



Energistyrelsen



Styrelsen for Grøn
Arealomlægning og Vandmiljø



Plan- og
Landdistriktsstyrelsen



Miljø- og
Ligestillingsministeriet
Miljøstyrelsen

Afdækning af eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg

Juli 2025

Udgiver: Miljøstyrelsen

Forfattere:

Rikke Andersen Lindeque, DHI A/S

Anne Rathmann Pedersen, DHI A/S

Edith Mønsted, DHI A/S

ISBN: 978-87-7564-014-0

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter indenfor miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	5
2.	Sammenfatning og konklusioner	6
2.1	Baggrund og formål	6
2.2	Litteratursøgning	6
2.3	Viden om afsmitning fra solceller og solcellepaneler	6
2.4	Viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller	8
2.5	Manglende viden	10
3.	Forkortelser	11
4.	Indledning	12
4.1	Baggrund	12
4.2	Formål	12
4.3	Afgrænsning	12
5.	Metodeafsnit	14
5.1	Litteratursøgning	14
6.	Resultater af litteratursøgning	16
6.1	Typer af solceller	16
6.2	Afsmitning fra solceller og solpaneler	17
6.2.1	Afsmitning fra intakte solceller	17
6.2.2	Afsmitning fra ikke-intakte solceller	18
6.2.3	Aktiviteter og afsmitning til miljøet i anlægsfasen ifølge danske VVM-undersøgelser	23
6.2.4	Afsmitning til miljøet i driftsfasen ifølge danske VVM-undersøgelser	23
6.2.5	Opsamling på afsmitning fra solcelleanlæg	26
6.3	Typer af onshore vindmøller	27
6.4	Afsmitning fra vindmøller	27
6.4.1	Aktiviteter og afsmitning til miljøet i anlægsfasen ifølge danske VVM-undersøgelser	29
6.4.2	Afsmitning til miljøet i driftsfasen ifølge danske VVM-undersøgelser	29
6.4.3	Opsamling på afsmitning fra vindmøller	30
6.5	Særligt problematiske stoffer i VE-anlæg	30
6.5.1	Kandidatlistede stoffer	30
6.5.2	PFAS-forbindelser	32
7.	Konklusioner	34
7.1	Afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra solceller og solpaneler	34
7.2	Afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller	36
7.3	Manglende viden	37
7.3.1	Begrænset viden om afsmitning fra nyere typer solcelleanlæg	37
7.3.2	Begrænset viden om afsmitning af organiske stoffer for både solcelle- og vindmølle-anlæg	37

7.3.3	Begrænset viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller	37
8.	Referencer	38
	Bilag 1.Litteratursøgning afsmitning fra VE anlæg	42
Bilag 1.1	Søgning i Science Direct, Google Scholar og DTU Orbit.	43
Bilag 1.2	Oversigt over søgte ord og tilsvarende hits fra søgning i Google Scholar	46
Bilag 1.3	Oversigt over søgte ord og tilsvarende hits fra søgning i DTU Orbit	48
Bilag 1.4	Søgning i SCIP-databasen (ECHA, 2024)	49
	Bilag 2.Data for afsmitning fra solceller	50
Bilag 2.1	Data fundet på afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra solceller og solpaneler	51

1. Forord

Dette er rapporten for projektet "Afdækning af eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg" udarbejdet for Miljøstyrelsen af DHI A/S.

Med VE-anlæg menes anlæg, der etableres og drives med henblik på produktion af energi fra vedvarende energikilder. I projektet er VE-anlæg begrænset til at omfatte solcellepaneler og vindmøller på land.

I *Klimaaftalen om grøn strøm og varme* fra juni 2022 blev det besluttet, med deltagelse af medarbejdere på tværs af Energistyrelsen, Plan- og Landdistriktsstyrelsen og Miljøstyrelsen, at etablere et rejsehold for vedvarende energi, der bl.a. skal sikre udbredelse af gode eksempler i forbindelse med realisering af VE-projekter i kommunerne. Rejseholdet har i den forbindelse oplevet, at kommunerne efterspørger viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg. Der er derfor ønsket en rapport, der danner et overblik over allerede eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg, som kan bruges til oplysning og vejledning af kommuner.

I dette projekt leveres et overblik over international og national viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlægstyperne solceller/solpaneler og vindmøller på land (on-shore) i form af en litteratursøgning af eksisterende viden på området samt generel viden om problematiske indholdsstoffer i komponenter benyttet til solceller/solpaneler og/eller vindmøller fra EU.

Projektet "Afdækning af eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg" er gennemført for Miljøstyrelsen i perioden juli 2024 til marts 2025 og er udarbejdet af DHI A/S.

2. Sammenfatning og konklusioner

2.1 Baggrund og formål

Det blev med *Klimaaftale om grøn strøm og varme* fra juni 2022 besluttet at etablere et rejsehold for vedvarende energi der bl.a. skal sikre udbredelse af gode eksempler i forbindelse med realisering af VE-projekter i kommunerne. Rejseholdet har i den forbindelse oplevet, at kommunerne efterspørger viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg. Hovedformålet med denne rapport er at skabe et overblik over allerede eksisterende viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlægstyperne solceller og vindmøller på land samt identificere, hvor der mangler viden om miljøfarlige forurenende stoffer i disse typer VE-anlæg.

Rapporten samler og formidler et overblik over eksisterende viden på området baseret på tilgængelig litteratur og forskning på området. Overblikket kan tjene som understøttende oplysning til kommunerne og den kommunale sagsbehandler, som modtager henvendelser og høringsvar f.eks. fra borgere, der er bekymrede for, om miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg kan forurene det omkringliggende miljø.

Rapporten har fokus på kandidatlistede stoffer (særligt problematiske stoffer) og stoffer, som er listet i BEK nr. 796 af 13/06/2023 samt PFAS-stoffer.

2.2 Litteratursøgning

I projektet er der foretaget en litteratursøgning til afdækning af viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg med fokus på landbaserede solcellepaneler og vindmøller, og litteratursøgningen dækker både anlægs- og driftsfasen under normale forhold. Litteratursøgningen indsamler eksisterende national og international viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer til det nærtliggende miljø. Litteratursøgningen dækker Danmark, EU og lande uden for EU. VVM-undersøgelser for VE-anlæg i Danmark inden for de sidste 10 år gennemgås for at identificere viden og mulige kilder til viden om afsmitning i forbindelse med nyere anlæg og drift af solcelle- og vindmølle-anlæg.

2.3 Viden om afsmitning fra solceller og solcellepaneler

Litteraturstudiet har identificeret 3 studier med viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra intakte solceller i driftsfasen. Studierne er foretaget inden for de sidste 10 år. Ligeledes har litteraturstudiet identificeret 29 studier med viden der afspejler afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra ikke-intakte solceller i driftsfasen. Studierne er foretaget inden for de sidste 30 år. Studier, hvor syreholdige ekstraktionsvæsker er benyttet, er ikke medtaget her, idet de beskriver ekstreme forhold f.eks. ved affaldsdeponering.

Undersøgelser af afsmitning af kemiske stoffer til miljøet er ofte udført under laboratorieforhold og ofte på knuste eller udskårne prøver af solcellerne. Der er dog tre undersøgelser, hvor afsmitningen er undersøgt på intakte solceller, hvor afsmitningen enten er målt i jorden under solcelleanlægget eller undersøgt under laboratorie- eller in-situ-forhold, hvor de udskårne prøver er forsegledede og derfor må anses som intakte.

Det er vigtigt at gøre opmærksom på, at litteraturstudiet ikke har forholdt sig til størrelsen af den potentielle afsmitning, og dermed ikke om afsmitningen giver anledning til overskridelse af miljøkvalitetskrav og grænseværdier eller i øvrigt påvirker den kemiske tilstand i miljøet.

Der er ikke fundet kilder fra litteratursøgningen eller gennemgangen af miljøkonsekvensvurderinger, der beskriver den faktiske afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer til miljøet fra anlægsfasen af solcelleanlæg. Under normale forhold i anlægsfasen af et solcelleanlæg er der ifølge oplysningerne indhentet fra miljøkonsekvensrapporter udarbejdet forud for anlæggelse af solcelleanlægget ikke afsmittning til miljøet. Håndtering af olier f.eks. transformatorolie kan dog medføre spild, men det forventes, at tilsyn og afværgeforanstaltninger er med til at undgå og mindske afsmittning til miljøet.

En oversigt over eksisterende viden om potentiel afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra intakte og ikke-intakte solceller i driftsfasen er angivet nedenfor.

TABEL 1. Viden om potentiel afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra intakte solceller i driftsfasen.

Solcelletype	Antal studier fra litteraturen	Stoffer undersøgt for udvaskning	Kandidatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK målt i udvaskning fra intakte solceller
Krystallinsk Silicium (c-Si)	1	Ba, Cd, Cu, Li, Ni, Pb, Se, Sr, Zn	Ba, Ni, Se, Sr
Polymere solceller, Ag-OPV	1	Ag, Zn	-
Perovskit	1	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb	As, Cu, Pb

TABEL 2. Viden om potentiel afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra ikke-intakte solceller i driftsfasen.

Solcelletype	Antal studier fra litteraturen	Stoffer undersøgt for udvaskning Tal i parentes angiver antal studier, hvor stoffet er undersøgt	Kandidatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK målt i udvaskning fra ikke-intakte solceller Tal i parentes angiver antal studier, hvor stoffet er målt
Amorft Silicium (a-Si)	4	Ag(3), Al(3), As(2), Ba(1), Cd(4), Cr(2), Cu(3), Fe(1), Ga(4), In(4), Mn(1), Mo(2), Ni(3), Pb(4), Sb(1), Se(3), Sn(1), Te(3), Zn(3)	Ag(3), Ba(1), Cd(1), Cr(2), Cu(3), Fe(1), Mn(1), Mo(1), Ni(3), Pb(3), Sb(1), Se(2), Sn(1), Zn(3)
Krystallinsk Silicium (c-Si)	5	Ag(4), Al(4), As(1), Ba(1), Cd(5), Cr(3), Cu(3), Fe(1), Ga(3), In(2), Mn(2), Mo(2), Ni(3), Pb(5), Sb(1), Se(4), Si(1), Sn(1), Te(3), Zn(4)	Ag(3), Ba(1), Cd(3), Cr(2), Cu(3), Fe(1), Mn(1), Mo(1), Ni(2), Pb(4), Sb(1), Se(1), Sn(1), Zn (1)
Silicium Uspecificeret	1	Ag, Al, B, Cu, Fe, Pb, Sb, Zn, organiske stoffer	Ag, B, Cu, Fe, Pb, Sb, Zn
Cadmium Tellur (CdTe)	8	Ag(2), Al(2), As(1), Ba(1), Cd(8), Cr(1), Cu(2), Ga(4), In(4), Mn(1), Mo(3), Ni(3), Pb(3), Sb(1), Se(4), Sn(1), Te(7), Zn(3)	Ba(1), Cd(8), Cr(1), Cu(1), Mn(1), Mo(2), Ni(2), Pb(2), Sn(1), Zn(1)
Kobber indium diselenide (CIS)	2	Cd(2), Cu(2), Ga(2), In(2), Mo(2), Ni(1), Se(2), Te(1), Zn(2)	Cd(2), Cu(2), Mo(2), Se(2), Zn(2)

Kobber indium gallium diselenide (CIGS)	7	Ag(4), Al(4), As(3), Ba(1), Cd(6), Cr(2), Cu(4), Fe(1), Ga(5), In(5), Mn(1), Mo(5), Ni(3), Pb(6), Sb(2), Se(6), Sn(2), Te(3), Ti(1), Zn(5)	Ag(1), As(1), Cd(6), Cr(1), Cu(3), Fe(1), Mo(5), Ni(2), Pb(4), Se(6), Sn(2), Zn(5)
Polymere solceller, Ag-OPV	1	Ag, Zn	Ag, Zn
Polymere solceller, C-OPV	1	Ag, Zn	Zn

Ét studie med afsmittning fra intakte solceller viser udvaskning af miljøfarlige forurenende stoffer Ba, Ni, Se og Sr fra krystallinske silicium solceller (c-Si), som er en af de mest anvendte typer i Danmark. For ikke-intakte solceller af de mest almindelige typer, krystallinske silicium (c-Si) og amorft silicium (a-Si) viser en række studier afsmittning af en række metaller, som alle er miljøfarlige forurenende stoffer med et fastlagt miljøkvalitetskrav (Ag, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn og Zn). Herudover er der i et studie målt afsmittning af bor samt lette og tunge kulbrinter fra et uspecifiseret silicium solcellepanel.

For tyndfilmssolceller, som også er almindeligt anvendt, er der ikke undersøgelser med intakte solceller. Undersøgelser med ikke-intakte paneler af typerne Cadmium Tellur (CdTe), Kobber indium diselenide (CIS) og Kobber indium gallium diselenide (CIGS) viser potentiel afsmittning af en lang række metaller for hvilke der er fastsat et miljøkvalitetskrav (Ag, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sn og Zn).

Et studie har undersøgt nyere polymere solceller af typen AG-OPV, og her er der ikke fundet afsmittning fra intakte celler, kun fra ikke intakte paneler, hvor afsmittning af Ag og Zn er detekteret. For ikke-intakte solceller af typen C-OPV er afsmittning af Zn detekteret.

Undersøgelser med intakte perovskit solceller viser afsmittning af As, Cu og Pb, og det er netop indhold af opløselige, organiske blyforbindelser, der giver miljømæssige bekymringer, som står i vejen for en kommercialisering af denne type solceller.

Det skal noteres, at studierne ikke oplyser, hvorvidt afsmittningen af stofferne giver anledning til forurening i miljøet eller overskridelse af miljøkvalitetskrav og grænseværdier.

En gennemgang af SCIP-databasen viser, at der anvendes en række PFAS-stoffer i fremstillingen af solceller. Anvendelserne omfatter klæbemiddel, elektrisk beskyttelse og isolering, laminering og overfladebehandling for bedre holdbarhed og beskyttelse mod vejrlig, og dermed angives forekomst af PFAS-stoffer i for-og bagbeklædning, ledninger og kabler og i overfladebelægninger på solceller. Afsmittning af PFAS fra solceller er undersøgt i et dansk studie, og resultater tyder på en meget lille afsmittning. Den mængde PFAS, der afvaskes, vurderes i studiet at være mange gange lavere end den målte deposition fra luften (våd og tør). Sammenlignes frigivelsen af PFAS fra solcellerne med den maksimalt tilladte mængde PFAS, der årligt må spredes med spildevandsslam på landbrugsjord, vil PFAS bidraget fra solceller i hele panelets levetid - ifølge studiet - være 3.400 til 460.000 gange mindre, end der kunne være tilført med spildevandsslam.

2.4 Viden om afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller

Litteraturstudiet har identificeret 2 studier med viden om afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra landbaserede vindmøller.

Der er ikke fundet kilder, der beskriver afsmittning til miljøet fra anlægsfasen af vindmøller på land. Afsmittning fra aktiviteter i anlægsfasen vurderes i miljøkonsekvensrapporterne, som er

udarbejdet forud for anlægsfasen, at kunne ske udelukkende i forbindelse med spild eller uheld, hvor der kan spildes olie eller andre kemikalier. Der vil dog være forbyggende foranstaltninger samt afværgeforanstaltninger, der skal forhindre eller mindske spild og dermed afsmittning til miljøet.

En oversigt over eksisterende viden om potentiel afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra landbaserede vindmøller er angivet nedenfor.

TABEL 3. Viden om potentiel afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra landbaserede vindmøller.

Vindmølle	Stoffer undersøgt	Antal studier fra litteraturen	Potentiel afsmittning af kandidatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK
Vindmøllevinge ¹	Bisphenol A (BPA), PFAS	1	Potentiel afsmittning af BPA Afsmittning af PFAS kan ikke udelukkes
Vindmøllepark	Ag, As, Ba, Bi, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, La, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Pr, Rb, S, Sb, Se, Sn, Sr, Ta, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr	1	Forhøjet koncentration af Co og Ti i jord under vindmøller. Ingen signifikant forskel for resten af stofferne

Vindmøller indeholder forskellige væsker (gearolie, hydraulikvæske, kølevæsker, transformerolie), og i driftsfasen anvendes mindre mængder af fedt og smøremidler samt rengøringsmidler i møllerne. Det er ikke oplyst, om der anvendes kemikalier til vedligehold og reparationer. En række tiltag i form af indretning, forbyggende foranstaltninger og afværgeforanstaltninger skal forhindre eller mindske spild og dermed afsmittning til miljøet under almindelig drift af en vindmølle.

Gennemgang af data i SCIP-databasen viser, at der anvendes en række PFAS-stoffer og et organisk stof (Imidazolidine-2-thione) i vindmøller. PFAS-stofferne anvendes som beskyttelsesbelægning på vinger og mølletårne samt som smøremiddel og er primært sulfonamider og fluorpolymere (FEVE, ETFE, PTFE, PFPE). Det er ikke oplyst, om anvendelsen er til onshore og/eller offshore vindmøller.

For driftsfasen af vindmølleanlæg gav litteratursøgningen på afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller kun meget begrænsede resultater. Afsmittning af PFAS-stoffer fra opskårne vindmøllevinger er undersøgt i en screeningsundersøgelse, hvor det ikke er tydeligt, om der er screenet for onshore eller offshore vindmøller. Selvom undersøgelsen peger på, at en afsmittning af PFAS ikke kan udelukkes, er det tvivlsomt om resultaterne er repræsentative for onshore vindmøller under normale driftsforhold, da studiet har undersøgt opskårne vindmøllevinger ved en batchtest. Afsmittning af bisphenol A, som er et kandidatlistet stof, er undersøgt i det samme studie, som viser potentiel afsmittning fra vindmøllevinger af bisphenol A. I et studie fra Kina er der målt forhøjede koncentrationer af kobolt i jorden under en vindmøllepark. Kobolt er et miljøfarligt forurenende stof med et fastsat miljøkvalitetskriterie.

Selvom der kan være en potentiel afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra vindmøller, er det ikke sikkert, at afsmittningen vil føre til en forurening med stofferne i miljøet eller overskridelse af miljøkvalitetskrav og grænseværdier.

