbeugel heeft geen effect op de functie van het daksysteem en van de panlatten	
A.43	Eis	Constructiematerialen dienen een CE-markering te hebben	

Frame-beugel verbinding

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
A.44	Eis	De beugel is sterk en stijf genoeg om (herhaaldelijke) belastingen door windzuiging, sneeuw en ijs te weerstaan	NEN EN 1991-1-4, artikel 7.4, GCW-2012 (wind),
A.45	Eis	Het frame is te plaatsen (compatible) op de beugels	
A.46	Wens	De frames zijn vanaf een platform op goothoogte (steiger) te plaatsen met <hulpmiddel X, n.t.b.>	
A.47	Eis	Het frame moet geaard worden	NEN 1010

Paneel-frame verbinding

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
A.48	Wens	Bevestiging van de PV module vindt plaats zonder nagels en schroeven	
A.49	Eis	Bij het plaatsen van de PV module wordt tegelijk de elektrische connectie gemaakt, zonder tussenkomst van iemand op het dak	
A.50	Wens	De verbinding tussen paneel en frame ontmoedigt diefstal	
A.51	Wens	De PV panelen zijn vanaf een platform op goothoogte (steiger) te plaatsen met <hulpmiddel X, n.t.b.>	
A.52	Eis	Bij het vastzetten van het paneel aan het frame wordt het paneel automatisch geaard. Indien het frame geanodiseerd is, moet de oppervlakte geopeneteerd worden.	

Beheer en onderhoud

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
A.53	Eis	Het PV systeem is onderhoudsvrij (Wel met de mogelijkheid tot eventuele periodieke inspectie of reinigen zoals met conventionele systemen gebeurt).	
A.54	Wens	Het is mogelijk om na installatie een beugel handmatig te demonteren en vervangen met 2 personen, zodanig dat het systeem op dezelfde manier blijft functioneren	
A.55	Wens	Het is makkelijk om na installatie één of enkele PV modules te vervangen tegen (t.o.v. de huidige situatie) redelijke kosten en doorlooptijd/inspanning	
A.56	Wens	Het is t.o.v. de huidige situatie minstens zo makkelijk om na installatie een paneel incl. electronica (+optimizer) te vervangen	

Proces-specifieke eisen: Panelenlift concept

Prestatie

Panelenlift

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
B.1	Eis	De lift kan een PV module tot 10 meter ophijsen.	
B.2	Eis	De lift heeft een minimale hefsnelheid van 30 m/min	
B.3	Eis	De lift is gemakkelijk te vervoeren	
B.4	Eis	De lift weegt maximaal <n.t.b.> kg	
B.5	Eis	De lift moet een hefcapaciteit hebben van ten minste 20 kg	
B.6	Eis	De lift kan verankerd worden	
B.7	Eis	De lift is beveiligd tegen vallen van de PV module	
B.8	Eis	De lift is tot en met windkracht <n.t.b.> te gebruiken*	
B.9	Eis	De lift is te gebruiken bij een maximale afstand tot de gevel van 5 m	
B.10	Eis	De lift is licht en veilig	Ai-17 Hijs- en hefmiddelen
B.11	Eis	De lift is uit te breiden naar de nok	
B.12	Wens	De lift kan verankerd worden aan de nok	
B.13	Wens	De lift kan ook veilig gebruikt worden als ladder	A-blad Ladders en trappen
B.14	Wens	De modules worden gehesen door de installateur door middel van katrollen, binnen de Arboretgeving	
B.15	Wens	Er kan geen situatie ontstaan waarin tegelijk een paneel wordt gehesen en de lift wordt gebruikt als ladder	

* Installateur A: 4; Installateur B: 6

Verreik-tool(s)

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
B.16	Wens	Met <Hulpmiddel X> kunnen de beugels geplaatst worden vanaf een platform op goothoogte (bijv. steiger)	
B.17	Wens	Met <Hulpmiddel X> kunnen de frames geplaatst worden vanaf een platform op goothoogte (bijv. steiger)	
B.18	Wens	Met <Hulpmiddel X> kunnen de panelen geplaatst worden vanaf een platform op goothoogte (bijv. steiger)	
B.19	Wens	Met <Hulpmiddel X> kunnen de profielen worden afgedopt vanaf een platform op goothoogte (bijv. steiger)	
B.20	Wens	Met <Hulpmiddel X> kunnen de eindkabels door de doorvoer worden geplaatst vanaf een platform op goothoogte (bijv. steiger)	

Businesscase

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
B.21	Eis	De maximale huurprijs per dag voor de panelenlift / ladder is € 150	
B.22	Wens	De maximale kostprijs voor de panelenlift / ladder is € 4500	

Proces-specifieke eisen: Hoogwerker concept

Prestatie

Installatiemethode

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
C.1	Eis	De installatie kan volledig worden uitgevoerd vanuit de werkbak van een hoogwerker	
C.2	Wens	Eventueel wordt een lichtgewicht hoogwerker – met ondersteuning op het dak - ontworpen, die door een woning heen kan rijden om installatie aan de achterkant mogelijk te maken	

Hoogwerker (te huren of ontwerpen, zie eis C.2)