¹ Ikke specificeret om der er tale om landbaserede eller offshore vindmøllevinger.

2.5 Manglende viden

Det er begrænset, hvad der eksisterer af viden om afsmitning fra især intakte VE-anlæg i drift under normale forhold – dels viden om afsmitning men også viden, der eventuelt kan udelukke afsmitning.

Der er kun få undersøgelser tilgængelige for afsmitning fra de nyere typer solceller, som omfatter monolitiske III-V solceller (CPV), perovskit solceller og polymere solceller (AG-OPV, C-OPV og Belectric OPV). Herudover er der for alle typer af solceller fokus på at undersøge afsmitning af metaller, mens undersøgelser af afsmitning af organiske stoffer er næsten fraværende.

På baggrund af litteratursøgningen vurderes omfanget af viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer, herunder PFAS fra eksisterende vindmøller såvel som for nye typer vindmøller at være meget begrænset for normal drift på land.

3. Forkortelser

6:2 FTS	Fluortelomersulfonat
BHT	Butyleret hydroxytoluen
BPA	Bisphenol A
CPV	Concentrated PhotoVoltaic
ECHA	Det europæiske kemikalieagentur
ETFE	Ethylentetrafluorethylen
EVA	Ethylenvinylacetat
FEVE	Fluorethylenvinylether
FOSAA	Perfluorooktansulfamido eddikesyre
MoSC	Monokrystallinske siliciumsolceller
PCB	Polyklorerede biphenyler
PFAS	Per- og polyfluorerede alkylstoffer
PFBA	Perfluorbutansyre
PFBS	Perfluorbutansulfonsyre
PFHxA	Perfluorhexansyre
PFOA	Perfluoroktansyre
PFOS	Perfluoroktansulfonsyre
PFPE	Per- og polyfluorerede polyethere
PFPeA	Perfluoro-n-pentansyre
POE	Polyolefin elastomer
PoSC	Polykrystallinske siliciumsolceller
PP	Polypropylen
PSC	Perovskit siliciumsolceller
PTFE	Polytetrafluorethylen, teflon
PVC	Polyvinylklorid
PVF	Polyvinylfluorid
TCLP	Toxicity characteristic leaching procedure
VE	Vedvarende energi/energikilde
VVM	Vurdering af virkninger på miljøet
WET	Waste Extraction Test

4. Indledning

Miljøstyrelsen ønsker et overblik over viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra anlæg til produktion af energi fra vedvarende energikilder og afgrænset til at omfatte landbaserede solcellepaneler og vindmøller.

4.1 Baggrund

Det blev med *Klimaaftale om grøn strøm og varme* fra juni 2022 besluttet at etablere et rejsehold for vedvarende energi, der bl.a. skal sikre udbredelse af gode eksempler i forbindelse med realisering af VE-projekter i kommunerne. Rejseholdet har i den forbindelse oplevet, at kommunerne efterspørger viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg. Hovedformålet med denne rapport er at skabe et overblik over allerede eksisterende viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlægstyperne solceller og vindmøller på land samt identificere, hvor der mangler viden om miljøfarlige forurenende stoffer i disse typer VE-anlæg. Denne viden skal kunne bruges til oplysning og vejledning af kommuner.

4.2 Formål

Hovedformålet med rapporten er at inødekomme kommunernes efterspørgsel på viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlægstyperne solceller og vindmøller på land samt identificere, hvor der mangler viden om miljøfarlige forurenende stoffer i disse typer VE-anlæg. Rapporten samler og formidler et overblik over eksisterende viden på området baseret på tilgængelig litteratur på området. Denne viden kan bruges som oplysning til kommunerne og som vejledning til den kommunale sagsbehandler, som modtager henvendelser og høringsvar fra borgere, der er bekymrede for, at miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg kan forurene det omkringliggende miljø.

Litteraturstudiet tager udgangspunkt i de miljøfarlige forurenende stoffer, der er relevante for elproducerende VE-anlæg. Undersøgelsen omfatter afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra både solcelle- og vindmølle-anlæg og dækker, i det omfang det har været muligt, både anlægs- og driftsfasen. Litteraturstudiet adresserer også, hvorvidt de undersøgelser, der ligger bag, med rimelighed er repræsentative for de materialer og produkter, som anvendes i kommende anlæg, såfremt der har været oplysninger tilgængelige, og ved at fokusere på nyere VVM-rapporter lavet inden for de sidste 10 år samt ikke at forholde sig til studier, der udelukkende undersøger affaldsfasen (se også 4.3 Afgrænsning).

4.3 Afgrænsning

Efter aftale med Miljøstyrelsen er litteratursøgningen afgrænset til afdækning af eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra landbaserede solcelle- og vindmølle-anlæg og dækker anlægs- og driftsfasen. Litteratursøgningen dækker afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg til indlandsvand, kystnært vand, grundvand samt jordmiljøet. Rapporten har fokus på kandidatlistede stoffer (særligt problematiske stoffer) og stoffer, som er listet i BEK nr. 796 af 13/06/2023 samt PFAS-stoffer.

Sammensætning og materialetyper i anlæggene, der kan give anledning til afsmitning, vil som udgangspunkt ikke blive undersøgt enkeltvis. Derimod undersøges afsmitning fra hele VE-anlæg først, og derefter kan de materialetyper, der er anvendt i anlægget, tages i betragtning, såfremt denne viden er tilgængelig.

På baggrund af den eksisterende viden vurderes potentiel afsmitning, så vidt det er muligt, ud fra de tilgængelige oplysninger. En egentlig risikovurdering af afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg til miljøet ligger uden for formålet med denne rapport. Det er dog hensigten med rapporten, at den skal afdække og rapportere tilgængelig viden, der kan bruges i forbindelse med en eventuel risikovurdering.

5. Metodeafsnit

I projektet er der foretaget en litteratursøgning til afdækning af eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg med fokus på elproducerende landbaserede solcellepaneler og vindmøller. Der søges efter viden om afsmitning af kemiske stoffer fra VE-anlæg, idet der skelnes mellem intakte og ikke-intakte anlæg. Herudover søges der om viden om forekomst af særligt problematiske stoffer i VE-anlæg.

5.1 Litteratursøgning

Litteratursøgningen indsamler eksisterende national og international viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlægstyperne solceller og vindmøller, både under anlægs- og driftsfasen, til det nærtliggende miljø. Litteratursøgningen dækker Danmark, EU og lande uden for EU. VVM-undersøgelser for VE-anlæg i Danmark inden for de sidste 10 år gennemgås for at identificere viden og mulige kilder til viden om afsmitning i forbindelse med nyere anlæg og drift af solcelle- og vindmølleanlæg.

Litteratursøgningen består af flere tilgange med fokus på førstnævnte tilgang:

1. Bred søgning efter litteratur der beskriver afsmitning fra VE-anlæg i anlægsfase og driftsfase. Der søges i følgende litteraturkilder: ScienceDirect, Google, Orbit DTU. Søgning foretages både på dansk og engelsk med anvendelse af centrale søgeord og med fokus på review artikler. Centrale søgeord inkluderer: Release, leaching, solar panels, solar cells, pv modules, photovoltaic modules, windmills, windturbines, contaminant, pollutant, toxicity, environment, PFAS, afsmitning, solceller, solpaneler, vindmøller og vindturbiner. Review artikler og referencelister i udvalgte kilder er ydermere gennemgået, for yderligere referencer. Resultatet af denne søgning bruges til at skabe et overblik over den tilgængelige viden og til at identificere eventuel mangel på viden. Resultatet omfatter tilgængelig viden om afsmitning af kemiske stoffer fra både intakte og ikke-intakte anlæg i anlægs- og driftsfasen. Relevante miljøfarlige forurenende stoffer er som udgangspunkt de kandidatlistede stoffer (særligt problematiske stoffer) og stoffer, som er listet i BEK nr. 796 af 13/06/2023 samt PFAS-stoffer.

Litteratursøgningen suppleres med de nedenfor nævnte to tilgange, som foretages udelukkende for at identificere forekomst af miljøfarlige forurenende stoffer i VE-anlæg og dermed et potentiale for afsmitning.

2. Søgning i ECHA²'s database over stoffer i artikler. Der tages udgangspunkt i listen over kandidatlistede stoffer i artikler, idet der søges efter forekomst i solcellepaneler og vindmøller. Denne liste er senest opdateret i 2019 og dækker derfor kun stoffer optaget på Kandidatlisten slut 2019, og det forventes derfor ikke, at listen er udtømmende. Herudover søges der i SCIP³-databasen for at identificere kandidatlistede stoffer i solcellepaneler og vindmøller.

² The European Chemicals Agency

³ Substances of Concern In articles as such or in complex objects (Products)

3. Gennemgang af restriktionsforslaget for PFAS med henblik på at undersøge om PFAS stoffer forekommer i solcelle- og vindmølle anlæg.
Restriktionsforslaget indeholder oplysninger om anvendelsen af PFAS inden for energisektoren og er derfor en kilde til oplysning om hvilke stoffer, der kan forekomme i solcellepaneler og vindmøller.

Resultatet af de to sidstnævnte tilgange er derfor en indikation på forekomst af stofferne, hvor potentiale for afsmittning ikke kendes.

4. Gennemgang af VVM-undersøgelser for VE-anlæg i Danmark
Som led i tilladelsen til projekter for etablering af energianlæg skal der udføres en miljøkonsekvensvurdering af projektet for alle aktiviteter i anlægs-, drifts- og nedtagningsfasen. Forud for projektet vurderes indvirkning på miljøet bl.a. biodiversitet, fauna, flora, jordbund, vand og luft. Via EA-Hub (eahub.miljoeportal.dk), som samler miljøvurderinger for projekter herunder miljørapporter og miljøkonsekvensrapporter (VVM-rapporter) er der søgt efter viden om afsmittning fra solcelleanlæg og vindmøller på land. Søgningen er begrænset til projekter, der er foretaget inden for de seneste 10 år i Danmark.

6. Resultater af litteratursøgning

Resultater af litteratursøgningen præsenterer et overblik over eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra solcellepaneler og vindmøller på land. For solcellepaneler skelnes der mellem afsmitning fra intakte og ikke-intakte anlæg. Herudover er der givet oplysninger om forekomst af særligt problematiske stoffer i VE-anlæg, men hvor der ikke foreligger viden om afsmitning fra anlæggene.

6.1 Typer af solceller

I Danmark anvendes fotovoltaiske solceller (PV-solceller) i stigende grad ved etablering af anlæg. Mange typer af PV-solceller er af praktiske årsager lamineret med eller påsat en glasrude, så modulet er mekanisk rillet og vejrbeskyttet. PV-solceller anvendt til solcelleanlæg er typisk 2-3 m² i størrelse (Danish Energy Agency, 2016).

PV-solceller karakteriseres ud fra typen af det anvendte absorberende materiale:

- Krystallinsk silicium (c-Si), det mest anvendte absorberende materiale, der kan anvendes som enten mono- eller multikrystallinsk silicium oblater (*wafers*). Solceller baseret på silicium i monokrystallinsk form forventes at dominere verdensmarkedet i årtier grundet fordele associeret med omkostning og ydeevne.
- Tyndfilmssolceller, hvor det halvledende absorberende lag er påsat modulets glasdække i et mikrometer tyndt lag. Tyndfilmssolceller kan opdeles i amorft/mikrokrystallinsk silicium (a-Si/μc-Si), cadmium Telluride (CdTe) og kobber indium (gallium) (di)senilide (CIGS) (Tammaro *et al.* 2016).
- Monolitiske III-V solceller, fremstillet af forbindelser af gruppe III og gruppe V elementer (Ga, As, In og P) og ofte aflejret på et Ge-substrat (baseret på germanium). Disse typer bruges primært til rumapplikationer eller i Concentrated PhotoVoltaic (CPV) systemer. CPV udnytter den direkte strålekomponent af solbestrålingen, hvilket gør den ideel i klimatyper domineret af direkte sollys i modsætning til danske forhold, hvor difust sollys udgør halvdelen af solenergien. CPV-anlæg, som består af højeffektive linser (Fresnel linser), fokuserer solens stråler på modtagere, som kan omdanne strålerne til varme og via en varmeveksler direkte kan opvarme vand. I 2022 var der opsat denne type af anlæg to steder i Danmark (Jensen *et al.* 2022).
- Perovskit solceller er lavet af en hybrid af organisk-uorganisk bly eller tinhalogenid-baserede materialer (salte), som er placeret i en Perovskit-struktur. Perovskit solceller har gennem årene vist fremskridt med hensyn til effektivitet, men giver samtidig miljømæssige bekymringer grundet materialets indhold af toksiske, opløselige, organiske blyforbindelser. Derfor skal Perovskits sundheds- og miljøpåvirkning analyseres, før materialet i sidste ende kan komme i betragtning som et absorberende materiale i solceller. Det er usikkert, hvornår denne type PV-celler bliver kommercielt tilgængelige (Danish Energy Agency, 2016).

Foruden traditionelle PV-solceller forskes der i anvendelsen af organiske PV-solceller (OPV). I litteratursøgningen er der fundet frem til følgende typer inden for OPV-solceller og hvad de kort anvendes til:

- Ag-OPV – bruger sølvholdige materialer, ofte i form af sølvnanopartikler eller komplekser, som ledende lag i solcellen (Espinosa *et al.*, 2016).
- C-OPV – anvender kulstofbaserede materialer som ledende og aktive lag i solcellen (Espinosa *et al.*, 2016).
- Belectric OPV – anvender organiske polymerer og mindre molekyler til at generere elektricitet (Brun *et al.*, 2016).

6.2 Afsmitning fra solceller og solpaneler

I litteratursøgningen er det noteret, hvorvidt der er målt afsmitning af kemiske stoffer fra solceller og solcellepaneler. I de tilfælde, hvor der for repræsentative forhold for driftsfasen er noteret en afsmitning af kandidatlistede stoffer, stoffer med et miljøkvalitetskrav i henhold til BEK nr. 796 af 13/06/2023 eller PFAS-stoffer, vil det fremgå, at der er potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer. Vi gør opmærksom på, at vi ikke har forholdt os til størrelsen af afsmitningen, og dermed ikke om afsmitningen giver anledning til overskridelse af miljøkvalitetskrav eller i øvrigt påvirker den kemiske tilstand i miljøet.

Undersøgelser af afsmitning af kemiske stoffer til miljøet er ofte udført under laboratorieforhold og ofte på knuste eller udskårne prøver af solcellerne. Der er dog tre undersøgelser, hvor afsmitningen er undersøgt på intakte solceller, hvor afsmitningen er målt i jorden under solcelleanlægget. Samtidig er der udført undersøgelser under laboratorie- eller in-situ-forhold, hvor de udskårne prøver er forseglede og derfor må anses som intakte.

Der skelnes her mellem undersøgelser af afsmitning fra intakte solceller, som repræsenterer driftssituationen, og afsmitning fra ikke-intakte solceller, som hovedsageligt beskriver afsmitning i affaldsfasen, men som også repræsenterer ødelagte celler i driftsfasen. I Bilag 2.1 er vist den fulde oversigt over resultaterne for de enkelte studier i litteratursøgningen.

6.2.1 Afsmitning fra intakte solceller

TABEL 4 nedenfor viser en oversigt over undersøgelser og resultater for afsmitning af kemiske stoffer inklusive miljøfarlige forurenende stoffer fra solcelleanlæg, sorteret efter type af solceller. Der er i tabellen kun medtaget data fra undersøgelser, hvor solcellerne har været intakte i driftsfasen.

TABEL 4. Oversigt over fundne data for afsmitning af metaller og PFAS fra intakte solcelleanlæg, sorteret efter typer af solceller.

Solcelletype	Stoffer undersøgt for afsmitning	Resultat	Afsmitning af kandidatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK	Kilde
c-Si	Ba, Cu, Cd, Li, Ni, Pb, Se, Sr og Zn	Forhøjede koncentrationer i jorden under solpaneler for Ba, Li, Ni, Se og Sr – Ingen signifikant ændring for Cd og Pb. Fald i koncentrationen i jorden for Cu og Zn.	Koncentrationer af Ba, Ni, Se og Sr i jorden under anlæg. Ba, Ni, Se og Sr er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK ⁴	Robinson & Meindl, 2019
Ag-OPV	Ag og Zn	Ag og Zn ikke udvasket. Udskårne prøver men forseglede uden tegn på indtrængen af vand.	-	Espinosa <i>et al.</i> , 2016

⁴ MKK: Miljøkvalitetskrav i henhold til BEK nr. 796 af 13/06/2023

Solcelletype	Stoffer undersøgt for afsmitning	Resultat	Afsmitning af kandidatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK	Kilde
Perovskit	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb.	Pb, Cu og As udvasket. Hg, Cd og Cr ikke detekteret. Nogle af solcellerne kommercielt tilgængelige andre udviklet af forskningsgrupper. Opskårne celler men forseglede/indsluttede.	Afsmitning af Pb, Cu og As, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Panthi <i>et al.</i> , 2020
-	PFAS	Meget lille forekomst af PFAS på overfladen med en forsvindende frigivelse af PFAS til jordmiljøet og grundvandet	PFAS	Skjolding & Baun, 2025

I studiet, der har undersøgt for afsmitning af PFAS, er det oplyst, at 17 PFAS-stoffer er undersøgt i studiet. To forbindelser (PFHxA og PFPeA) er fundet over kvantificeringsgrænsen. Her konkluderes det, at mængden af PFAS-stofferne, der afvaskes, er mange gange (100-500) lavere end den målte deposition fra luften (våd og tør) ved Lyngby og langt (880-5550 gange) lavere end grænseværdierne for jord, grundvand og overfladevand. Sammenlignes frigivelsen af PFAS fra solcellerne med den maksimalt tilladte mængde PFAS, der årligt må spredes med spildevandsslam på landbrugsjord, vil PFAS bidraget fra solceller i hele panelets levetid - ifølge studiet - være 3.400 til 460.000 gange mindre end der kunne være tilført med spildevandsslam (Skjolding & Baun, 2025).

6.2.2 Afsmitning fra ikke-intakte solceller

Litteratursøgningen viser, at der er væsentlig flere undersøgelser for ikke-intakte solceller end for intakte solceller. Årsagen til dette kan være, at det i praksis er nemmere at undersøge udvaskning af kemiske stoffer fra opskårne solceller, men også fordi det må forventes, at når solcellerne er beskadigede, kan solcellernes elektriske dele blive eksponeret til regnvand og dermed medføre et potentiale for udvaskning af kemiske stoffer til miljøet. Samtidig er der øget fokus på afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra beskadigede solceller, der kan ende på affaldsdeponi.

Undersøgelser af ikke-intakte solceller inkluderer således undersøgelser på beskadigede solceller. Herunder kan studier på frigivelse fra knuste solceller f.eks. ved brand give et billede af mulige frigivelser af stoffer fra beskadigede solcelleanlæg. Oversigten fra litteratursøgningen omfatter undersøgelser med udvaskning under neutrale forhold (pH =7). Det skal bemærkes, at regnvand kan have en lidt lavere pH end neutral pH. Studier, hvor syreholdige ekstraktionsvæsker er benyttet, er ikke medtaget her, idet de beskriver ekstreme forhold f.eks. ved affaldsdeponering. PH kan have betydelig indflydelse på udvaskningen for nogle stoffer, hvilket bl.a. kan ses i resultater fra Nain & Kumar (2020).

TABEL 5. Oversigt over fundne data for afsmitning af metaller og PFAS fra solcelleanlæg, sorteret efter typer af solceller. I tabellen er kun medtaget data, hvor solceller ikke er intakte. Dette inkluderer forsøg med brand og udvaskningsforsøg under neutral pH for opskårne solceller.

Solcelletype	Stoffer undersøgt for afsmitning	Resultat	Afsmitning af kandidatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK	Kilde
a-Si	Al, Cd, Cu, Ga, In, Mo, Ni, Pb, Se, Te, Zn.	Zn, Cu og Ni udvasket fra opskårne paneler, resultater for andre stoffer ikke nævnt.	Afsmitning af Zn, Cu og Ni, der er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK ⁵	Nover <i>et al.</i> , 2021
a-Si	Ag, Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ga, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Zn.	Ag, Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Zn udvasket fra opskårne paneler. Te, Ga, In og As under detektionsgrænsen.	Afsmitning af Ag, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn og Zn, der alle er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Tammaro <i>et al.</i> , 2016
a-Si	Ag, Al, As, Cd, Cu, Cr, Ga, In, Fe, Ni, Se, Pb, Zn	Zn, Cu og Ni udvasket fra beskadede paneler. Ag, Al, Cu, Cr, Fe, Ni, Pb, Se og Zn frigivet fra udskårne prøver ved udvaskning med vand ved pH=7 i et år. As, Cd, Ga, In under detektionsgrænsen.	Afsmitning af Zn, Cu og Ni, der er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK Afsmitning af Ag, Cu, Cr, Fe, Ni, Pb, Se og Zn, der alle er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Nain & Kumar, 2020
a-Si	Pb, Cd, Ag, Te, Se, In, Ga	Solcellerne er pulveriserede til forsøget. Mineraliseret vand (pH= 8,4), Pb og Ag udvasket.	Afsmitning af Pb og Ag, som begge er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Zapf-Gottwick <i>et al.</i> , 2015
c-Si	Al, Cd, Cu, Ga, In, Mo, Ni, Pb, Se, Te, Zn.	Al og Pb under detektionsgrænsen. Udvasning af andre stoffer ikke rapporteret.	-	Nover <i>et al.</i> , 2021
c-Si	Ag, Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Zn.	Ag, Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Zn udvasket under udvaskningsforsøg på skårede solpaneler.	Afsmitning af Ag, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn og Zn, der alle er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Tammaro <i>et al.</i> , 2016

⁵ MKK: Miljøkvalitetskrav i henhold til BEK nr. 796 af 13/06/2023

Solcelletype	Stoffer undersøgt for afsmitning	Resultat	Afsmitning af kandidatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK	Kilde
c-Si	Al, As, Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Ga, Ni, Pb, Si, Se, Zn.	Mono og multi Si moduler: Udvaskning af Si, Al, Fe, Cu, Ni, Pb og Ag fra skårede paneler og fra beskadigede paneler (pH=7). Lav udvaskning af Cd, Cr og Fe, mens As, Se og Zn ikke er detekteret eller ikke målt.	Afsmitning af Fe, Cu, Ni, Pb, Ag, Cr, og Cd, der alle er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Nain & Kumar, 2020
c-Si	Ag, Al, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn	Udvaskning af Cu, Pb og Al (pH 7), fra opskårne celler. Med undtagelse af Pb for solcellen uden laminering, er der målt højere koncentrationer for de UV-eksponerede solceller end de "nye" solceller for alle tungmetallerne.	Afsmitning af Cu og Pb, der begge er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Sharma et al., 2021
c-Si	Pb, Cd, Ag, Te, Se, In, Ga	Solcellerne er pulveriserede til forsøget. Mineraliseret vand (pH= 8,4): Pb, Cd og Ag udvasket	Afsmitning af Pb, Cd og Ag, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Zapf-Gottwick <i>et al.</i> , 2015.
Si (uspecifiseret)	Der er undersøgt for i alt 59 uorganiske stoffer. Nærværende rapport har fokus på Al, Ag, Sb, Pb, B, Fe, Cu, Zn. Ligeledes er der undersøgt organiske stoffer	Kunstigt regnvand (pH=7). Knust frontglas: Al, Sb, Pb, B, Zn målt over kvalitetskriterier. Nedfaldet panel (opskåret): Al, Sb, Pb, Fe, Cu, Zn, Ag målt over kvalitetskriterier. Organiske stoffer udvasket: Flygtige kulbrinter, C ₆ -C ₁₀ , Lette kulbrinter, C ₁₀ -C ₂₅ , Tunge kulbrinter, C ₂₅ -C ₃₅ Identificerede stoffer: 1-ethyl-1 hexanol, okta-decenamid samt decanedioic acid, bis(2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidiny) ester.	Afsmitning af Sb, Pb, B, Fe, Cu, Zn og Ag, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK Ifølge Ramsay (2021): Antimon, bor og zink er mobile og vurderes derfor at kunne give anledning til grundvandsforurening under worst-case forhold, mens forurening til grundvand ikke forventes at forekomme under realistiske forhold.	Ramsay, 2021
CdTe Cd	Ikke intakt	Opskårne og beskadigede. Lav udvaskning af cadmium ved pH 7, væsentligt højere ved pH=6.	Afsmitning af Cd, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Allen <i>et al.</i> , 2010
CdTe	Cd og Te	Cd udledt ved forsøg under brand.	Afsmitning af Cd, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Baumann <i>et al.</i> , 1995

Solcelletype	Stoffer undersøgt for afsmitning	Resultat	Afsmitning af kandidatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK	Kilde
CdTe	Cd og Te	Cd frigivet ved forsøg under brand fra opskårne celler.	Afsmitning af Cd, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Fthenakis <i>et al.</i> , 2005
CdTe	Cd og Te	Cd og Te udledt ved forsøg under brand	Afsmitning af Cd, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Patterson <i>et al.</i> , 1994
CdTe	Al, Cd, Cu, Ga, In, Mo, Ni, Pb, Se, Te, Zn	Cd, Te og Mo udvasket i laboratorieforsøg ved pH 7.	Afsmitning af Cd og Mo, som begge er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Nover <i>et al.</i> , 2021
CdTe	Cd, Ga, In, Mo, Ni, Se Te og Zn	Cd, Ni og Te udvasket	Afsmitning af Cd og Ni, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK.	Steinberger, 1998
CdTe	Ag, Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ga, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Zn.	Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, Te og Zn udledt under udvaskningsforsøg med skårede solceller.	Afsmitning af Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, og Zn som alle er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Tammaro <i>et al.</i> , 2016
CdTe	Pb, Cd, Ag, Te, Se, In, Ga	Solcellerne er pulveriserede til forsøget. Mineraliseret vand (pH= 8.4): Pb, Cd og Te udvasket.	Afsmitning af Pb og Cd, som begge er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Zapf-Gottwick <i>et al.</i> , 2015.
CIS	Cd, Cu, Ga, In, Mo, Se, Zn	Cd, Cu, Ga, In, Mo, Se, Zn udvasket fra solpaneler med og uden glas i destilleret vand.	Afsmitning af Cd, Cu, Mo, Se og Zn, som alle er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Finke <i>et al.</i> , 1996
CIS	Cd, Cu, Ga, In, Mo, Ni, Se Te og Zn	Cd, In, Mo, Se og Zn udvasket	Afsmitning af Cd, Cu, Mo, Se og Zn, som alle er miljøfarlige forurenende stoffer med MKK.	Steinberger, 1998
CIGS	Cd, Mo, Se og Zn	Cd, Mo, Se, Zn udvasket fra UV eksponerede og skårede solpaneler i beholder med søvand.	Afsmitning af Cd, Mo, Se, Zn, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Brun, Wehrli & Fent, 2016
CIGS	Al, Cd, Cu, Ga, In, Mo, Ni, Pb, Se, Te, Zn.	Mo, Cd, Zn, Ga, Se og Cu udvasket fra skårede solpaneler.	Afsmitning af Mo, Cd, Zn, Se og Cu, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Nover <i>et al.</i> , 2021
CIGS	Ag, Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ga, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Zn	Al, Cd, Cu, Ga, In, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, Te, Zn udvasket fra skårede solpaneler.	Afsmitning af Cd, Cu, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, og Zn, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Tammaro <i>et al.</i> , 2016

Solcelletype	Stoffer undersøgt for afsmitning	Resultat	Afsmitning af kandidatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK	Kilde
CIGS	As, Ag, Al, Cr, Cd, Cu, Fe, Ga, In, Mo, Ni, Se, Pb, Zn	Lav udvaskning af metaller fra skårede solceller i sammenligning med Si-solceller. Udvasning af Al, Fe og Cu (mg-skala). Lav udvaskning af In, Mo, Se og Ga, As, Ag, Cr, Cd, Ni, Pb og Zn (µg-skala).	Afsmitning af Fe, Cu, Mo, Se, As, Ag, Cr, Cd, Ni, Pb og Zn, som alle er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Nain & Kumar, 2020
CIGS	Al, Zn, Se, Mo, Cd, Ti, Cu, Ga, As, Ag, In, Sn, Sb, Pb	Opskårne solcelle fragmenter, omrystet i forsøg. Simuleret surt regnvand (pH=5): Al, Zn, Mo, Cd og Se udvasket. Ti, Cu, Ga, As, Ag, In, Sn, Sb, Pb udvasket i meget lave koncentrationer eller under detektionsgrænsen. Simuleret ferskvand (pH=8,6): Al, Zn, Mo, Cd, Se og Sn udvasket. Ti, Cu, Ga, As, Ag, In, Sb, Pb udvasket i meget lave koncentrationer eller under detektionsgrænsen.	Afsmitning af Zn, Mo, Cd, Se og Sn, som alle er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Zimmermann <i>et al.</i> , 2013
CIGS	Pb, Cd, Ag, Te, Se, In, Ga	Solcellerne er pulveriserede til forsøget. Lavt mineraliseret vand (pH= 8.4): Pb, Cd, Se, In, Ga udvasket.	Afsmitning af Pb, Cd og Se, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Zapf-Gottwick <i>et al.</i> , 2015.
CIGS	Pb	Pb udvasket ved brand.	Afsmitning af Pb, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Conings <i>et al.</i> , 2019
Ag-OPV	Ag og Zn	Ag og Zn udvasket ved forsøg med regn på beskadigede og opskårne solceller med vandindtrængen.	Afsmitning af Ag og Zn, som begge er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Espinosa <i>et al.</i> , 2016
C-OPV	Ag og Zn	Zn udvasket ved forsøg med regn på beskadigede og opskårne solceller, med vandindtrængen.	Afsmitning af Zn, som er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Espinosa <i>et al.</i> , 2016

Solcelletype	Stoffer undersøgt for afsmitning	Resultat	Afsmitning af kan- didatlistede stoffer eller stoffer med fastsat MKK	Kilde
OPV (uspecifiseret)	Al, Zn, Se, Mo, Cd, Ti, Cu, Ga, As, Ag, In, Sn, Sb, Pb	Udskårne solcelle fragmenter, omrystet i forsøg. Simuleret surt regnvand (pH=5): Zn og Ag udvasket. Al, Ti, Cu, Ga, As, Se, Mo, Cd, In, Sn, Sb, Pb udvasket i meget lave koncentrationer eller under detektionsgrænsen. Simuleret ferskvand (pH=8,6): Al, Zn, Ag udvasket. Ti, Cu, Ga, As, Se, Mo, Cd, In, Sn, Sb, Pb <0.7 udvasket i meget lave koncentrationer eller under detektionsgrænsen.	Afsmitning af Zn og Ag, som begge er miljøfarlige forurenende stoffer med fastsat MKK	Zimmermann <i>et al.</i> , 2013
Transformatorolie	Organiske stoffer	Organiske stoffer, målt i ekstraktionsvæsken: Flygtige kulbrinter, C ₆ -C ₁₀ Lette kulbrinter, C ₁₀ -C ₂₅ Tunge kulbrinter, C ₂₅ -C ₃₅ Identificerede stoffer: BHT (butylated hydroxytoluene)	-	Ramsay, 2021

6.2.3 Aktiviteter og afsmitning til miljøet i anlægsfasen ifølge danske VVM-undersøgelser

Et landbaseret solcelleanlæg består af solcellepaneler samt transformatorer. Solcellepanelerne monteres på stativer, som anbringes på ikke-befæstede arealer. De typiske anlægsdele består af stål (stativer til montering), monokrystallinske siliciumsolceller lamineret mellem et eller to glas hærdede glas, aluminiumsramme, lamineringsplastmaterialer PP, POE, EVA og PVC samt kobbertråd belagt med blanding af sølv, bly og tin.

I anlægsfasen opstilles solcellepanelerne, transformerstation samt evt. mindre bygninger, og der etableres veje, beplantninger og hegn i området, som bevirker øget trafik, gravearbejde samt påfyldning af transformatorolie (VVM-rapporter bl.a. LE34 (2023)).

I VVM-rapporterne vurderes det generelt, at der normalt ikke er afsmitning til miljøet under anlægsfasen, dog kan håndtering af olie medføre spild. Det forventes, at der i forbindelse med håndtering af olie vil være tilsyn, og at afværgeforanstaltning straks kan iværksættes. Der er ikke fundet kilder, der beskriver den faktiske afsmitning til miljøet fra anlægsfasen af solcelleanlæg.

6.2.4 Afsmitning til miljøet i driftsfasen ifølge danske VVM-undersøgelser

VVM-rapporterne giver et udtryk for almindelig praksis, og generelt i VVM-rapporterne nævnes følgende forhold, hvor afsmitning til miljøet udelukkes:

- Der anvendes ikke rengøringsmidler til rengøring af solcellerne, udelukkende regnvand eller kalkfrit vand – dog med enkelte undtagelser, hvor miljøgodkendt sæbe vil blive anvendt

- Regnvand, som falder på arealerne, vil nedsives i jorden. Der afvaskes ikke stoffer fra anlæggene, der kan påvirke overfladevand, søer og vådområder
- Der er ikke udledning af stoffer fra anlæggene til grundvand, søer, moser eller andet natur
- Der anvendes ikke pesticider eller gødning på arealerne.

Herudover nævnes i VVM-rapporterne forhold, som kan give anledning til afsmitning til miljøet:

- Brug af varmgalvaniserede stålstativer, der rammes direkte i jorden uden fundament
- Solcelleglas coatede med titanium oxid for at mindske refleksion
- Solcelleglas coatede med grafen (nanomateriale bestående af kulstofatomer) for at mindske tilsmudsning
- Overfladebehandling af bagsidefolien af solceller med indhold af fluorpolymerer (PFAS)
- Lækage eller spild af transformerolie, der anvendes i olieledede komponenter i transformatorstationer
- Metallegeringer og kabler med indhold af kobber, sølv, bly og tin.

Ovenstående, som forventes at beskrive den normale praksis for drift af solcelleanlæg i Danmark, er baseret på beskrivelse af den planlagte drift af solcelleanlæg, som er beskrevet i VVM-rapporterne forud for et projekt. Forhold med potentiel afsmitning til miljøet er videre beskrevet i VVM-rapporterne og gennemgået herunder.

Ifølge Teknologisk Institut (2019) refereret i flere VVM-rapporter kan der ske en langsom forvitring af ståloverfladen på de varmgalvaniserede stålstativer, hvorved zink frigives til jorden. Zinklaget på stålpælene er dog meget tyndt, og typisk vil der være mindre end 1 g zink per m² ståloverflade. Bidraget af zink fra det nedrammede galvaniserede stål til jordens indhold af zink anses som uvæsentlig i forhold til det naturlige baggrunds niveau af zink i jorden (typisk mellem 10 og 300 g per m²). Der vil således være en lille teoretisk risiko for, at zinklaget på stålpælene frigøres over tid, men dette sker i ubetydelige små mængder (Cowi 2021).

Solcelleglassets coating med titaniumoxid og grafen vil kunne vaskes/slides af, men kun i ubetydelige mængder. Generelt for titaniumoxid og grafen betragtes risikoen for nedsivning til grundvandet som meget lille, idet disse stoffer i praksis ikke er opløselige i vand, og derfor er risikoen for påvirkning af grundvandet ubetydelig (Cowi 2021).

Bagsiden af solcellerne kan være overfladebehandlet med fluorpolymerer, hvoraf nogle er PFAS. Der findes overordnet to forskellige bagsidefolier - dem, som består af fluorpolymererne (syntetisk kulstofbaseret plast) som f.eks. PVF (polyvinylfluorid) og PVDF (polyvinylidenfluorid), og dem uden fluorpolymerer (Velas 2023). Består solcelleanlæggets komponenter af polymermateriale af typen fluorpolymer vurderes risiko for forurening af overfladevand og grundvand ikke at være til stede. Men i tilfælde, hvor der anvendes funktionelle fluorpolymerer klassificeret som PFAS⁶, så vurderes en afgivelse og afsmitning til miljøet over tid at kunne udgøre en risiko (WSP 2024).