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
C.3	Eis	De hoogwerker heeft een minimale reikwijdte van <n.t.b.> m*	
C.4	Eis	De hoogwerker heeft een minimale reikhoogte van 10 m	
C.5	Eis	De hoogwerker heeft een minimaal laadvermogen van <n.t.b.> kg**	
C.6	Eis	De installateur kan veilig worden verankerd aan de werkbak van de hoogwerker	
C.7	Eis	De hoogwerker kan verankerd worden	
C.8	Eis	De hoogwerker is tot en met windkracht <n.t.b.> te gebruiken***	
C.9	Eis	De hoogwerker is gemakkelijk te vervoeren	
C.10	Wens	De hoogwerker kan worden aangestuurd vanuit de werkbak	

* Installateur A: 3-4 m; Installateur B: 20 m

** Installateur A: 100-300 kg; Installateur B: 500 kg

*** Installateur A: 3-4; Installateur B: 6

Businesscase

Nr.	E/W	Omschrijving	Verificatie
C.11	Eis	De maximale huurprijs per dag voor de hoogwerker is € <n.t.b.>	
C.12	Wens	De maximale kostprijs voor de hoogwerker is € <n.t.b.>	
C.13	Wens	De hoogwerker kan ook toegepast worden in andere vergelijkbare toepassingen (denk aan dakonderhoud, warmtepompen buitenunits, dakdekkers, glazenwasser etc.)	

Bijlage C: Businesscase

Scenario 0: huidig	Installateur 1	Installateur 2	Installateur 3
Kosten totaal	€ 841	€ 818	€ 955
Kosten personeel	€ 832	€ 810	€ 945
Inzetbaarheid personeel			
<i>productiviteit</i>	100%	100%	100%
<i>valgevaar</i>	100%	100%	100%
<i>fysieke belasting</i>	100%	100%	100%
Investering/ afschrijving per woning			
Dakrandbeveiliging	€ 9	€ 8	€ 10
<i>Investering</i>	€ 2.000	€ 2.000	€ 2.000
<i>inzet per woning (uren)</i>	7	7	8
<i>afschrijfperiode (uren)</i>	1600	1600	1600

Scenario 1: panelenlift, beugel, klikverbindingen	Installateur 1	Installateur 2	Installateur 3
Financiële baten t.o.v. scenario 0	€ 94	€ 61	€ 55
Kosten personeel	€ 489	€ 500	€ 641
Inzetbaarheid personeel			
<i>productiviteit</i>	141%	138%	132%
<i>valgevaar</i>	78%	84%	79%
<i>fysieke belasting</i>	68%	73%	70%
Investering/ afschrijving per woning	€ 258	€ 258	€ 259
Dakrandbeveiliging (als referentie)	€ 9	€ 8	€ 10
<i>Investering</i>	€ 2.000	€ 2.000	€ 2.000
<i>inzet per woning (uren)</i>	4	4	5
<i>afschrijfperiode (uren)</i>	1600	1600	1600
Deeloplossing panelen lift - kosten	€ 1	€ 1	€ 1
<i>Investering</i>	€ 1.000	€ 1.000	€ 1.000
<i>inzet per woning (uren)</i>	2	2	2
<i>afschrijfperiode (uren)</i>	1600	1600	1600
Deeloplossing - beugel	€ 24	€ 24	€ 24
<i>meerprijs per stuk</i>	€ 2	€ 2	€ 2
<i>aantal per woning</i>	16	16	16
Deeloplossing - klikverbing elektrisch	€ 128	€ 128	€ 128
<i>meerprijs per stuk</i>	€ 8	€ 8	€ 8
<i>aantal per woning (2 per paneel)</i>	16	16	16
Deeloplossing - klikverbing mechanisch	€ 96	€ 96	€ 96
<i>meerprijs per stuk</i>	€ 2	€ 2	€ 2
<i>aantal per woning (6 per paneel)</i>	48	48	48

Scenario 2: verreiker, beugel, klikverbindingen	Installateur 1	Installateur 2	Installateur 3
Financiële baten t.o.v. scenario 0	-€ 163	-€ 196	-€ 166
Kosten personeel	€ 447	€ 458	€ 563
Inzetbaarheid personeel			
<i>productiviteit</i>	146%	144%	140%
<i>valgevaar</i>	13%	12%	11%
<i>fysieke belasting</i>	48%	56%	58%
Investing/ afschrijving per woning	€ 548	€ 548	€ 548
Deeloplossing verreiker - kosten (huur per dag)	€ 300	€ 300	€ 300
Deeloplossing - beugel	€ 24	€ 24	€ 24
meerprijs per stuk	€ 2	€ 2	€ 2
aantal per woning	16	16	16
Deeloplossing - klikverbing elektrisch	€ 128	€ 128	€ 128
meerprijs per stuk	€ 8	€ 8	€ 8
aantal per woning (2 per paneel)	16	16	16
Deeloplossing - klikverbing mechanisch	€ 96	€ 96	€ 96
meerprijs per stuk	€ 2	€ 2	€ 2
aantal per woning (6 per paneel)	48	48	48