Der vurderes ikke at være risiko for udvaskning af miljøfremmede stoffer, hvis der vælges bifaciale solcellemoduler, da disse består af glas på både for- og bagside i forhold til monofaciale, hvor der sidder en bagsidefolie, der eventuelt kan indeholde stoffer såsom PFAS. Ved valg af bifaciale solcellemoduler vil der derfor ikke være denne risiko (LE34 2023).

Lækage eller spild af olie fra transformere vurderes generelt i VVM-rapporterne at være minimal, idet olien ikke skal udskiftes og transformerne er hermetisk lukkede. Foranstaltninger for

⁶ Funktionelle fluorpolymerer klassificeret som PFAS er gruppen af sulfonsyrer og carboxylsyrer f.eks. PFOS og PFOA

spild tages dog ved f.eks. olieopsamlingskar, sandfang og olieudskiller samt tilkoblet alarmsystem. Der er eksempler på, at olien skal udskiftes eller renses f.eks. efter 10 års drift (Cowi 2021, LE34 2023), og at denne olie kan være PCB-holdig (Velas 2023).

Solcellerne indeholder kobber, sølv, bly og tin, der forekommer i metallisk form, og som er indesluttet i elektriske komponenter placeret beskyttet inde i solcellekonstruktionen. Herudover findes kobber i kabelføringer. Disse metaller er alle beskyttet mod nedbrydning og afgivelse af stof til omgivelserne under normale forhold. Teknologisk Institut har redegjort for potentiel afsmitning – er omtalt nedenfor (Teknologisk Institut 2019). Kun under ugunstige forhold som brand eller knuste solceller, kan metallerne blottægges og der derved kan være en risiko for udvaskning. Det laminerede glas er beskyttet mod stenslag og anden kraftpåvirkning, så det ikke umiddelbart falder fra hinanden (LE43 2022, WSP 2024).

Oplysninger om potentiel og teoretisk afsmitning fra driftsfasen fremgår af VVM-rapporterne, mens der peges på meget få kilder med redegørelser og/eller undersøgelse af afsmitning til miljøet for driftsfasen af solcelleanlæg. I VVM-rapporterne henvises til følgende kilder:

Teknologisk Institut (TI) (2019) har udarbejdet en udredning med risikovurdering i forhold til mulig påvirkning af jordbund og grundvand med uønskede stoffer fra solcelleanlæg. TI redegør for indhold af en række stoffer som sølv, bly og tin, der forekommer i metallisk form og indesluttet i elektriske komponenter placeret beskyttet inde i solcellekonstruktionen samt kobber i metallisk form, som ud over anvendelse i de elektriske kredsløb også findes anvendt i kabelføringer. Ifølge TI er disse metaller beskyttet mod nedbrydning og afgivelse til omgivelserne. Så samlet set vurderer TI, at der ikke er nogen risiko for betydelig afgivelse af metallerne fra de anvendte materialer i et solcelleanlæg med tilhørende anlæg for kobling og transport af effekt til hovedledningsnettet.

Aarhus Kommune Grundvandsbeskyttelse har arbejdet med potentiel afsmitning fra solceller siden 2022 og har undersøgt, om solcelleanlæg udgør en risiko for grundvand (Svendsen & Ladekarl, 2024). De har gennemgået tilgængelige kilder og konklusionen, som præsenteret ved Natur- & Miljø Konference 2024, er udelukkende baseret på en gennemgang af opbygningen af solceller (glasmatrice, coating, celleindkapslingsmateriale, elektroniske dele, plastbagside, modulramme, stativ, junction-bokse, invertere, kabler og transformerstationer). Der henvises ikke til konkrete studier med information om afsmitning fra solcellepaneler. Konklusionen peger på krav, der bør håndhæves i forbindelse med opstilling af solcelleanlæg og vedrører indretning og vedligeholdelse af anlæg samt krav om dokumentation for, at der ikke er PFAS i panelerne.

Mulig udvaskning af PFAS-stoffer fra solcellepaneler er undersøgt af IPU (Ravn & Tang, 2022) på foranledning fra European Energy i forbindelse med etablering af en solcellepark på et område med drikkevandsindvinding på Bornholm. Undersøgelsen er udelukkende teoretisk med fokus på anvendelsen af PFAS-stoffer i fremstilling af solceller og konkluderer, at der ikke er noget, som tyder på, at de undersøgte solcellepaneler (Longi LR5-72HBD, Hi-MO 5 fra Longi Green Energy Technology Co. Ltd, Kina) indeholder PFAS-stoffer, der kan udvaskes.

Ramsay (2021) har for European Energy udarbejdet et notat til belysning af risikoen for grundvandsforurening ved etablering, drift og afvikling af en solcellepark. Potentielle risici er identificeret, og fire forhold alle med lav risiko er undersøgt nærmere med empiriske målinger. Disse omhandler udslip af transformerolie eller afsmitning fra hele/knuste solcelle-paneler. I forhold til transformerolie nævner notatet, at mineralolie er mest udbredt, men at der findes alternativer, som er nedbrydelige biobaserede olietyper. Potentiel udvaskning til grundvand ved spild eller lækage for disse to typer er undersøgt (se TABEL 5). Udvasning af flygtige kulbrinter C₆-C₁₀, lette kulbrinter C₁₀-C₂₅ og tunge kulbrinter C₂₂-C₃₅ er målt og viser udvaskning af især de lette kulbrinter. Ved GC/MS-analyse på den vandopløselige del er der kun identificeret ét stof,

BHT (butyleret hydroxytoluen), som er mistænkt for at være hormonforstyrrende og har en kronisk giftighed i vandmiljøet (Aquatic chronic 1; H410). Det bemærkes, at væsker med PCB ikke længere anvendes i transformatorerne. Potentielt afsmittning af metaller er undersøgt for knuste frontglas med forskellige overfladebehandling samt for et helt solcellepanel. Der er potentielt afsmittning af antimon, bly, bor og zink, for hvilke der er fastsat miljøkvalitetskrav. For et helt knust solcellepanel er der potentielt afsmittning af antimon, bly, zink, kobber og sølv, der er miljøfarlige forurenende stoffer med et fastsat miljøkvalitetskriterie. Udvaskning af organiske stoffer fra det knuste solcellepanel er desuden undersøgt, og her er fundet udvaskning af flygtige kulbrinter C₆-C₁₀, lette kulbrinter C₁₀-C₂₅ og tunge kulbrinter C₂₂-C₃₅ (se TABEL 5). De dominerende stoffer, der blev udvasket var 1-ethyl-1 hexanol, okta-decenamid samt decanedioic acid, bis(2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidinyl) ester. Det sidstnævnte stof er mistænkt for at være reprotoksisk (Repr. 2; H361f) og for at være akut og kronisk giftig i vandmiljøet (Aquatic Acute 1; H400, Aquatic chronic 2; H411). Klassificeringer er hentet fra C&L-fortegnelsen på ECHA's hjemmeside⁷.

6.2.5 Opsamling på afsmittning fra solcelleanlæg

Afsmittning til miljøet i anlægs- og driftsfasen af solcelleanlæg er beskrevet og vurderet ifølge danske VVM-undersøgelser forud for etablering af de landbaserede solcelleanlæg.

Der er ikke fundet kilder, der beskriver den faktiske afsmittning til miljøet fra anlægsfasen af solcelleanlæg. Det nævnes, at håndtering af olie i anlægsfasen kan medføre spild, men at der vil være tilsyn og afværgeforanstaltninger, der hindrer eller mindsker spildet.

Oplysninger om potentiel og teoretisk afsmittning fra driftsfasen fremgår af VVM-rapporterne og her nævnes potentiel afsmittning af zink, kobber, sølv, bly, tin, titaniumoxid, grafen, PFAS-stoffer og transformerolie. VVM-rapporterne peger på de få kilder med redegørelser og/eller undersøgelse af afsmittning til miljøet for driftsfasen af solcelleanlæg. Heriblandt vurderes det, at ubetydelige mængder af de nævnte stoffer zink, kobber, sølv, bly og tin, titaniumoxid og grafen frigives og derved, at risiko for påvirkning af overfladevand og grundvand er ubetydelig. Det nævnes, at kun under ugunstige forhold som brand eller knuste solceller, kan metallerne blotlægges og at der derved kan være en risiko for udvaskning. Det vurderes desuden i VVM-rapporterne, at afgivelse af funktionelle fluorpolymerer klassificeret som PFAS over tid vil kunne udgøre en risiko ved afsmittning til miljøet, mens risiko for forurening af overfladevand og grundvand vurderes ikke at være til stede for polymermateriale som PVDF. For transformerolie er den vandopløselige fraktion undersøgt, og her vurderes der at være potential afsmittning af især de lette kulbrinter i tilfælde af spild af transformerolien.

De tre undersøgelser, der er fundet i litteraturen vedrørende afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra intakte solcellepaneler, tyder på, at der kan ske afsmittning af metaller herunder tungmetaller under driftsfasen for c-Si og perovskit solcelletyper. Ifølge Espinosa *et al.* (2016) som har undersøgt afsmittning fra polymere solceller af typen Ag-OPV, sker der udelukkende afsmittning fra ikke-intakte solceller. Tabellen nedenfor viser hvilke metaller, som er detekteret i udvaskning fra intakte solceller.

TABEL 6. Oversigt over stoffer med fastsat MKK målt i udvaskning fra intakte solceller.

Solcelletype	Stoffer med fastsat MKK målt i udvaskning fra intakte solceller
Krystallinsk Silicium (c-Si)	Ba, Ni, Se, Sr
Polymere solceller, Ag-OPV	-

⁷ <https://echa.europa.eu/da/information-on-chemicals/cl-inventory-database>

Solcelletype	Stoffer med fastsat MKK målt i udvaskning fra intakte solceller
Perovskit	As, Cu, Pb

For solceller, hvor afsmitningen er undersøgt for ikke-intakte celler, er der tegn på, at der kan ske afsmitning af en række metaller herunder tungmetaller under driftsfasen for alle typer af solceller. Tabellen nedenfor viser en oversigt over metaller med et fastsat miljøkvalitetskrav, og som er detekteret i udvaskning fra ikke-intakte solceller.

TABEL 7. Oversigt over stoffer med fastsat MKK målt i udvaskning fra ikke-intakte solceller.

Solcelletype	Stoffer med fastsat MKK målt i udvaskning fra ikke-intakte solceller
Amorft Silicium (a-Si)	Ag, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Zn
Krystallinsk Silicium (c-Si)	Ag, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Zn
Silicium Uspecificeret	Ag, B, Cu, Fe, Pb, Sb, Zn
Cadmium Tellur (CdTe)	Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, Zn
Kobber indium diselenide (CIS)	Cd, Cu, Mo, Se, Zn
Kobber indium gallium diselenide (CIGS)	Ag, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, Zn
Polymere solceller, Ag-OPV	Ag, Zn
Polymere solceller, C-OPV	Zn

Ved undersøgelse af afsmitning af organiske stoffer er der desuden målt afsmitning af lette og tunge kulbrinter fra et uspecificeret silicium solcellepanel (Ramsay 2021).

6.3 Typer af onshore vindmøller

Hovedproducenterne af onshore vindmøller i Danmark i dag er Vestas og Siemens Gamesa. Vindmøllertyper varierer i antal vinger på møllen, vingernes retning (vertikal og horisontal akse) samt anden opbygning af vindmøllen. Den mest udbredte vindmølle i Danmark og resten af verden er den 3-vingede horisontalakslede vindmølle (Energistyrelsen, 2024).

For at opnå en større genanvendelighed af vindmøllevinger, som består af uopløselige kompositmaterialer (blanding af træ, resin og glasfibre) udvikles nye typer materialer, som kan opløses f.eks. ved aktivering med eddikesyre (Siemens Gamesa). Den genanvendelige løsning er klar til brug både til offshore og onshore vindmølleprojekter (VidenOmVind 2024).

6.4 Afsmitning fra vindmøller

Litteratursøgningen forholder sig udelukkende til potentiel afsmitning af stoffer og ikke til størrelsen af afsmitningen og dermed ikke til, om afsmitningen giver anledning til overskridelse af miljøkvalitetskrav eller i øvrigt påvirker den kemiske tilstand i miljøet.

Litteratursøgningen vedrørende afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller, gav begrænsede resultater. Der er alene fundet frem til to studier. Det meste af litteraturen vedrørende afsmitning fra vindmøller er for offshore vindmøller. Ved kontakt til DTU WIND Institut for Vind og Energisystemer, er det blevet oplyst, at vindmøller til offshore brug har andre overfladebehandlinger end landbaserede vindmøller (Ignacio Martí, divisionschefen for Materialer og Komponenter, personlig kommunikation, 10. oktober 2024). Derfor er litteratur for offshore-vindmøller ikke medtaget. Litteraturgennemgangen viser desuden, at der er væsentlig fokus på mikroplast, støjforurening og påvirkning af fugle ved onshore vindmølleanlæg.

TABEL 8. Resultater fundet for afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra vindmøller fra litteratursøgning i Google Scholar, DTU Orbit og ScienceDirect.

Vindmølle	Stoffer undersøgt	Forsøg	Resultat	Kilde
Ikke-intakte/opskåret vindmøllevinge Fra vindmølleproducenter, og affaldsdeponier (ikke specificeret om landbase-ret)	Bisphenol A (BPA), PFAS	Laboratorieforsøg, tankudvaskningstest	Målte udvaskede mængder af PFAS er meget små og med meget stor usikkerhed. Afsmitning af BPA er målt.	MST, 2023
Vindmøllepark Anlægs- og driftsfase	Ag, As, Ba, Bi, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, La, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Pr, Rb, S, Sb, Se, Sn, Sr, Ta, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr.	Fuldskalaforsøg. Jordmålinger i og uden for vindmøllepark	Co 1-4 gange højere i vindmølleparken, og Ti 1-10 gange højere end uden for vindmølleparken. For resten af stofferne er forskelle mellem i og uden for vindmølleparken minimale.	Luo <i>et al.</i> , 2021

Litteraturen viser, at der for landbaserede vindmøller kan være afsmitning af følgende kandidatlistede stoffer og stoffer med fastsat MKK: PFAS-stoffer, bisphenol A og kobolt. Observationerne i de to studier er yderligere diskuteret nedenfor.

Miljøstyrelsen udgav i 2023 rapporten *Screeningsundersøgelse af udvaskning fra vindmøllevinger*, med undersøgelser udført af Danish Waste Solutions. Rapporten fokuserer på PFAS og Bisphenol A (BPA). Som en del af rapporten er tankudvaskningstest og batchtest udført på dele af vindmøllevinger. Da batch-test benytter knuste vindmøller, findes resultaterne fra tankudvaskningstestene, der bruger skårede vindmølledele, mest relevant for at kunne konkludere noget om potentiel afsmitning. Der gøres opmærksomt på, at der for studiet ikke er tale om en undersøgelse af anlægs- eller driftsfasen. Resultaterne af studiet er præsenteret i TABEL 8. På baggrund af udvaskningstestene konkluderes følgende (MST 2023):

"På det foreliggende grundlag, som må betegnes som en screeningsundersøgelse, kan det konstateres, at der sandsynligvis kan udvaskes BPA fra vindmøllevinger. Derudover kan det ikke udelukkes, at der efter deponering kan udvaskes kvantificerbare mængder PFAS fra vindmøllevingeaffald, især efter knusning. De målte niveauer er meget lave, og forfatterne vurderer ikke, at de vil kunne bidrage synligt til den samlede PFAS-udvaskning observeret i perkolat fra deponeringsanlæg, som generelt er flere størrelsesordener højere."

Studiet undersøgte afsmitning af hhv. 22 og 35 PFAS-forbindelser (i hhv. to forskellige laboratorier) og BPA. Tanktestene er blevet udført på vinger fra deponi, affaldsbehandlingsvirksomheder og producent. Det er ikke specificeret, om der er tale om offshore eller landbaserede vindmøller. Derfor er der tvivl om, data er repræsentative for onshore vindmøller, og det vurderes derfor, at der ikke er tilstrækkelige oplysninger til at konkludere, om afsmitningen er potentiel for onshore vindmøller. PFBA, PFBS, PFOS og to "next generation" PFAS er detekteret i nogle af prøverne. 6:2 FTS, er detekteret i nogle af prøverne men med stor usikkerhed tilknyttet. Herudover har det ene laboratorium målt koncentrationer af FOSAA og MeFOSAA i en enkelt prøve. BPA er målt i alle udvaskningstestene. Litteratursøgningen i studiet gav ikke brugbare informationer, og det blev konkluderet, at der ikke findes danske eller udenlandske data på udvaskning fra deponerede vindmøllevinger eller glasfiberkompositter (MST 2023). Det skal også noteres, at der er screenet for PFAS stoffer på overfladen af vindmøller, da det er den største flade med potentiale for afsmitning. Studiet undersøger ikke afsmitning af PFAS fra andre komponenter i vindmøllen.

Fuldskalastudiet med jordmålinger i og uden for en vindmøllepark er et kinesisk studie (Luo *et al.*, 2021). Det har ikke været muligt at vurdere relevansen af studiet i forhold til danske forhold.

6.4.1 Aktiviteter og afsmitning til miljøet i anlægsfasen ifølge danske VVM-undersøgelser

Aktiviteter i anlægsfasen omfatter etablering af veje, evt. grundvandssænkning i forbindelse med udgravning til vindmøllefundament, støbning af fundament med armeret beton, levering og opsætning af vindmølle, kabelarbejde, evt. etablering af transformerstation, (VVM-rapporter bl.a. PlanEnergi 2020). Herudover kan der være nedtagning af tidligere og udtjente vindmøller. En midlertidig grundvandssænkning i anlægsfasen forud for støbning af fundamenter, vurderes til at give anledning til en midlertidig påvirkning af vandstanden i nærliggende vandhuller og hydraulikken i nærliggende grøfter og vandløb.

Der kan forekomme spild af olie eller andre kemikalier under opsætning af en vindmølle, som potentielt kan være en risiko til forurening af grund- og overfladevand. Risikoen afhænger bl.a. af geologiske og topografiske forhold samt nærhed til vådområder, og er derfor af betydning bl.a. i forhold til drikkevandsinteresser (PlanEnergi 2014). Risikoen for spild og udslip af olie eller diesel fra arbejdsmaskiner og kraner i anlægsfasen er vurderet at være lille. Ved et eventuelt spild kan der hurtigt etableres afværgeforanstaltninger i form af for eksempel afgravning af det øverste jordlag (PlanEnergi 2015, PlanEnergi 2020 m. flere). Det oplyses desuden, at olie og øvrige kemikalier opbevares i containere eller udendørs stående i spildbakker (WSP 2022).

Oplysninger om potentiel afsmitning fra anlægsfasen er hentet i miljøkonsekvensrapporterne, som er udarbejdet i forbindelse med ansøgning om tilladelse til anlægsprojekter. Der er således ikke fundet oplysninger, om der faktisk er sket afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra anlæggelsen af vindmølleanlæg. Der er ved litteratursøgningen ikke fundet andre kilder til information om afsmitning fra anlægsfasen.

6.4.2 Afsmitning til miljøet i driftsfasen ifølge danske VVM-undersøgelser

Vindmøller indeholder forskellige væsker med forskellige formål: Gearolie, hydraulikvæske, kølevæsker samt transformeroie og der er tale om flere hundrede liter af hver type (bl.a. PlanEnergi 2015). Herudover anvendes mindre mængder af fedt og smøremidler samt rengøringsmidler i møllerne (WSP 2022).

Generelt i VVM-rapporterne angives det, at der er potentiel afsmitning til miljøet fra:

- Spild eller udslip f.eks. ved servicering af vindmøllen
- uheld med sprængte olie- eller hydraulikslanger og -rør samt ødelagte pakninger
- kabelskader
- væltet vindmølle.

Der er en række indretninger, forebyggende foranstaltninger og afværgeforanstaltninger, som skal forhindre eller mindske spild og dermed afsmitning til miljøet under almindelig drift af en vindmølle:

- Opsamlingssystemer, opsamlingskar
- udstyr til opsamling af eventuelle spild
- tryk- eller niveaufølere
- alarmer, så et eventuelt spild straks opdages
- beredskabsplan, rutiner for servicering.

Olie- eller kemikaliespild opsamles i nacellen, og ledes ned til opsamlingsbakker i bunden af mølletårnet. Ved eftersyn og service i driftsfasen returneres eventuelt brugt olie og opsamlet, spildt olie til mølleproducenten eller direkte til godkendt aftager. Evt. vaskevand fra vindmøllerne bliver opsamlet og håndteret som spildevand, der bortskaffes efter gældende regler (PlanEnergi 2015, Orbicon 2019, WSP 2022).

Generelt vurderes det i VVM-rapporterne, at der kun er minimal risiko for forurening af jord eller grundvand som følge af aktiviteter under såvel anlægs- som drifts- og nedtagningsfase for møllerne.

Ligesom for anlægsfasen er oplysningerne for driftsfasen hentet i miljøkonsekvensrapporterne udarbejdet i forbindelse med ansøgning om tilladelse til anlægsprojekterne. Der er således ikke fundet oplysninger, om der faktisk er sket afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra driften af vindmølle anlæg.

6.4.3 Opsamling på afsmitning fra vindmøller

Afsmitning til miljøet i anlægs- og driftsfasen af vindmøller på land er beskrevet og vurderet i danske VVM-undersøgelser forud for etablering af vindmølle anlæg. Afsmitning fra aktiviteter i anlægsfasen samt fra driftsfasen vurderes i miljøkonsekvensrapporterne at kunne ske udelukkende i forbindelse med spild eller uheld, hvor der kan spildes olie eller kemikalier. Både for anlægsfasen og driftsfasen vil forbyggende foranstaltninger samt afværgeforanstaltninger forhindre eller mindske spild og dermed afsmitning til miljøet.

Der er ikke fundet kilder, der beskriver den faktiske afsmitning til miljøet fra anlægsfasen. For driftsfasen af vindmølle anlæg gav litteratursøgningen på afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller meget begrænsede resultater. Afsmitning af PFAS-stoffer fra vindmøllevinger er undersøgt og undersøgelsen peger på, at en afsmitning af PFAS ikke kan udelukkes, men det er tvivlsomt, om resultaterne er repræsentative for landbaserede vindmøller under normale forhold.

Der er i to studier identificeret afsmitning af PFAS-stoffer, bisphenol A og kobolt fra vindmøller. Bisphenol A er på kandidatlisten og har som kobolt et fastsat miljøkvalitetskrav.

6.5 Særligt problematiske stoffer i VE-anlæg

På baggrund af søgning i ECHA's database over stoffer i artikler samt i SCIP-databasen er det undersøgt om kandidatlistede stoffer forekommer i færdige solcellepaneler og vindmølle anlæg. Herudover er restriktionsforslaget for PFAS gennemgået med henblik på at undersøge om PFAS-forbindelser anvendes til fremstilling af VE-anlæg.

6.5.1 Kandidatlistede stoffer

Kemiske stoffer, der optræder på Kandidatlisten, er identificerede som særligt problematiske stoffer dvs. stoffer, som er klassificerede som værende enten kræftfremkaldende, reprotoxiske, mutagene eller være persistente, bioakkumulerbare og meget giftige i miljøet.

I forbindelse med krav om anmeldelse af særligt problematiske stoffer i artikler under den europæiske kemikaliereregulering REACH (Forordning (EF) Nr. 1907/2006) har ECHA i 2019 offentliggjort en rapport over indkommende anmeldelser. Anmeldelserne er foretaget af importører og producenter af artikler. Rapporten bliver ikke opdateret, idet brugen af særligt problematiske stoffer i artikler forventes omfattet alene af registreringen efter den sidste frist for registrering i 2018.

Nedenstående tabel viser oversigt over stoffer, der forekommer i artikler relateret til VE-anlæg, idet det bemærkes, at potentialet for afsmitning af disse stoffer ikke kendes. Det bemærkes, at selvom stofferne forekommer i dele af solcellepanelerne og vindmølle anlæg, er potentialet for afsmitning af disse stoffer ikke undersøgt.

TABEL 9. Særligt problematiske stoffer, der forekommer i artikler relateret til VE-anlæg (ECHA, 2019)

Anvendelse	Artikelkategori	Stofnavn	CAS nr.	EC. Nr.
Solcellemoduler PV moduler Solcellepaneler	-	Bly	7439-92-1	231-100-4
	Elektriske batterier og akkumulatorer	Cadmiumklorid	10108-64-2	233-296-7
	Elektriske og elektroniske komponenter/produkter			
	-	Cadmiumsulfid	1306-23-6	215-147-8

Siden januar 2021 har det været et krav i affaldsrammedirektivet, at virksomheder, der markedsfører artikler med indhold af kandidatlistede stoffer i en koncentration på over 0,1 vægtprocent, skal indberette oplysninger om disse artikler i SCIP-databasen. Indhold af kandidatlistede stoffer skal angives for hele artiklens livscyklus dvs. for hver enkel delartikel med indhold af kandidatlistede stoffer samt for den komplekse artikel sammensat af flere artikler. Det er op til virksomhederne at levere tilstrækkelige oplysninger, så artiklerne vil kunne identificeres i en affaldssituation.

Nedenstående tabel viser resultatet af søgning i SCIP-databasen med angivelse af artikelkategori oplyst af virksomheder. Der er udelukkende søgt på overordnede termer på engelsk for solcellepaneler og vindmøller (Se Bilag 1). Det bemærkes, at selvom stofferne forekommer i dele af solcellepanelerne og vindmølle anlæg, er potentialet for afsmittning af disse stoffer ikke undersøgt i forbindelse med indberetningen til SCIP-databasen.

Det er angivet med fed skrift i tabellen, hvilke stoffer der er fundet undersøgelser på i denne litteratursøgning.

TABEL 10. Særligt problematiske stoffer, der forekommer i artikler relateret til VE-anlæg. Baseret på indmeldelser i SCIP-databasen (ECHA, 2024). Stoffer er angivet med fed skrift, hvis der er fundet studier af afsmittning fra VE-anlæg.

Anvendelse	Artikel kategori	Stofnavn	CAS nr.	EC. Nr.
Solcellepaneler	Batteri	1, 2-dimethoxyethane (EGDME)	110-71-4	203-794-9
Solcellepaneler	Lysdiode	1,3,5-Tris(oxiran-2-ylmethyl)-1,3,5-triazinane-2,4,6-trione (TGIC)	2451-62-9	219-514-3
Solcellepaneler	Solcellevinger	2-methylimidazole	693-98-1	211-765-7
Solcellepaneler	Foldbare solpaneler, knæbeskyttelse	Alkaner, C14-17, chlor	85535-85-9	287-477-0
Solcellepaneler	CU-film Diode Leder Messingdele Metal dele Solcellebånd Transformer	Bly	7439-92-1	231-100-4
Solcellepaneler	Ikke angivet	Cadmium	7440-43-9	231-152-8

Anvendelse	Artikel kategori	Stofnavn	CAS nr.	EC. Nr.
Solcellepaneler	Lysdiode	Hexahydromethylphthalic anhydrid	25550-51-0	247-094-1
Solcellepaneler	Solcellevinger	Kalium 1,1,2,2,3,3,4,4,4-nonaf-luorobutane-1-sulfonat	15120-21-5	239-172-9
Solcellepaneler	Plastkabinet	Natrium perborat	29420-49-3	249-616-3
Solcellepaneler	Plast/gummidele, solcellevinger	N,N-dimethylacetamid	127-19-5	204-826-4
Solcellepaneler	Film af sort plast	N,N-dimethylformamid	68-12-2	200-679-5
Solcellepaneler	Transformer	Octamethylcyclotetrasiloxan	556-67-2	209-136-7
Vindmølle (turbine og vinger)	Batteri Gearkasse Generator Kabel Klammer Konverter Skruforbindelser	Bly	7439-92-1	231-100-4
Vindmølle (turbine og vinger)	Spændemuffe	Imidazolidine-2-thione (2-imidazoline-2-thiol)	96-45-7	202-506-9
Vindmølle (turbine og vinger)	Bly-batteri	Svovlsyre, bly salt, dibasic	62229-08-7	263-467-1

6.5.2 PFAS-forbindelser

En gennemgang af forslag til restriktion af PFAS (Per- og polyfluoralkylstoffer) viser, at der anvendes PFAS i forbindelse med fremstilling af solceller og vindmøller samt som smøremiddel for vindmøller (ECHA, 2023). Tabellen nedenfor lister anvendelser af PFAS, som er relateret til VE-anlæg.

TABEL 11. PFAS med anvendelse relateret til VE-anlæg (ECHA, 2023)

Anlæg	Artikel kategori	Anvendelse	Funktion	Eksempel på PFAS
Solceller	For- og bagbeklædning, selvklæbende	Fastgørelse	Klæbemiddel	Ingen angivet
Solceller	Katode	Fastgørelse af katode	Klæbemiddel	Ingen angivet
Solceller	For- og bagbeklædning af PV-moduler	Film/coating, tape til beskyttelse af indre komponenter, specifikt solcellerne og elektriske komponenter mod eksterne belastninger.	Vandafvisende Elektrisk isolator Beskyttelse	PVDF, ETFE, FEVE, PFPE
Solcellepaneler	Ledninger og kabler	Lednings- og kabelisolering	Isolering	PVDF

Anlæg	Artikel kategori	Anvendelse	Funktion	Eksempel på PFAS
Flexible solcellepaneler	Arkitektoniske membraner, herunder fluoropolymerfilm (ETFE) og stoffer eller glasfiber belagt/lamineret med fluoropolymerer	Belægning/laminering	Holdbarhed	PTFE, ETFE, FEP, PVDF Non-polymeric PFASs e.g. PBSF
Solpaneler af glas eller ETFE		Overfladebelægning	Modstandsdygtighed over for vejrlig og regn	Polymer PFASs e.g. FEP fluoropolymer og silan/siloxan-baserede sidekædede fluorerede polymerer
Solpalleljer	Installation (Tracking system)			PTFE
Vindenergi	Møllevinger, Vindmølleårne	Beskyttelsesbelægning til vindmøllevinger (forhindrer fugt i luften i at påvirke hærdningsprocessen), vindmølleårne.	Film/belægning Vejrbestandighed	FEVE, ETFE, Perfluorobutane sulphonamide
Vindenergi	Vindmøllevinger	Overfladebeskyttende film/belægninger	Vejrbestandighed	Polymer PFAS: FEVE, ETFE Non-polymer PFASs: Perfluorobutane sulphonamides
Vindenergi	Vindturbiner	Anvendes som smøremidler/oilier/fedt		PTFE
Vindkraft	Lejer	Smøremiddel	Modstandsdygtighed ved høj temperatur; kemisk resistens	PTFE, PFPE
Vindkraft	Skruer, møtrikker, magnetiske ankre, bolte m.m.	Smøremiddel	Lav friktion; meget gode slidstyrke og tribologisk uerstattelige egenskaber	PFTE (0,25-25%)

I PFAS-restriktionsrapporten (ECHA 2023) er følgende noteret "Ifølge personlig kommunikation med Hempel bruges fluoropolymerer, så vidt de ved, ikke til overfladebehandling af vindmøllevinger i Danmark".

Lignende oplysninger findes i den danske presse, hvor vindmølleproducenten Siemens Gamesa i et citat skriver: "PFAS bruges ikke i vores produkter" og brancheorganisationen Green Power Denmark er citeret for at sige: "Vi har ikke oplysninger, der viser, at PFAS bruges i danske vindmøller". PFAS-restriktionsrapporten konkluderer på denne baggrund, at disse oplysninger, der involverer nogle af de største vindmølleproducenter i verden, viser, at der anvendes ikke-fluoropolymerbaseret belægning til vindmøllevinger i EØS.

7. Konklusioner

Rapportens konklusioner er baseret på resultatet af litteratursøgningen foretaget i projektet vedrørende eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg.

7.1 Afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra solceller og solpaneler

Der er ikke fundet kilder, der beskriver den faktiske afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer til miljøet fra anlægsfasen af solcelleanlæg. Under normale forhold i anlægsfasen af et solcelleanlæg er der ifølge oplysningerne indhentet fra miljøkonsekvensrapporter udarbejdet forud for anlæggelse af solcelleanlægget, ikke afsmitning til miljøet. Håndtering af olier f.eks. transformerolie kan dog medføre spild, men det forventes, at tilsyn og afværgeforanstaltninger er med til at undgå og mindske afsmitning til miljøet.

En oversigt over eksisterende viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra intakte og ikke-intakte solceller i driftsfasen er angivet i TABEL 12 og TABEL 13. Det skal noteres, at studierne ikke oplyser, hvorvidt afsmitningen af stofferne giver anledning til forurening i miljøet eller overskridelse af miljøkvalitetskrav og grænseværdier.

TABEL 12. Viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra intakte solceller i driftsfasen.

Solcelletype	Antal studier fra litteraturen	Stoffer undersøgt for udvaskning	Stoffer med fastsat MKK målt i udvaskning fra intakte solceller
Krystallinsk Silicium (c-Si)	1	Ba, Cd, Cu, Li, Ni, Pb, Se, Sr, Zn	Ba, Ni, Se, Sr
Polymere solceller, Ag-OPV	1	Ag, Zn	-
Perovskit	1	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb	As, Cu, Pb

TABEL 13. Viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra ikke-intakte solceller i driftsfasen.

Solcelletype	Antal studier fra litteraturen	Stoffer undersøgt for udvaskning Tal i parentes angiver antal studier, hvor stoffet er undersøgt	Stoffer med fastsat MKK målt i udvaskning fra ikke-intakte solceller. Tal i parentes angiver antal studier, hvor stoffet er målt
Amorft Silicium (a-Si)	4	Ag(3), Al(3), As(2), Ba(1), Cd(4), Cr(2), Cu(3), Fe(1), Ga(4), In(4), Mn(1), Mo(2), Ni(3), Pb(4), Sb(1), Se(3), Sn(1), Te(3), Zn(3)	Ag(3), Ba(1), Cd(1), Cr(2), Cu(3), Fe(1), Mn(1), Mo(1), Ni(3), Pb(3), Sb(1), Se(2), Sn(1), Zn(3)

Krystallinsk Silicium (c-Si)	5	Ag(4), Al(4), As(1), Ba(1), Cd(5), Cr(3), Cu(3), Fe(1), Ga(3), In(2), Mn(2), Mo(2), Ni(3), Pb(5), Sb(1), Se(4), Si(1), Sn(1), Te(3), Zn(4)	Ag(3), Ba(1), Cd(3), Cr(2), Cu(3), Fe(1), Mn(1), Mo(1), Ni(2), Pb(4), Sb(1), Se(1), Sn(1), Zn (1)
Silicium Uspecificeret	1	Ag, Al, B, Cu, Fe, Pb, Sb, Zn, organiske stoffer	Ag, B, Cu, Fe, Pb, Sb, Zn
Cadmium Tellur (CdTe)	8	Ag(2), Al(2), As(1), Ba(1), Cd(8), Cr(1), Cu(2), Ga(4), In(4), Mn(1), Mo(3), Ni(3), Pb(3), Sb(1), Se(4), Sn(1), Te(7), Zn(3)	Ba(1), Cd(8), Cr(1), Cu(1), Mn(1), Mo(2), Ni(2), Pb(2), Sn(1), Zn(1)
Kobber indium diselenide (CIS)	2	Cd(2), Cu(2), Ga(2), In(2), Mo(2), Ni(1), Se(2), Te(1), Zn(2)	Cd(2), Cu(2), Mo(2), Se(2), Zn(2)
Kobber indium gallium diselenide (CIGS)	7	Ag(4), Al(4), As(3), Ba(1), Cd(6), Cr(2), Cu(4), Fe(1), Ga(5), In(5), Mn(1), Mo(5), Ni(3), Pb(6), Sb(2), Se(6), Sn(2), Te(3), Ti(1), Zn(5)	Ag(1), As(1), Cd(6), Cr(1), Cu(3), Fe(1), Mo(5), Ni(2), Pb(4), Se(6), Sn(2), Zn(5)
Polymere solceller, Ag-OPV	1	Ag, Zn	Ag, Zn
Polymere solceller, C-OPV	1	Ag, Zn	Zn

Studier med afsmittning fra intakte solceller er sparsomme, men de viser, at der kan være afsmittning af de miljøfarlige forurenende stoffer Ba, Ni, Se og Sr, der har fastsatte miljøkvalitetskrav, fra krystallinske silicium solceller (c-Si), som er en af de mest anvendte typer i Danmark. For ikke-intakte solceller af de mest almindelige typer, krystallinske silicium (c-Si) og amorf silicium (a-Si) ses afsmittning af en lang række metaller, som alle er miljøfarlige forurenende stoffer med et fastlagt miljøkvalitetskrav (Ag, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn og Zn). Herudover er der målt afsmittning af bor samt lette og tunge kulbrinter fra et uspecificeret silicium solcellepanel.

For tyndfilmssolceller, som også er almindeligt anvendt, er der ikke undersøgelser med intakte solceller. Undersøgelser med ikke-intakte paneler af typerne Cadmium Tellur (CdTe), Kobber indium diselenide (CIS) og Kobber indium gallium diselenide (CIGS) viser potentiel afsmittning af en lang række metaller, som alle er miljøfarlige forurenende stoffer med et fastlagt miljøkvalitetskrav (Ag, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sn og Zn).

De nyere polymere solceller af typen AG-OPV er undersøgt, og her er der ikke fundet afsmittning fra intakte celler, kun fra ikke intakte paneler, hvor afsmittning af sølv og zink er set. For ikke-intakte solceller af typen C-OPV er afsmittning af zink set.

Undersøgelser med ikke-kommercielle perovskit solceller, der er intakte, viser afsmittning af arsen, kobber og bly, og det er netop indhold af opløselige, organiske blyforbindelser, der giver miljømæssige bekymringer, som står i vejen for en kommercialisering af denne type solceller (Danish Energy Agency, 2016).

Selvom der kan være en potentiel afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra intakte og ikke-intakte solceller, er det ikke sikkert, at afsmittningen vil føre til en forurening med stofferne i miljøet.

Ved en gennemgang af data med oplysninger om forekomst af særligt problematiske stoffer i VE-anlæg ses det ikke overraskende, at der anvendes bly og cadmiumforbindelser i solcellepaneler. Herudover anvendes der en række organiske stoffer, der er særligt problematiske, dels i elektriske komponenter dels i plast og gummideler. Der er ikke fundet viden om afsmittning af disse stoffer fra solcelleanlæg. Gennemgangen viser desuden, at der anvendes en række PFAS-stoffer i fremstillingen af solceller. Anvendelserne omfatter klæbemiddel, elektrisk

beskyttelse og isolering, laminering og overfladebehandling for bedre holdbarhed og beskyttelse mod vejrlig, og dermed angives forekomst af PFAS-stoffer i for- og bagbeklædning, ledninger og kabler og i overfladebelægninger på solceller. Afsmitning af PFAS fra solceller er undersøgt, og resultater tyder på meget lille afsmitning. Den mængde PFAS, der afvaskes, vurderes at være mange gange lavere end den målte deposition fra luften (våd og tør) samt mange gange lavere end den maksimalt tilladte mængde PFAS, der årligt må spredes med spildevandsslam på landbrugsjord. Det vurderes desuden i VVM-rapporterne, at afgivelse af funktionelle fluorpolymerer klassificeret som PFAS (sulfonsyrer og carboxylsyrer) over tid vil kunne udgøre en risiko ved afsmitning til miljøet, mens risiko for forurening af overfladevand og grundvand ikke vurderes at være til stede for polymermaterialer som PVDF.

7.2 Afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller

Der er ikke fundet kilder, der beskriver afsmitning til miljøet fra anlægsfasen af vindmøller på land. Afsmitning fra aktiviteter i anlægsfasen vurderes i miljøkonsekvensrapporterne, som er udarbejdet forud for anlægsfasen, at kunne ske udelukkende i forbindelse med spild eller uheld, hvor der kan spildes olie eller andre kemikalier. Der vil dog være forbyggende foranstaltninger samt afværgeforanstaltninger, der skal forhindre eller mindske spild og dermed afsmitning til miljøet.

En oversigt over eksisterende viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra landbaserede vindmøller er angivet i TABEL 14.

TABEL 14. Viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra landbaserede vindmøller.

Vindmølle	Stoffer undersøgt for udvaskning	Antal studier fra litteraturen	Potentiel afsmitning af kandidatlistede stoffer og stoffer med fastsat MKK
Vindmøllevinge ⁸	Bisphenol A (BPA), PFAS	1	Potentiel afsmitning af BPA Afsmitning af PFAS kan ikke udelukkes
Vindmøllepark	Ag, As, Ba, Bi, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, La, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Pr, Rb, S, Sb, Se, Sn, Sr, Ta, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr	1	Forhøjet koncentration af Co og Ti i jord under vindmøller. Ingen signifikant forskel for resten af stofferne

Vindmøller indeholder flere hundrede liter forskellige væsker (gearolie, hydraulikvæske, kølevæsker, transformatorolie), og i driftsfasen anvendes mindre mængder af fedt og smøremidler samt rengøringsmidler i møllerne. Det er ikke oplyst, om der anvendes kemikalier til vedligehold og reparationer. En række tiltag i form af indretning, forbyggende foranstaltninger og afværgeforanstaltninger skal forhindre eller mindske spild og dermed afsmitning til miljøet under almindelig drift af en vindmølle.

Gennemgang af EU-data fra SCIP-databasen med oplysninger om forekomst af særligt problematiske stoffer i vindmøller viser, at der anvendes bly og blyforbindelser i en række vindmølledele (batteri, gearkasse, generator, kabler m.m.). Herudover anvendes en række PFAS-stoffer og et organisk stof (Imidazolidine-2-thione). PFAS-stofferne anvendes som beskyttelsesbelægning på vinger og mølletårne samt som smøremiddel og er primært sulfonamider og fluorpolymere (FEVE, ETFE, PTFE, PFPE). Det er ikke oplyst om anvendelsen er til onshore og/eller offshore vindmøller samt om brugen af stoffer vedrører danske vindmøller.

⁸ Ikke specificeret om der er tale om landbaserede eller offshore vindmøllevinger.

For driftsfasen af vindmølle anlæg gav litteratursøgningen på afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller meget begrænsede resultater med kun to studier. Afsmittning af PFAS-stoffer fra opskårne vindmøllevinger er undersøgt i en screeningsundersøgelse. Selvom undersøgelsen peger på, at en afsmittning af PFAS ikke kan udelukkes, er det tvivlsomt om resultaterne er repræsentative for onshore vindmøller under normale driftsforhold. Afsmittning af bisphenol A er undersøgt i det samme studie, som viser potentiel afsmittning fra vindmøllevinger af bisphenol A, som er et særligt problematisk stof listet på kandidatlisten. I et studie fra Kina er der målt forhøjede koncentrationer af kobolt i jorden under en vindmøllepark. Kobolt er et stof med et fastsat miljøkvalitetskrav. Selvom der kan være en potentiel afsmittning af stoffer fra vindmøller, er det ikke sikkert, at afsmittningen vil føre til en forurening med stofferne i miljøet.

7.3 Manglende viden

Det er begrænset, hvad der eksisterer af viden om afsmittning fra især intakte VE-anlæg i drift under normale forhold – dels viden om afsmittning men også viden, der eventuelt kan udelukke afsmittning.

7.3.1 Begrænset viden om afsmittning fra nyere typer solcelleanlæg

Der er kun få undersøgelser tilgængelige for afsmittning fra de nyere typer, som omfatter monolitiske III-V solceller (CPV), perovskit solceller og polymere solceller (AG-OPV, C-OPV og Belectric OPV). For de nye typer, som er forskellige i opbygning og sammensætning i forhold til de eksisterende og udbredte typer, silicium-baserede solceller og tyndfilmsolceller, mangler der viden om afsmittning under intakte og ikke intakte forhold. Den tilgængelige viden om afsmittning af organiske stoffer for alle typer af solcelleanlæg, men særligt de nye polymere typer, er begrænset.

7.3.2 Begrænset viden om afsmittning af organiske stoffer for både solcelle- og vindmølle anlæg

For alle typer af solceller er der i litteraturen fokus på at undersøge afsmittning af metaller, mens undersøgelser af afsmittning af organiske stoffer er næsten fraværende. Afsmittning af organiske stoffer kan komme f.eks. fra solcellernes overfladebehandling, laminering, plastdele, elektroniske dele samt for- og/eller bagsidefolie. For vindmøllerne kan de organiske stoffer komme fra overfladebehandling af vinger og mølletårn samt fra smøremidler og rengøringsmidler. Til de organiske stoffer hører også PFAS-stofferne, som anvendes til flere formål både i solceller og vindmøller.

Den tilgængelige litteratur antyder, at afsmittning af PFAS fra solceller og vindmøller ikke er væsentlig. PFAS-stofferne er en stor og kompleks gruppe af stoffer, og selvom der er oplysninger om forekomst af stofferne i VE-anlæg, kendes afsmittningen ikke.

7.3.3 Begrænset viden om afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller

Litteratursøgningen vedrørende afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra onshore vindmøller, gav meget begrænsede resultater. Det vurderes umiddelbart, at der eksisterer mere viden om afsmittning for offshore vindmøller, som ifølge eksperter på området er forskellig fra onshore vindmøller. Dog vurderes det også, at dette primært er viden, som repræsenterer affaldsfasen, altså undersøgelser på knuste prøver af f.eks. vindmøllevinger. Der mangler viden om, hvorvidt der sker afsmittning til det omgivne miljø f.eks. fra olier, smøremidler og overfladebehandling af vinger og tårne under normal drift af vindmøller på land. Dette gælder for eksisterende vindmøller såvel som for nye typer vindmøller.

8. Referencer

- Allen, J. *et al.* (2010). Water Solubility of Cadmium Telluride in a Glass-to-Glass Sealed PV Module. *Biomater. Sci.* Tilgået: [Link](#)
- Baumann, A. E., Hynes, K. M. & Hill, R. (1995). An investigation of Cadmium telluride thin-film PV modules by impact pathway analysis. *Renewable Energy*, Vol. 6. No. 5, pp. 593-599, 1995.
- Brun, N. J., Wehrli, B. & Fent, K. (2016). Ecotoxicological assessment of solar cell leachates: Copper indium gallium selenide (CIGS) cells show higher activity than organic photovoltaic (OPV) cells. *Science of the Total Environment* 543, 703-714. [Link](#)
- Brown, F.C. *et al.* (2018). End-of-Life Heavy Metal Releases from Photovoltaic Panels and Quantum Dot Films: Hazardous Waste Concerns or Not? *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 6 (7), 9369-9374. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b01705
- Collins, M.K. & Ancil, A. (2015). Implications for current regulatory waste toxicity characterisation methods from analysing metal and metalloid leaching from photovoltaic modules. *International Journal of Sustainable Energy*. Volume 36 Issue 7. [Link](#)
- Conings, B. *et al.* (2019). Fire Safety of Lead Halide Perovskite Photovoltaics. *ACS Energy Letters* 2019 4 (4), 873-878 DOI: 10.1021/acsenenergylett.9b00546
- Cowi (2021). Miljøvurderingsrapport. Miljøvurdering af forslag til kommuneplantillæg nr. 5 og lokalplan nr. 1.7-1. Miljøkonsekvensvurdering (VVM) af ansøgt projekt. Solcelleanlæg ved Stevning, Better Energy A/S, Sønderborg Kommune. Juni 2021 (0471_solceller_Stevning)
- Danish Energy Agency (2016). Generation of Electricity and District Heating. Danish Energy Agency, 0015. Latest amendment April 2024. [Link](#)
- ECHA (2019). Data on Candidate List substances in articles. 18.12.2019.
- ECHA (2023). Annex to the Annex XV restriction report. Proposal for a restriction. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) Version number 2. 22.03.2023
- ECHA (2024). SCIP-databasen, tilgået på ECHA's website september 2024. [Link](#)
- Energistyrelsen (2024). Fakta om vindmøller på land, tilgået oktober 2024. [Link](#)
- Espinosa, N. *et al.* (2016). Outdoor fate and environmental impact of polymer solar cells through leaching and emission to rainwater and soil. *Energy Environ. Sci.*, 2016, 9, 1674. DOI: 10.1039/c6ee00578k
- Finke, A. *et al.* (1996). Leaching tests with thin film solar cells based on copper indium diselenide (CIS). *Chemosphere*. Volume 32 Issue 8. Page: 1633- 1641. [Link](#)
- Fthenakis, V. M. *et al.* (2005). Emissions and Encapsulation of Cadmium in CdTe PV Modules During Fires. *Progress in photovoltaics: Research and applications* 13:713-723

Hailegnaw, B. *et al.* (2015). Rain on Methylammonium Lead Iodide Based Perovskites: Possible Environmental Effects of Perovskite Solar Cell. *J Phys Chem Lett.* 2015 May 7;6(9):1543-7. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b00504

Jensen, A. R., Sifnaios, I., Caringal, G., Furbo, S., & Dragsted, J. (2022). Thermal Performance Assessment of the World's First Solar Thermal Fresnel Lens Collector Field. *Solar Energy*, 237, 447-455. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.01.067>

Jiang, Y. *et al.* (2019). Reduction of lead leakage from damaged lead halide perovskite solar modules using self-healing polymer-based encapsulation *Nature Energy* 4(7)
DOI:[10.1038/s41560-019-0406-2](https://doi.org/10.1038/s41560-019-0406-2)

Kilgo, M. K. *et al.* (2022). Metal leaching from Lithium-ion and Nickel-metal hydride batteries and photovoltaic modules in simulated landfill leachates and municipal solid waste materials. *Chemical Engineering Journal*. Volume 431. Part 2.
[Link](#)

Kwak, J. I. *et al.* (2020). Potential environmental risk of solar cells: Current knowledge and future challenges. *Journal of Hazardous Materials* Volume 392.

Kwak, J.I. *et al.* (2021). Comparative toxicity of potential leachates from perovskite and silicon solar cells in aquatic ecosystems. *Aquatic Toxicology*. Volume 237.

LE34 (2020). Miljøkonsekvensrapport. Belysning af de miljømæssige konsekvenser ved gennemførelse af ansøgning om udskiftning af vindmøller ved Hjortnæs, Hjørring Kommune. 30/6-2020.

LE34 (2022). Solcelleanlæg ved Hynding vest for Ravsted. Miljørapport og miljøkonsekvensrapport. Aabenraa Kommune og European Energi. LE34 (ABP, MSC), Rambøll, Moe og Natur360. 17.05.2022.

LE34 (2023). Solenergianlæg ved Pulsen. Miljørapport og miljøkonsekvensrapport. Den Grevelige Oberbech-Clausen-Peanske Familiefond og GreenGo Energy, Brønderslev Kommune. 1. juni 2023.

Lingchen, S. (2018). Soil contamination and plant uptake of metal pollutants released from Cu(In, Ga)Se₂ thin film solar panel and remediation using adsorbent derived from mineral waste material. Doctoral thesis. Hong Kong Baptist University.

Luo, L. *et al.* (2021). Local climatic and environmental effects of an onshore wind farm in North China. *Agricultural and Forest Meteorology* 308-309, 108607. [Link](#)

MST (2023). Screenings-undersøgelse af udvaskning fra vindmøllevinger. Jiri Hyks og Ole Hjelm, Danish Waste Solutions ApS. Miljøprojekt nr. 2242. Miljøstyrelsen, april 2023.
Nain, P & Kumar (2020). A. Metal dissolution from end-of-life solar photovoltaics in real landfill leachate versus synthetic solutions: One-year study. *Waste Management* 351-361, Volume 114. [Link](#)

Nover, J. *et al.* (2017). Long-term leaching of photovoltaic modules. *Japanese Journal of Applied Physics*. Volume 56 (8S2). DOI: 10.7567/JJAP.56.08MD02

Nover, J. *et al.* (2021). Leaching via Weak Spots in Photovoltaic Modules. *Energies* 2021, 14(3), 692. [Link](#)

- Orbicon (2019). Nye Vindmøller og solceller ved Veddum Kær. Miljøkonsekvensrapport. Euro-wind Project A/S, Mariagerfjord Kommune. 23-8-2019.
- Panthi, G. *et al* (2021). Leaching potential of chemical species from real perovskite and silicon solar cells *Process Safety and Environmental Protection*. Volume 149, May 2021, Pages 115-122 [Link](#)
- Patterson, M.H. *et al.* (1994). Health, safety and environmental aspects of the use of cadmium compounds in thin film PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 35 (1994) 305-310.
- Peidong, Su *et al.* (2020). Pb-Based Perovskite Solar Cells and the Underlying Pollution behind Clean Energy: Dynamic Leaching of Toxic Substances from Discarded Perovskite Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters* Volume 11 Issue 8. [Link](#)
- PlanEnergi (2014). VVM-Redegørelse og miljørapport. Vindmøller nord for Krejbjerg. Skive Kommune. Februar 2014.
- PlanEnergi (2015). Nye vindmøller ved Lyngdrup. Miljørapport – Miljøvurdering og VVM-redegørelse. Aalborg Kommune. Marts 2015.
- PlanEnergi (2020). Vindmøller øst for Blåhøj. Miljøkonsekvensrapport for det konkrete projekt. Belysning af de miljømæssige konsekvenser ved opstilling af vindmøller øst for Blåhøj, Ikast-Brande Kommune. European Energi.
- Ramos-Ruiz, A. *et al.* (2017). Leaching of cadmium and tellurium from cadmium telluride (CdTe) thin-film solar panels under simulated landfill conditions. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 336. [Link](#)
- Ramsay L. (2021). Risiko for grundvandsforurening ved solcellepark, Kildeplads ved Vittarp. VIA University College, European Energy, Søborg, 18. marts, 2021.
- Ravn C. & Tang T. (2022). Mulig udvaskning af PFAS-stoffer fra solcellepaneler. IPU, 16. november 2022.
- Robinson, S. A., & Meindl, G. A. (2019). Potential for leaching of heavy metals and metalloids from crystalline silicon photovoltaic systems. *JNRD - Journal of Natural Resources and Development*, 9, 19–24. [Link](#)
- Sharma, (2021). Evaluation of heavy metal leaching under simulated disposal conditions and formulation of strategies for handling solar panel waste. *Science of The Total Environment*. Volume 780. [Link](#)
- Skjolding, L. & Baun, A. (2025). Dansk sammenfatning af projektet – “Metodeudvikling, testning og vurdering af frigivelse af PFAS fra solcellepaneler”. DTU Sustain, Institut for Miljø-og Ressourceteknologi, Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, Danmark.
- Steinberger, H. (1998). Health, safety and environmental risks from the operation of CdTe and CIS thin-film modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Volume 6, Issue 2, Pages 99 – 103 1998. DOI: 10.1002/(SICI)1099-159X(199803/04)6:2<99::AID-PIP211>3.0.CO;2-Q
- Svenden A-S. & Ladekarl U.L. (2024). Udgør solcelleanlæg en risiko for grundvandet? Natur og Miljøkonference 2024. Aarhus Kommune Grundvandsbeskyttelse.

Tammaro, M. *et al.* (2016). Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels. *Journal of hazardous materials*. Volume 306, P.195-405. [Link](#)

Teknologisk Institut (2019). *Solcelleparker over drikkevandsområder - Risikovurdering*. TI - Teknologisk Institut⁹.

Velas (2023). Miljøkonsekvensrapport (VVM) Vedrørende solcelleanlæg ved Severinsminde i Holbæk Kommune. Sol og Vind APS. Velas. Version 2, 17. maj 2023.

VidenOmVind (tilgået oktober 2024). Kan møllevinger genanvendes? [Link](#).

WSP (2022). Vindmøller ved Thorup-sletten. Opdateret miljørapport 2022. Eurowind Project A/S. WSP Danmark A/S. 09-11-2022.

WSP (2024). Solceller ved Skodsebølle. Miljøkonsekvensrapport. European Energi A/S. Lolland Kommune. WSP Danmark A/S. Version 1.0. 2024-07-15.

Yan, D. *et al.* (2022). Lead Leaching of Perovskite Solar Cells in Aqueous Environments: A Quantitative Investigation. *Solar RRL*. 6. 10. DOI: 1002/solr.202200332.

Zapf-Gottwick, R. *et al.* (2015). Leaching Hazardous Substances out of Photovoltaic Modules. *International Journal of Advanced Applied Physics Research*. 2 P. 7-14. [Link](#)

Zapf-Gottwick, R. *et al.* (2021). Size- and Surface-Dependent Solubility of Cadmium Telluride in Aqueous Solutions *Energies*. Volume 14. [Link](#)

Zeng, C. *et al.* (2015). Cadmium telluride (CdTe) and cadmium selenide (CdSe) leaching behavior and surface chemistry in response to pH and O₂. *Journal of Environmental Management*. Volume 154. [Link](#)

Zhai, Y. *et al.* (2020). The fate and toxicity of Pb-based perovskite nanoparticles on soil bacterial community: Impacts of pH, humic acid, and divalent cations. *Chemosphere*. Volume 249. 126564. [Link](#)

Zimmermann, Y. *et al.* (2013). Thin-Film Photovoltaic Cells: Long-Term Metal(loid) Leaching at Their End-of-Life. *Environmental Science and Technology* Volume 47 Issue 22, 13151-13159. [Link](#)

⁹ Der har ikke været adgang til rapporten, hvorfor informationer medtaget i denne rapport er baseret på sekundære kilder.

Bilag 1. Litteratursøgning afsmittning fra VE anlæg

Bilag 1.1 Søgning i Science Direct, Google Scholar og DTU Orbit.

Oversigt over søgte ord og tilsvarende hits fra søgning i ScienceDirect.

Kolonnen med relevante kilder er eksklusiv relevante kilder fundet i tidligere søgning i databasen. I parentes er inkluderet antallet af relevante kilder fundet ved videre søgning i abstract, indledning og review artikler.

Søgeord	Søgeord i titel, abstrakt eller nøgleord	Hits	Relevante kilder	Kommentar
environment* AND release* AND solar panel* AND contaminant*	Release* solar* panel*	14	1 (2)	
Contaminant* AND release* AND "solar cell"	Solar* release*	58	4 (12)	
Contaminant* AND release* AND ("solar panel*" OR "photo-voltaic cell*")	Solar* release*	39	5	
Toxic* AND releas* AND ("solar panel*" OR "solar cell*" OR "photo-voltaic cell*")	(solar OR photovoltaic*) AND toxic* AND releas*	81	6	
(pollutant OR contaminant OR sub-stance) AND (re-release or emission or leakage) AND ("solar panel" OR "solar cell" OR "photovoltaic cell")	(solar OR photovoltaic) AND release AND (pollutant OR contaminant)	1	0	
(pollut* OR contamin* OR substance*) AND (release OR emission* OR leak*) AND (Solar)	solar cell* AND release AND (contam* OR substance* OR pollut*)	68	4	
(pollut* OR contamin* OR substance*) AND (release OR emission* OR leak*) AND solar	solar panel* AND release AND (contam* OR substance* OR pollut*)	28	2	
(pollut* OR contamin* OR substance*) AND (release OR emission* OR leak*) AND photovoltaic*	photovoltaic* AND release AND (contam* OR substance* OR pollut*)	67	3	
Releas*OR leach*	Pfas* AND solar*	5	0	
(Release OR toxicity OR emission) AND (windmill OR wind turbine) AND (pollutant OR contaminant OR substance OR chemical)	(Windmill OR wind turbine) AND (Release OR toxicity OR emission)	7	0	
(Release OR toxic* OR emission*) AND (windmill* OR wind turbine*) AND (pollutant* OR contaminant*)	(Windmill* OR wind turbine*) AND (Release OR toxic* OR emission*)	369	0	Første 100 gennem søgt. Ingen meningsfyldte resultater.

(Release OR toxic* OR emission*) AND (windmill* OR wind turbine*) AND (pollutant* OR contaminant*) AND on-shore	(Windmill* OR wind turbine*) AND (Release OR toxic* OR emission*)	80	0	
(Release OR toxic* OR emission*) AND (windmill* OR wind turbine*) AND (substanc* OR chemical*) AND on-shore	(Windmill* OR wind turbine*) AND (Release OR toxic* OR emission*)	125	0	
(leach*) AND (windmill* OR wind turbine*)	(Windmill* OR wind turbine*) AND (leach*)	8	0	
wind turbine* leak* environment*	wind turbine* leak*	15	0	
windmill* leak* environment*	windmill* leak*	2	0	
	Wind turbine* leach*	8	0	
	Windmill* leach*	0	0	
Wind turbine* (PFAS OR oil) release*	wind turbine* releas*	40	0	
Windmill* (PFAS OR oil) release*	windmill* releas*	1	0	
Wind turbine* lubricant* leak*		948	0	Første 50 resultater undersøgt og gav ingen meningsfyldte resultater
	Wind turbine* lubricant* leak*	0	0	
	Windmill* lubricant* leak*	0	0	
Wind* turbine* lubricant* leak	Lubricant*	18	0	
wind turbine* lubricant* releas*	Lubricant* wind environment*	3	0	
wind turbine* oil* release*	Oil* wind* environment*	136	1	
onshore windmill* environment*	onshore windmill*	6	0	
onshore windmill* water*	onshore windmill*	7	0	
Landfill AND windmill AND leaching		95	0	Samlinger af konference abstracts ikke gennemgået.
Landfill* windmill* leach*	Windmill* leach*	0	0	
Landfill* wind turbine* leach*	Wind turbine* leach*	1	0	
Landfill* wind turbine* releas*	Wind turbine* releas*	8	0	
Landfill* windmill* releas*	Windmill* releas*	1	0	

bisphenol leach* (wind turbine* OR windmill*)	Wind*	10	0
---	-------	----	---

Bilag 1.2 Oversigt over søgte ord og tilsvarende hits fra søgning i Google Scholar

Kolonnen med relevante kilder er eksklusiv relevante kilder fundet i tidligere søgning i databasen. I parentes er inkluderet antallet af relevante kilder fundet ved videre søgning i abstract, indledning og review artikler.

Søgeord	Alle i titel ¹⁰	Hits	Relevante kilder	Kommentar
	solar panel release	8	0	
	Solar panels release	4	0	
	Solar panel contamination	3	1	
	Solar panels contamination	5	0	
	Solar cell release	5	0	
	Solar cells release	26	0	
	Solar cell pollutant	4	0	
	Solar cells pollutant	3	0	
	Solar cells polluting	0	0	
	Photovoltaic release	20	0	
	Photovoltaics release	5	0	
	Photovoltaics pollutant	0	0	
	Photovoltaic pollutant	8	0	
	Photovoltaics pollution	3	0	
	Photovoltaic pollution	81	0	Første 40 gennemgået, og gav ingen meningsfyldte resultater.
	Photovoltaic polluting	2	0	
	Photovoltaics polluting	0	0	
	wind turbine contamination	14	0	
	wind turbines contamination	10	0	
	wind turbine release	6	0	
	Wind turbines release	4	0	
	Wind turbine pollutants	2	0	
	Wind turbines pollutant	0		
	Wind turbines pollutants	2	0	
	Wind turbines leaching	0	0	
	Wind turbine leaching	1	0	
	Windmill release	1	0	
	Windmills release	0	0	
	Windmill leaching	0	0	
	Windmills leaching	0	0	
	Windmill pollutant	0	0	

¹⁰ Alle i titlen supporterer ikke wildcards* i google scholar. Istedet er kendte endelser undersøgt.

Søgeord	Alle i titel ¹⁰	Hits	Relevante kilder	Kommentar
	Windmills pollutant	0	0	
	Windmill pollution	0	0	
	Wind turbine pollution	11	0	
	Wind turbines pollution	28	0	
leaching solar cell environment impact		82300	11	Mest relevante (landbaserede og normale forhold) undersøgt af 50 første.
Leach* solar cell* environment* impact*		47500		Første 70 undersøgt. Søgning ikke specifik nok. Søgning indskrænket.
Leach* contamin*	Solar	5	0	
Leach* contamin*	turbine	12	0	
Leach* contamin* wind	Turbines*	48	0	
Leach* contamin*	windmill	6	0	
Leach* contamin*	windmills	9	0	
	PFAS release solar	0	0	
	wind PFAS	2	0	
	wind turbine PFAS	0	0	
Afsmitning vindmøller		38	1	
Afsmitning* vindmøl*		48	0	
Afsmitning vindturbiner		1	0	
Afsmitn* vindturbine*		1	0	
Afsmitning solpaneler		2	0	
Solceller afsmitning		14	1	
Afsmitning solpanel*		1	0	
Afsmitning solcell*		14	0	
water pollution*	onshore windmill*	24	0	
wind farm onshore pollution		29500	1	Første 60 kilder undersøgt. Begrænsede meningsfyldte resultater.
Wind farm* onshore* pollut*		18500	0	Første 110 kilder undersøgt.. Ingen meningsfyldte resultater.
Leach* wind turbine* onshore*		3050	0	Første 100 gennemset. Ingen meningsfyldte resultater.
Leach* windmill* onshore*		668	0	Første 70 gennemset. Ingen meningsfyldte resultater.

Bilag 1.3 Oversigt over søgte ord og tilsvarende hits fra søgning i DTU Orbit

Kolonnen med relevante kilder er eksklusive relevante kilder fundet i tidligere søgning i databasen. I parentes er inkluderet antallet af relevante kilder fundet ved videre søgning i abstract, indledning og review artikler.

Søgeord	Hits	Relevante kilder
Leach* solar cell*	2	1
solar cell* releas*	12	1
Leach* windmill*	0	0
Leach* wind turbine*	2	0
Releas* pollut* wind turbine*	0	0
pfas wind turbine*	0	0
pfas windmill*	0	0
pfas solar panel*	0	0
pfas solar cell*	0	0
Releas* windmill*	1	0
Releas* wind turbine*	50	0
Contamin* releas* wind turbine*	0	0
Pollut* wind turbine*	24	0
Wind turbine* contamin*	10	0
Afsmit* solcell*	1	0
Afsmit* vindmøll*	0	0
Afsmit* vindturbine*	0	0
Afsmit* solpanel*	0	0
PFAS vindmøll*	0	0
PFAS solcell*	0	0

Bilag 1.4 Søgning i SCIP-databasen (ECHA, 2024)

Søgeord	Hits	Stof	Kommentar
Solar panel	7	Bly	Metaldele
Solar panel	7	Alkanes, C14-17, chloro	Foldbare solpaneler, knækbeskyttelse
Solar panel	7	N,N-dimethylformamide	Film af sort plast
Solar cell	83	Bly	Solcellebånd
Photovoltaic	19	Bly	Transformer, diode, messing dele
Photovoltaic	19	Potassium 1,1,2,2,3,3,4,4,4-nonafluorobutane-1-sulphonate	Plast kabinet
Photovoltaic	19	Hexahydromethylphthalic anhydride	Lysdiode
Photovoltaic	19	Octamethylcyclotetrasiloxane	Transfomer
Photovoltaic	19	1, 2-dimethoxyethane; ethylene glycol dimethyl ether (EGDME)	Batteri
Photovoltaic	19	1,3,5-Tris(oxiran-2-ylmethyl)-1,3,5-triazinane-2,4,6-trione (TGIC)	Lysdiode
Solar array	10	Chromic acid	Kabelklemmer
Solar array	10	N,N-dimethylacetamide	Plast/gummi dele, solcellevinger
Solar array	10	Bly	<i>Ikke angivet</i>
Solar array	10	Cadmium	<i>Ikke angivet</i>
Solar array	10	2-methylimidazole	solcellevinger
Solar array	10	Sodium perborate	solcellevinger
Photovoltaic module	13	Bly	CU Film, Diode, conductor,
Wind turbine	17	Bly	Konverter, batteri, generator, gearkasse, skrueforbindelser,
Wind turbine	17	Sulfurous acid, lead salt, dibasic	bly-batteri
Wind mill	0		
Wind blade	1	Bly, bly monooxid	kabel, klammer
Wind blade	1	Imidazolidine-2-thione (2-imidazoline-2-thiol)	Spændemuffe

Bilag 2. Data for afsmitning fra solceller

Bilag 2.1 Data fundet på afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra solceller og solpaneler

Resultater fundet for afsmittning af miljøfarlige forurenende stoffer fra solceller/paneler fra litteratursøgning i Google Scholar, DTU Orbit og ScienceDirect.

*Aflæst fra graf, ** Lavere end detektionsgrænse på 0,5 µg/L.

Kilde	Type	Stand og fase	Forsøg	Stoffer	Resultat
Allen, J. <i>et al.</i> , 2010	CdTe	Ikke intakt Opskårne og beskadigede.	Laboatorieforsøg. Forskellige pH (3,4,5,6) og én prøve med DI vand.	Cd	Lav udvaskning af cadmium ved pH 7 (Cd=7,28 mg/L), højere ved faldende pH (ph=6: Cd=107 mg/L).
Baumann, A. E. <i>et al.</i> , 1995	CdTe (Sunceram II-celler)	Ikke intakt (Brand) Driftsfasen	Litteraturreview.	Cd, Te	Simulerede forsøg med brand udført af det tyske katalyseinstitut, fandt frigivelse af 50% af Cd ved temperaturer 800-900°C. Glasset i panelerne smeltede ved samme temperaturer og indkapslede resten af Cd.
Brun, N. J., Wehrli, B. & Fent, K., 2016	CIGS (sunload 12 Wp) OPV (Belectric OPV)	Ikke-intakt (UV-eksponeret og skåret til 1,5 x 3 cm)	Udvaskning i beholdere med søvand Laboratorieskala	Cd, Mo, Se, Zn	Mesotrofisk Søvand: CIGS: Cd= 9±1 µg/L, Mo= 583±24 µg/L, Se= 11±1 µg/L, Zn= 60 ±4 µg/L. OPV: Zn=63±7 µg/L.
Conings, B. <i>et al.</i> , 2019	Si/perovskit tandem solceller Produceret til forsøg, følger industri-standard.	Ikke intakt (brand) Driftsfasen	Laboratorieskala	Pb	Pb udledt ved brand ved 760°C, koncentrationer ikke specificeret.
Espinosa, N. <i>et al.</i> , 2016	Ag-OPV og C-OPV	Intakte og ikke-intakte Driftsfasen Ag- OPV 2 eneste der ikke viste tegn på delaminering.	Regnafstrømning (6 måneder) Laboratorieskala	Zn, Ag,	Ag-OPV (ikke-intakt): 7,9-14,3 mg Ag, 65,7-79,0 mg Zn fra 1 m ² på 6 måneder Ag-OPV (forseglet uden tegn på indtrængen af vand): 1 prøve tæt på reference eksemplarer for Ag og Zn. Anden prøve ca. 14,5 mg Ag og 37 mg Zn.* C-OPV (laser-skåret, men ellers intakt): ingen Ag udvasket. Ca. 13-17 mg Zn fra 1 m ² på 6 måneder *

Kilde	Type	Stand og fase	Forsøg	Stoffer	Resultat
Finke, A. <i>et al.</i> 1996	CIS	Ikke intakt Driftsfasen Opskårede solceller.	Laboratorieforsøg (bl.a. DEV S4 test) 24 timer i destilleret vand	Zn, Mo, Se, Cu, Ga, In, Cd	Med glas: Zn = 2,83 mg/L, Mo = 9,37 mg/L Se = 0,45 mg/L, Cu = 14,80 µg/L Ga = 191,00 µg/L In = 49,10 µg/L Cd = 27,60 µg/L Uden glas: Zn = 9,58 mg/L Mo = 16,30 mg/L Se = 2,16 mg/L Cu = 23,10 µg/L Ga = 604,00 µg/L In = 62,40 µg/L Cd = 36,50 µg/L
Fthenakis, V.M. <i>et al.</i> , 2005	Glas-glas CdTe PV moduler (First Solar Inc.)	Ikke intakt (brand) Driftsfasen Opskårede	Laboratorieskala	Cd, Te	Brand ved 1100°C Udledning af 0,5± 0,1% af Cd indholdet

Kilde	Type	Stand og fase	Forsøg	Stoffer	Resultat
Nain, P. & Kumar, A., 2020	a-Si, CIGS, Mono-Si, Multi-Si.	Intakt Ikke intakt Opskårede celler.	Laboratorie forsøg med forskellige pH. 1 år	As, Al, Ag, Cd, Cu, Cr, Ga, In, Fe, Ni, Pb, Se, Zn,	Ikke beskadigede (pH=7) A-Si: As=0.000mg/L Al=52.500mg/L Cd= ND Ga=ND In=ND, Fe=168.904 mg/L Ni=14.720mg/L, Se= 0.046mg/L Zn=0.074mg/L CIGS: Ubetydelig udvaskning af indium, molybdenum, selenium og gallium. As= 0.923 Ag = 11.920 Al = 1531.421 Cr = 11.8042 Cd= 101.6184 Cu= 328.55 mg/L, Fe = 12438.442 Ni= 509.293 Pb = 5.240 Zn=3.194. Mono-Si: As= ND Ag=8.430 mg/L Cd= 0.004 mg/L Cr= 1.502 mg/L, Ga= NM, In=NM, Fe=184.950mg/L Se=ND Zn=ND Multi-Si: As= ND Ag= 0.954, Cd= NM, Cr = 0.078, Ga =ND, In = NM, Fe=388.400, Se =NM, Zn=NM Beskadigede (pH=7) A-Si: As= 0.005 mg/L Al=12.800 mg/L Cd=0.0 mg/L Ga=ND, In=0.0 mg/L Fe=187.927 mg/L Ni=11.370 mg/L Se=0.003 mg/L, Zn=0.130mg/L Mono-Si: As= 0.002mg/L Ag= 11.321 mg/L Cd= 0.006 mg/L Cr= 2.174 mg/L, Ga= 0.007, In= 0.017, Fe= 249.004mg/L Se= 0.003 Zn= 0.039mg/L Multi-Si: As=ND, Ag= 0.050, Cd=ND,Cr= 0.473, Ga=0.009, In=ND, Fe= 384.200, Se=ND, Zn=0.011.

Kilde	Type	Stand og fase	Forsøg	Stoffer	Resultat
Nover, J. <i>et al.</i> , 2021	c-Si, a-Si, CdTe, CIGS.	Ikke-intakt Opskårede solceller	Laboratorie forsøg med forskellig pH. 1,5 år.	Zn, Cd, Te, In, Ga, Se, Al, Mo, Cu, Ni, Pb.	CdTe, pH = 7: Cd = 4,5%, Te = 7,8% og Mo = 19% af totalmængden i solpanelet. CIGS, pH = 7: In = ikke detekteret, Mo, Cd, Zn, Ga, Se og Cu (i rækkefølge, mest udvasket til mindst udvasket) c-Si: Al og Pb. Begge under detektionsgrænsen for pH = 7. a-Si: Zn, Cu og Ni i små mængder (10^{-2} - $10^1\%$)
Panthi, G. <i>et al.</i> , 2020	Perovskit solceller (PSC), monocrySTALLINE (MoSC) silicon solceller, og polycrystalline (PoSC) silicon solceller. Nogle solceller kommercielt tilgængelige andre fra research grupper.	Intakt og ikke-intakt. Opskårede men indesluttet.	Laboratorieforsøg med flere konstellationer: statsisk eller tumbling med deioniseret (DI) vand eller udvaskningsvæske (syre). Resultater for statisk med DI vand er medtaget her.	Si, Pb, Al, As, Ni, Cd, Cr, Cu, Hg	Intakt PSC: ca. 0.06 mg Pb/L, ca. 0.01mg/L Cu og As, ca. 0.005mg/L Hg. Cd og Cr ikke detekteret. Ikke-intakt PSC, Ikke-intakt MoSC, og Ikke-intakt PoSC. Resultater kun præsenteret med udvaskningsvæske.
Patterson, M.H. <i>et al.</i> , 1994	CdTe	Ikke intakt (brand) Driftsfasen	Litteraturreview	Cd, Te	Emissioner af Cd og Te, både som gas og som deponeret sod, udgør ikke en toksisk risiko, ved en 800°C til 900°C, træbrand.
Ramsay L. 2021	Silicium Frontglas med coating af kvarts (Kinesiske leverandører: Flat group, XYG, CNBM)	Ikke-intakt (knuste frontglas)	Ekstraktion med kunstigt regnvand, pH 7	Al, Sb, Pb, B, Zn	Uorganiske stoffer, hvor koncentrationen målt i ekstraktionsvæsken overstiger et eller flere kvalitetskriterier. Antimon, bor og zink er mobile og vurderes derfor at kunne give anledning til grundvandsforurening.
Ramsay L. 2021	Silicium Nedfaldet panel (fra Risø-anlæg). Hel sandwich af frontglas, lamineering, ribbons og lodninger	Ikke-intakt (afklippede stykker)	Ekstraktion med kunstigt regnvand, pH 7	Al, Sb, Pb, Fe, Cu, Zn, Ag	Uorganiske stoffer, hvor koncentrationen målt i ekstraktionsvæsken overstiger et eller flere kvalitetskriterier. Antimon og zink er mobile og vurderes derfor at kunne give anledning til grundvandsforurening.

Kilde	Type	Stand og fase	Forsøg	Stoffer	Resultat
Ramsay L. 2021	Silicium Nedfaldet panel (fra Risø-anlæg). Hel sandwich af frontglas, lamine-ring, ribbons og lodninger	Ikke-intakt (afklippede stykker)	Ekstraktion med kunstigt regnvand, pH 7		Organiske stoffer, målt i ekstraktionsvæsken: Flygtige kulbrinter, C ₆ -C ₁₀ 3,7 µg/L Lette kulbrinter, C ₁₀ -C ₂₅ 500 µg/L Tunge kulbrinter, C ₂₅ -C ₃₅ 220 µg/L Identificerede stoffer: 1-ethyl-1 hexanol, okta-decenamid samt decanedioic acid, bis(2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidiny) ester.
Ramsay L. 2021	Transformerolie, solcelleanlæg	Spild situation	Ekstraktion med kunstigt grundvand, pH 7		Organiske stoffer, målt i ekstraktionsvæsken: Flygtige kulbrinter, C ₆ -C ₁₀ <2 µg/L Lette kulbrinter, C ₁₀ -C ₂₅ 490-520 µg/L Tunge kulbrinter, C ₂₅ -C ₃₅ <9 µg/L Identificerede stoffer: BHT (butylated hydroxytoluene)
Robinson, S. A., & Meindl, G. A., 2019	c-Si	Intakt Driftsfasen	Jordprøver fra under solceller og nærliggende marker. Fuld-skala	Cu, Zn, Se, Sr, Li, Ni, Ba, Pb, Cd	Højere koncentrationer ved solpaneler: Se, Sr, Li, Ni, Ba. Ikke signifikant anderledes koncentrationer: Pb, Cd Fald i koncentrationer: Cu, Zn
Sharma <i>et al.</i> (2021)	Poly c-Si	Ikke intakt Opskårede solceller.	Laboratorie, Udvaskningstest: Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) (med syreholdig ekstraktionsvæske), SPLP (simulerede naturlige forhold med pH=4.2, pH statisk test (pH=3, pH=7, pH=9). Udført med og uden glas laminering og med og uden UV-eksponering.	Ag, Al, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Zn	pH Statiske tests. pH=7 med glas laminering: Cu= 9,9 ± 0,9 µg/L, Pb= 4,17 ± 0.8 µg/L. pH=7 uden glas laminering: Al= 87 ± 3,1 µg/L . Cu= 10.8 ± 1.76 Pb= 69 ± 1.8 µg/L Med undtagelse af Pb uden laminering, er der målt højere koncentrationer for de UV-eksponerede solceller end de "nye" solceller.

Kilde	Type	Stand og fase	Forsøg	Stoffer	Resultat
Skjolding & Baun, 2025	Ikke specificeret	Intakt og ikke-intakt Driftsfasen	Laboratorieforsøg (wiping)	PFAS	17 PFAS-stoffer er undersøgt i studiet. To forbindelser (PFHxA og PFPeA) er fundet over kvantificeringsgrænsen. Her konkluderes det, at mængden af PFAS-stofferne, der afvaskes, er mange gange (100-500) lavere end den målte deposition fra luften (våd og tør) ved Lyngby og langt (880-5550 gange) lavere end grænseværdierne for jord, grundvand og overfladevand. Sammenlignes frigivelsen af PFAS fra solcellerne med den maksimalt tilladte mængde PFAS, der årligt må spredes med spildevandsslam på landbrugsjord, vil PFAS bidraget fra solceller i hele panelets levetid være 3.400 til 460.000 gange mindre end der kunne være tilført med spildevandsslam.
Steinberger, H. 1998	CdTe og CIS	Intakt og ikke intakt Driftsfasen	Forsøg (udendørs) Forsøgs-baseret model	Cd, Te, Ni, Zn, Mo, Se, In, (Ga)	Forsøgstest eluater CIS: Zn = 2,1 mg/L, Mo = 2,5 mg/L, Se = 0,4 mg/L, Cd = 10 µg/L, In = 30 µg/L CdTe: Cd = 1 mg/L, Te = 0,3 mg/L, Ni = 0,1 mg/L. Forsøgsbaseret model – forøgelse af koncentration i jord CIS: Cd = 83 µg/kg, Ga = 16 µg/kg, In = 20 µg/kg, Cu = 10 µg/kg, Mo = 2,2 mg/kg, Se = 0,3 mg/kg, Zn = 2,2 mg/kg. CdTe: Cd = 240 µg/kg, Ni = 30 µg/kg, Te = 160 µg/kg. Forsøgsbaseret model – Vand fra tag CIS: Zn = 10,5 µg/L, Mo = 12,5 µg/L, Se = 2 µg/L, Cd = 50 ng/L, In = 150 ng/L CdTe: Cd = 5 µg/L, Te = 1,5 µg/L, Ni = 5 µg/L.

Tammaro, M. <i>et al</i> , 2016	c-Si, a-Si, CdTe og CIGS	Ikke intakt Drifts og af-faldsfasen	Laboratorieforsøg Udvasningsforsøg med rent vand. Op-skårede solpaneler af forskellige aldre.	Al, Cr, Mn, Cu, Cd, Pb, Se, Sn, Zn, Te, Sb, Ag, Mo, Ba, Ni, As	Tyndfilm (a-Si, CdTe og CIGS) udleder væsentligt mere end c-Si. c-Si (26 typer/prøver): Al = 106,3 – 1320,6 µg/L Cr = <d.l.** – 10,8 µg/L Mn = <d.l.** – 11,5 µg/L Cu = <d.l.** – 37,8 µg/L Cd = <d.l.** – 22,5 µg/L Pb = <d.l.** – 61375,0 µg/L Se = <d.l.** – 6,2 µg/L Sn = <d.l.** – 661,3 µg/L Zn = 6,5 – 141,5 µg/L Te = <d.l. – 9,4 µg/L Sb = <d.l.** – 20,1 µg/L Ag = <d.l.** – 693,8 µg/L Mo = <d.l.** – 6,0 µg/L Ba = <d.l.** – 617,8 µg/L Ni = <d.l.** – 41,9 µg/L a-Si (8 typer/prøver): Al = n.d. – 1025 µg/L Cr = <d.l.** – 483,0 µg/L Mn = <d.l.** – 13,0 µg/L Cu = <d.l.** – 65,1 µg/L Cd = <d.l.** – 3,1 µg/L Pb = <d.l.** – 778,1 µg/L Se = <d.l.** – 8,9 µg/L Sn = <d.l.** – 26,3 µg/L Zn = <d.l.** – 365,8 µg/L Te = <d.l.** Sb = <d.l.** – 3,0 µg/L Ag = <d.l.** – 20,1 µg/L Ga = <d.l.** In = <d.l.** Mo = <d.l.** – 8,2 µg/L Ba = <d.l.** – 42,8 µg/L Ni = <d.l.** – 42,8 µg/L As = <d.l.** CdTe (3 typer/prøver): Al = 235,0 – 540,8 µg/L Cr = 5,4 – 5,7 µg/L Mn = <d.l.** – 4,8 µg/L Cu = 0,6 – 4,1 µg/L Cd = 150,9 – 1420,0 µg/L Pb = <d.l.** – 18,8 µg/L Se = <d.l.** Sn = <d.l.** – 102,0 µg/L Zn = 10,5 – 35,1 µg/L Te = 263,0 – 1999,4 µg/L Sb = <d.l.** Ag = <d.l.** Ga = <d.l.**
---------------------------------	--------------------------	-------------------------------------	---	--	---

Kilde	Type	Stand og fase	Forsøg	Stoffer	Resultat
					In = <d.l.** Mo = 272,5 – 930,0 µg/L Ba = <d.l.** – 10,3 µg/L Ni = 5,0 – 18,2 µg/L As = <d.l.** CIGS (1 type/prøve): Al = 63,4 µg/L Cr = < d.l. ** Mn = <d.l.** Cu = 673,3 µg/L Cd = 80,9 µg/L Pb = 46,9 µg/L Se = 1285,0 µg/L Sn = 15,0 µg/L Zn = 703,1 µg/L Te = 6,9 µg/L Sb = <d.l.** Ag = <d.l.** Ga = 399,4µg/L In = 870,6µg/L Mo = 692,9 µg/L Ba = <d.l.** Ni = 4,7 µg/L As = <d.l.**.
Zapf-Gottwick <i>et al.</i> , 2015.	c-Si, CdTe, CIGS, a-Si.	Ikke intakt. Driftsfase. Solcellerne er pulverise- rede til forsø- get.	Laboratorieforsøg Udvaskningsforsøg med lavt minerali- seret vand (pH= 8.4), saltvand og surt regnvand (pH=3).	Pb, Cd, Ag, Te, Se, In, Ga	Lavt mineraliseret vand: c-Si: Pb, Cd og Ag udva- sket CdTe: Pb, Cd ogTe udva- ske. CIGS: Pb, Cd, Se, In, Ga udvasket. a-Si: Pb og Ag udvasket.

Kilde	Type	Stand og fase	Forsøg	Stoffer	Resultat
Zimmermann <i>et al.</i> , 2013	CIGS, OPV	Ikke intakt Driftsfasen. Opskårede solceller (fragmenter).	Forsøg med simuleret ferskvand (pH 8.6), saltvand (pH 7.9) og surt regnvand (pH 5.0). Flasker med prøver omrystet under forsøg.	Al, Zn, Se, Mo, Cd, Ti, Cu, Ga, As, Ag, In, Sn, Sb, Pb.	CIGS: Surt regnvand (pH=5): Al= $9.2 \pm 3.9 \mu\text{g/g PV}$, Zn= $27.9 \pm 4.1 \mu\text{g/g PV}$, Se= $0.9 \pm 0.1 \mu\text{g/g PV}$. Mo= $949.6 \pm 41.0 \mu\text{g/g PV}$, Cd= $16.7 \pm 0.9 \mu\text{g/g PV}$, Ti, Cu, Ga, As, Ag, In, Sn, Sb, Pb $< 0.7 \mu\text{g/g PV}$. Ferskvand: Al= $0.9 \pm 0.3 \mu\text{g/g PV}$, Zn= $15.2 \pm 7.1 \mu\text{g/g PV}$, Se= $2.8 \pm 1.0 \mu\text{g/g PV}$, Mo= $1660.8 \pm 103.5 \mu\text{g/g PV}$ Cd= $9.9 \pm 4.5 \mu\text{g/g PV}$, Sn= $2.6 \pm 2.6 \mu\text{g/g PV}$. Ti, Cu, Ga, As, Ag, In, Sn, Pb $< 0.7 \mu\text{g/g PV}$ OPV: Surt regnvand: Zn= $3.9 \pm 0.7 \mu\text{g/g PV}$, Ag= $0.7 \pm 0.1 \mu\text{g/g PV}$. Al, Ti, Cu, Ga, As, Se, Mo, Cd, In, Sn, Sb, Pb $< 0.7 \mu\text{g/g PV}$. Ferskvand: Al= $2.4 \pm 0.7 \mu\text{g/g PV}$, Zn= 4.4 ± 0.1, Ag= $1.6 \pm 0.3 \mu\text{g/g PV}$. Ti, Cu, Ga, As, Se, Mo, Cd, In, Sn, Sb, Pb $< 0.7 \mu\text{g/g PV}$

Afdækning af eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg

Dette er rapporten for projektet "Afdækning af eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg" udarbejdet for Miljøstyrelsen af DHI A/S.

Med VE-anlæg menes anlæg, der etableres og drives med henblik på produktion af energi fra vedvarende energikilder. I projektet er VE-anlæg begrænset til at omfatte solcellepaneler og vindmøller på land.

I Klimaaftalen om grøn strøm og varme fra juni 2022 blev det besluttet, med deltagelse af medarbejdere på tværs af Energistyrelsen, Plan- og Landdistriktsstyrelsen og Miljøstyrelsen, at etablere et rejsehold for vedvarende energi, der bl.a. skal sikre udbredelse af gode eksempler i forbindelse med realisering af VE-projekter i kommunerne. Rejseholdet har i den forbindelse oplevet, at kommunerne efterspørger viden om potentiel afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg. Der er derfor ønsket en rapport, der danner et overblik over allerede eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg, som kan bruges til oplysning og vejledning af kommuner.

I dette projekt leveres et overblik over international og national viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlægstyperne solceller/solpaneler og vindmøller på land (on-shore) i form af en litteratursøgning af eksisterende viden på området samt generel viden om problematiske indholdsstoffer i komponenter benyttet til solceller/solpaneler og/eller vindmøller fra EU.

Projektet "Afdækning af eksisterende viden om afsmitning af miljøfarlige forurenende stoffer fra VE-anlæg" er gennemført for Miljøstyrelsen i perioden juli 2024 til marts 2025 og er udarbejdet af DHI A/S.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk