



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Miljømæssig optimering af termiske oprensningemetoder

Miljøprojekt nr. 1501, 2013

Titel:

Miljømæssig optimering af termiske
oprensningemetoder

Forfattere:

Falkenberg, A. J. og Weber, K., NIRAS
Nielsen, S.G., NIRAS/TerraTherm
Lemming, G. DTU Miljø

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

År:

2013

ISBN nr.

978-87-93026-42-1

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. 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

Forord	5
Sammenfatning og konklusion	6
Summary and Conclusion	8
1 Projektbeskrivelse	10
1.1. Projektkoncept og formål	10
1.1.1. De fire termiske oprensningsmetoder.....	10
1.1.2. Afgrensning	11
1.2. Brainstorm og forslag til aktiviteter	11
2 Metodebeskrivelse	12
2.1. Miljømæssig optimering.....	12
2.2. Opgørelse af materiale- og energiforbrug.....	12
2.2.1. Basis-scenarier	12
2.2.2. Optimeringsscenarier	14
2.3. Livscyklusvurderinger - LCA	14
2.3.1. Miljøvurderingsmodel	14
2.3.2. Miljøeffekter og ressourceparametre	14
3 Basis-scenarier	16
3.1. Termisk ledningsevne opvarmning – TCH/ISTD	16
3.1.1. Opgørelse af materiale- og energiforbrug.....	16
3.1.2. Resultat af livscyklusvurdering for basis-scenarierne.....	17
3.2. Dampoprensning – SEE	20
3.2.1. Opgørelse af materiale- og energiforbrug.....	20
3.2.2. Livscyklusvurdering.....	21
3.3. Elektrisk modstandsopvarmning – ERH/ET-DSP™.....	24
3.3.1. Opgørelse af materiale- og energiforbrug.....	24
3.3.2. Livscyklusvurdering.....	25
3.4. Radio frekvens opvarmning - RFH	28
3.4.1. Opgørelse af materiale- og energiforbrug.....	28
3.4.2. Livscyklusvurdering.....	29
4 Miljømæssig optimering	33
4.1. Diskontinuert opvarmning (Opvarmning udenfor kraftværkernes spidslastperioder)	33
4.2. Substitution af normal dansk elmix med brug af certificeret vandkraft	38
4.3. Alternative opbygninger af vapor cap	39
4.4. Substitution af stenkulsbaseret aktivt kul med biobaseret aktivt kul.....	42
4.5. Anvendelse af alternative stållegeringer i varmelegemer	44
4.6. Kondenserende versus ikke kondenserende naturgasfyret kedel.....	46
4.7. Substitution af stål med glasfiber i dampinjektionsboringer.....	47
4.8. Brug af lokale eksperter og udstyr.....	48

5	Samlet vurdering.....	50
5.1.	Undersøgelser, risikovurdering og projektering.....	50
5.2.	Optimering af delprocesser	50
5.3.	Optimeringspotentiale for termiske metoder.....	53
5.4.	Betydning af skala for oprensning.....	55
6	Referencer	56

BILAG

BILAG A	Beskrivelse af de fire teknikker TCH (ISTD), SEE, ERH (ET-DSP™) og RFH	57
BILAG B	ISTD - Materiale- og energiforbrug	65
BILAG C	Life cycle assessment and environmental optimization of In Situ Thermal Desorption - ISTD	79
BILAG D	Life cycle assessment and environmental optimization of Steam Enhanced Extraction - SEE	108
BILAG E	Life cycle assessment and environmental optimization of Electro-Thermal Dynamic Stripping Process - ET-DSP™	127
BILAG F	Life cycle assessment of Radio Frequency Heating - RFH	145
BILAG G	Optimering af vapor cap	161
BILAG H	Ekstern energiregulering	173

Forord

Problematisk jordforurening med flygtige komponenter såsom chlorerede opløsningsmidler kan oprensnes effektivt ved anvendelse af in situ termiske metoder, som dog er kendetegnet ved et stort forbrug af materialer og energi.

Projektet omfatter en systematisk kortlægning af energi- og materialeforbrug for fire termiske oprensningsmetoder. Der er foretaget en livscyklusvurdering (LCA) og en vurdering af muligheder for miljømæssig optimering af de termiske metoder.

Projektet er igangsat af Region Hovedstaden, og finansieret af Region Hovedstaden og Miljøstyrelsen under Miljøstyrelsens Teknologiprogram for jord- og grundvandsforurening.

I forbindelse med projektopstart er der i december 2010 foretaget en brainstorm blandt en række aktører, som enten har erfaringer inden for dimensionering af termiske oprensninger eller evaluering af miljøpåvirkninger. Efterfølgende har flere aktører bidraget med kommentarer og oplysninger om materiale- og energiforbrug.

Følgende personer har bidraget til projektet:

- Heron, G. og Baker, R., TerraTherm
- Winder, B. og Walker, K., McMillan-McGee
- Ploug, N. og Holm, J., Krüger
- Larsen, L. og Larsen T.H., Orbicon
- Jensen, K.R., Arkil
- Holm, J., GEO

Projektets følgegruppe har omfattet følgende personer:

- Katrine Smith Miljøstyrelsen
- Mads Terkelsen Region Hovedstaden
- Carsten Bagge Region Hovedstaden

Sammenfatning og konklusion

Baggrund og formål

Projektet sigter på at afdække mulighederne for miljømæssig optimering af følgende fire termiske oprensningsmetoder.

- Termisk ledningsevneopvarmning - Thermal Conductive Heating (TCH). Den specifikke TCH metode, som er undersøgt i dette projekt, benævnes In situ Thermal Desorption (ISTD)
- Dampoprensning - Steam Enhanced Remediation (SER) eller Steam Enhanced Extraction (SEE)
- Elektrisk modstandsovervarmning – Electric Resistance Heating (ERH). Den specifikke ERH metode, som er undersøgt i dette projekt, benævnes Electro-Thermal Dynamic Stripping Process (ET-DSP™)
- Radiofrekvensopvarmning - Radio Frequency Heating (RFH).

Med udgangspunkt i konkrete projekterfaringer er der foretaget en systematisk kortlægning af energi- og materialeforbrug for de enkelte oprensningsmetoder, baseret på to basis-scenarier for henholdsvis en lille (180 m²) og en stor (1.300 m²) lokalitet forurenet med chlorerede opløsningsmidler. Forbrugsdata anvendes i en detaljeret miljømæssig analyse af de enkelte afværgemetoders miljøpåvirkninger og ressourceforbrug udført ved hjælp af livscyklusvurdering (LCA). Herefter er der gennemført en række livscyklusvurderinger med det formål at identificere og evaluere muligheder for miljømæssig optimering af termiske oprensningsmetoder.

Muligheder for miljømæssig optimering

De termiske oprensningsmetoder er alle relativt energitunge, hvorfor en minimering af opvarmningsbehovet vil have stor betydning. Den anvendte energimængde til at opvarme jorden er afhængig af jordvolumenet, overfladearealet og den anvendte termiske teknik. Energiforbruget er dermed afhængigt af anvendt energitype (elektrisk effekt ved brug af strøm eller dampinjektion ved brug af naturgas eller diesel) og varigheden af driften, indtil den fornødne oprensningstemperatur og termiske behandling for at fjerne forureningen er nået. Herudover medgår der en betydelig energimængde til drift af luft- og vandbehandlingsanlæg. Endelig medgår der energi til brændstof i forbindelse med tilsyn og den efterfølgende kontrolfase. Alle disse processer kan således være mål for energioptimering.

Materialeforbrug kan optimeres ved et forbedret design, der minimerer mængden af materialer, ved genbrug af materialer og ved substitution til mindre miljøbelastende materialer.

På baggrund af en indledende brainstorm er der udvalgt følgende optimeringsscenarier:

- Diskontinueret opvarmning (opvarmning uden for kraftværkernes spidslastperioder) (ISTD, ET-DSP, RFH).
- Substitution af normal dansk elmix med brug af certificeret vandkraft (ISTD, ET-DSP, RFH).
- Alternative opbygninger af vapor cap (fælles for alle termiske metoder).
- Substitution af stenkulbaseret aktivt kul med biobaseret aktivt kul fremstillet af kokosnøddeskaller (fælles for alle termiske metoder).
- Anvendelse af alternative stållegeringer i varmelegemer og beskyttelsesrør (ISTD).
- Kondenserende versus ikke kondenserende kedel (SEE).
- Substitution af stål med glasfiber i dampinjektionsboringer (SEE).

- Indskrænket brug af interkontinental transport af eksperter og udstyr (generelt).

Med udgangspunkt i relevante basis-scenarier for de fire termiske teknikker er der gennemført sammenlignende livscyklusanalyser med henblik på at beskrive optimeringspotentialer for de enkelte tiltag.

Resultater og konklusioner

Livscyklusvurderinger af termisk oprensning viser, at on-site energiforbrug indebærer de absolut største miljøpåvirkninger og ressourceforbrug. Dernæst er det materialeforbrug til overjordiske installationer som eksempelvis vapor cap og behandlingsanlæg og underjordiske materialer til varmebrønde, ventilationsboringer mv., der giver de største miljøpåvirkninger og ressourceforbrug.

Energibehovet til in situ termisk oprensning afhænger af volumen og overfladeareal af den jord, der skal oprenses. En nøjagtig og præcis afgrænsning og kvantificering af forureningen vil give mulighed for en optimal afgrænsning af det område, der skal oprenses. En detaljeret risikovurdering vil desuden give grundlag for at fastlægge den fornødne oprensningseffektivitet. Samlet vurderes detaljerede og målrettede undersøgelser og risikovurderinger at indebære et væsentligt potentiale for projektoptimering. Fokus i dette projekt er dog at udføre en miljømæssig optimering af et projekt, hvor der på forhånd er foretaget en velfunderet afgrænsning af behandlingsområdet.

Ved hjælp af livscyklusvurderinger er der identificeret og evalueret en række muligheder for miljømæssig optimering af termiske oprensningsteknikker. Herigennem er reduktionspotentialer for de enkelte muligheder blevet belyst. Resultaterne er gengivet oversigtligt i efterfølgende tabel.

OVERSIGT OVER IDENTIFICEREDE MULIGHEDER FOR MILJØMÆSSIG OPTIMERING AF DELPROCESSER VED TERMISK OPRENSNING.

OPTIMERINGSSCENARIE	REDUKTIONSPOTENTIALE
OPVARMNING UDENFOR KRAFTVÆRKNES SPIDSLASTPERIODER	STORT POTENTIALE FOR REDUKTION AF MILJØBELASTNINGER OG RESSOURCEFORBRUG HVIS VEDVARENDE ENERGI ER TIL RÅDIGHED I NETTET. INDEBÆRER ET MARGINALT STØRRE ELFORBRUG.
ALTERNATIVE OPBYGNINGER AF VAPOR CAP	MODERAT POTENTIALE, MEN INDEBÆRER SKÆRPEDE KRAV TIL UDFØRELSESMETODER MV.
SUBSTITUTION AF STENKULSBASERET AKTIVT KUL MED BIOBASERET AKTIVT KUL	VED LUFTBEHANDLING MED AKTIVT KUL ER DER ET MODERAT POTENTIALE FOR REDUKTION AF MILJØPÅVIRKNINGER OG ET LILLE POTENTIALE FOR REDUKTION AF RESSOURCEFORBRUG. P.T. INGEN DRIFTSERFARINGER.
ANVENDELSE AF ALTERNATIVE STÅLLEGERINGER I VARMELEGEMER MV.	STORT POTENTIALE FOR REDUKTION I NIKKELFORBRUG VED BRUG AF ALTERNATIVE LEGERINGER I RUSTFRIT STÅL.
KONDENSERENDE VERSUS IKKE KONDENSERENDE KEDEL (DAMP)	STORT POTENTIALE FOR ENERGIBESPARELSE VED BRUG AF NATURGASFYRET KONDENSERENDE KEDEL. VIL MEDFØRE MODERATE REDUKTIONER I MILJØPÅVIRKNINGER.
SUBSTITUTION AF STÅL MED GLASFIBER I DAMPINJEKTIONSBORINGER (DAMP)	MODERAT REDUKTION AF MILJØPÅVIRKNINGER OG RESSOURCEFORBRUG.
BRUG AF LOKALE EKSPERTER OG UDSTYR	MINDRE REDUKTION AF MILJØPÅVIRKNINGER OG RESSOURCEFORBRUG.

Ser man på reduktionspotentialer for de termiske metoder som helhed, er det samlede reduktionspotentialer for miljøpåvirkninger, afhængigt af den pågældende metode, estimeret til 10-21%. Reduktionspotentialer for ressourceforbrug er estimeret til 8-20%. Der er heri antaget en under danske betingelser relativt stor lokalitet, svarende til et oprensningssområde på ca. 1.300 m² og et volumen på ca. 11.500 m³.

Summary and Conclusion

Background and purpose

The objective of the project is to identify the scope for environmental optimization of the following four thermal remediation techniques:

- Thermal Conduction Heating (TCH). The specific TCH technique evaluated in this project is In Situ Thermal Desorption (ISTD)
- Steam Enhanced Remediation (SER) or Steam Enhanced Extraction (SEE)
- Electrical Resistance Heating (ERH). The specific ERH technique evaluated in this project is Electro-Thermal Dynamic Stripping Process (ET-DSP™)
- Radio Frequency Heating (RFH).

A systematic mapping of energy and material consumption for the individual remediation techniques has been carried out based on actual project experience and standardised in two basic scenarios for a small (180 m²) and a large (1,300 m²) site contaminated with chlorinated solvents. These data are used in a detailed analysis of the environmental impacts and resource consumption associated with each thermal technology performed using life cycle assessment (LCA). Subsequently, a number of life cycle assessments have been performed to identify and evaluate options for reducing the environmental impacts due to the thermal remediation techniques.

Possibilities for environmental optimization

Thermal remediation techniques are all relatively energy intensive methods and therefore minimizing the demand for heating is very important. The amount of energy required to heat the soil depends on the volume of soil, the surface area, and the type of energy required by the specific technique (electrical power or steam injection using natural gas or diesel) as well as the efficiency and duration of the process to attain the treatment temperature required to remediate the soil contamination. In addition, a considerable amount of energy is expended by the air and water treatment facilities. Finally, fuel energy is consumed for transportation during supervision and in the subsequent verification phase. All these processes can be evaluated with regard to energy optimization.

Resource consumption can be optimised by improved design minimising the amount of material required, by increased recycling and by substitution to less environmentally detrimental materials.

Based on an initial brainstorming, the following optimization scenarios were selected:

- Discrete heating (heating outside peak power demand) (ISTD, ET-DSP™, RFH).
- Substitution of normal Danish electricity mix with certified hydropower (ISTD, ET-DSP™, and RFH).
- Alternative materials for vapour cap (all thermal methods).
- Substitution of coal-based activated carbon with bio-based activated carbon from coconut shells (all thermal methods).
- Use of alternative steel alloys in heaters and well elements (ISTD).
- Condensing versus non condensing boilers (SEE).
- Substitution of steel with fiberglass in steam injection wells (SEE).
- Replace intercontinental transport of experts and equipment with local resources (all thermal methods).

Based on the basic scenarios for the four thermal techniques, life cycle assessments have been performed to analysis the optimization potential of the individual measures.

Results and conclusions

Energy requirements for in situ thermal remediation depends on volume and surface area of the area to be remediated and therefore an accurate and precise delineation and quantification of the pollution will allow optimisation the remediation design. A detailed risk assessment will also determine the necessary remediation efficiency and possibilities for optimisation. Significant potential for project optimization is therefore associated with detailed site investigations and risk assessment with emphasis on remediation goals and risk management. The focus of this project is however to identify options for environmental optimization of remediation projects requiring thermal treatment methods after meticulous identification of the treatment area.

Life cycle assessment to evaluate a range of options for environmental optimization of thermal remediation methods and identify the reduction potential have provided the results summarized in the following table.

SUMMARY OF POTENTIAL FOR ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION OF THERMAL REMEDITATION TECHNIQUES

OPTIMISATION OPTIONS	POTENTIAL FOR REDUCTION OF ENVIRONMENTAL IMPACTS
HEATING OUTSIDE PEAK POWER PRODUCTION	HIGH POTENTIAL FOR REDUCING ENVIRONMENTAL IMPACT AND RESOURCE CONSUMPTION IF RENEWABLE ENERGY IS AVAILABLE IN THE GRID CAUSES A MARGINALLY HIGHER ELECTRICITY CONSUMPTION
ALTERNATIVE MATERIALS FOR THE VAPOR CAP	MODERATE POTENTIAL, BUT INVOLVES STRINGENT CONTROL OF PRODUCTION METHODS, ETC.
SUBSTITUTION OF COAL-BASED ACTIVATED CARBON WITH BIO-BASED ACTIVATED CARBON	A MODERATE POTENTIAL FOR REDUCING ENVIRONMENTAL IMPACTS AND A LOW POTENTIAL FOR REDUCING RESOURCE FOR THE TREATMENT PLANT FOR CONTAMINATED AIR. NOT VERIFIED AND NO ACTUAL OPERATING EXPERIENCE.
THE USE OF ALTERNATIVE STEEL ALLOYS, HEATERS, ETC.	HIGH POTENTIAL FOR REDUCTION OF NICKEL CONSUMPTION BY USE OF ALTERNATIVE ALLOYS IN STAINLESS STEEL.
CONDENSING VERSUS NON-CONDENSING BOILER (STEAM)	HIGH POTENTIAL FOR ENERGY REDUCTION BY USING NATURAL GAS-FIRED CONDENSING BOILERS. MODERATE REDUCTION IN ENVIRONMENTAL IMPACTS.
SUBSTITUTING STEEL WITH FIBERGLASS IN STEAM INJECTION WELLS (STEAM)	MODERATE REDUCTION OF ENVIRONMENTAL IMPACTS AND RESOURCE CONSUMPTION.
USING LOCAL EXPERTS AND EQUIPMENT	MINOR REDUCTION OF ENVIRONMENTAL IMPACTS AND RESOURCE CONSUMPTION.

With regard to the overall potential for reduction of environmental impacts for thermal remediation techniques, the total reduction potential is estimated at 10-21%, dependent on the actual technique. The potential for reduction of resource consumption is estimated to be about 8-20%. This assessment is based on Danish conditions for a relatively large site with a treatment area of approximately 1,300 m² and a treated volume of approximately 11.500 m³.

1 Projektbeskrivelse

1.1. Projektkoncept og formål

Projektet sigter på at afdække mulighederne for miljømæssig optimering af fire termiske oprensningsteknikker.

Med udgangspunkt i konkrete projekterfaringer foretages en systematisk kortlægning af energi- og materialeforbrug for de enkelte oprensningsteknikker. Disse data anvendes i en detaljeret miljømæssig analyse af de enkelte afværgemetoderes miljøpåvirkninger og ressourceforbrug udført ved hjælp af en livscyklusvurdering (LCA). Herudover indsamles forslag til, hvorledes der kan foretages en miljømæssig optimering af de termiske metoder, eksempelvis ved udskiftning af materialetyper eller ændret opvarmningsstrategi. Potentialet for reduktion af miljøpåvirkninger og ressourceforbrug kvantificeres ved hjælp af livscyklusvurderinger af de optimerede systemer.

Kortlægningen danner grundlag for anvisninger til miljøforbedrende tiltag, der kan implementeres i forbindelse med projektering, udførelse og drift.

1.1.1. De fire termiske oprensningsteknikker

Projektet beskæftiger sig med følgende 4 termiske metoder:

- Termisk ledningsevneopvarmning - Thermal Conductive Heating (TCH). Den specifikke TCH metode, som er undersøgt i dette projekt, benævnes In situ Thermal Desorption (ISTD)
- Dampoprensning - Steam Enhanced Remediation (SER) eller Steam Enhanced Extraction (SEE)
- Elektrisk modstandsoveropvarmning - Electric Resistance Heating (ERH). Den specifikke ERH metode, som er undersøgt i dette projekt, benævnes Electro-Thermal Dynamic Stripping Process (ET-DSP™)
- Radiofrekvensopvarmning - Radio Frequency Heating (RFH).

SEE, ERH og RFH metoderne er alle afhængige af tilstedeværelsen af vand, og er derfor begrænset til måltemperaturer svarende til porevandets kogepunkt. Derfor er metoderne primært egnede til oprensning af forureningskilder med flygtige/lavt kogende stoffer. Med ISTD metoden kan der opnås jordtemperaturer op til 400-500°C, hvorved forureninger med højere kogende stoffer (tungere olier, tjære, kreosot, PCB'er, dioxiner mv.) også kan oprenses. En sådan høj-temperatur løsning kræver et mere omfattende design og større energiforbrug pr. enhed behandlet jord, hvorfor de tilknyttede miljøbelastninger derfor ligeledes er større. I dette projekt er der for alle metoder taget udgangspunkt i oprensninger af flygtige forureninger såsom chlorerede opløsningsmidler, hvor måltemperaturen er lig med porevandets kogepunkt.

Gennem de seneste ca. 15 år er tre termiske oprensningsteknikker (Steam Enhanced Extraction (SEE), In situ Termisk Desorption (ISTD) og Electric Resistance Heating (ERH)) dokumenteret at indebære mulighed for hurtig og ekstrem effektiv oprensning. Radiofrekvensopvarmning (RFH) er en fjerde metode, som blev anvendt sporadisk i USA i 1990'erne og som nu søges udviklet i Europa som et supplement til ovennævnte opvarmningsmetoder. Danske oprensninger med SEE, ISTD, ERH og RFH er ligeledes gennemført og afsluttet. RFH har dog kun været udført én gang i pilotskala, og det pågældende pilotprojekt måtte afbrydes, inden oprensningens mål var nået. I BILAG A er principper og anlægsopbygning for de fire metoder præsenteret.

1.1.2. Afgrænsning

I forbindelse med projektet foretages der ikke kortlægning af energi- og materialeforbrug samt miljøpåvirkninger som følge af undersøgelsesaktiviteter (forundersøgelser), byggeplads foranstaltninger, anvendelse af skurvogne m.v., idet den samlede påvirkning heraf vurderes at være ensartet uanset valg af afværgeteknik. Derimod medtages kørsel i forbindelse med drift og monitorering, idet driftsperiode og hyppighed af kørsel kan variere. I BILAG H er der redegjort for mulighed for ekstern energiregulering ved valg af klimavenlige energiløsninger ifm. køb af el.

For de fire termiske metoder er der foretaget vurderinger i forhold til både de underjordiske installationer og det overjordiske behandlings- og forsyningsanlæg. For de overjordiske anlæg medtages, foruden energi- og materialeforbrug til drift af luft- og vandbehandlingsanlæg, endvidere materialeforbrug for hver enkelt af de betydeligste overjordiske anlægskomponenter. Der er i opgørelsen indberegnet, at overjordiske behandlingsanlæg typisk har en langt længere levetid og genbrugsgrad end de underjordiske installationer. Ved at medtage behandlingsanlæg fås et relativt mål for, hvor stor en andel behandlingsanlæg udgør af den samlede miljøbelastning set i et livscyklusperspektiv. Dette kan få betydning for, i hvor høj grad, der fokuseres herpå i efterfølgende projekter.

1.2. Brainstorm og forslag til aktiviteter

Før iværksættelse af en konkret kortlægning af potentielle miljøpåvirkninger og mulighederne for optimering under design- og driftsfasen, er der i december 2010 foretaget en brainstorm blandt en række aktører, som enten har erfaringer inden for dimensionering af termiske oprensninger eller ved evaluering af miljøpåvirkninger.

Ved mødet blev en række emner med betydning for miljømæssige optimering identificeret:

- Optimering af omfanget af de fornødne afværgetiltag, herunder afgrænsning af det jordvolumen, for hvilket der er behov for behandling samt definition af realistiske oprensningskriterier i forhold til de lokalitetsspecifikke forhold og krav til dokumentation (f.eks. gennemsnit, masse- og fluxbetragtning eller en fastlagt grænse).
- Optimering af valg af afværgeteknik eller en kombination af afværgeteknikker, som passer til lokalitetsspecifikke forhold, efter en afvejning af geologi, hydrogeologiske forhold, effektivitet, tidshorisont, mulige miljøpåvirkninger og økonomi. Hvis nødvendigt, teknik til afskæring af grundvandsflux eller dræning med henblik på at reducere opvarmningsbehovet.
- Energoptimering ved hjælp af processtyring og driftsoptimering eller ved genanvendelse af damp til opvarmning af procesvand (SER), ved at forhindre vandindtrængning, ved at anvende intens opvarmning for at minimere varmetab, ved at anvende kontinuert eller diskontinuert opvarmning med en mindre tæthed mellem varmeboringerne eller ved at nedsætte elforbruget i kraftværkernes spidslastperioder.
- Minimering af materialeforbrug ved optimering af design og dimensioner, vurdering af mulighed for erstatning med mindre miljøbelastende materialer og genanvendelse.

2 Metodebeskrivelse

2.1. Miljømæssig optimering

De termiske oprensningsmetoder er alle relativt energitunge, hvorfor en minimering af opvarmningsbehovet har stor betydning. Den anvendte energimængde til at opvarme jorden er afhængig af jordvolumen, overfladeareal og den anvendte termiske teknik. Energibehovet er dermed afhængig af anvendt energitype (elektrisk effekt ved brug af strøm eller dampinjektion ved brug af naturgas eller diesel) og varigheden af driften indtil den fornødne oprensningstemperatur for at fjerne forureningen er nået. Herudover medgår der en betydelig energimængde til drift af luft- og vandbehandlingsanlæg. Endelig medgår der energi til brændstof i forbindelse med tilsyn og den efterfølgende kontrolfase. Alle disse processer kan således være mål for energioptimering.

Materialeforbrug kan optimeres ved et forbedret design, der minimerer mængden af materialer, ved genbrug af materialer og ved substitution til mindre miljøbelastende materialer.

På baggrund af den indledende brainstorm er der udvalgt følgende optimeringsscenarier:

- Diskontinueret opvarmning (Opvarmning udenfor kraftværkernes spidslastperioder) (ISTD, ET-DSP™, RFH).
- Substitution af normal dansk elmix med brug af certificeret vandkraft (ISTD, ET-DSP™, RFH).
- Alternative opbygninger af vapor cap (fælles for alle termiske metoder).
- Substitution af stenkulsbaseret aktivt kul med biobaseret aktivt kul fremstillet af kokosnøddeskaller (fælles for alle termiske metoder).
- Anvendelse af alternative stållegeringer i varmelegemer og beskyttelsesrør samt alternative nikkellegeringer i cold pins (ISTD).
- Kondenserende versus ikke kondenserende kedel (SEE).
- Substitution af stål med glasfiber i dampinjektionsboringer (SEE).
- Brug af lokale eksperter og udstyr (analyseret for ERH, men relevant for alle termiske metoder).

Med udgangspunkt i relevante basis-scenarier for de fire termiske teknikker er der gennemført sammenlignende livscyklusanalyser med henblik på at beskrive optimeringspotentialet for de enkelte tiltag. Udvalgte resultater af livscyklusanalyserne for basis-scenarierne er gennemgået i kapitel 3. Resultaterne af de sammenlignende livscyklusanalyser, der viser optimeringspotentialet for de identificerede optimeringsscenarier er gennemgået i kapitel 4. Den potentielle betydning af de enkelte optimeringsscenarier i forhold til den samlede oprensning er diskuteret i kapitel 5.

2.2. Opgørelse af materiale- og energiforbrug

2.2.1. Basis-scenarier

Da der foreligger stor erfaring ved anvendelse af ISTD har projektet fokuseret på at udarbejde og udvikle de anvendte arbejdsmetoder og -teknikker med udgangspunkt i ISTD teknikken. Efterfølgende er det udviklede koncept overført til de andre teknikker SEE, ET-DSP™ og RFH.

Der er foretaget en opgørelse af forbruget af materialer og energi ved en oprensning med ISTD, SEE og ET-DSP™ på henholdsvis en lille (180 m²) og en stor (1.300 m²) lokalitet forurenet med chlorerede opløsningsmidler. Disse størrelser er valgt, da de repræsenterer to lokaliteter, hvor der

er gennemført ISTD-oprensninger, nemlig i Skuldelev ved Frederikssund og i Reerslev ved Hedehusene vest for København. Derved var det fornødne lokalitetsspecifikke datagrundlag for gennemførelsen af analyserne allerede etableret forud for starten af projektet. De to lokaliteter benævnes efterfølgende som typelokaliteter og betegnelserne "lille" og "stor" lokalitet vil blive benyttet.

For RFH er det vurderet, at det vil være urealistisk at opskalere til det store oprensningsprojekt, idet metoden hidtil udelukkende har været benyttet til oprensning af mindre lokaliteter. RFH er derfor kun vurderet i forhold til et aktuelt dansk pilotprojekt (80 m²) og et senarie opskaleret til den lille lokalitet på 180 m².

Som grundlag for livscyklusvurderingen af ISTD er der indledningsvis (BILAG B) foretaget en specifikation af processer og materialeforbrug og identificeret en række elementer og aspekter som krævede afklaring og yderligere detaljering, f.eks. flere oplysninger om de anvendte betontyper, vægt og genbrugsrater af diverse anlægskomponenter m.v.

I opgørelsen af materiale- og energiforbrug for de to typelokaliteter samt for RFH pilotskala projektet er det valgt at modificere inddata, så de i højere grad er sammenlignelige. Eksempelvis er der forudsat samme transportafstand i forbindelse med persontransport ved tilsyn og transport af materialer til og fra lokaliteterne og forbruget af aktivt kul er justeret for at gøre det mere generelt og dermed sammenlignelige. Nøgledata er vist i Tabel 2-1.

TABEL 2-1
STANDARDPARAMETRE FOR DE TO TYPELOKALITETER OG PILOTSKALA PROJEKTET FOR RFH

		Pilotskala (RFH)	Lille lokalitet	Stor lokalitet
Areal	m ²	25	180	1.300
Dybde	m	8	7	9
Jordvolumen	m ³	100	1.200	11.510
Tilsyn – tur/retur	km	90	90	90
Mængde chlorerede opløsningsmidler fjernet	kg	75	400	2.400

Opgørelse over materiale- og energiforbrug omfatter oplysninger opdelt i en række delprocesser:

- On-site energiforbrug til opvarmning af jord og drift af behandlingsanlæg (on-site energy/electricity)
- Overjordiske materialer (above grade materials)
- Underjordiske materialer (wellfield materials)
- Entreprenørmaskiner (machines)
- Transport (transportation)

Opgørelse af materiale- og energiforbrug samt livscyklusvurderinger i deres helhed for de 4 teknikker ISTD, SEE, ET-DSPTM samt RFH er vedlagt i BILAG C, BILAG D, BILAG E og BILAG F. For de respektive termiske metoder er der i bilagenes appendiks 1 givet oversigter over følgende processer:

- Transport
- Underjordisk udstyr og materialeforbrug
- Overjordisk udstyr og materialeforbrug

- Energiforbrug

For forbruget af udstyr og materialer er vægten og den regningsmæssige genanvendelse specificeret. Såfremt materialer ikke genbruges er anvendelsesprocenten 100%, mens en anvendelsesprocent på 25% betyder at materialet kan genbruges på op til 4 projekter. Typisk vil de overjordiske materialer f.eks. behandlingssystemer for de ekstraherede gasser og væsker kunne genanvendes ca. 4 gange, mens aktivt kul i filterenheder ikke genbruges.

For de respektive termiske metoder er beregningsforudsætninger og afgrænsning af LCA analyserne specificeret i bilagens appendiks 2.

2.2.2. Optimeringsscenarier

For de respektive optimeringsscenarier er den potentielle reduktion i energi- og materialeforbrug kvantificeret, hvorved der er skabt grundlag for en sammenlignede livscyklusanalyse for de undersøgte optimeringsscenarier.

Livscyklusanalyserne af de enkelte optimeringsscenarier er i reglen gennemført for én af teknikkerne, men resultaterne er ofte repræsentative for flere af de øvrige teknikker. Der er redegjort for hvilket teknikker de respektive optimeringsscenarier er repræsentative for.

2.3. Livscyklusvurderinger - LCA

På baggrund af forbrugsopgørelsen for typelokaliteterne og pilotskalaprojektet for RFH er der foretaget detaljerede livscyklusvurderinger af miljøeffekter og ressourceforbrug for basis-scenarierne.

De sammenlignende livscyklusvurderinger for optimeringsscenarierne er derefter gennemført med udgangspunkt i resultaterne for basis-scenarierne, men er i højere grad fokuseret på de processer som optimeringen angår.

LCA-beregningsresultaterne er derefter anvendt i en vurdering af den miljømæssige effekt af de foreslåede ændringer i design og drift af de enkelte teknikker.

2.3.1. Miljøvurderingsmodel

Livscyklusvurderingen baserer sig på EDIP2003 metoden (Hauschild & Potting, 2005) for non-toksiske effekter (global opvarmning, ozondannelse, eutrofiering og forsuring) og USEtox™-modellen (Rosenbaum et al, 2008) for toksiske effekter (carcinogen humantoksicitet og non-carcinogen humantoksicitet). Endelig er respiratoriske effekter som følge af partikelforurening inkluderet (Humbert et al., 2011).

De anvendte LCA data bygger i vid udstrækning på Ecoinventdatabasen (Frischknecht et al., 2007). Som beskrevet i BILAG C, BILAG D, BILAG E og BILAG F er der foretaget justeringer i nogle af de anvendte processer for bedre at repræsentere danske produktionsforhold samt for at tage højde for bortskaffelsesfase og genvinding af materialer.

2.3.2. Miljøeffekter og ressourceparametre

Indledningsvis er der foretaget LCA-beregninger for basis-scenarierne for henholdsvis den lille og den store typelokalitet. De miljømæssige påvirkninger opgjort i LCA'en er opdelt i følgende 9 påvirkningskategorier:

- Global opvarmning
- Ozondannelse
- Forsuring
- Terrestrisk eutrofiering

- Akvatisk eutrofiering
- Respiratoriske effekter
- Økotoksicitet (ferskvand)
- Human toksicitet (non-carcinogen)
- Human toksicitet (carcinogen)

Af hensyn til sammenlignelighed er alle miljøpåvirkninger konverteret til personækvivalenter (PE), som repræsenterer en gennemsnitspersons årlige miljøpåvirkning.

Der er desuden foretaget opgørelse af de samlede forbrug af knappe ressourcer for de to projekter. Disse omfatter en række energiråstoffer og metaller:

- Brunkul
- Kul
- Naturgas
- Olie
- Aluminium
- Kobber
- Krom
- Jern
- Mangan
- Molybdæn
- Nikkel
- Uran

Ressourceforbruget er opgivet i personreserver (PR). Dette angiver et vægtet ressourceforbrug, hvor forbruget først er omregnet til personækvivalenter og efterfølgende vægtet i forhold til forsyningshorisonten for den enkelte ressource.

3 Basis-scenarier

I de følgende afsnit opsummeres materiale- og energiforbrug og livscyklusvurderinger for basis scenarierne for de fire termiske teknikker.

3.1. Termisk ledningsevne opvarmning – TCH/ISTD

3.1.1. Opgørelse af materiale- og energiforbrug

Det samlede regningsmæssige materiale- og energiforbrug fremgår af BILAG B.

Tabel 3-1 giver en oversigt over de væsentligste projektdata og nøgletal for materiale- og energiforbrug ved en ISTD oprensning på de to typelokaliteter..

TABEL 3-1
PROJEKTDATA OG NØGLETAL FOR MATERIALE- OG ENERGIFORBRUG FOR DE TO TYPELOKALITETER

ISTD KARAKTERISTIKA		LILLE LOKALITET (180 M ²)	STOR LOKALITET (1.300 M ²)
BEHANDLET JORDVOLUMEN	m ³	1.175	11.500
VARMEBORINGER (HVER MED ÉT ISTD VARMEELEMENT)	Antal	53	147
TRYKMONITERINGSBORINGER	Antal	24*	10*
VAKUUM VENTILATIONSBORINGER	Antal	21*	14*
TEMPERATURMONITERINGSBORINGER	Antal	20	30
BEHANDLINGSTEMPERATUR	°C	100-105	100-105
DRIFTSTID	dage	97	209
FORURENING FJERNET	kg	400	2.400
TRANSPORT			
PERSONTRANSPORT, BIL	km	13.035	19.918
MATERIALETRANSPORT, LASTBIL	tonkm	6.994	33.319
DAG-TIL-DAG LEVERING, VAREVOGN	tonkm	56	80
SÆRLEVERANCE, SKIBSTRANSPORT FRA USA	tonkm	4.476	16.171
MATERIALER, UNDERJORDISKE			
BETON/CEMENT GROUT	kg	1.633	2.731
STÅL, HEATERECANS MV.	kg	6.637	22.707
STÅL SPUNSVÆG	kg	17.376	
RUSTFRIT STÅL, HEATERE, FILTRE MV.	kg	1.264	3.456
KOBBER (KABLER)	kg	312	866
NIKKEL (COLD PINS)	kg	22	60
GLASFIBER	kg	45	127
MATERIALER, OVERJORDISKE			
SKUMBETON, VAPOR CAP	kg	41.600	275.200
STÅL	kg	3.893	5.593

ISTD KARAKTERISTIKA		LILLE LOKALITET (180 M ²)	STOR LOKALITET (1.300 M ²)
RUSTFRIT STÅL	kg	422	656
AKTIVT KUL (LUFT)	kg	2.646	15.984
AKTIVT KUL (VÆSKE)	kg	405	120**
POLYETHYLEN	kg	782	782
ENERGIFORBRUG, ON SITE			
ELEKTRICITET, JORDOPVARMNING	kWh	640.000	3.797.00
ELEKTRICITET, BEHANDLINGSANLÆG	kWh	126.000	185.000
BENZIN, MASKINER	l	846	1.031
DIESEL, MASKINER	l	3.773	5.177

* Ved den lille lokalitet (Skuldelev) blev der anvendt borer (konstruerede som trykmoniteringsboringer) langs spunsen, hvorfra luften kunne trækkes ned i området hvorefter ekstraktionen skete fra vertikale borer. Ved den store lokalitet (Reerslev) er ekstraktionen forgået fra horisontale dræn (i alt 14 stk. – hver med en længde på op til 30 meter) samt fra eksisterende vakuumboringer (tidligere SVE anlæg)

** Der blev ikke pumpet vand ved den store lokalitet (Reerslev) og derfor er der kun behandlet kondensat. Angivne mængder af vandkul er estimeret på baggrund af den beregnede massejernelse på vandfasen, men i realiteten er den samlede forbrugte mængde større, idet kulfiltrene er fyldt op forud for oprensningen og "ubrugt" kul derfor er bortskaffet ved projektets afslutning.

For den lille typelokalitet er der inkluderet en spunsvæg, der skal hindre gennemstrømning af grundvand, der virker afkølede. Spunsvæggen bidrager væsentligt til forbruget af stål på trods af at 2/3 af spunsjernene forventes genbrugt direkte på en anden lokalitet.

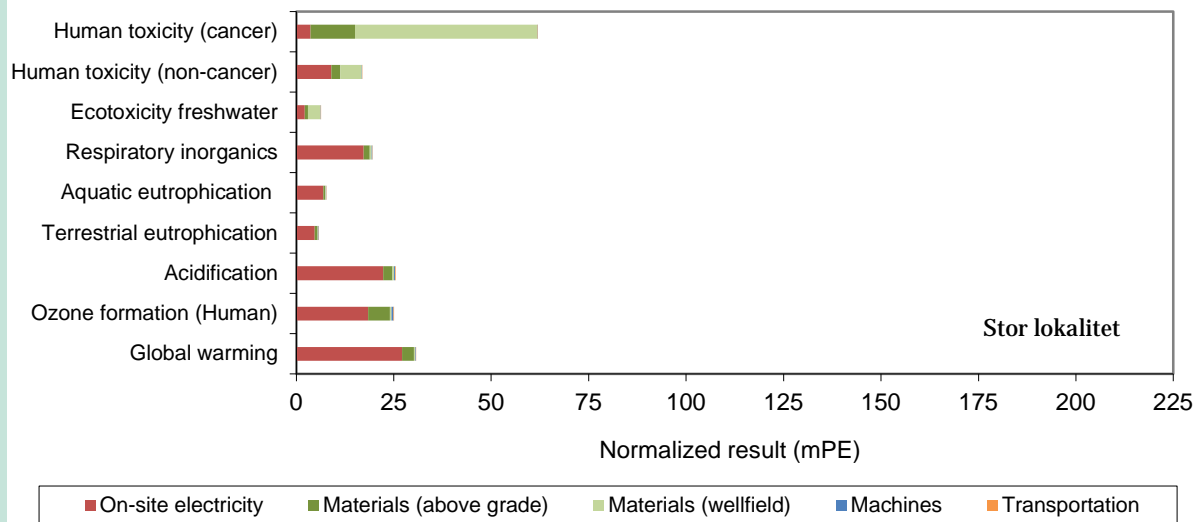
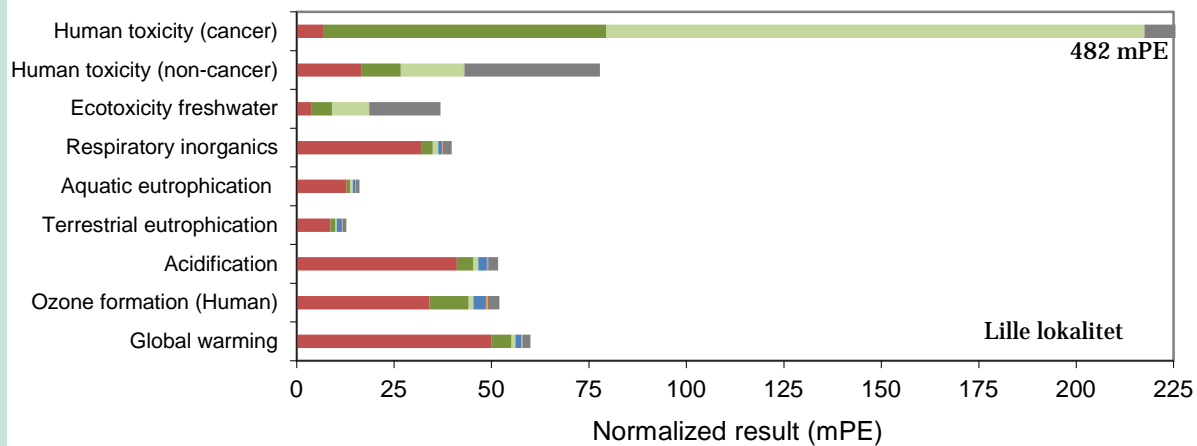
De fleste underjordiske materialer omfattende heatercans, stålføringer, stålfilter, beton og sand kan ikke genbruges direkte på andre projekter. For alle komponenter af stål og rustfrit stål antages at 80% af stålet genvindes til produktion af sekundært stål. Beton fra vapor cap antages nedknust og genanvendt som erstatning for grus. For plastikkomponenter antages ligeledes at 80% indgår i produktionen af sekundært granulat. For nikkel (i cold pins) og kobber (i ledninger) antages at henholdsvis 80 og 95% genvindes.

For de overjordiske materialer er der en lang række komponenter i behandlingssystemerne som forventes kun at blive anvendt en mindre del af deres levetid på det enkelte oprensningsprojekt. Derfor tilskrives kun en andel af materialeforbruget på oprensningsprojektet. Nærmere detaljer om direkte genanvendelse af komponenter fremgår af BILAG C.

3.1.2. Resultat af livscyklusvurdering for basis-scenarierne

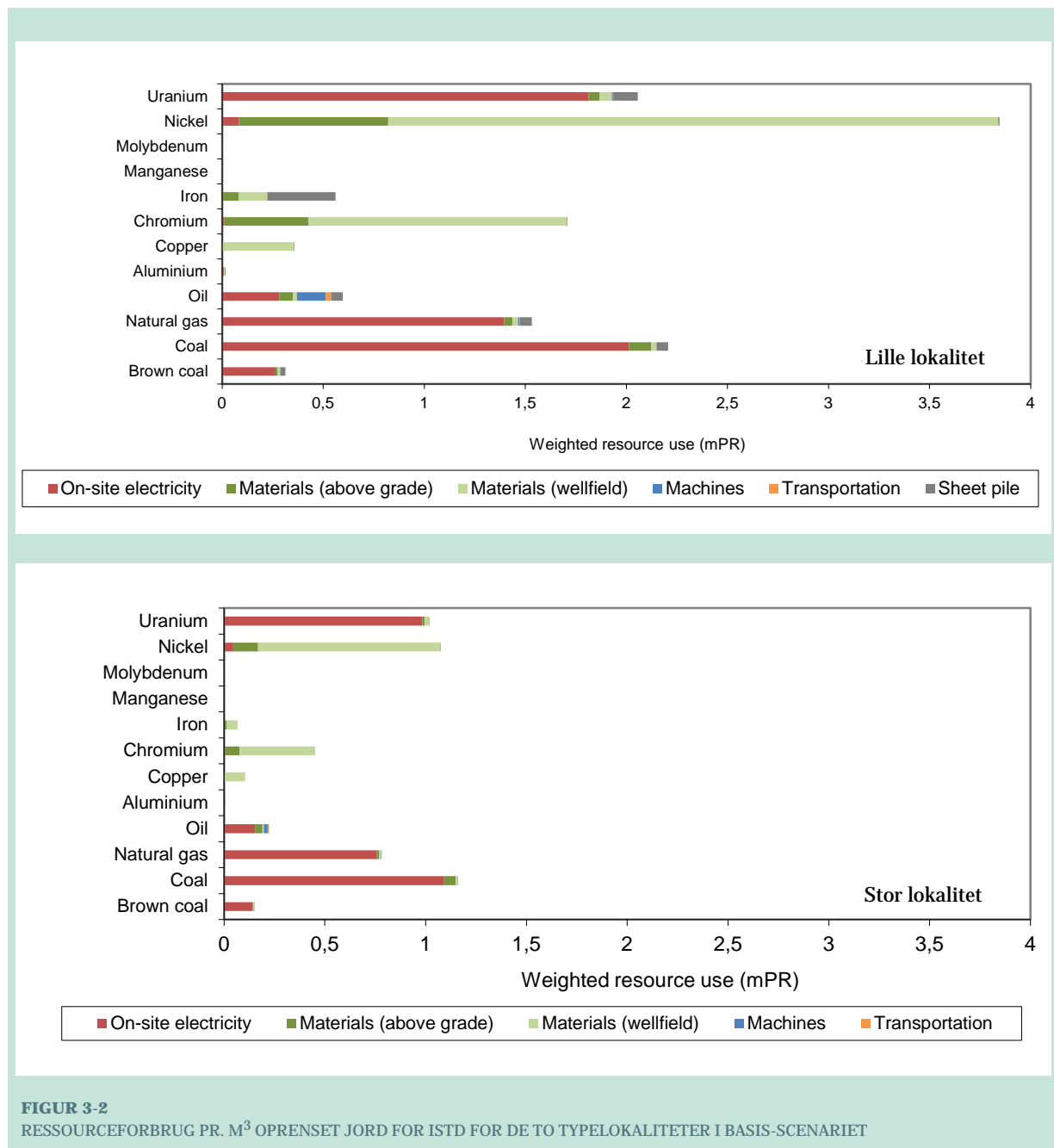
I BILAG C redegøres for de udførte livscyklusvurderinger. En opsummering følger herunder.

Figur 3-1 sammenstiller de miljømæssige påvirkninger pr. m³ oprenset jord for de to - typelokaliteter.



FIGUR 3-1
MILJØMÆSSIGE PÅVIRKNINGER PR. M³ OPRENSET JORD FOR ISTD FOR DE TO TYPELOKALITETER I BASIS-SCENARIET

I Figur 3-2 er de væsentligste ressourceforbrug pr. m³ oprenset jord for de to typelokaliteter.



Elektricitetsforbruget udgør den væsentligste kilde til de ikke-toksiske miljøeffekter. Ved den lille og store lokalitet anvendes respektivt 80% og 95% til jordopvarmning og resten til drift af SVE og behandlingsanlæg. Udover elforbruget bidrager det overjordiske brug af materialer mest til de ikke-toksiske effekter. Dette skyldes især de store mængder af beton til vapor cap samt forbruget af aktivt kul. Et detaljeret LCA-resultat for hver af underkategorierne Materials (above grade), Materials (wellfield) og Transportation kan ses af BILAG C.

Forbruget af stål og rustfrit stål til varmeboringerne (underjordiske materialer) og spunsvæg er de vigtigste kilder til de humantoksiske (især carcinogene) effekter og økotoksiske effekter, hvilket henføres til tungmetaleksponering relateret til minedrift og produktion af stål. Det bemærkes, at der generelt er større usikkerhed knyttet til vurderingen af de toksiske påvirkninger. Desuden kan normaliseringsreferencerne (den vurderede påvirkning pr person på årsbasis) være

underestimerede, idet det er sandsynligt at de underliggende opgørelser ikke er komplette grundet det store antal kemikalier, der potentielt kan bidrage til toksiske effekter.

Tilsyn i personbiler og transport af materialer til og fra lokaliteten samt brændstofforbrug i entreprenørmaskiner bidrager generelt begrænset til den samlede miljøbelastning.

De største ressourceforbrug er knyttet til elektricitetsforbruget, der er baseret på et mix af brændsler samt nikkel og krom, der indgår i rustfri stål, som især benyttes til de underjordiske materialer (varmeboringer, ekstraktionsboringer, varmelegemer mv.), men også til visse overjordiske komponenter (køler og beholder til aktivt kulfilter).

3.2. Dampoprensning – SEE

3.2.1. Opgørelse af materiale- og energiforbrug

Det samlede regningsmæssige materiale- og energiforbrug fremgår af BILAG D.

Tabel 3-2 giver en oversigt over de væsentligste projektdata og nøgletal for materiale- og energiforbrug ved en dampoprensning på de to typelokaliteter.

TABEL 3-2
PROJEKTDATA OG NØGLETAL FOR MATERIALE- OG ENERGIFORBRUG FOR DE TO TYPELOKALITETER

SEE KARAKTERISTIKA		LILLE LOKALITET (180 M ²)	STOR LOKALITET (1.300 M ²)
BEHANDLET JORDVOLUMEN	m ³	1.175	11.500
DAMPINJEKTIONSBORINGER	Antal	18	52
MULTIFASEEKSTRAKTIONSBORINGER	Antal	6	13
TRYKMONITERINGSBORINGER	Antal	5	10
TEMPERATUR MONITERINGSBORINGER	Antal	20	30
BEHANDLINGSTEMPERATUR	°C	100-105	100-105
DRIFTSTID	dage	83	120
FORURENING FJERNET	kg	400	2.400
TRANSPORT			
PERSONTRANSPORT, BIL	km	15.451	20.586
MATERIALETRANSPORT, LASTBIL	tonkm	6.640	32.783
DAG-TIL-DAG LEVERING, VAREVOGN	tonkm	52	68
MATERIALER, UNDERJORDISKE			
BETON/CEMENT GROUT	kg	5.775	21.620
STÅL, INJEKTIONS- OG EKSTRAKTIONSBOIRNGER MV.	kg	1.949	6.365
RUSTFRIT STÅL, FILTRE MV.	kg	377	1.175
KOBBER (KABLER)	kg	33	44
NIKKEL	kg	-	-
GLASFIBER	kg	45	129
MATERIALER, OVERJORDISKE			
SKUMBETON, VAPOR CAP	kg	41.600	275.200
STÅL	kg	3.893	9.263
RUSTFRIT STÅL	kg	480	1.120
AKTIVT KUL (LUFT)	kg	2.646	15.984
AKTIVT KUL (VÆSKE)	kg	405	120*

SEE KARAKTERISTIKA		LILLE LOKALITET (180 M ²)	STOR LOKALITET (1.300 M ²)
POLYETHYLEN	kg	835	1.208
ENERGIFORBRUG, ON SITE			
NATURAL GAS, HEAT BOILER	10 ⁶ BTU	2.740	20.290
ELEKTRICITET, BEHANDLINGSANLÆG	kWh	136.000	363.000
BENZIN, MASKINER	L	810	1.094
DIESEL, MASKINER	L	3.111	4.760

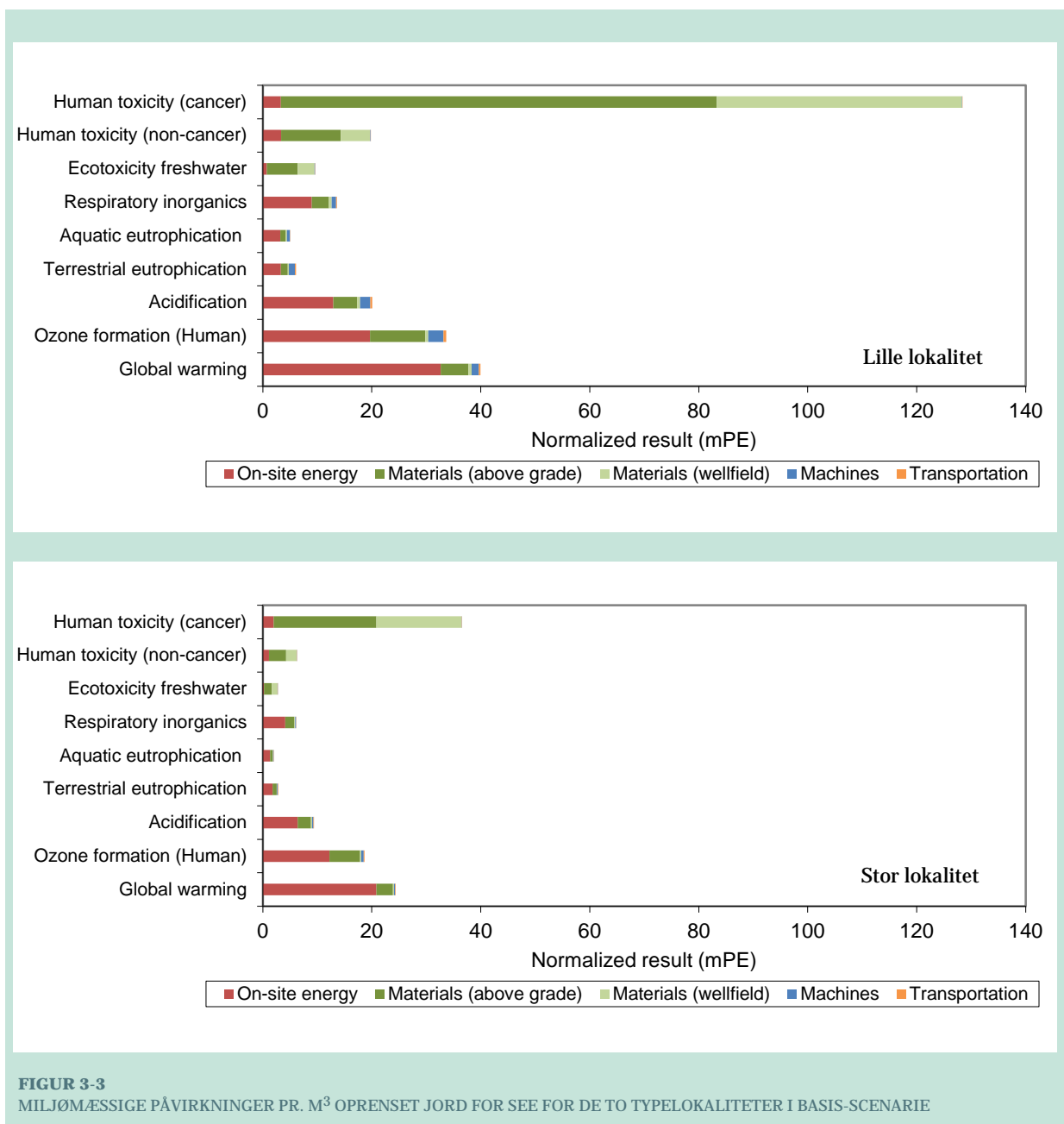
* Der blev ikke pumpet vand ved den store lokalitet (Reerslev) og derfor er der kun behandlet kondensat. Angivne mængder af vandkul er estimeret på baggrund af den beregnede massejernelse på vandfasen, men i realiteten er den samlede forbrugte mængde større, idet kulfiltrene er fyldt op forud for oprensningen og "ubrugt" kul derfor er bortskaffet ved projektets afslutning.

De fleste underjordiske materialer omfattende dampinjektionsboringer, ekstraktionsboringer, beton og sand kan ikke genbruges direkte. For alle komponenter af stål og rustfrit stål antages at 80% af stålet genvindes til produktion af sekundært stål. Beton fra vapor cap antages nedknust og genanvendt som erstatning for grus. For kobber (i ledninger) antages at 95% genvindes. For glasfiber antages 20% genbrugt og 80% at blive udnyttet som brændsel i et kraftvarmeanlæg.

3.2.2. Livscyklusvurdering

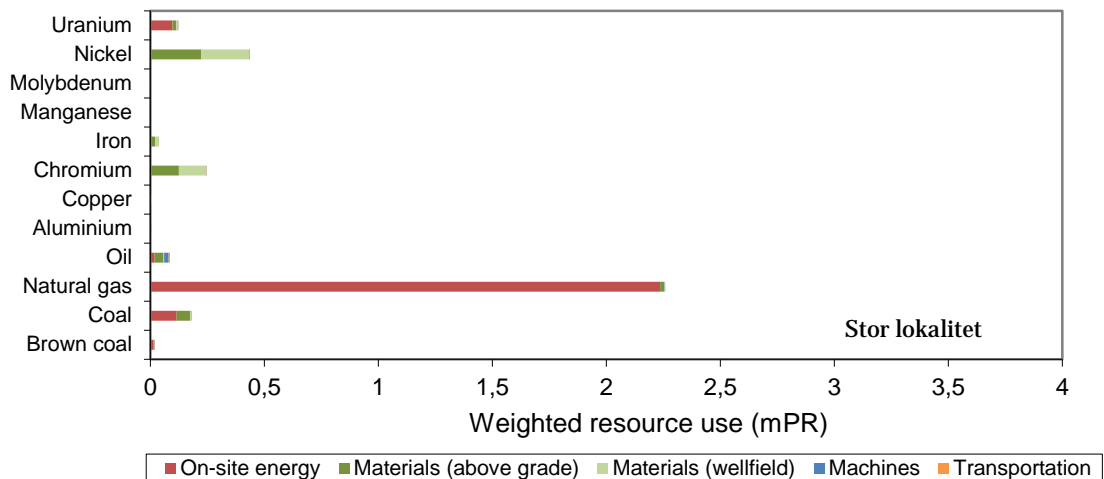
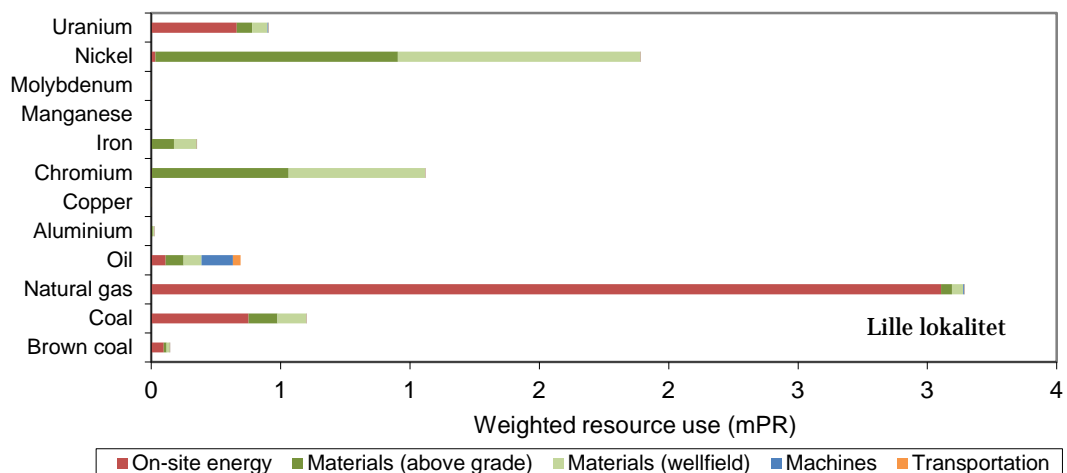
I BILAG D redegøres for de udførte livscyklusvurderinger for SEE teknikken. En opsummering følger herunder.

Figur 3-3 sammenstiller de miljømæssige påvirkninger pr. m³ oprenset jord for de to typelokaliteter.



FIGUR 3-3
MILJØMÆSSIGE PÅVIRKNINGER PR. M³ OPRENSET JORD FOR SEE FOR DE TO TYPELOKALITETER I BASIS-SCENARIE

I Figur 3-4 er de væsentligste ressourceforbrug pr. m³ oprenset jord for de 2 typelokaliteter.



FIGUR 3-4
RESSOURCEFORBRUG PR. M³ OPRENSET JORD FOR SEE FOR DE TO TYPELOKALITETER I BASIS-SCENARIE

Energiforbruget bidrager mest til de ikke-toksiske effekter, uanset om damproduktionen er baseret på naturgas- eller oliefyring (den viste beregning er for naturgas). Ved den lille og store lokalitet bidrager damproduktionen respektivt med 30%-73% og 53%-88% af de non-toksiske effekter fra energiforbruget, mens resten stammer fra elektriciteten anvendt til drift af SVE og behandlingsanlæg. Derudover bidrager den overjordiske brug af materialer mest til de ikke-toksiske effekter. Dette skyldes især de store mængder af beton til vapor cap samt forbruget af aktivt kul.

Brugen af stål og rustfrit stål til dampinjektions- og ekstraktionsboringer (underjordiske materialer) og behandlingssystem (overjordisk) er de vigtigste kilder til de humantoksiske (især carcinogene) og økotoksiske effekter på grund af tungmetalforurening relateret til minedrift og produktion af stål.

Tilsyn i personbiler og transport af materialer til og fra lokaliteten samt brændstofforbrug i entreprenørmaskiner bidrager generelt begrænset til den samlede miljøbelastning.

De største ressourceforbrug er knyttet til brugen af naturgas (alternativt olie) til dampproduktionen samt nikkel og krom, der indgår i det rustfri stål.

3.3. Elektrisk modstandsopvarmning – ERH/ET-DSP™

3.3.1. Opgørelse af materiale- og energiforbrug

Det samlede regningsmæssige materiale- og energiforbrug fremgår af BILAG E.

Tabel 3-3 giver en oversigt over de væsentligste projektdata og nøgletal for materiale- og energiforbrug ved en ET-DSP™ oprensning på de to typelokaliteter.

TABEL 3-3
PROJEKTDATA OG NØGLETAL FOR MATERIALE- OG ENERGIFORBRUG FOR DE TO TYPELOKALITETER

ET-DSP™ KARAKTERISTIKA		LILLE LOKALITET (180 M ²)	STOR LOKALITET (1.300 M ²)
BEHANDLET JORDVOLUMEN	m ³	1.175	11.500
ELEKTRODEBORINGER (HVER MED 2 ET-DSP™ ELEKTRODER)	Antal	36	140
VAKUUMVENTILATIONSBORINGER	Antal	8	38
TRYK- OG TEMPERATURMONITERINGSBORINGER	Antal	20	30
BEHANDLINGSTEMPERATUR	°C	100-105	100-105
DRIFTSTID	dage	132	178
FORURENING FJERNET	kg	400	2.400
TRANSPORT			
PERSONTRANSPORT, BIL	km	14.503	18.351
PERSONTRANSPORT, FLY	km	57.600	57.600
MATERIALETRANSPORT, LASTBIL	tonkm	6858	32.408
DAG-TIL-DAG LEVERING, VAREVOGN	tonkm	52	72
SÆRLEVERANCE, GODSTOG	tonkm	85.680	185.640
SÆRLEVERANCE, FRAGTSKIB	tonkm	91.800	198.900
SÆRLEVERANCE, FRAGTFLY	tonkm	1080	1080
MATERIALER, UNDERJORDISKE			
BETON/CEMENT GROUT	kg	1.720	4.412
STÅL, EKSTRAKTIONSBORINGER MV.	kg	1.383	6.039
RUSTFRIT STÅL, ELEKTRODER, FILTRE MV.	kg	266	1.778
KOBBER (KABLER)	kg	423	1645
GLASFIBER	kg	220	496
MATERIALER, OVERJORDISKE			
BETON, VAPOR CAP	kg	41.600	275.200
STÅL	kg	3.856	5.943
RUSTFRIT STÅL	kg	422	714
AKTIVT KUL (LUFT)	kg	2.484	15.902
AKTIVT KUL (VÆSKE)	kg	1.620	600
POLYETHYLEN	kg	799	870
ENERGIFORBRUG, ON SITE			
ELEKTRICITET, JORDOPVARMNING	kWh	503.000	3.276.000
ELEKTRICITET, BEHANDLINGSANLÆG	kWh	167.000	176.000

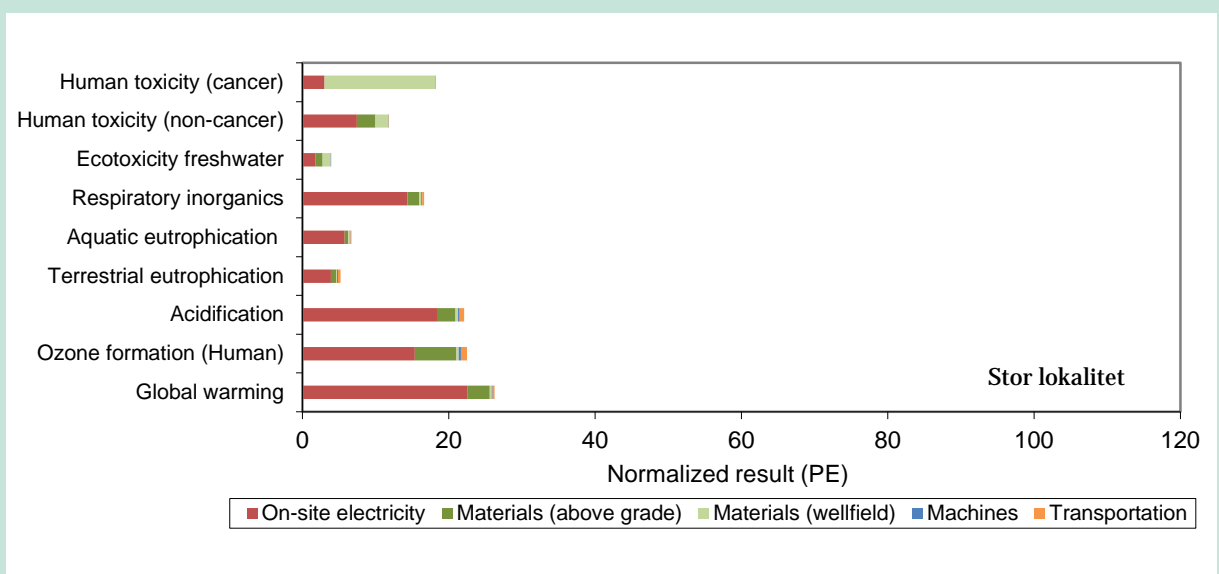
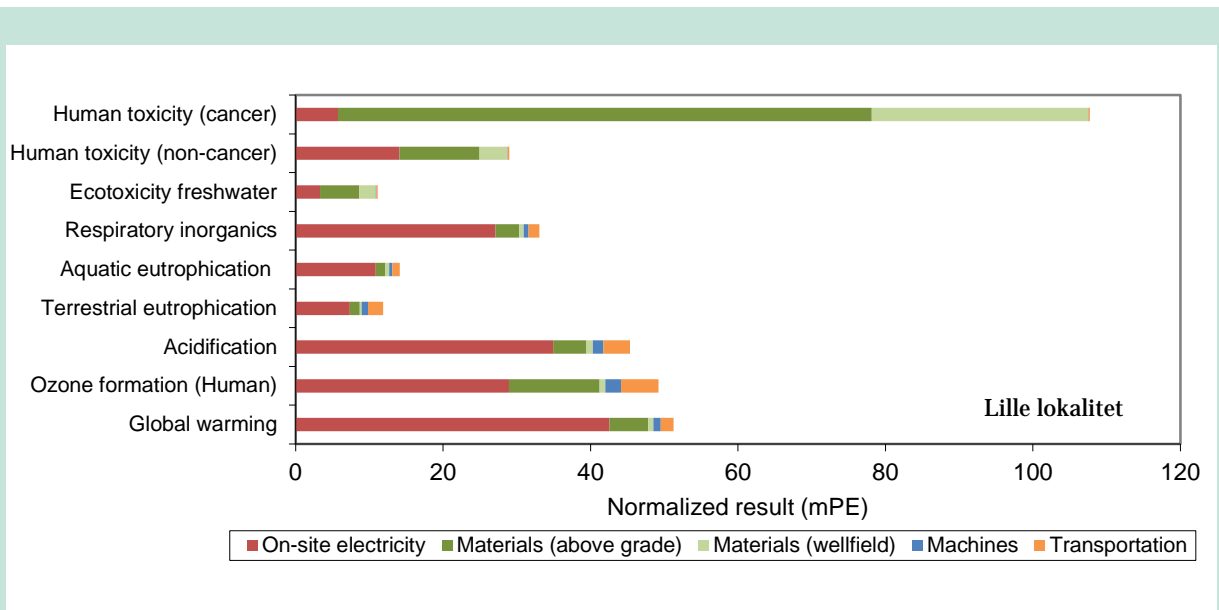
ET-DSP™ KARAKTERISTIKA		LILLE LOKALITET (180 M ²)	STOR LOKALITET (1.300 M ²)
BENZIN, MASKINER	L	779	2.259
DIESEL, MASKINER	L	990	3.554

De fleste underjordiske materialer omfattende elektroder, ekstraktionsboringer, beton og sand kan ikke genbruges direkte. For alle komponenter af stål og rustfrit stål antages at 80% af stålet genvindes til produktion af sekundært stål. Beton fra vapor cap antages nedknust og genanvendt som erstatning for grus. For plastikkomponenter antages ligeledes at 80% indgår i produktionen af sekundært granulat. For kobber (i ledninger) antages at 95% genvindes. For glasfiber antages 20% genbrugt og 80% at blive udnyttet som brændsel i et kraftvarmeanlæg.

3.3.2. Livscyklusvurdering

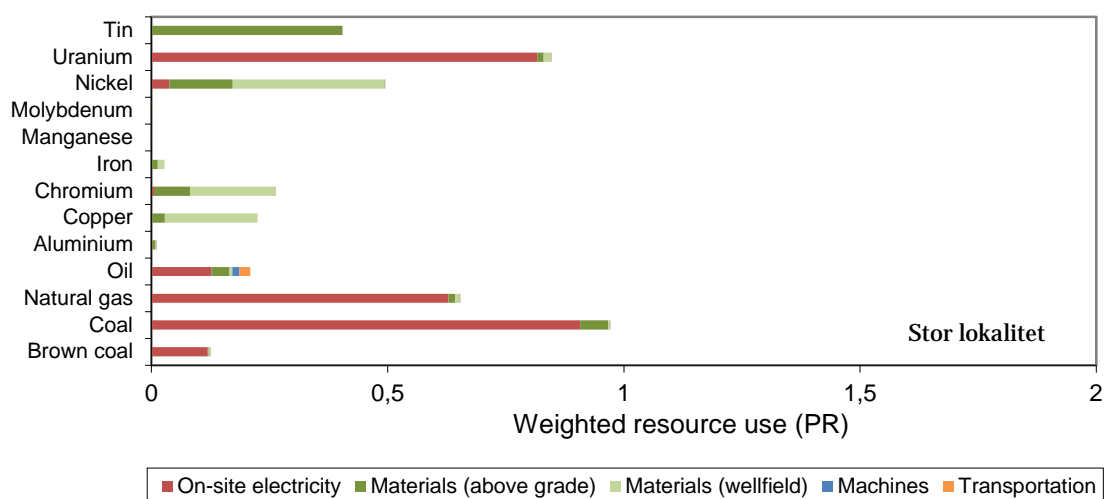
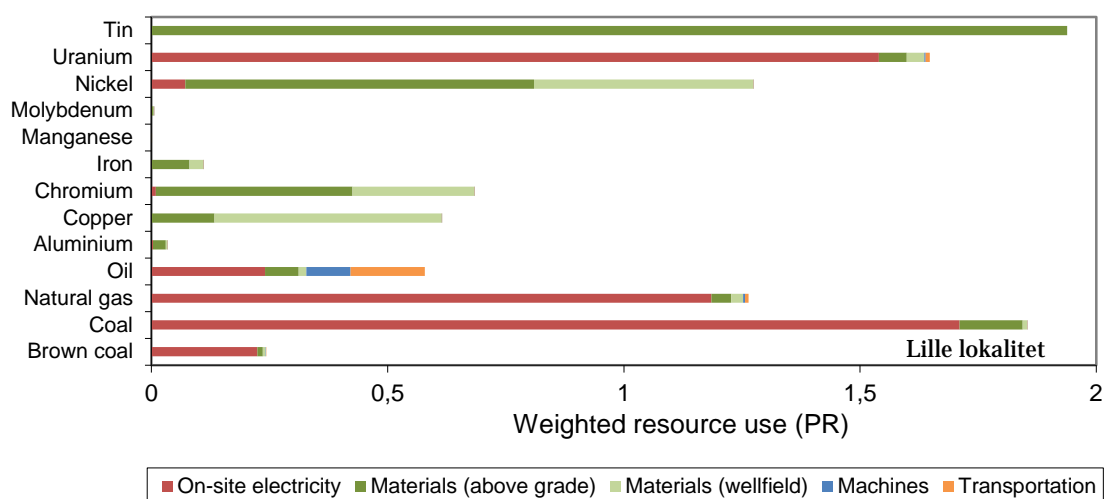
I BILAG E redegøres for de udførte livscyklusvurderinger. En opsummering følger herunder.

Figur 3-5 sammenstiller de miljømæssige påvirkninger pr. m³ oprenset jord for de to typelokaliteter.



FIGUR 3-5
MILJØMÆSSIGE PÅVIRKNINGER PR. M³ OPRENSET JORD FOR ET-DSP™ OPRENSNING FOR DE TO TYPELOKALITETER I BASIS-SCENARIOET

I Figur 3-6 er de væsentligste ressourceforbrug pr. m³ oprenset jord for de to typelokaliteter.



FIGUR 3-6
RESSOURCEFORBRUG PR. M³ OPRENSET JORD FOR ET-DSP™ OPRENSNING FOR DE TO TYPELOKALITETER I BASIS-SCENARIE

Elektricitetsforbruget on site udgør det største forbrug af energiressourcer og den relativt største miljøbelastning.

Elektricitetsforbruget udgør den væsentligste kilde til de ikke-toksiske miljøeffekter. Ved den lille og store lokalitet anvendes respektivt 77% og 95% til jordopvarmning og resten til drift af SVE og behandlingsanlæg. Udover elforbruget bidrager den overjordiske brug af materialer mest til de ikke-toksiske effekter. Dette skyldes især de store mængder af beton til vapor cap samt forbruget af aktivt kul.

Forbruget af stål og rustfrit stål til elektroder og ekstraktionsboringer (underjordiske materialer) og strømfordelingssystem, vandcirkulationssystem, behandlingsanlæg, tanke mv. (overjordisk) er de vigtigste kilder til de humantoksiske (især carcinogene) effekter og økotoksiske effekter, hvilket henføres til tungmetaleksponering relateret til minedrift og produktion af stål.

Som for de øvrige teknikker bidrager brændstofforbrug i entreprenørmaskiner generelt begrænset til den samlede miljøbelastning. Derimod har transportaktiviteter en relativt større betydning for ET-DSP™ end for de øvrige teknikker og er dermed den underkategori, der bidrager tredje mest til de ikke-toksiske effekter og udgør således mellem 3-17% og 1-6.5% af de ikke-toksiske effekter for henholdsvis den lille og den store lokalitet.

Det store bidrag fra transport ved ET-DSP™ teknikken bygger på antagelser om, at eksperter samt specifikt udstyr vil være nødvendigt at transportere fra Canada til Danmark, da teknikken pt. ikke er velafprøvet herhjemme. En detaljeret opgørelse af miljøeffekter fra de forskellige transportkategorier ses i Bilag E. Heraf fremgår det, at transporten af udstyr samt eksperter fra Canada udgør en relativt stor andel af de samlede transporteffekter.

De største ressourceforbrug er knyttet til elektricitetsforbruget, der er baseret på et mix af brændsler, tin der indgår bronzelegering i vandcirkulationssystemet samt nikkel og krom, der indgår i det rustfrie stål. Transportaktiviteter bidrager i høj grad til forbruget af råolie.

3.4. Radio frekvens opvarmning - RFH

3.4.1. Opgørelse af materiale- og energiforbrug

Det samlede regningsmæssige materiale- og energiforbrug fremgår af BILAG F.

Tabel 3-4 giver en oversigt over de væsentligste projektdata og nøgletal for materiale- og energiforbrug ved en RFH oprensning på de to typelokaliteter.

TABEL 3-4
PROJEKTDATA OG NØGLETAL FOR MATERIALE- OG ENERGIFORBRUG FOR PILOTSKALA OG DEN LILLE TYPELOKALITET

RFH KARAKTERISTIKA		LILLE LOKALITET (180 M ²)	PILOT SKALA (25 M ²)
BEHANDLET JORDVOLUMEN	m ³	1.175	100
RFH ANTENNEBORINGER (FUNGERER SAMTIDIG SOM VENTILATIONSBORINGER)	Antal	50	9
TRYK- OG TEMPERATURMONITERINGSBORINGER	Antal	20	8
BEHANDLINGSTEMPERATUR	°C	100-105	100-105
DRIFTSTID	dage	95	130
FORURENING FJERNET	kg	400	75
TRANSPORT			
PERSONTRANSPORT, BIL	km	13.056	14.205
MATERIALETRANSPORT, LASTBIL	tonkm	3.759	1.596
DAG-TIL-DAG LEVERING, VAREVOGN	TONKM	53	55
SÆRLEVERANCE FRA LEIPZIG, LASTBIL	tonkm	6000	1596
MATERIALER, UNDERJORDISKE			
BETON/CEMENT GROUT	kg	905	0
BENTONIT			917
STÅL	kg	0	0
RUSTFRIT STÅL, RFH ANTENNER.	kg	6.000	540
KOBBER (KABLER)	kg	74	9
GLASFIBER	kg	219	120

RFH KARAKTERISTIKA		LILLE LOKALITET (180 M ²)	PILOT SKALA (25 M ²)
MATERIALER, OVERJORDISKE			
SKUMBETON, VAPOR CAP	kg	41.600	0*
STÅL	kg	3.659	2.548
RUSTFRIT STÅL	kg	422	422
AKTIVT KUL (LUFT)	kg	2.646	490
AKTIVT KUL (VÆSKE)	kg	405	75
POLYETHYLEN	kg	791	783
ENERGIFORBRUG, ON SITE			
ELEKTRICITET, JORDOPVARMNING	kWh	869.520	79.480
ELEKTRICITET, BEHANDLINGSANLÆG	kWh	121.580	45.430
BENZIN, MASKINER	L	6.055	567
DIESEL, MASKINER	L	800	0

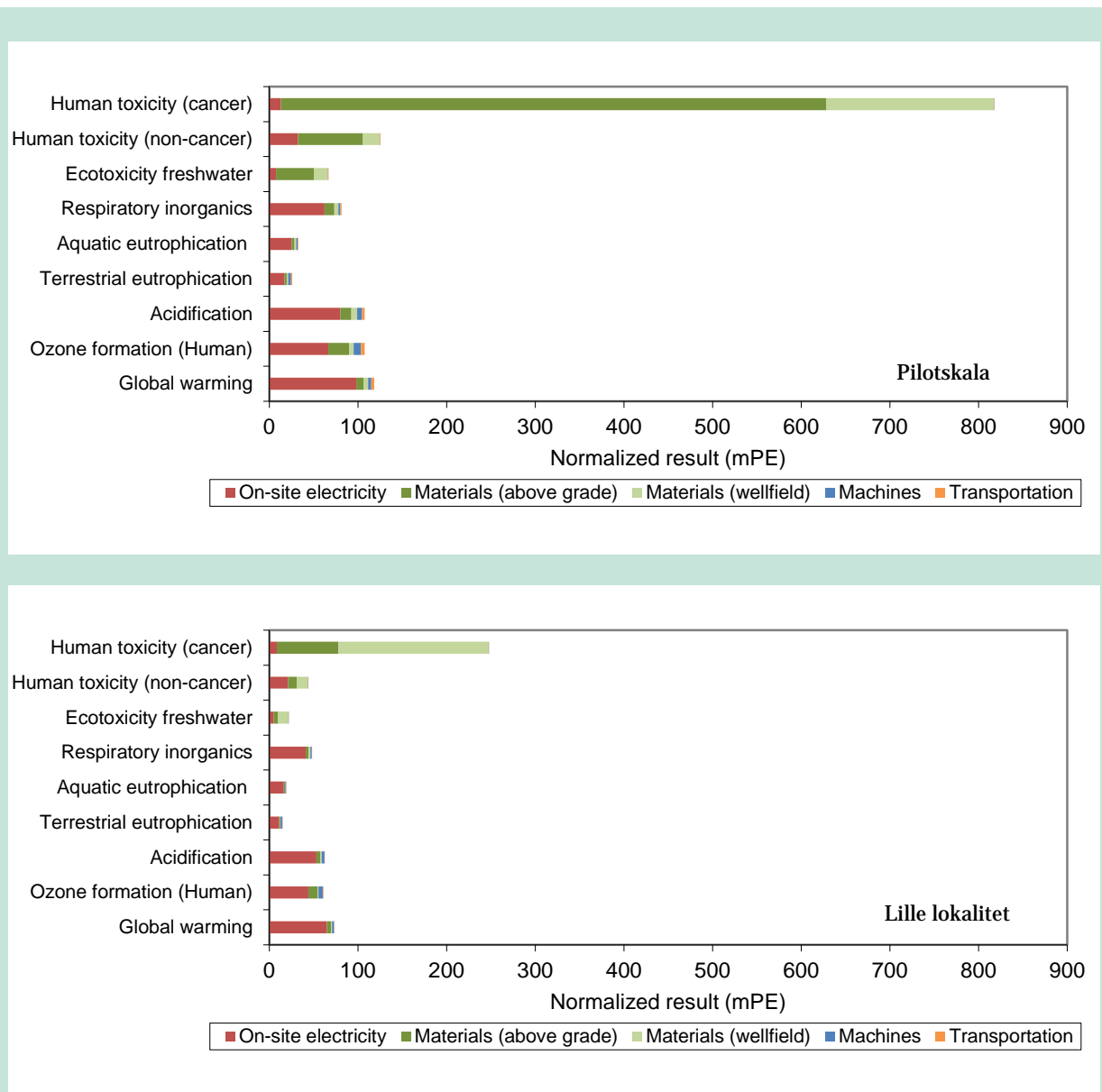
* Der blev ikke benyttet vapor cap pga. stor dybde til forureningen.

De fleste underjordiske materialer omfattende ekstraktionsboringer, glasfiber, beton og sand kan ikke genbruges direkte. For alle komponenter af stål og rustfrit stål antages at 80% af stålet genvindes til produktion af sekundært stål. Beton fra vapor cap antages nedknust og genanvendt som erstatning for grus. For plastikkomponenter antages ligeledes at 80% indgår i produktionen af sekundært granulat. For kobber (i ledninger) antages at 95% genvindes. For glasfiber antages 20% genbrugt og 80% at blive udnyttet som brændsel i et kraftvarmeanlæg.

3.4.2. Livscyklusvurdering

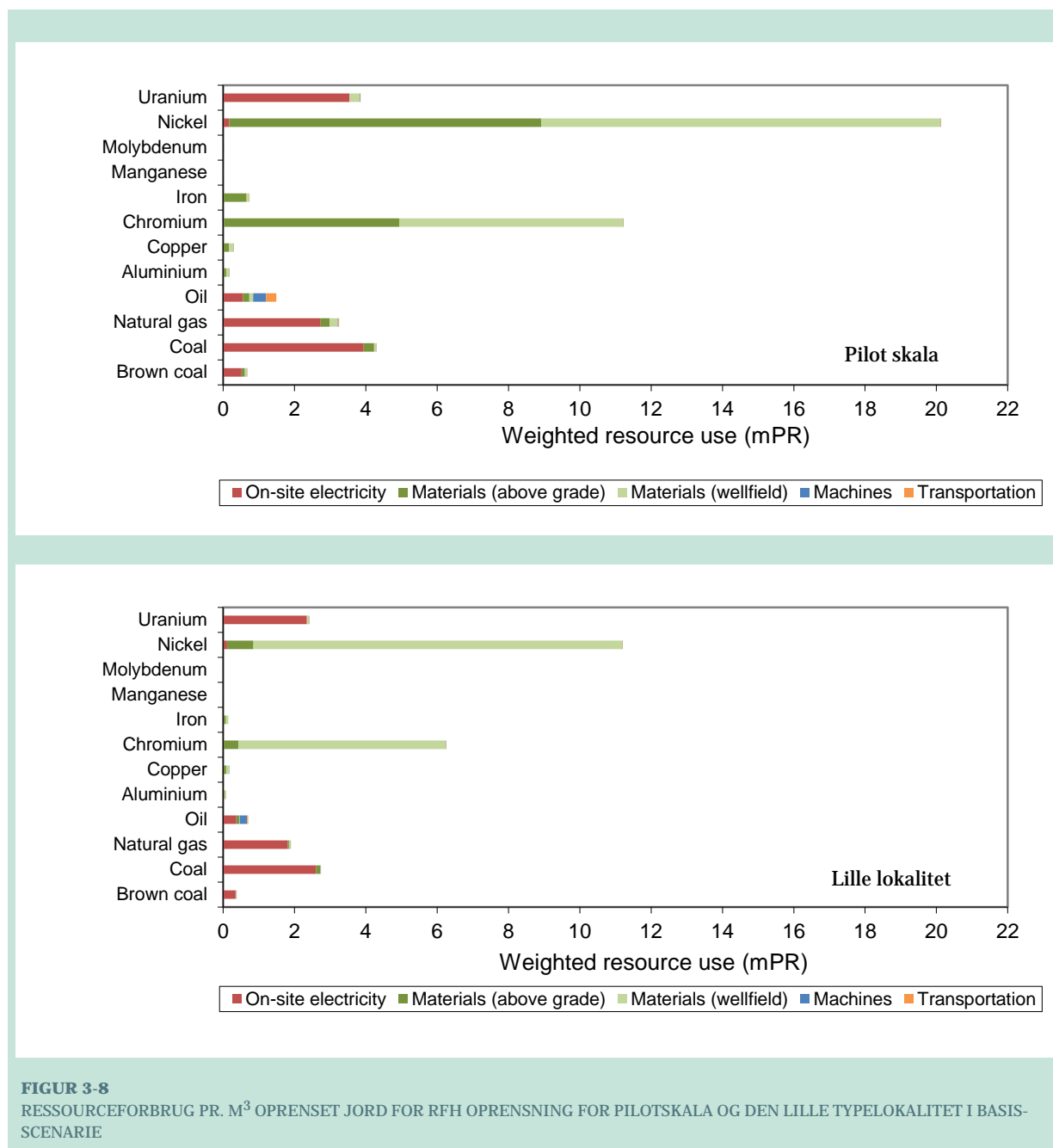
I BILAG F redegøres for de udførte livscyklusvurderinger. En opsummering følger herunder.

Figur 3-7 sammenstiller de miljømæssige påvirkninger pr. m³ oprenset jord for pilotskalaen og den lille typelokalitet.



FIGUR 3-7
MILJØMÆSSIGE PÅVIRKNINGER PR. M³ OPRENSET JORD FOR RFH OPRENSNING FOR PILOTSKALA OG DEN LILLE TYPELOKALITET I BASIS-SCENARIOET

I Figur 3-8 er de væsentligste ressourceforbrug pr. m³ oprenset jord for pilotskalalokaliteten og den lille typelokalitet.



Elektricitetsforbruget on site udgør det største forbrug af energiresourcer og den relativt største miljøbelastning.

Elektricitetsforbruget udgør den væsentligste kilde til de ikke-toksiske miljøeffekter. Ved den lille lokalitet anvendes 88% til jordopvarmning og resten til drift af SVE og behandlingsanlæg, mens der på pilotskalalokaliteten bruges 64% til opvarmning og 36% til drift af SVE og behandlingsanlæg.

Udover elforbruget bidrager den overjordiske brug af materialer mest til de ikke-toksiske effekter. Dette skyldes især forbruget af aktivt kul og beton til vapor cap. Det skal dog bemærkes, at der for pilotskalalokaliteten er set bort fra brug af vapor cap, da dette var tilfældet for den faktiske

oprensning på lokaliteten pga. en stor dybde til forureningen. Miljøeffekter og ressourceforbrug fra overjordiske materialer er derfor relativt mindre for pilotskalalokaliteten end for den lille lokalitet.

Forbruget af rustfrit stål til RFH antenner (underjordiske materialer) er relativt stort i forhold til de andre undersøgte metoder. Dertil kommer også et forbrug af stål og rustfrit stål til behandlingsanlæg (overjordisk). Forbruget af stål og rustfri stål er de vigtigste kilder til de humantoksiske (især carcinogene) effekter og økotoksiske effekter, hvilket henføres til tungmetaleksponering relateret til minedrift og produktion af stål.

Tilsyn i personbiler og transport af materialer til og fra lokaliteten samt brændstofforbrug i entreprenørmaskiner bidrager generelt begrænset til den samlede miljøbelastning. Entreprenørmaskiner bidrager dog relativt mere til denne tekniks samlede miljøbelastninger end hvad der er observeret for de øvrige teknikker. Det gør sig især gældende for pilotskalalokaliteten.

De største ressourceforbrug er knyttet til elektricitetsforbruget, der er baseret på et mix af brændsler, samt nikkel og krom, der indgår i det rustfri stål.

Den i pilotprojektet anvendte radiofrekvensgenerator havde en relativt lav energieffektivitet, svarende til at ca. 50% af den anvendte elektricitet omsættes til varme i jorden. En kommende generation af radiofrekvensgeneratorer forventes at have en energieffektivitet på ca. 80%. Dette er dog fortsat lavt sammenlignet med ISTD og ET-DSPTM, som har virkningsgrader nær 100%. Sammenlignet med ISTD og ET-DSPTM anvendes der derfor forholdsvist større energimængder til opvarmningen.

4 Miljømæssig optimering

Der er gennemført livscyklusvurderinger af en række optimeringsscenarier med henblik på at beskrive potentialet for miljømæssig optimering af de termiske oprensingsmetoder.

De enkelte optimeringsscenarier kan være relevante for flere eller alle 4 termiske metoder. Tabel 4-1 giver et overblik over de analyserede optimeringsscenarier og hvilke termiske metoder, som de er relevante for.

TABEL 4-1

TABELLEN VISER HVILKE METODER DE UNDERSØGTE OPTIMERINGSSCENARIER ER RELEVANTE FOR. BOGSTAV HENVISER TIL DET BILAG, HVOR LCA BEREGNINGER FOR DET PÅGÆLDENDE OPTIMERINGSSCENARIO ER DOKUMENTERET

OPTIMERINGSSCENARIER	TCH ISTD BILAG C	SEE BILAG D	ET- DSP™ BILAG E	RFH BILAG F
DISKONTINUERT OPVARMNING (OPVARMNING UDENFOR KRAFTVÆRKERNES SPIDSLAST PERIODER)	C		E	C
SUBSTITUTION AF NORMAL DANSK ELMIX MED VANDKRAFT	C		C	C
ALTERNATIVE OPBYGNINGER AF VAPOR CAP	C	C	C	C
SUBSTITUTION AF STENKULSBASERET AKTIVT KUL MED BIOBASERET AKTIVT KUL	C	C	C	C
ANVENDELSE AF ALTERNATIVE STÅLLEGERINGER I VARMELEGEMER OG LINERE TIL VARMEBORINGER	C			
KONDENSERENDE VERSUS IKKE-KONDENSERENDE NATURGASFYRET KEDEL		D		
SUBSTITUTION AF STÅL MED GLASFIBER I DAMPINJEKTIONSBORINGER		D		
BRUG AF LOKALE EKSPERTER OG Udstyr*			E	

* Analyseret for ET-DSP™, men relevant for alle teknikker

De i Tabel 4-1 nævnte optimeringsscenarier er gennemgået i det følgende.

4.1. Diskontinuert opvarmning (Opvarmning udenfor kraftværkernes spidslastperioder)

Baseret på modelberegninger er der udført en vurdering af konsekvenserne for den samlede opvarmningsperiode og det samlede energiforbrug ved at ændre opvarmningsstrategien fra kontinuert opvarmning til en diskontinuert opvarmning, således at der i kraftværkernes spidslastperioder kun varmes med 20% af den fulde effekt. Opvarmningen ønskes ikke stoppet helt, idet det vil indebære en hårdere belastning på især de underjordiske materialer pga. de store temperaturforskelle mellem maksimum og standby belastningen.

Studier af elforbruget på timebasis (Nordpoolspot, 2013) viser, at elproduktionen under spidslast typisk ligger 25% - 35% over det gennemsnitlige elforbrug i Danmark. Varigheden af spidslastperioder om vinteren skønnes typisk at omfatte tidsrummet mellem kl. 8:00 – 20:00 i ugens 5 første dage, dvs. samlet set 36% af tiden. Varigheden af spidslastperioder om sommeren skønnes typisk at omfatte tidsrummet mellem kl. 9:00 – 15:00 i ugens 4 første dage, dvs. samlet set 14% af tiden.

Ved at begrænse opvarmningsperioder med fuld intensitet til perioder uden for kraftværkernes spidslastperioder fås en relativt større andel af vindenergi. Hermed opnås en samfundsmæssig miljøforbedring, idet elforbrug i perioder med spidsbelastning indebærer et øget forbrug af den marginale og dermed mest miljøbelastende el produktion.

Der er beregnet på følgende tre scenarier for ISTD, jf. BILAG B:

Basis-scenarie:	Konstant varmetilførsel ved fuld effekt
Sommer scenarie:	6 timer 4 gange ugentligt med reduceret effekt på 20% af maximal effekt. Maksimal effekt resten af tiden.
Vinter scenarie:	12 timer 5 gange ugentligt med reduceret effekt på 20% af maximal effekt. Maksimal effekt resten af tiden.

Det vurderes, at den gennemsnitlige maksimale effekt, der kan afsættes per varmeelement er stigende, såfremt varmeelementet ikke yder fuld effekt hele tiden. Eksempelvis er den maksimale gennemsnitlige varmeeffekt angivet til 604 W/m for basis-scenariet, stigende til 656 W/m for sommerscenariet og videre til 761 W/m for vinterscenariet. Det skyldes at jordens evne til at modtage energi typisk er den begrænsende faktor, og at jorden derved kan modtage mere energi umiddelbart efter at varmeelementet har været droslet ned for en periode. Derfor slår skiftende opvarmningsintensitet ikke så hårdt igennem i forhold til en forlængelse af driftsperioden (der køres eksempelvis reduceret effekt i 14% af tiden i sommerscenariet, men det gennemsnitlige energiinput er kun 4% mindre sammenlignet med baselinescenariet). Se Tabel 4-2.

TABEL 4-2
KONSEKVENSER VED ANVENDELSE AF SKIFTENDE OPVARMNINGSINTENSITET FOR ISTD

		BASIS- SCENARIO	SOMMER- SCENARIO	VINTER- SCENARIO
MAX. STRØMINPUT	W/M	604	656	761
MIN. STRØMINPUT	W/M	604	131	152
GENNEMSNITLIGT INPUT	W/M	604	580	544
PROCENT TID MED LAVT INPUT	%	0%	14%	36%
PROCENT LAVERE INPUT I GENNEMSNI	%	0%	4%	10%
TOTAL DRIFTSTID	DAGE	209	215	227
TOTAL STRØMFORBRUG	KWH	3.982.000	4.019.156	4.091.634
STIGNING DRIFTSTID IFT. BASELINE	%	0%	2,9%	8,5%
STIGNING ELFORBRUG IFT. BASELINE	%	0%	0,9%	2,8%

Ændringer i opvarmningsstrategien vil medføre en lidt længere oprensningstid, der kan medføre et let forøget behov for transport i forbindelse med tilsyn og leverancer.

I det antagende vinterscenarie reduceres opvarmningen til 20% af maximal effekt i dagtimerne mellem kl. 8:00 – 20:00 i de 5 arbejdsdage i ugen. Dette omfatter 60 timer af ugens 168 timer, svarende til 36% af tiden. Denne opvarmningsstrategi medfører behov for en 8,5% længere opvarmningsperiode, hvilket samlet set indebærer et 2,8% større forbrug af elektricitet.

I det antagende sommerscenarie reduceres opvarmningen til 20% af maximal effekt i dagtimerne mellem kl. 9:00 – 15:00 i de første arbejdsdage i ugen. Dette omfatter 24 timer af ugens 168 timer, svarende til 14% af tiden. Denne opvarmningsstrategi medfører behov for en 2,9% længere opvarmningsperiode, hvilket samlet set indebærer et 0,9% større forbrug af elektricitet.

Modelberegningerne viser at diskontinuert opvarmning har relativt lille betydning for det samlede energiforbrug, hvorfor det er relevant at se på den mulige miljømæssige effekt.

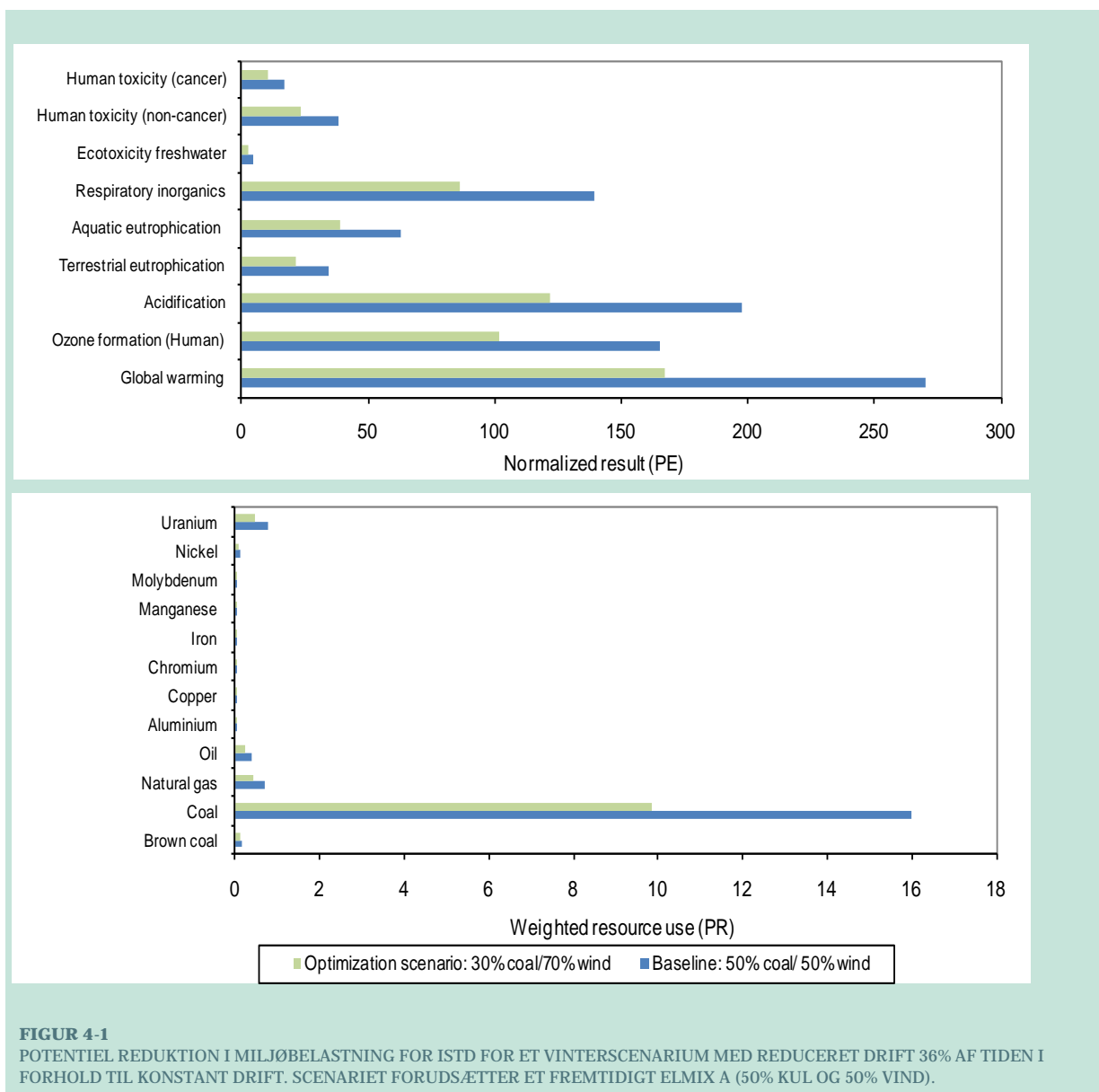
Der er foretaget LCA-beregninger med to forskellige antagelser til elsammensætning:

- Elmix A: I spidslastperioden fra kl. 8-20 (12 timer) produceres elektriciteten på et kulkraftværk. Udenfor spidslastperioden er der 100% vindenergi til stede i elnettet.
- Elmix B: Der er vindenergi i elnettet 6 timer i døgnet (kl. 24-06) og resten af tiden produceres elektriciteten på et kulkraftværk.

Disse antagelser repræsenterer en forsimpning af virkeligheden, der repræsenterer spændet i usikkerheden. Elproduktionen er reelt et mix af flere forskellige typer af elproduktion omfattende kernekraft, termiske produktionsformer baseret på naturgas, olie, biomasse samt vedvarende elproduktion baseret på vand- og vindkraft med videre. Sammensætningen af dette elmix varierer over døgnet og med udviklingen i energibranchen i almindelighed. Da der ikke foreligger faktiske opgørelser over elektricitetens sammensætning over døgnet i det danske elnet er der i stedet anvendt de ovennævnte antagelser for sammensætningen.

Vinterscenarie med elmix A

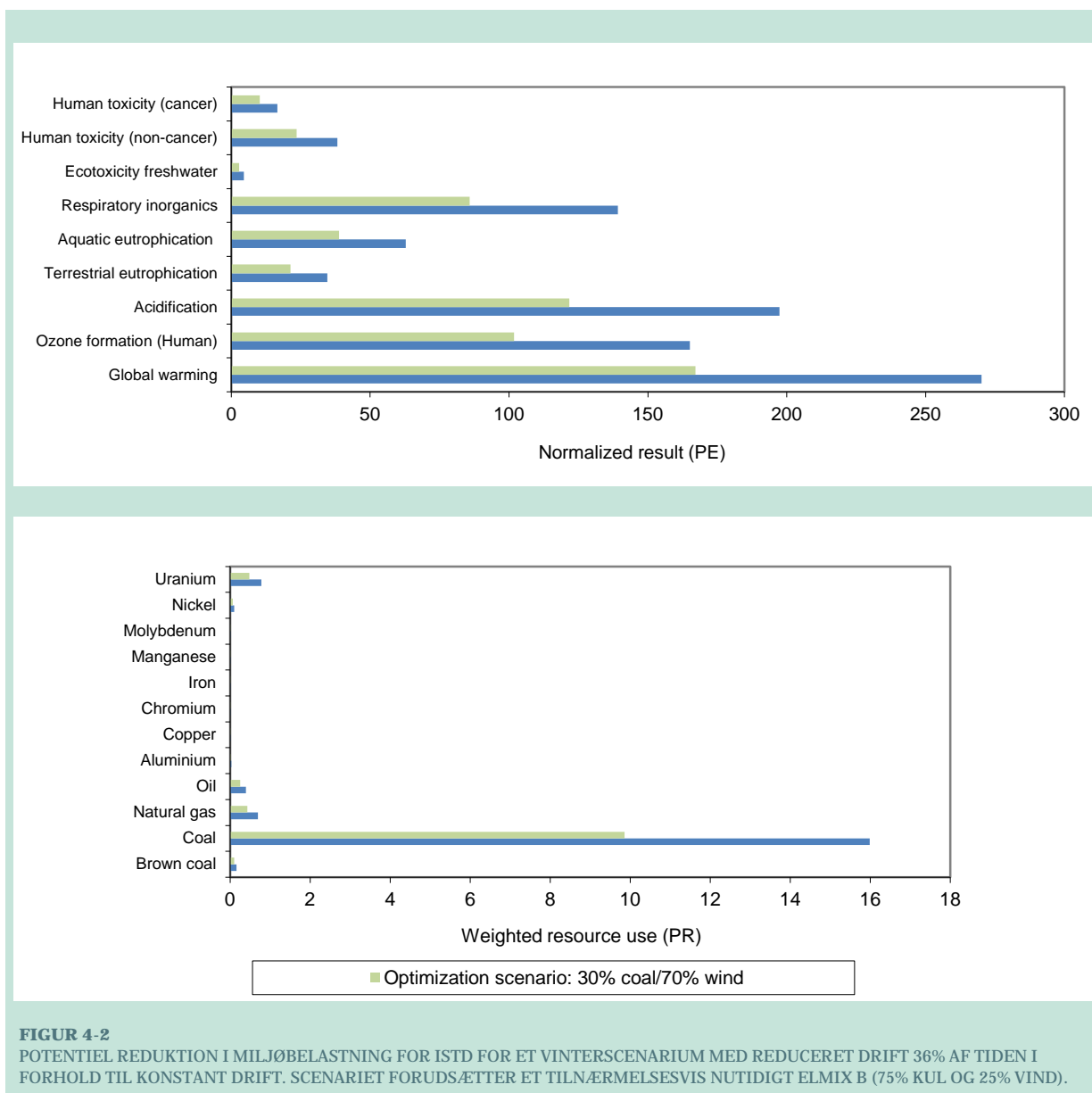
For et vinterscenarie med en forudsætning om et fremtidigt elmix A, hvor al elproduktion om natten baseres på vindkraft – samlet set i 36% af tiden – svarer dette til 70% vindenergi og 30% fra kulkraftværk.



Af LCA beregningsresultatet i Figur 4-1 fremgår det, at der for ISTD opnås en reduktion på ca. 40% i ressourceforbruget og i miljøbelastningerne, hvilket skal sammenholdes med et øget samlet elforbrug på ca. 3%.

Vinterscenarie med elmix B

For et vinterscenarie med en forudsætning om et tilnærmelsesvis nutidigt elmix B, hvor al elproduktion baseres på vindkraft i 14% af tiden – svarer dette til 35% vindenergi og 65% fra kulkraftværk.



Af LCA beregningsresultatet i Figur 4-2 fremgår det, at der for ISTD opnås en reduktion på ca. 10% i ressourceforbruget og i miljøbelastningerne, hvilket skal sammenholdes med et øget samlet elforbrug på ca. 1%.

Den øgede transport i forbindelse med diskontinuert opvarmning har ikke væsentlig betydning. For de detaljerede beregninger henvises til BILAG C.

For en tilsvarende analyse af ET-DSP™ fås tilnærmelsesvis de samme resultater. Som en gennemsnitsbetragtning er der estimeret et optimeringspotentiale på ca. 8% i ressourceforbruget og i miljøbelastningerne. For de detaljerede beregninger henvises til BILAG E.

Sidstnævnte senarie vurderes realistisk for de aktuelle forhold. Som følge af at on-site elforbrug udgør 70-90% af alle non-toksiske ved termisk oprensning, vurderes en optimering med diskontinuert drift for relevant og vil få endnu større betydning i takt med, at der bliver mere vedvarende energi til rådighed i samfundet.

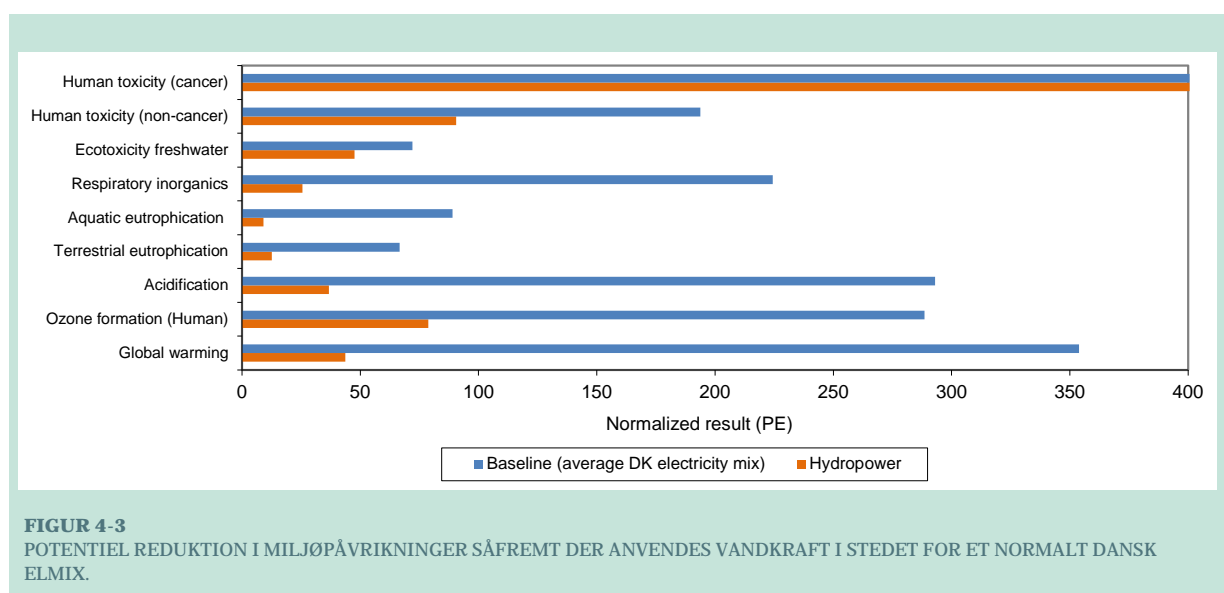
Det skal dog understreges, at vind- og kulbaseret elproduktion repræsenterer de miljømæssige ekstremer under danske betingelser, hvorfor beregningsforudsætningerne for en vurdering af potentialet for miljøoptimering repræsenterer "bedste fald".

Selvom det samlede elektricitetsforbrug øges ved diskontinuert opvarmning indebærer det – med de givne forudsætninger om elproduktionens sammensætning - reducerede miljøbelastninger. Det øgede elforbrug vil også få en økonomisk betydning. Ved en reduceret nattarif kan der dog tænkes en samlet økonomisk besparelse.

4.2. Substitution af normal dansk elmix med brug af certificeret vandkraft

Termiske oprensninger indebærer som før nævnt et relativt stort energiforbrug sammenlignet med andre afværgeteknikker. Sammensætningen af energiproduktionen er derfor af stor betydning for miljøprofilen for termisk oprensning. Under skandinaviske betingelser kunne man tænke sig en substitution af dansk elektricitet med en større andel af vandkraft, der kunne importeres fra Sverige eller Norge. Ved oprensningsprojektet med ISTD på den store lokalitet blev der indkøbt certificeret vandkraft fra Norge til at dække strømforbruget. For at illustrere betydningen heraf er substitution af et normalt dansk elmix med vandkraft som energibase analyseret.

De samlede miljøpåvirkningerne ved termisk oprensning af den store lokalitet ved brug af henholdsvis gennemsnitlig dansk el og vandkraft fremgår af Figur 4-3.



Brugen af vedvarende energi minimerer naturligvis brugen af de fossile brændsler. Dette indebærer, at bidraget til global opvarmning, ozondannelse, forsurening, eutrofiering og respiratoriske effekter reduceres med ca. 80%, mens økotoksiske og non-carcinogene effekter reduceres med 30 – 50%. For de detaljerede beregninger henvises til BILAG C.

Anvendelsen af vedvarende energi som certificeret vandkraft er kommercielt muligt. Ud fra nationale synspunkter kan man argumentere for at termisk oprensning har et bedre miljøprofil i lande som Norge og Sverige, hvor anvendelsen af vandkraft indebærer en relativt højere andel af vedvarende energi end i Danmark. Vandkraft anses imidlertid for at være fuldt udbygget i de skandinaviske lande (Dyck-Madsen, 2009). Et certificeret forbrug af vandkraft vil derfor ikke indebære, at der samlet set sker en udbygning af vandkraftproduktionen og dermed en forbedring af de gennemsnitlige elproduktionsforhold. Det kan derfor diskuteres om det reelt vil udgøre en forbedring af at anvende certificeret vandkraft. For at et grønt energiprodukt skal have en egentlig

miljøforbedrende virkning skal det indebære, at forbruget – fx som en merpris - anvendes til udbygning af vedvarende energi eller til opkøb af CO₂ kvoter lande (Dyck-Madsen, 2009).

4.3. Alternative opbygninger af vapor cap

Vapor cap anvendes når forureninger ligger relativt tæt på terræn og anvendes typisk for alle 4 teknikker, der behandles i denne rapport. Vapor cap udgør en barriere for en afskærende dampopsamling. Derudover skal vapor cap også isolere mod varmetab, så der opnås en tilstrækkelig høj temperatur i jordens øvre lag. Endelig skal vapor cap minimere infiltreringen af kølende nedbør til det opvarmede område.

Der er i BILAG G foretaget en sammenlignende undersøgelse af fem alternative opbygninger af vapor cap, der tilnærmelsesvis alle har samme funktion og isoleringsevne:

- Alt. 0: Skumbeton, normal: Densitet 400 kg/m³. Samlet højde 40 cm.
- Alt. 1: Skumbeton, højporøs: Densitet 300 kg/m³. Samlet højde 26 cm.
- Alt. 2: Betonsandwich med 10 cm polystyren plader (EPS) og Leca nødder omkring heatere
- Alt. 3: Betonsandwich med 21 cm Leca nødder
- Alt. 4: Betonsandwich med 30 cm muslingskaller.

Alternativ 0 benævnes basis-scenarie og svarer til den vapor cap, der er antaget i basis-scenarierne for de 4 oprensningsteknikker. Denne opbygning har været anvendt på projekter i Danmark.

Alternativ 1 er en lettere skumbeton, der indebærer et mindre betonforbrug.

Alternativ 2 – 4 er betonsandwich konstruktioner, hvor topafdækning er opbygget af 4 cm sprøjtebeton og en barriere i bunden bestående af 5 cm sprøjtebeton. Som mellemlag er valgt alternative isolerende materialer.

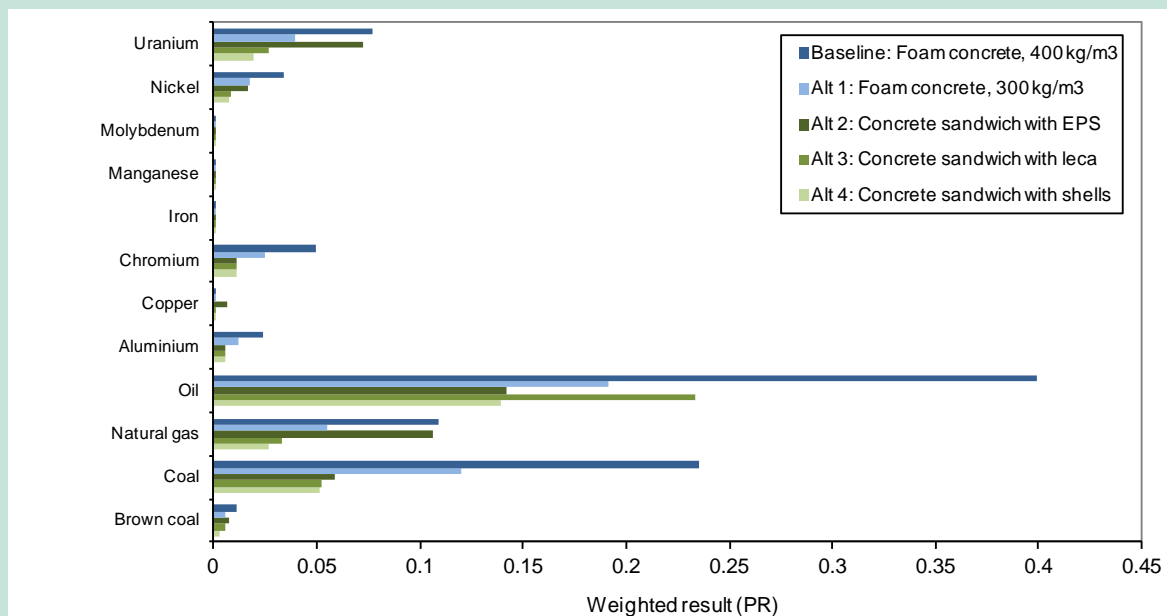
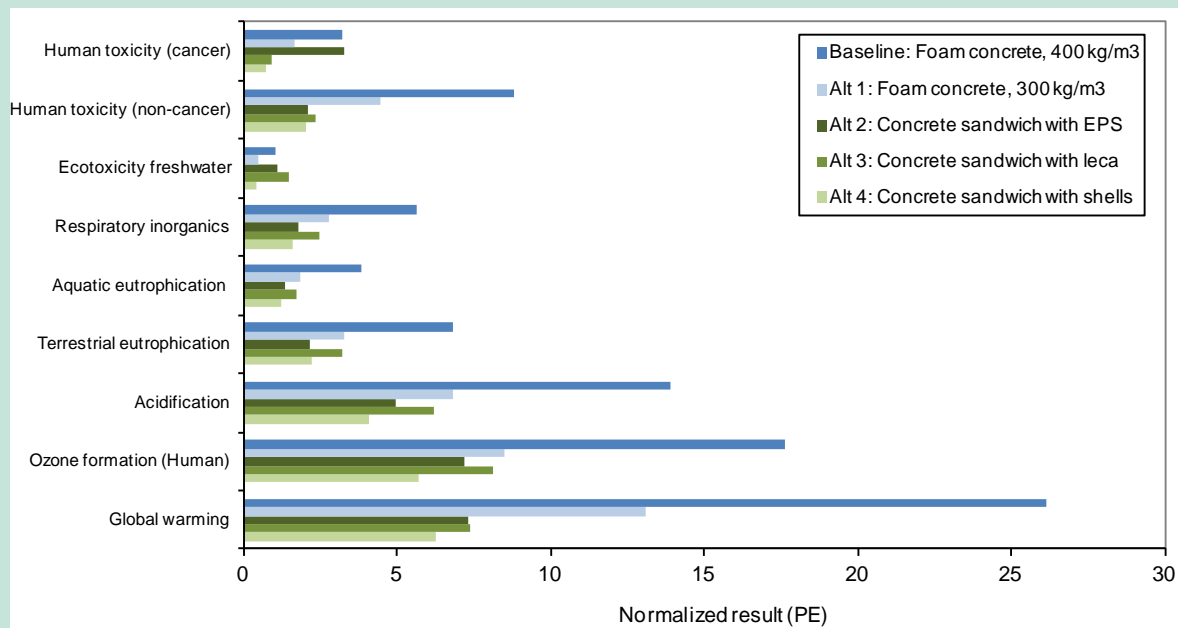
Den varmeisolerende effekt skal sikre, at den fornødne temperatur opnås overalt i de terrænnære jordlag. Erfaringsmæssigt bør vapor cap'ens samlede konstruktion have en varmetransmissionskoefficient U på ca. 0,38 W/m² K. Med mindre varmeenergien i jorden genvindes vil en forbedret isolering blot medføre en midlertidigt højere temperaturer under vapor cap indtil opvarmningen stopper, hvorefter energien tabes til omgivelserne. Isoleringsgraden indgår derfor ikke som en optimeringsparameter.

Den beregnede varmetransmissionskoefficient for de 5 alternative vapor cap's varierer mellem 0,36 – 0,39 W/m² K, hvorved man direkte kan sammenligne deres miljøprofil relateret til ressourceforbrug og miljøpåvirkninger.

Der er redegjort for funktionskrav, design, udførelsesmetoder, anvendte materialer mv. i BILAG G. Forudsætninger for og resultaterne af LCA beregningerne fremgår af BILAG C, idet livscyklusvurderingen af optimeringsscenariet er gennemført i forbindelse med ISTD teknikken.

Potentiale for optimering

LCA beregningerne viser overordnet at vapor cap i basis-scenariet udgør 2-7% af alle ikke-toksiske miljøeffekter for ISTD projektet. Det væsentligste ressourceforbrug relateret til vapor cap'en er forbruget af olie, naturgas og kul som især vedrører cementproduktionen og udgør 13% af det samlede olieforbrug for projektet. Hertil kommer et forbrug af tilslagsmaterialer af sand og grus, der er en lokal ressource, som ikke indgår i LCA beregningen. Bidrag til global opvarmning udgør ca. 7% af den samlede påvirkning fra en termisk oprensning.



FIGUR 4-4
MILJØPÅVIRKNINGER OG RESSOURCEFORBRUG FOR BASIS-SCENARIOE VAPOR CAP OG ALTERNATIVE VAPOR CAP'S

Effekter af alternative vapor cap's

De alternative udformninger af vapor cap er alle mindre ressourceforbrugende og mindre miljøbelastende end basis-scenariet, jf. Figur 4-4.

Ved anvendelse af en højporøs skumbeton (alternativ 1) reduceres egenvægten af vapor cap til ca. det halve, hvorved ressourceforbrug og miljøpåvirkninger reduceres med ca. 50%.

Ved anvendelse af betonsandwich konstruktioner med isolering med polystyrenplader (EPS), Leca klinker eller muslingskaller fås yderligere reduktioner svarende til typisk 25 – 40% af basis-scenariet. Isoleringer med EPS og Leca letklinker forekommer nogenlunde ligeværdige, mens muslingskaller generelt indebærer den laveste miljøpåvirkning. Selv om den lokale transport fra

producent til lokalitet bidrager relativt meget til miljøprofilet, vurderes dette i reglen kun at ændre det indbyrdes forhold, men vil næppe påvirke rangordenen. For Leca letklinker er der dog tale om en tovejs transport, hvor en lokalitet tæt på fabrikken også vil kunne ændre rangordenen.

Udførelsesmetoder, materialer og genbrug

Skumbeton med lav densitet stiller høje krav til produktionsmetoden, hvilket særligt gør sig gældende for den højporøse skumbeton. Skumbeton kan relativt let fordeles i opvarmningsområdet.

EPS har et smeltepunkt nær 100°C, hvorfor konsekvenserne af en temperaturudvikling til dette niveau nøje må overvejes. Nær heatere er der behov for udlægning af en varmeresistent isolering, eksempelvis Leca letklinker. EPS udlægges som plader og er dermed relativt arbejdskrævende, idet pladerne skal udlægges på et plant underlag og tilpasses omkring gennemføringer.

Leca letklinker kan relativt let udlægges med minigraver eller ved udblæsning og forudsætter ikke et plant underlag.

Muslingskaller kan udlægges med gravemaskine. Skallerne har ikke samme styrke og stabilitet som Leca letklinker, hvorfor der må forventes et merforbrug på grund af knusning af skallerne. Kørsel direkte på skallerne bør undgås. Anvendelse af muslingskaller forudsætter en afgang af skallerne før brug. Afgasningen indebærer behov for en længerevarende mellemlagring i område, hvor naboer ikke udsættes for lugtgener. Derudover kan der være lang leveringstid, idet landing og forarbejdning af muslinger er sæsonafhængig.

Behovet for udlægning af en dug for adskillelse af isolering og toplaget af beton bør overvejes, dels i relation til nedtrængning af beton i isoleringen, dels i hvilket omfang materialerne senere kan genbruges. Beton, Leca letklinker og muslingskaller vurderes i vid udstrækning af kunne genbruges. Brugt EPS vurderes ikke at kunne genbruges i professionel sammenhæng, men kan bortskaffes til forbrænding.

Sandwich-konstruktionen i alternativ 3-5 medfører en væsentlig forøgelse af arbejdsbyrden og etablerings- og demobiliseringstiden i felten sammenlignet med Alternativ 1-2.

Delprocesser for optimering

Sammenfattende er der nedenfor givet en oversigt over identificerede delprocesser for en optimering af vapor cap. En indikation af den relative betydning er angivet i parentes (stor/moderat/lille):

- Minimering af areal i forhold til opvarmningsområde (stor).
- Minimering af lagtykkelser, hvilket stiller krav til udførelsesmetoder (stor).
- Ved anvendelse af skumbeton bør en så lav densitet som muligt tilstræbes, hvilket stiller særlige krav til udførelsesmetoder (stor).
- Minimering af betonstyrke, hvorved behovet for cement klinker minimeres (moderat).
- Anvendelse af relativt meget flyveaske som tilslagsmateriale i beton (moderat).
- Anvendelse af knust beton som tilslagsmateriale i beton (lille).
- Anvendelse af betonsandwichkonstruktioner med isolering med EPS (betinget egnet), Leca letklinker eller muslingskaller (moderat).
- Eventuel substitution af sand med Leca letklinker som tilslagsmateriale i sprøjtebeton (forudsætter succesfuld afprøvning) (lille).
- Design der sikrer en høj grad af genbrug af materialer, gerne til lokale formål (lille).

Minimering af cementforbruget i beton har relativ stor betydning, hvilket kan opnås ved en kombination af design, materialevalg og udførelsesmetoder. Optimering stiller således skærpede krav til dimensionering, udførelsesmetoder, tilsyn og kontrolforanstaltninger.

Afhængig af forudsætningerne for basis-scenariet, vurderes en optimering af vapor cap at kunne bidrage til en samlet reduktion af ressourceforbrug og miljøbelastningerne af størrelsesordenen ca. 5%, men med stor variation mellem de enkelte parametre. Dette optimeringspotentiale er beregnet ud fra det store projekt.

4.4. Substitution af stenkulsbaseret aktivt kul med biobaseret aktivt kul

Aktivt kul (AC) anvendes i relativt store mængder til rensning af luft og vand for de flygtige organiske forureninger, der mobiliseres under oprensningen. Normalt anvendes aktivt kul, der oparbejdes fra antracit stenkul. Et forbrug af størrelsesordenen 10 tons er ikke usædvanligt for større projekter.

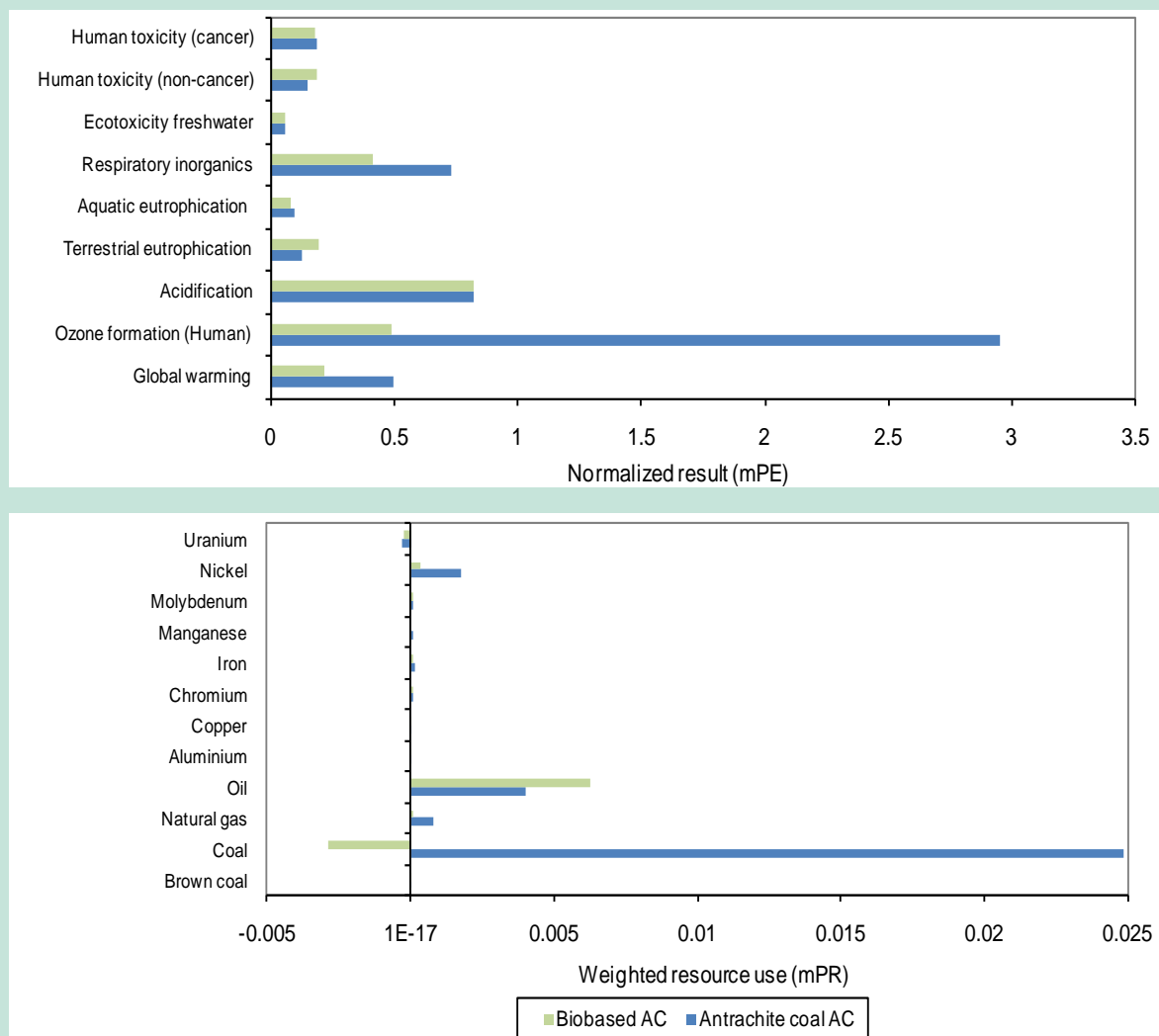
Der er mulighed for at sende den brugte kul til regenerering i Belgien, men høje indhold af chlorerede opløsningsmidler (> 40-50 masse%) kan være problematisk (Zwicky, 2011). I praksis bortskaffes brugt kul ofte til Kommune Kemi i Nyborg, hvor det forbrændes og hvor det dermed bidrager til energiproduktion. Muligheden for miljøoptimering ved regenerering af aktivt kul er derfor ikke undersøgt i denne analyse.

I denne analyse er der foretaget en sammenlignende undersøgelse af stenkulsbaseret aktivt kul, der er udvundet og produceret i Kina med biologisk baseret aktivt kul, der er fremstillet i Malaysia. Biologisk baseret aktivt kul er baseret på affald af kokosnøddeskaller.

LCA beregningen inkluderer transport til en lokalitet i Danmark og efter brug en transport til og forbrænding på Kommunekemi i Nyborg. Forbrændingsprocessen for begge kultyper antages at erstatte kulbaseret energiproduktion.

Potentiale for optimering

LCA beregningerne viser overordnet at anvendelsen af konventionelt produceret aktivt kul er relativt miljøbelastende. Det aktive kul udgør 2-16% af de samlede non-toksiske miljøeffekter for ISTD projektet. Især er bidraget til ozondannelse (16%), forsuring (4,5%) og respiratoriske effekter grundet partikelforurening (5%) relativt stort. Bidraget til global opvarmning udgør ca. 2% af den samlede påvirkning fra en termisk oprensning.



FIGUR 4-5
SAMMENLIGNING AF MILJØPÅVIRKNINGER OG RESSURCEFORBRUG FOR 1 KG BIOBASERET AKTIVT KUL (PRODUCERET AF KOKOSNØDDESKALLER) OG 1 KG STENKULSBASERET AKTIVT KUL.

Effekt ved substitution til biologisk baseret aktivt kul

LCA beregningerne viser, at der opnås en relativt stor reduktion i miljøbelastningerne ved at substituere til biobaseret aktivt kul, jf. Figur 4-5. Således reduceres ozondannelsen fra den anvendte kulmængde med ca. 80%, bidraget til global opvarmning ca. 50%, respiratoriske effekter ca. 40% og næringsstofbelastning med ca. 10%. Dertil kommer at kulforbruget elimineres til fordel for en nyttiggørelse af affald af kokosnøddeskaller. For de detaljerede beregninger henvises til BILAG C. LCA opgørelsen for biobaseret aktivt kul refererer til litteraturen og er ikke fra en anerkendt database som Ecoinvent, hvilket i udgangspunktet introducerer en usikkerhed.

Ovenstående sammenligning er gældende for luftrensning, hvor der forventes anvendt den samme mængde aktivt kul uanset om det er baseret på stenkul eller biologisk baseret aktivt kul. Ved vandrensning må effekten påregnes halveret, idet der skal påregnes ca. den dobbelte mængde biologisk baseret aktivt kul for at opnå den samme absorptionskapacitet som for stenkulsbaseret aktivt kul. Den ringere effektivitet indebærer behov for større anlæg og en mere omfattende håndtering, hvorfor der ikke kan forventes nogen betydelig miljøfordel ved at skifte til biobaseret aktivt kul til vandrensning.

4.5. Anvendelse af alternative stållegeringer i varmelegemer

Der indgår et relativt stort forbrug af rustfrit stål til underjordiske installationer som varmeboringer, foringsrør, filtre i vakuumventilationsboringer samt eventuelt drænstreng under vapor cap. Rustfrit stål er et modstandsdygtigt materiale, der tåler de høje temperaturer i kombination med det kemisk aggressive miljø. Dertil kommer at disse komponenter ikke må svigte under driften, idet servicering eller reparation under opvarmningsprocessen vil være meget problematisk.

Forbruget af rustfrit stål medfører et relativt stort forbrug af nikkel og krom, der indgår i legeringen af rustfrit stål. Dette viser sig ofte i LCA beregninger som de dominerende materialeforbrug ved termisk oprensning, også selvom varmelegemer i reglen genbruges flere gange.

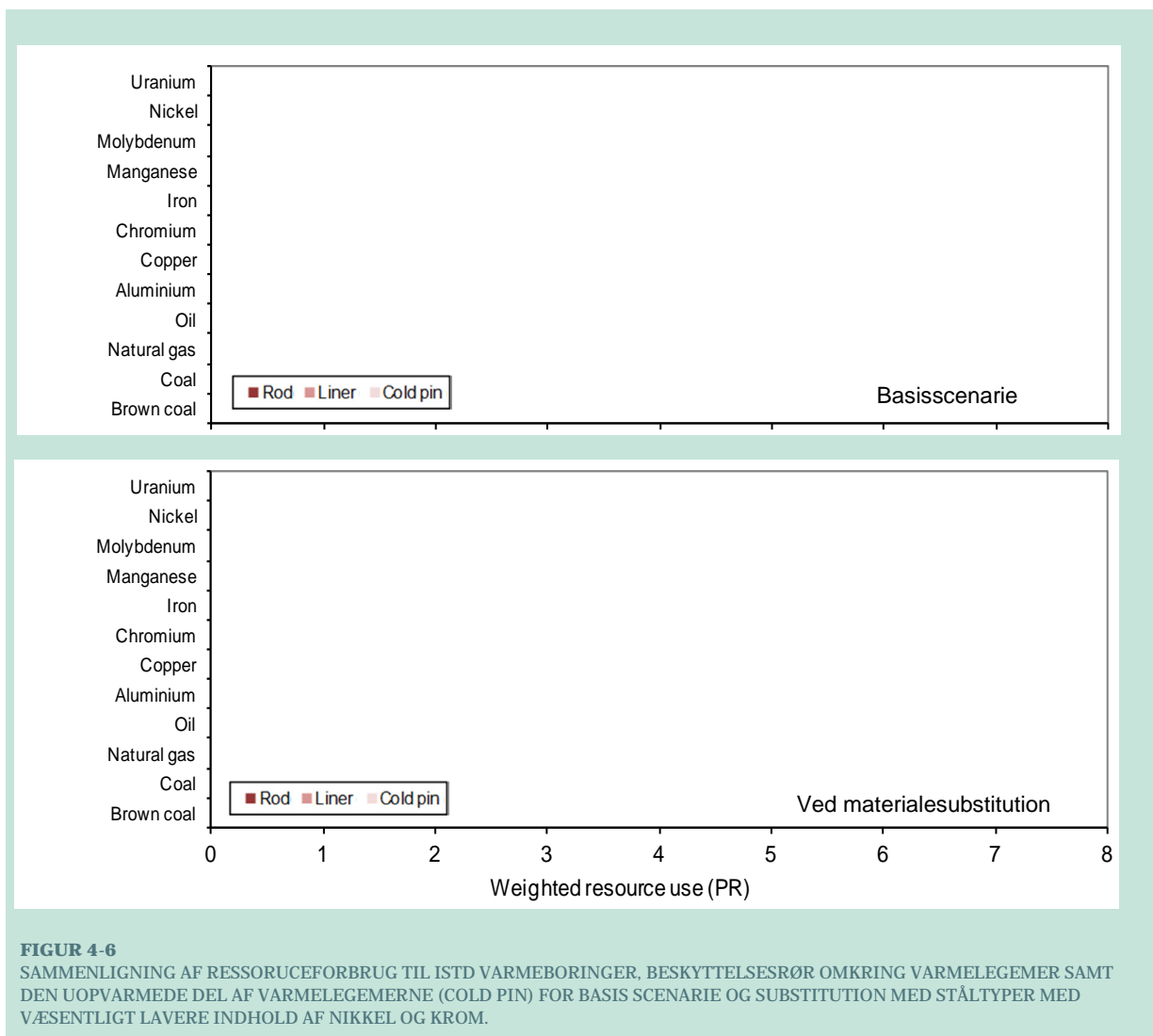
Med udgangspunkt i driftserfaringer i USA har TerraTherm i forbindelse med nærværende projekt vurderet mulighederne for at anvende legeringer af rustfrit stål, som indeholder mindre nikkel og krom ved ISTD oprensninger. For tre underjordiske hovedkomponenter er der foretaget en sammenligning af et basis-scenarie med et alternativt scenarie, hvor der er antaget en substitution til komponenter med lavere indhold af nikkel og krom og som vurderes mulige at anvende trods de skærpede funktionskrav in situ komponenter.

Specifik er der foretaget konsekvensberegninger af substitution af varmelegemer i varmeboringer (heater rod), af beskyttelsesrør omkring varmelegemet (heater sleeve/liner) samt af det uopvarmede stykke af varmelegemet, som fører varmelegemet til terræn (heater cold pin) til komponenter med væsentligt lavere indhold af nikkel og krom.

Tabel 4-3 er en oversigt over forbruget af rustfrit stål til de 3 in situ hovedkomponenter ved den store lokalitet.

TABEL 4-3
OVERSIGT OVER STÅLMATERIALE (LEGERINGER) OG MÆNGDEN DER BRUGES TIL ISTD VARMEBORINGER, BESKYTTELSERØR OMKRING VARMELEGEMER SAMT DEN UOPVARMEDE DEL AF VARMELEGEMERNE (COLD PIN) FOR DEN STORE LOKALITET (1300 M²).

Komponenter – stor lokalitet	BASIS SCENARIO		ALTERNATIV SCENARIO	
	STÅLMATERIALE	VÆGT [KG]	STÅLMATERIALE	VÆGT [KG]
VARMEBORINGER (ROD)	LEGERING 1	667	ALTERNATIV LEGERING 1	1864
BESKYTTELSERØR OMKRING VARMELEGEMER (LINER)	LEGERING 2	1107	ALTERNATIV LEGERING 2	1107
UOPVARMET DEL AF VARMELEGEME (COLD PIN)	LEGERING 3	61	ALTERNATIV LEGERING 3	60



Potentiale for optimering

Beregningerne viser, at der for en lokalitet svarende til den store typelokalitet (1.300 m²) samlet set kan opnås en reduktion i forbruget af nikkel på 80%, mens forbruget af krom vil være stort set uændret. For de detaljerede beregninger henvises til BILAG C.

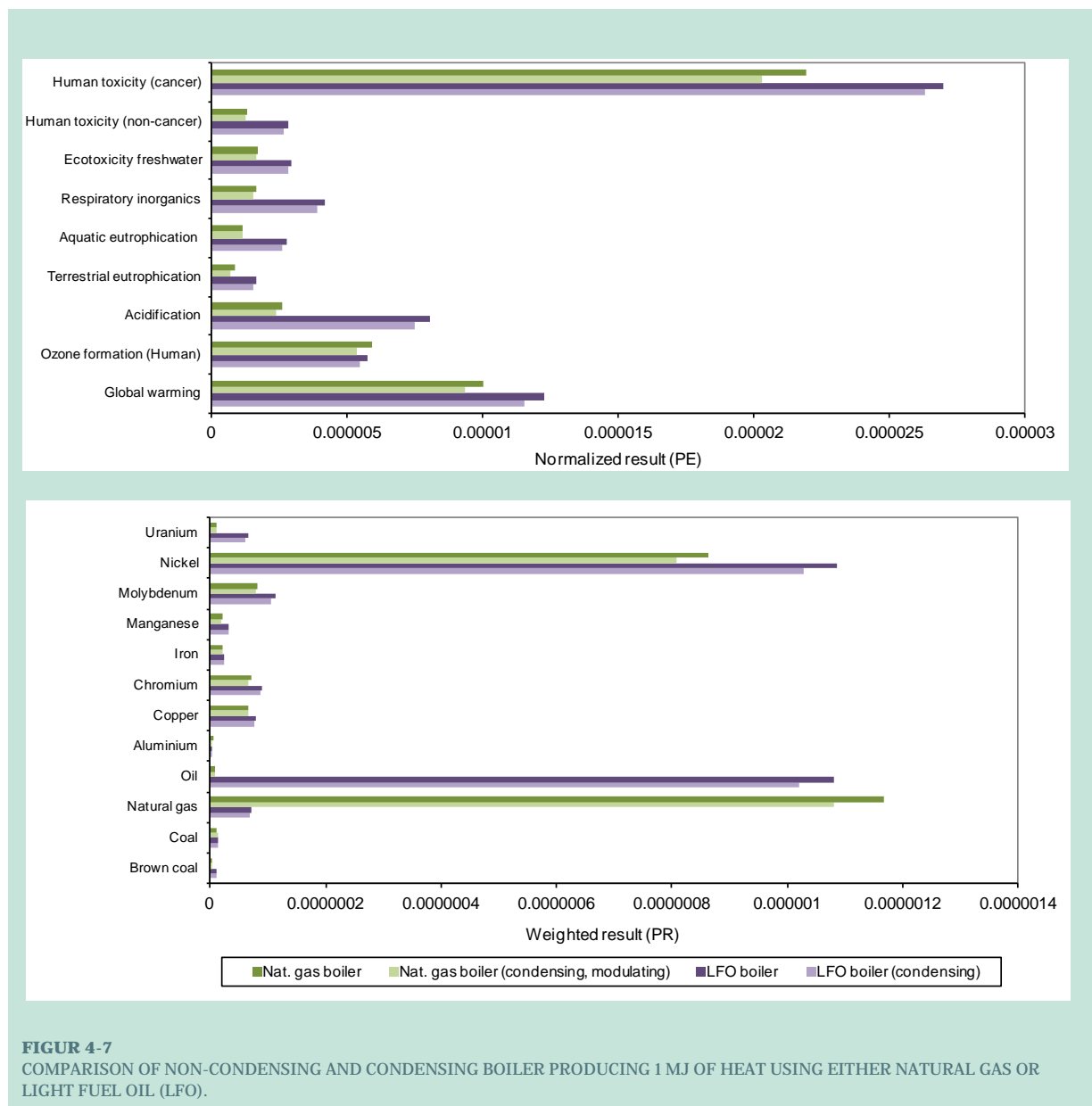
Reduktionen af nikkelforbruget er således betydeligt. Forbruget af krom falder ikke tilsvarende, idet den alternative legering medfører behov for væsentligt større varmelegemer for at opnå den ønskede varmeeffekt. Levetiden og dermed mulighederne for genbrug vurderes ikke at blive påvirket af, at der skiftes til de alternative legeringer. Dog tyder foreløbige analyser på at materialeegenskaberne ved driftstemperaturen af varmelegemerne er anderledes end i de hidtil anvendte metaller. Dette bør undersøges nærmere forud for en eventuel afprøvning af de opstillede alternativer.

Mængden af rustfrit stål i ISTD varmeboringer skønnes ved en typisk termisk oprensning at udgøre 30-50% af det samlede forbrug af rustfrit stål. Vakuumentilationsystemet med rustfri rør, foringer og filtre repræsenterer den overvejende del af det øvrige forbrug af rustfrit stål og kan variere relativt meget fra lokalitet til lokalitet. Der vurderes mulighed for væsentlig miljøoptimering både ved et optimeret design og ved substitution af rustfrit stål til andre stallegeringer, hvor det er muligt.

I det omfang der anvendes rustfri rør, manifold med videre i de overjordiske installationer, vil dette forbrug formentlig i vidt omfang kunne erstattes med andre materialer som eksempelvis almindeligt stål eller glasfiber, der begge umiddelbart skønnes at medføre et bedre miljøprofil. Effekten heraf er dog ikke kvantificeret for indeværende.

4.6. Kondenserende versus ikke kondenserende naturgasfyret kedel

Traditionelle kedler lukker røggassen fra forbrændingen ud ved en meget høj temperatur, så vanddampen udledes til luften. Kondenserende kedler udnytter energien bedre ved at nedkøle røggasserne til en temperatur, der er lavere end røggassernes dugpunkt. Herved kondenseres røggassens vandindhold og varmen genvindes. Kondenserende kedeltyper er relativt dyrere end ikke-kondenserende kedler.



Figur 4-7 viser forskellen i miljøpåvirkninger og ressourceforbrug ved produktion af 1 MJ varme for en ikke-kondenserende kedel og en kondenserende kedel både med naturgas og let fyringsolie som brændstof.

Den kondenserende naturgas fyrede kedel udnytter energien ca. 7% bedre end en traditionel gasfyret kedel. For de detaljerede beregninger henvises til BILAG D.

I områder hvor naturgas ikke er tilgængelig vil dampen kunne produceres med en oliefyret kedel. Et mobilt anlæg vil i reglen være baseret på let fyringsolie (LFO). En ikke-kondenserende oliefyret kedel indebærer en stigning i samtlige parametre undtagen ozondannelse med 22-200% i forhold til et naturgasfyret anlæg.

Den kondenserende oliefyrede kedel udnytter energien ca. 6% bedre end en traditionel oliefyret kedel.

4.7. Substitution af stål med glasfiber i dampinjektionsboringer

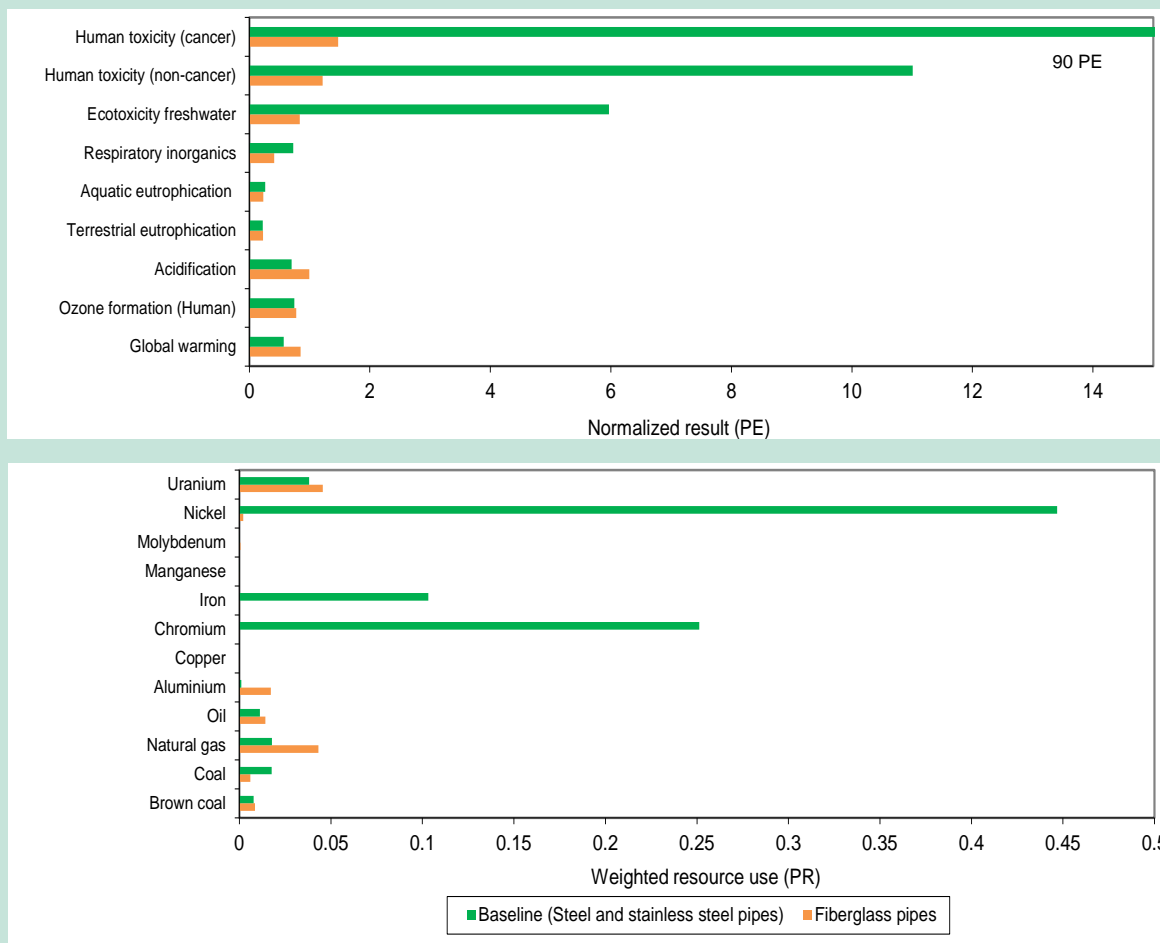
Der anvendes en relativt stor mængde stål og rustfrit stål til injektionsboringer ved dampoprensning – SEE. Dette indebærer human- og økotoxikologiske påvirkninger grundet emissioner fra stålproduktionen. Derudover indebærer forbruget naturligvis også et ressourceforbrug af jern, nikkel og krom.

Det stål der anvendes til dampinjektionsrør vurderes at kunne substitueres med glasfiberrør. Da glasfiber har en lavere densitet end stål vil dette indebære en materialebesparelse, men anvendelse af et andet materiale.

Der er gennemført livscyklusberegninger hvor brugen af stålrør i SEE basis-scenariet er sammenlignet med brug af glasfiberrør for den store lokalitet. Det antagede materialeforbrug for de to scenarier fremgår af Tabel 4-4. Det er antaget, at 80% af det anvendte stål og rustfrit stål er baseret på oparbejdede genbrugsmaterialer. Af den brugte glasfiber antages 80% at blive brændt i et kraftvarmeværk, hvor 3 kg glasfiber substituerer 1 kg olie.

TABEL 4-4
MATERIALEFORBRUG TIL DAMPINJEKTIONS RØR PÅ EN STOR LOKALITET FOR STÅLRØR OG ALTERNATIVT FOR GLASFIBERRØR

MATERIALE	BASIS-SCENARIO: STÅLRØR	SCENARIO: GLASFIBERRØR
STÅL	4.304 KG	
RUSTFRIT STÅL	269 KG	
GLASFIBER		1.400 KG



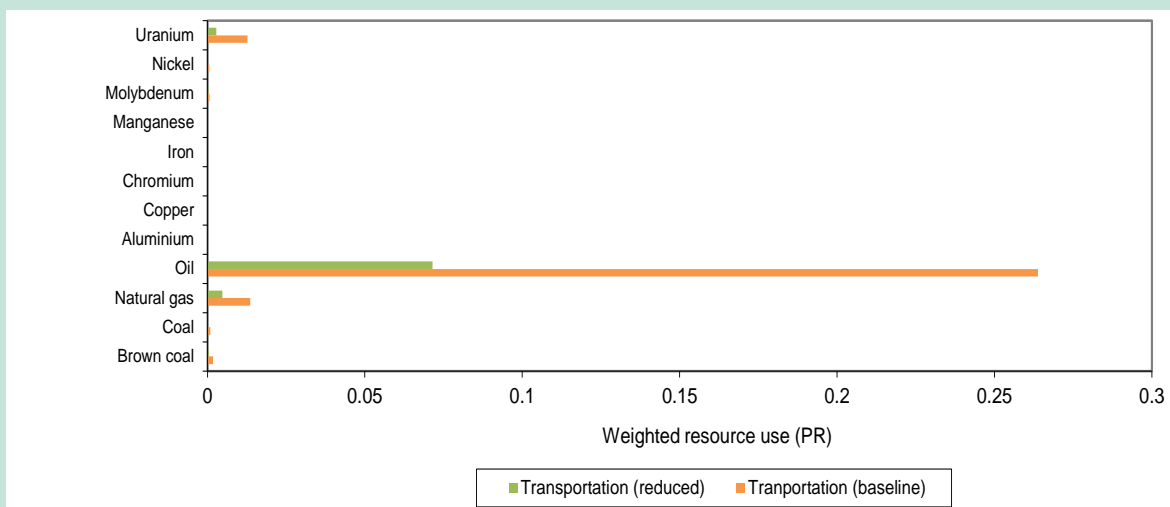
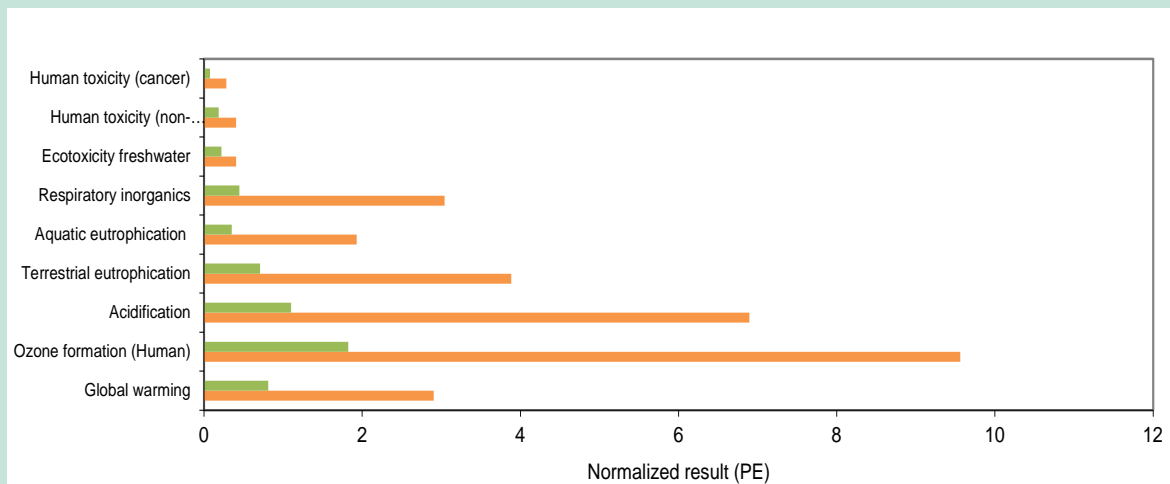
FIGUR 4-8
SAMMENLIGNING AF BASIS-SCENARIO (DAMPINJEKTIONSRØR I STÅL OG RUSTFRIT STÅL) MED ET SCENARIO HVOR DAMPINJEKTIONSRØR ER UDFØRT I GLASFIBER. DET VISTE RESULTAT ER GÆLDENDE FOR EN STOR LOKALITET.

Beregningsresultatet fremgår af Figur 4-8. Det ses at anvendelsen af glasfibermaterialer reducerer human- og økotoksicitet til 10-15% af påvirkningen ved anvendelse af stålør. Dertil kommer en reduktion i respiratoriske effekter. For de detaljerede beregninger henvises til BILAG D.

Substitutionen til glasfiber medfører, at forbruget af nikkel, jern og krom stort set elimineres og kul reduceres til ca. 40%. Til gengæld øges forbruget af aluminium, naturgas og olie. Det samlede energiforbrug indebærer således også øgede emissioner, der øger global opvarmning og forurening. Den relative forøgelse af disse effekter og ressourceforbrug er dog mindre end den reduktion i toksiske effekter og nikkel, jern og kromforbrug, som kan opnås ved et skift til glasfiber.

4.8. Brug af lokale eksperter og udstyr

I basis-scenariet for elektriskmodstandsovervarmning – ERH/ET-DSP™ - er det antaget, at nogle af komponenterne (kraftdistributionssystem, vandrecirkulationssystem og elektroder) transporteres fra Canada til Danmark. Derudover er der indregnet assistance 2 gange fra 2 eksperter fra Canada, hvilket indebærer 4 interkontinentale flyrejser tur/retur. Brugen af udenlandsk ekspertise er ofte nødvendig når nye metoder introduceres i Danmark fra andre lande. Behovet aftager i takt med erfaringsopbygningen i Danmark.



FIGUR 4-9
SAMMENLIGNING AF BASIS-SCENARIO, DER INKLUDERER TRANSPORT AF Udstyr OG 4 INTERKONTINENTALE FLYREJSER FOR EKSPERTER FRA CANADA TIL DANMARK T/R OG ET SCENARIO, HVOR Udstyr OG EKSPERTICE FOREFINDES LOKALT. ANALYSEN ER GENNEMFØRT FOR ERH/ET-DSP™ FOR DEN STORE TYPELOKALITET.

Betydningen af transport af udstyr og personer over lange afstande fremgår af Figur 4-9. De miljøpåvirkninger, der er knyttet til transport, kan reduceres med ca. 70%, hvis det nødvendige udstyr og materialer er til rådighed lokalt. Dertil kommer en reduktion i ressourceforbrug af størrelsesordenen 60%. For de detaljerede beregninger henvises til BILAG E.

Der må forventes en lignende betydning ved andre afværgemetoder af samme omfang.

5 Samlet vurdering

Det aktuelle projekt belyser mulighederne for miljømæssig optimering af fire termiske oprensningsmetoder: Termisk ledningsevne (ISTD), dampoprensning (SEE), elektrisk modstandsopvarmning (ET-DSP™) og radio frekvensopvarmning (RFH).

På baggrund af projekterfaringer er der indledningsvist foretaget en systematisk kortlægning af energi- og materialeforbrug ved gennemførte oprensninger med ISTD, SEE og ET-DSP™. For RFH er dataindsamlingen baseret på et pilotprojekt. Efterfølgende er der gennemført miljømæssige livscyklusvurderinger af basis-scenarier med ensartede projektforsætninger.

På baggrund af en brainstorm med fagfolk knyttet til projektet, er der identificeret forhold, som vurderes at være af betydning for en miljømæssig optimering af termisk oprensning. Dette omfatter dels en optimering af oprensningsbehov, dels en optimering af delprocesser, der omfatter energi-optimering, substitution af materialer og udstyr samt reduktion af transportbehov.

5.1. Undersøgelser, risikovurdering og projektering

Energibehovet til in situ termisk oprensning afhænger af volumen og overfladearealet af den jord, der skal oprenses. En nøjagtig og præcis afgrænsning og kvantificering af forureningen vil give mulighed for en nøje afgrænsning af det område, der skal oprenses. I den forbindelse vil en detaljeret risikovurdering give grundlag for at fastlægge den fornødne oprensningseffektivitet. Samlet vurderes detaljerede og målrettede undersøgelser og risikovurderinger at indebære et væsentligt potentiale for projektoptimering.

Optimeringspotentialet er naturligvis afhængigt af kvaliteten af det foreliggende projekteringsgrundlag og kan derfor ikke kvantificeres nøjere. I forbindelse med afgrænsning og risikovurdering af forureninger, der skal oprenses, anbefales det at gennemføre følsomhedsanalyser til bestemmelse af usikkerheder i fastlæggelsen af det jordvolumen, der skal oprenses.

Den øgede præcision stiller samtidig øgede krav til temperaturovervågning og anden monitoring under opvarmningsprocessen.

5.2. Optimering af delprocesser

De delprocesser, der er prioriteret til en nøjere analyse af potentialet for forbedring af miljøprofilen, omfatter:

- Diskontinuert opvarmning; opvarmning uden for kraftværkernes spidslastperioder (elekticitetsbaserede opvarmningsteknikker).
- Substitution af normal dansk elmix med brug af certificeret vandkraft (elekticitetsbaserede opvarmningsteknikker).
- Alternative opbygninger af vapor cap (alle opvarmningsteknikker).
- Substitution af stenkulsbaseret aktivt kul med biobaseret aktivt kul (alle opvarmnings-teknikker).
- Anvendelse af alternative stållegeringer i varmelegemer (ISTD).
- Kondenserende versus ikke kondenserende kedel (SEE).
- Substitution af stål med glasfiber i dampinjektionsboringer (SEE).
- Indskrænket brug af interkontinental transport af eksperter og udstyr (generelt).

De prioriterede delprocesser indgår i sammenlignende livscyklusanalyser med tilsvarende delprocesser, der indgår i basis-scenarierne. Herved er det relative miljømæssige optimeringspotentiale kvantificeret for de enkelte delprocesser.

I livscyklusvurderingen kvantificeres en række miljøpåvirkninger, der omfatter global opvarmning, fotokemisk ozondannelse, forsurening af vandmiljø, næringssaltbelastning af jord- og vandmiljø, respiratoriske effekter for mennesker samt toksiske effekter for mennesker og vandmiljø, grundet udledning af kemikalier. Derudover beregnes forbruget af energiråstoffer (uran, olie, naturgas, stenkul og brunkul) og materialeråstoffer (nikkel, molybdæn, mangan, jern, krom, kobber og aluminium).

Generelt viser livscyklusvurderingerne, at det absolut største bidrag til forbrug af energiråstoffer og miljøpåvirkninger for ISTD, ET-DSP™ og RFH er on-site elektricitetsforbrug til opvarmning af jorden med tilhørende drift af luft- og vandbehandlingsanlæg. For SEE er det tilsvarende forbruget af naturgas eller olie til on-site produktion af damp.

For de elektricitetsbaserede oprensningsteknikker ligger det største optimeringspotentiale i at reducere elektricitetsforbruget eller ændre det til i højere grad at udnytte vedvarende energi. Det danske elmix anvendt i LCA-beregninger omfatter omkring 20% energi fra vedvarende energikilder (vindenergi, biomasse). Andre geografiske steder som eksempelvis Sverige og Norge har større andele af vedvarende energi, hvorved optimeringen af energiforbruget får relativt mindre betydning i forhold til en optimering af materialeforbruget.

I det omfang den vedvarende energi, der er til rådighed i forsyningsnettet, er fuldt udnyttet, kan man argumentere for, at ethvert yderligere forbrug – eksempelvis en termisk oprensning – bør allokeres til den marginale elproduktion, som i Danmark er kulkræftbaseret. De gennemregnede scenarier tager imidlertid udgangspunkt i, at et elektricitetsforbrug allokeres til det elmix, som må forventes at være til stede på brugstidspunktet.

I det følgende er de behandlede optimeringsscenarier sammenfattet ved eksempler på beregningsresultater, idet der her tages udgangspunkt i et stort projekt (~1.300 m²):

- *Diskontinuert opvarmning (Opvarmning uden for kraftværkernes spidslastperioder)*
Optimeringen baserer sig på et scenarie, hvor opvarmningen reduceres til 20% af den normale effekt i kraftværkernes spidslastperioder (~ 12 dagtimer i 5 døgn pr. uge) og 100% i den øvrige varmeperiode. Ydermere allokeres elektricitetsforbruget til vindkraft 6 timer/døgn (natten) og kulkraft resten af døgnen. Med disse forudsætninger kan der opnås en reduktion i miljøpåvirkninger og ressourceforbrug af størrelsesordenen 8-10%, mens det samlede elektricitetsforbrug øges med 1-3% som følge af en længere varmeperiode.

Reduktionspotentialet forudsætter, at den øgede anvendelse af vindkraft – eller anden type vedvarende energi - er til rådighed i nettet.

- *Substitution af normalt dansk elmix med brug af certificeret vandkraft*
Analysen illustrerer betydningen af det elmix, der er til rådighed for oprensning. En tænkt substitution af et normalt dansk elmix med vandkræftbaseret elektricitet vil indebære en reduktion på ca. 80% i bidraget til ikke toksiske effekter. Økotoksiske og ikke-carcinogene effekter reduceres med 30 – 50%. Reelt vurderes der ikke at være et potentiale for miljøoptimering ved brug af certificeret vandkraft. Vandkræftpotentialet anses for fuldt udbygget i de skandinaviske lande, hvorved et øget forbrug af vandkræft ikke vil indebære en øget produktion af vedvarende energi baseret på vandkræft.

- *Alternative opbygninger af vapor cap*

Der medgår normalt relativt store mængder beton til etablering af vapor cap. Produktionen af cement indebærer et ikke uvæsentligt off site energiforbrug. Der er stillet forslag til alternative design af vapor cap med anvendelse af lettere skumbeton- og betonsandwich-konstruktioner med forskellige typer af isolering (polystyren plader, Leca letklinker og muslingskaller). Optimeringen stiller skærpede krav til dimensionering, udførelsesmetoder, tilsyn og kontrolforanstaltninger.

Beregningerne viser, at der vil kunne opnås en relativ reduktion i miljøpåvirkninger og ressourceforbrug af størrelsesordenen 50 – 70%, i forhold til en normalt anvendt vapor cap af skumbeton. Opbygningen med sandwich-konstruktioner repræsenterer det største reduktionspotentiale.

- *Substitution af stenkulsbaseret aktivt kul med biobaseret aktivt kul*

Der er foretaget en sammenlignende analyse af stenkulsbaseret aktivt kul fra Kina med biologisk baseret aktivt kul, der er baseret på affald af kokosnøddeskaller og fremstillet i Malaysia. Beregningerne viser, at der kan opnås en relativt stor reduktion i miljøbelastningerne. Således reduceres ozondannelsen med ca. 80%, bidraget til global opvarmning ca. 50%, respiratoriske effekter ca. 40% og næringsstofbelastningen med ca. 10%. Dertil kommer at kulforbruget elimineres til fordel for en nyttiggørelse af affald af kokosnøddeskaller.

Reduktionspotentialet er gældende for luftbehandling. Ved vandbehandling forventes effekten halveret, idet der skal påregnes ca. den dobbelte mængde biologisk baseret aktivt kul for at opnå den samme absorptionskapacitet som for stenkulsbaseret aktivt kul. Endelig bemærkes det, at der ikke er driftserfaringer med anvendelse af biobaseret aktivt kul, hvorfor der kan vise sig uventede driftsforhold.

- *Anvendelse af alternative stållegeringer i varmelegemer mv.*

Termisk oprensning indebærer et kemisk aggressivt miljø, hvor rustfrit stål i kraft af sin modstandsdygtighed i vidt omfang anvendes i varmeboringer, foringsrør, filtre mv. Der er identificeret muligheder for substitution af normalt anvendte legeringer af rustfrit stål med lavere legerede ståltyper. Herved er der identificeret mulighed for en reduktion af nikkel på indtil 80% i centrale komponenter (varmelegemer, beskyttelsesrør og cold pin ved ISTD), mens der ikke er fundet væsentligt reduktionspotentiale for krom.

Det skal understreges, at substitution af legeringer af rustfrit stål, almindeligt stål og glasfiber reelt indebærer anvendelse af komponenter, der kan være mindre resistente end de normalt anvendte komponenter. Man kan herved opnå mindre robuste anlæg, der vil kræve mere tilsyn og vedligeholdelse i opvarmningsperioden, ligesom mulighederne for genbrug af komponenter kan blive reduceret.

- *Kondenserende versus ikke-kondenserende kedler (SEE)*

En kondenserende kedel har en lavere røggastemperatur og udnytter derved energien bedre end en ikke-kondenserende kedel. Beregninger viser, at en naturgasfyret kondenserende kedel udnytter energien 7% bedre og en oliefyret kedel 6% bedre end en ikke-kondenserende kedel. Miljøbelastningerne reduceres tilsvarende.

Sammenlignes et naturgasfyret anlæg med et oliefyret anlæg, viser det sig, at et oliefyret anlæg indebærer miljøbelastninger, der med undtagelse af ozondannelse, er 22-200% større end for et naturgasfyret anlæg.

- *Substitution af stål med glasfiber i dampinjektionsboringer (SEE)*
Der anvendes en relativt stor mængde stål og rustfri stålør til injektionsboringer ved dampoprensning. Dette indebærer human- og økotoksikologiske påvirkninger grundet emissioner fra stålproduktionen. Derudover indebærer forbruget naturligtvis også et ressourceforbrug af jern. Dampinjektionsrør af stål vurderes at kunne substitueres med glasfiberrør.

Anvendelsen af glasfibermaterialer reducerer de toksiske påvirkninger med 86-98%. Dertil kommer en reduktion i respiratoriske effekter.

- *Interkontinental transport af eksperter og udstyr*
Effekten af at bruge eksperter og udstyr, der transporteres over lange afstande, er analyseret for ET-DSP™. Der er foretaget en sammenlignende analyse af udstyr og assistance, der indebærer 4 interkontinentale flyrejser tur/retur versus brug af lokalt baseret udstyr og ekspertise.

Beregninger viser, at de miljøpåvirkninger, der er knyttet til transport, kan reduceres med ca. 70%, hvis det nødvendige udstyr og materialer er til rådighed lokalt. Dertil kommer en reduktion i ressourceforbrug af størrelsesordenen 60%.

5.3. Optimeringspotentiale for termiske metoder

I Tabel 5-1 er der givet en oversigt over de identificerede optimeringsmuligheder for ISTD, SEE og ET-DSP™. Ydermere er det samlede reduktionspotentiale for miljøpåvirkninger og ressourceforbrug angivet samlet og opdelt på bidrag fra de enkelte optimeringsscenarier. Analysen baserer sig på en stor lokalitet (1.300 m²).

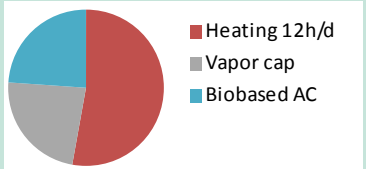
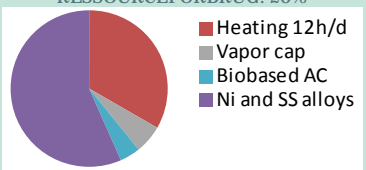
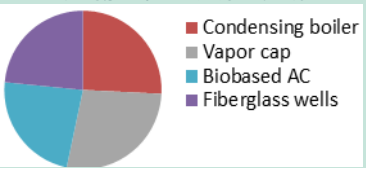
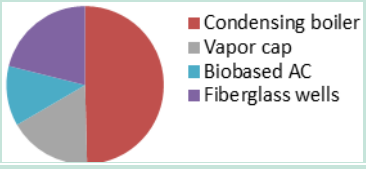
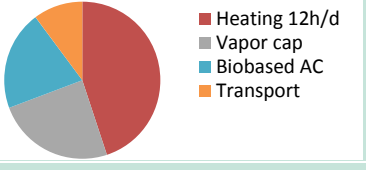
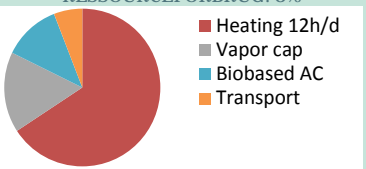
Den potentielle reduktion i miljøpåvirkninger og ressourceforbrug er kvantificeret i procent i forhold til basis-scenarierne, der afspejler hidtidig praksis for gennemførelse af termisk oprensning. Reduktionspotentialet i procent er givet i forhold til summen af miljøpåvirkninger i PE (personækvivalenter) og summen af ressourceforbrug i PR (personreserver). Det skal understreges, at de reduktionspotentialer, der er fundet for transport for ET-DSP™ og nikkel/rustfrit stål i ISTD, også er relevante for andre teknikker, hvor et lignende transportbehov eller materialeforbrug indgår. Sikkerheden for, i hvor høj grad de beregnede reduktionspotentialer reelt er til stede, er indikeret med henvisning til de parametre, der er årsag til usikkerheden.

Det samlede reduktionspotentiale spænder fra 10-21% for miljøpåvirkninger og 8-20% for ressourceforbrug, afhængigt af den pågældende metode. Dertil kommer reduktionspotentialet ved en minimering af det jordvolumen, der skal oprenses.

De human- og økotoksiske påvirkninger er generelt større og mere usikre end de øvrige påvirkninger og medfører derfor en relativt stor usikkerhed, når den samlede påvirkning estimeres. Hvis man ser bort fra de toksiske påvirkninger, vil reduktionspotentialet for miljøpåvirkninger for ISTD og ET-DSP™ øges til henholdsvis 17 og 18%. Cirkeldiagrammer i den sidste kolonne i Tabel 5-1 viser de relative reduktionsbidrag fra de forskellige optimeringsscenarier.

TABEL 5-1

SAMMENFATNING AF POTENTIELLE MULIGHEDER FOR OPTIMERING AF TERMISKE METODERS MILJØPROFIL

	OPTIMERINGS-SCENARIO	SIKKERHED FOR FORBEDRING AF MILJØPROFIL ¹⁾	REDUKTIONSPOTENTIALE FOR MILJØPÅVIRKNINGER OG RESSOURCEFORBRUG. SAMLET OG RELATIVT BIDRAG FRA DE ENKELTE OPTIMERINGSSCENARIER.
ISTD	DISKONTINUERT OPVARMNING (12 T/DAG)	+	<p>MILJØPÅVIRKNINGER: 10%</p>  <ul style="list-style-type: none"> Heating 12h/d Vapor cap Biobased AC
	VAPOR CAP UDFØRT SOM BETONSANDWICH	++	
	BIO-BASERET AKTIVT KUL I LUFTBEHANDLING	+	<p>RESSOURCEFORBRUG: 20%</p>  <ul style="list-style-type: none"> Heating 12h/d Vapor cap Biobased AC Ni and SS alloys
	SUBSTITUTION AF RUSTFRI STÅLLEGERINGER I VARMEBRØNDE	+	
SEE	SUBSTITUTION TIL KONDENSERENDE DAMPGENERATORER	++	<p>MILJØPÅVIRKNINGER: 21%</p>  <ul style="list-style-type: none"> Condensing boiler Vapor cap Biobased AC Fiberglass wells
	VAPOR CAP UDFØRT SOM BETONSANDWICH	++	
	BIO-BASERET AKTIVT KUL I LUFTBEHANDLING	+	<p>RESSOURCEFORBRUG: 9%</p>  <ul style="list-style-type: none"> Condensing boiler Vapor cap Biobased AC Fiberglass wells
	SUBSTITUTION AF STÅL TIL GLASFIBER I DAMPINJEKTIONSØR	+	
ET-DSP™	DISKONTINUERT OPVARMNING (12 T/DAG)	+	<p>MILJØPÅVIRKNINGER: 13%</p>  <ul style="list-style-type: none"> Heating 12h/d Vapor cap Biobased AC Transport
	VAPOR CAP UDFØRT SOM BETONSANDWICH	++	
	BIO-BASERET AKTIVT KUL I LUFTBEHANDLING	+	<p>RESSOURCEFORBRUG: 8%</p>  <ul style="list-style-type: none"> Heating 12h/d Vapor cap Biobased AC Transport
	BRUG AF LOKALT BASERET UDSTYR OG EKSPERTISE	++	

¹⁾ ++: Høj sikkerhed for reduktionspotentiale. +: Reduktionspotentiale, men størrelse usikker.

Ved både ISTD og ET-DSP™ oprensninger i Danmark udgør opvarmning uden for kraftværkernes spidslastperioder (diskontinuert opvarmning) ca. 50% af reduktionspotentialet for de afledte miljøpåvirkninger. Det resterende reduktionspotentiale ligger i en optimering af vapor cap og anvendelse af biobaseret aktivt kul. Substitution af rustfrit stål, der eksempelvis anvendes til varmebrønde og elektroder samt legeringer med lavere nikkelindhold, indebærer ved ISTD-teknikken et potentiale på op til ca. 35% reduktion i ressourceforbrug af nikkel. Tilnærmelsesvis samme reduktionspotentiale forventes ved ET-DSP™-teknikken

Ved dampoprensning bidrager de 4 optimeringsscenarier næsten lige meget til det samlede reduktionspotentiale for miljøpåvirkninger, mens brugen af en kondenserende dampgenerator udgør ca. 50% af det samlede reduktionspotentiale for ressourceforbrug.

Transport af udstyr og personer over lange afstande indebærer også signifikante miljøpåvirkninger og ressourceforbrug, som vil kunne reduceres væsentligt, hvis udstyr og ekspertise findes lokalt. Reduktion i transporten udgør 6-10% af det samlede reduktionspotentiale for ET-DSP™-teknikken. Det samlede reduktionspotentiale er ikke kvantificeret for RFH, idet de foreliggende erfaringer alene bygger på et projekt i pilotskala. Imidlertid forventes diskontinuert opvarmning, en alternativ opbygning af vapor cap og anvendelse af biobaseret aktivkul også at indebære lignende optimeringspotentialer, som for de øvrige teknikker. Derudover forventes elektricitetsforbruget at kunne reduceres væsentligt, idet virkningsgraden af radiofrekvensgeneratorer forventes at kunne øges væsentligt fra de nuværende ca. 50%.

5.4. Betydning af skala for oprensning

Potentialet for miljømæssig optimering i absolutte mængder er naturligvis størst for store projekter i forhold til små projekter, selvom de analyserede basis-scenarier viser, at de store projekter har et væsentligt bedre miljøprofil pr. m³ oprenset jord end små projekter. Dette skyldes et relativt mindre varmetab pr. m³ jord ved store lokaliteter, en relativt mindre periferi/randområde, der skal dækkes med underjordiske installationer, samt en mere effektiv udnyttelse af overjordisk udstyr, som eksempelvis behandlingsanlæg.

In situ termisk rensning kan udføres på væsentligt større lokaliteter end det, der er forudsat i denne analyse. I USA er der eksempler på ISTD oprensninger på arealer op til 70.000 m² og SEE oprensninger på arealer op til 300.000 m². Selvom det må forventes, at meget store oprensninger har et relativt bedre miljøprofil, vil selv et lille procentuelt potentiale for miljøoptimering indebære store reduktioner i forbruget af energi- og materialeressourcer og de deraf afledte miljøpåvirkninger.

På meget store lokaliteter kan man tænke sig andre optimeringsmuligheder. Eksempelvis kan on-site regenerering af aktivt kul med damp vise sig at være et økonomisk og miljømæssigt bedre alternativ.

6 Referencer

- Dyck-Madsen, S. 2009. Klima og grøn strøm. Kun få danske "Grøn Strøm" produkter gør faktisk en forskel. ISBN: 87-92044-37-9. Det økologiske råd, August 2009.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., & Wernet, G. 2007. Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Hauschild, M.Z. and Potting, J. 2005. Spatial differentiation in life cycle impact assessment - the EDIP-2003 methodology. Environmental news No. 80. 2005, Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment.
- Humbert S., Marshall J., Shaked S., Spadaro J., Nishioka Y., Preiss P., McKone T., Horvath A., and Jolliet, O. 2011. Intake fractions and characterization factors for particulate matter: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment. Environ. Sci. Technol. 2011, 45, 4808–4816.
- Nord Pool Spot. 2013. www.nordpoolspot.com
- Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., and Hauschild, M.Z. 2008. USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. International Journal of Life Cycle Assessment 13, 532-546.
- Zwicky, F. (2011). Personlig kommunikation pr. telefon med Flemming Zwicky, Chemviron A/S.

BILAG A Beskrivelse af de fire tekniker TCH (ISTD), SEE, ERH (ET-DSP™) og RFH

Indhold

A-1 In situ Thermal Desorption - ISTD™	57
A-1.1 Anvendelsesområde	57
A-1.2 Oprensningsprincip	57
A-1.3 Fordele og ulemper	58
A-1.4 Anlægsopbygning	58
A-2 Steam Enhanced Extraction - SEE	59
A-2.1 Anvendelsesområde	59
A-2.2 Oprensningsprincip	59
A-2.3 Fordele og ulemper	60
A-2.4 Anlægsopbygning	60
A-3 Electric Resistance Heating - ERH	61
A-3.1 Anvendelsesområde	61
A-3.2 Oprensningsprincip	61
A-3.3 Fordele og ulemper	62
A-3.4 Anlægsopbygning	62
A-4 Radio Frequency Heating - RFH	63
A-4.1 Anvendelsesområde	63
A-4.2 Oprensningsprincip	63
A-4.3 Fordele og ulemper	63
A-4.4 Anlægsopbygning	64

A-1 In situ Thermal Desorption - ISTD™

A-1.1 Anvendelsesområde

In situ Thermal Desorption - ISTD™ også kaldt termisk ledningsevne opvarmning - Thermal Conductive Heating (TCH) anvendes typisk ved oprensning af lerjord forurenet med flygtige forureninger som chlorerede opløsningsmidler eller oliestoffer. Teknikken kan dog anvendes for forureninger med forholdsvis høje kogepunkter og komplicerede geologier med ler, sand og silt.

A-1.2 Oprensningsprincip

Ved oprensning med termisk ledningsevne placeres borer (udført i stål) udstyret med varmelegemer i det forurenede område, der ønskes oprenset. Varmelegemerne opvarmes til 300 - 500°C, hvorved de omkringliggende jordlag opvarmes som følge af varmeledning. Afhængig af opvarmningstiden og afstanden til varmelegemerne kan der i praksis opnås jordtemperaturer på op til ca. 400 °C. I de fleste oprensninger er det dog ikke nødvendigt at foretage en opvarmning til højere temperaturer end porevandets kogepunkt. Ved opvarmningen mobiliseres forureningskomponenterne på gas- og vandfasen. Den mobiliserede forurening fjernes i gasfasen ved vakuumeekstraktion og i vandfasen ved grundvandsoppumpning. En stor del af forureningskomponenterne vil oxideres i de meget varme områder umiddelbart omkring og i borerne. Der er behov for køling af den ekstraherede gas – og vandfase, udskilning af kondensat samt rensning af poreluft, vand og kondensat.

Da den termiske ledningsevne – i modsætning til den hydrauliske ledningsevne – ikke varierer væsentligt mellem sand, silt og ler foregår opvarmningen ved termisk ledningsevne forholdsvis jævnt over oprensingsdybden. Da opvarmningen ved varmeledning desuden foregår forholdsvis langsomt er varmeudbredelsen forholdsvis nem at styre, så uønsket opvarmning af installationer mv. kan mindskes.

Den pneumatiske ledningsevne i de opvarmede og delvist udtørrede jordlag vil være markant højere end i de omkringliggende mere vandfyldte områder. Herved sikres mulighed for vakuumventilation i lerlag og dermed en hurtig fjernelse af forurening på gasfase, hvorved risikoen for utilsigtet spredning af forureningen fra oprensingsområdet minimeres.

A-1.3 Fordele og ulemper

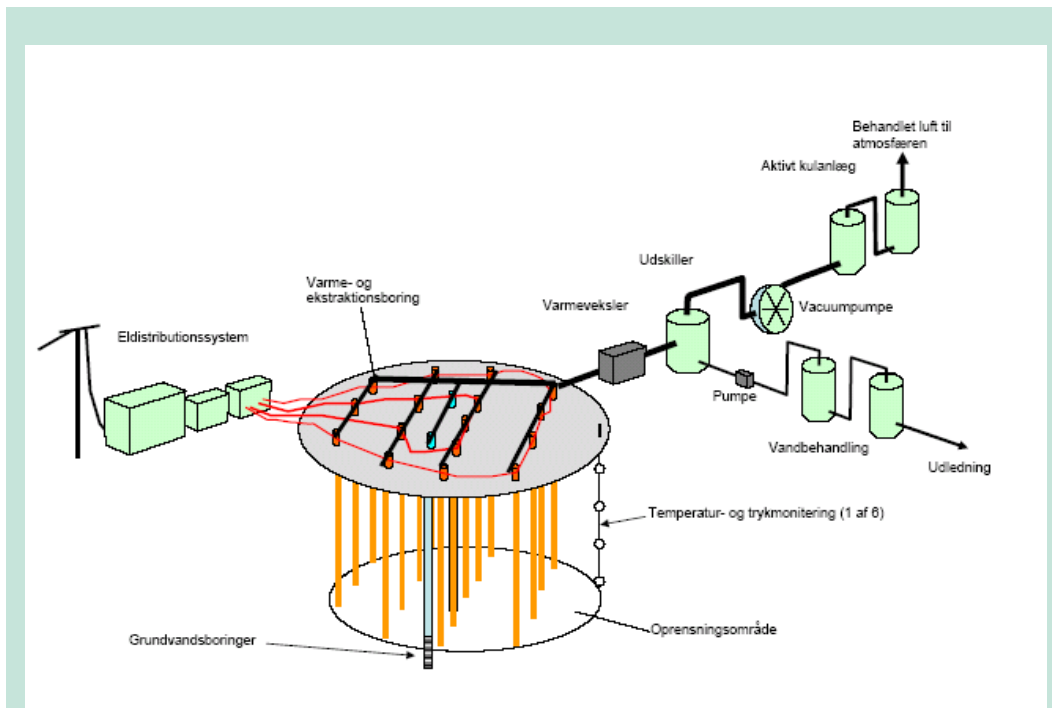
Metodens største ulempe er, at jordlag med kraftig grundvandsstrømning kan være vanskelige at opvarme pga. vandets kølende effekt. Metoden kan således ikke anvendes på steder, hvor der er stor tilstrømning af grundvand til det opvarmede område, idet kogning af dette vand vil være bekosteligt og nedsætte energitilførslen til de omkringliggende jordlag. Anvendelsen af metoden under sådanne forhold forudsætter således etablering af hydraulisk kontrol med grundvandet og eventuelt sænkning af vandspejlet i oprensingsområdet.

A-1.4 Anlægsopbygning

Vigtigste anlægskomponenter under en oprensning ved ISTD er vist i figur A-1.

De vigtigste anlægslementer er:

- El distributionssystem
 - Transformere som leverer strøm til de elektriske kredsløb
 - Kontakter, målere og kontrolenheder
 - Kabler til ISTD-varmelegemerne, som er placeret i vertikale varmeboringer
- Overjordiske elementer
 - Vapor cap (typisk beton)
 - Manifold
 - Transportledninger for ekstraherede gasser og væsker
 - Signalkabler
- In situ elementer
 - Varmeboringer (stål)
 - Ekstraktionsboringer for gasser og væsker
 - Temperaturmoniteringsboringer
 - Trykmoniteringsboringer
- Behandlingsystem for ekstraherede gasser og væsker
 - Varmevexler (rustfri stål)
 - Køleanlæg
 - Udskiller (rustfri stål)
 - Beholder til fri produkt
 - Vakuumpumpe (carbon stål)
 - Aktivt kulanlæg (behandling af gasfasen)
 - Aktivt kulanlæg (behandling af vandfasen)



FIGUR A-1
PRINCIPSKITSE AF ISTD-ANLÆG.

Typisk bruges endvidere en kontorcontainer til overvågning og dataopsamling i oprensningsperioden. Dataopsamlingen kan efter behov automatiseres. I takt med at oprensningsområdet opvarmes, bliver gasser og væsker ekstraheret, nedkølet, separeret og behandlet. Oprensningsområdet bliver overvåget ved monitoring af temperatur og tryk i formationen, samt detaljeret prøvetagning og analyser af ekstraherede væsker og gasser.

Kildeområdet opvarmes af varmeboringer med en diameter på 8-10 cm. I hver varmeboring er placeret et ISTD-varmeelement, som er kontrolleret med termostater for at sikre en ensartet opvarmning. Oprensningsvolumenet bliver typisk opvarmet til kogepunktet for vand, hvorved mobile forurenings faser bliver fjernet. Om nødvendigt kan den termiske behandling fortsættes indtil ønsket oprensningsniveau er opnået. Under oprensningen vil udelukkende området helt tæt på varmeboringerne (indtil ca. 0,5 m) blive opvarmet væsentligt over kogepunktet.

A-2 Steam Enhanced Extraction - SEE

A-2.1 Anvendelsesområde

Dampoprensning - Steam Enhanced Remediation (SER) eller Steam Enhanced Extraction (SEE) anvendes typisk i såvel den mættede som den umættede zone i højpermeable sandformation ved oprensning af flygtige forurenings med kogepunkter under ca. 200°C.

A-2.2 Oprensningsprincip

Ved dampinjektion udbredes dampzoner fra dampinjektionsboringer primært ind mod centrum af kildeområdet, og den injicerede damp samt forureningskomponenter på dampform føres med dampfronten ind mod ekstraktionsboringer centralt i forureningen. Herved opvarmes kildeområdet i takt med udbredelsen af dampfronten. Udbredelsen af dampfronterne samt opsamlingen af

forurening på væske- og gasfase kontrolleres ved vakuume ekstraktion samt grundvandsoppumpning fra de centrale ekstraktionsboringer.

Injektion af damp kan under passende højpermeable forhold anvendes såvel i den mættede som den umættede zone. I den mættede zone fortrænges grundvandet af den injicerede damp, idet formationen og porevand opvarmes til damptemperatur. I dampzonen er der således umættede forhold i den tidligere grundvandszone, og når dampfronterne er fremme ved ekstraktionsboringerne er der umættede forhold i hele kildeområdet.

Styringen af dampfronternes udbredelse kan vanskeliggøres af geologiske inhomogeniteter, specielt lerlag, som er svært gennemtrængelige for dampfronten. Samtidig er det muligt at behandle op mod 1 meter tykke lavpermeable lag med damp, da varmen fordeles ved termisk ledningsvejen et stykke ind i tætte matricer. Ligeledes vil en tæt placering af hhv. injektions- og ekstraktionsboringer lette kontrollen med dampfronternes udvikling.

A-2.3 Fordele og ulemper

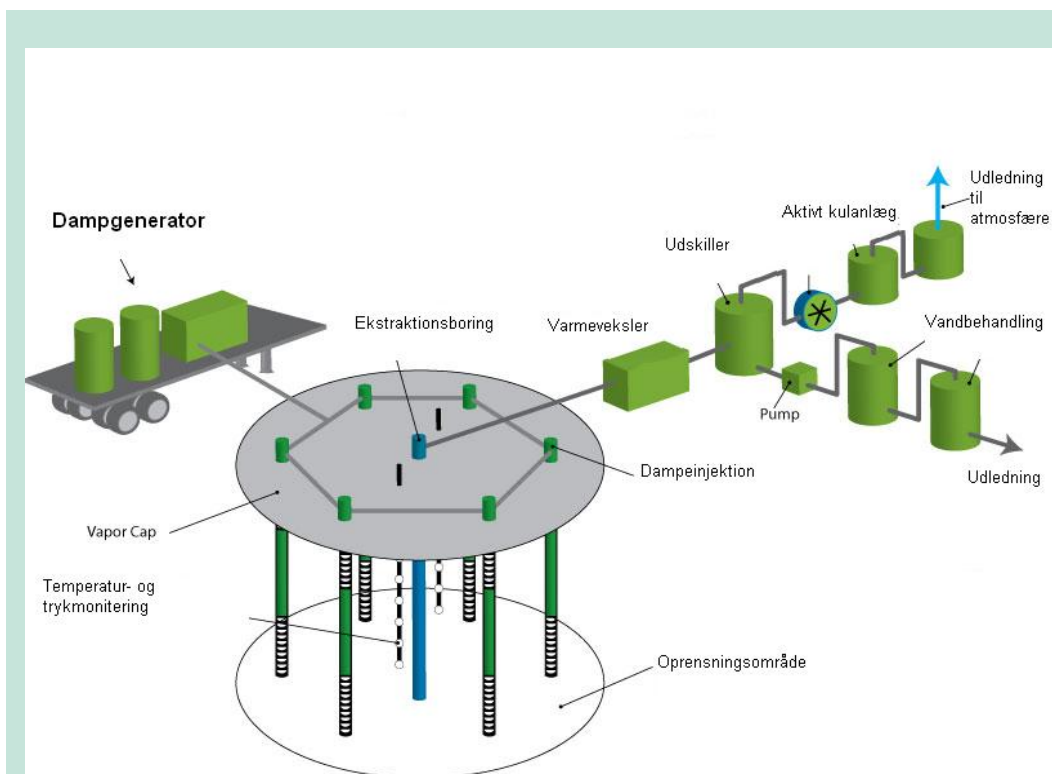
Det er yderst vigtigt at der etableres hydraulisk og pneumatisk kontrol under opvarmningen, og at det forhindres at forureningsstofferne spredes via kondensation under oprensningen.

A-2.4 Anlægsopbygning

Vigtigste anlægskomponenter under en oprensning ved SEE er vist i figur A-2.

De vigtigste anlægselementer er:

- Dampgeneratorsystem
- Overjordiske elementer
 - Vapor cap (typisk beton)
 - Manifold
 - Transportledninger for ekstraherede gasser og væsker
- In situ elementer
 - Dampinjektionsboringer (stål)
 - Ekstraktionsboringer for gasser og væsker
 - Temperaturmoniteringsboringer
- Behandlingsystem for ekstraherede gasser og væsker
 - Varmeveksler (rustfri stål)
 - Køleanlæg
 - Udskiller (rustfri stål)
 - Beholder til fri produkt
 - Vakuumpumpe (carbon stål)
 - Aktivt kulanlæg (behandling af gasfasen)
 - Aktivt kulanlæg (behandling af vandfasen)



FIGUR A-2
PRINCIPSKITSE AF SEE-ANLÆG (FRA TERRATHERM)

A-3 Electric Resistance Heating - ERH

A-3.1 Anvendelsesområde

Elektrisk modstandsovervarmning – Electric Resistance Heating (ERH) anvendes typisk ved oprensning af lerjord forurenet med flygtige forureninger som chlorerede opløsningsmidler eller oliestoffer. Teknikken kan dog anvendes for forureninger med forholdsvis høje kogepunkter og komplicerede geologier med ler, sand og silt.

A-3.2 Oprensningsprincip

Direkte elektrisk modstandsovervarmning findes i flere varianter, hvoraf den mest avancerede form er benævnt Electro-Thermal Dynamic Stripping Process (ET-DSP™). ET-DSP™ benyttes til oprensning af fri fase forureninger samt flygtige og semi-flygtige forureningskomponenter. ET-DSP™ metoden har været anvendt med succes på mere end 30 grunde hovedsagelig i USA. ET-DSP™ metoden er som ISTD metoden følsom over for grundvandsindstrømning i opremsningsperioden. Men da elektroderne kan levere op til 3-5 gange mere energi per længdeenhed, er løsningen dog lidt mere robust over for grundvandsindstrømning end ISTD løsningen.

Ved ET-DSP™ sendes der en strøm gennem jorden mellem afværgeområdets elektrode-boringer. Jordens elektriske modstand medfører, at der afsættes energi i jord og porevand, hvorved det opvarmes. Når porevandet er fordampet, holder strømmen op med at flyde mellem elektroderne – derfor injicerer der en mindre vandmængde ved hver elektrode for at forhindre at de tørrer ud. Af samme grund er metoden kun anvendelig til opvarmning op til vandets kogepunkt. Den mere avancerede ET-DSP™ metode har til dato været anvendt ved mere end 30 succesfulde

oprensninger, mens ERH metoden generelt har været anvendt på flere hundrede grunde. Den grundlæggende fordel ved ET-DSP™ frem for traditionel ERH er at der ved ET-DSP™ anvendes computerstyrede elektroder, placeret i flere dybdeniveauer, hvorved der kan opnås en mere ensartet opvarmning af jordvolumenet og derved en mere effektiv oprensning end ved traditionel ERH.

Ved opvarmningen mobiliseres forureningskomponenterne (som ved ISTD løsningen) primært på gasfasen og fjernes ved vakuumelekstraktion samt supplerende grundvandsboringer, såfremt dette vurderes nødvendigt. Ekstraheret gasfase og vand køles efterfølgende i behandlingsanlægget, kondensat udskilles, hvorefter vand og luft renses inden udledning til hhv. afløbssystemet og atmosfæren.

A-3.3 Fordele og ulemper

Oprensningsområdet opvarmes via jordens resistivitet, hvor strøm påføres gennem elektroder placeret i et fastlagt geometrisk mønster. Ved hver elektrode er der mulighed for væsketilførsel således, at jorden holdes fugtig. Udtørret jorden vil jordens elektriske ledningsevne falde, og opvarmning af formationen som helhed vil gå i stå. Oprensningsvolumenet kan opvarmes til kogepunktet for vand, hvorved mobile chlorerede faser bliver fjernet. Om nødvendigt kan den termiske behandling fortsættes indtil ønsket oprensingsniveau er opnået. Med denne metode vil ingen dele af oprensningsområdet blive opvarmet til over ca. 100°C, da jorden som nævnt ovenfor i givet fald vil tørre ud, og derved miste sin elektriske ledningsevne.

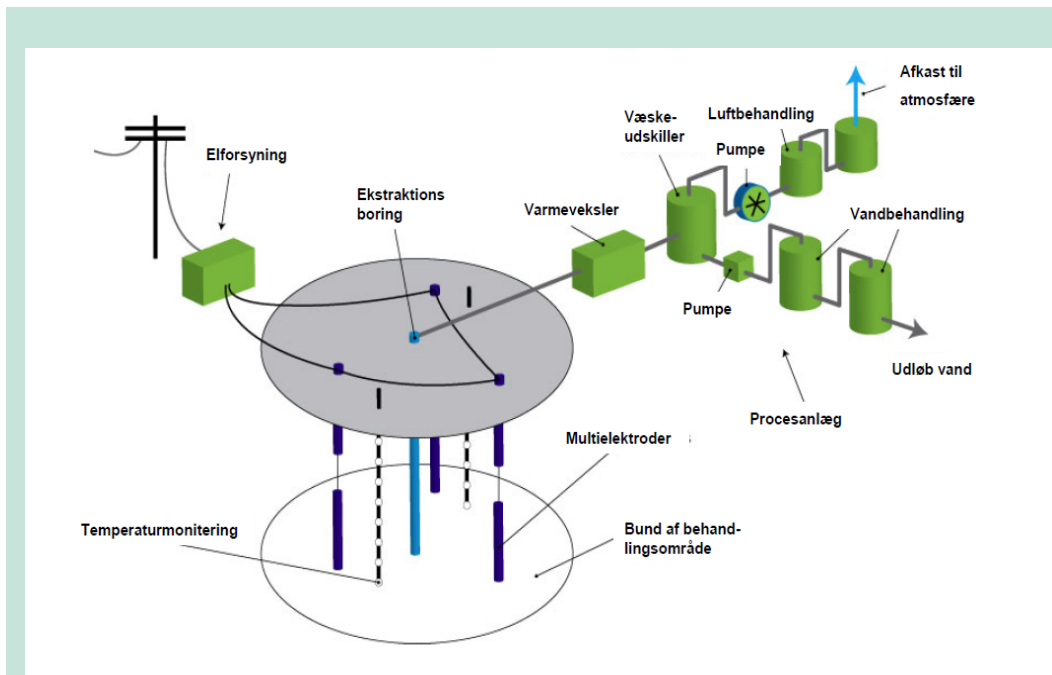
Metoden indebærer til gengæld, at man skal være sikre på, at der indenfor og i nærheden af området hvor der påføres strøm, ikke må forefindes andre genstande med lav resistivitet, f.eks. vandrør af stål, stålpele, ledninger med metaller o.l., da det dels vil kunne skade elektriske anlæg som der er forbindelse til, og dels kunne udgøre en personrisiko. Sådanne genstande skal beskyttes (ved bl.a. jording) inden oprensningen kan igangsættes.

A-3.4 Anlægsopbygning

Vigtigste anlægskomponenter under en oprensning ved ET-DSP™ er vist i figur A-3.

De vigtigste anlægselementer er:

- El distributionssystem
 - Transformere som leverer strøm til de elektriske kredsløb
 - Kontakter, målere og kontrolenheder
 - Kabler til elektroderne, som er placeret i vertikale boringer
- Overjordiske elementer
 - Vapor cap (typisk beton)
 - Manifold
 - Transportledninger for ekstraherede gasser og væsker
- In situ elementer
 - Ekstraktionsboringer for gasser og væsker
 - Temperaturmoniteringsboringer
- Behandlingsystem for ekstraherede gasser og væsker
 - Varmeveksler (rustfri stål)
 - Køleanlæg
 - Udskiller (rustfri stål)
 - Beholder til fri produkt
 - Vakuumpumpe (carbon stål)
 - Aktivt kulanlæg (behandling af gasfasen)
 - Aktivt kulanlæg (behandling af vandfasen)



FIGUR A-3
PRINCIPSKITSE AF ET-DSP™-ANLÆG (FRA TERRATHERM)

Styresystemer til distribution af el til de enkelte elektroder, overvågning af behandlingsanlæg og dataopsamling fra SRO-anlæg og temperaturmonitering i oprensningsperioden samles i en klimasikret container. Dataopsamlingen kan efter behov automatiseres. I takt med at oprensingsområdet opvarmes, bliver gasser og væsker ekstraheret, nedkølet, separeret og behandlet. Oprensingsområdet bliver, som ved ISTD, overvåget ved monitering af temperatur og tryk i formationen, samt detaljeret prøvetagning og analyser af ekstraherede væsker og gasser.

A-4 Radio Frequency Heating - RFH

A-4.1 Anvendelsesområde

Radio frekvens opvarmning –RFH kan anvendes ved oprensning af flygtige forureninger som chlorerede opløsningsmidler eller oliestoffer. Teknikken egner sig til mindre hotspots og er blevet anvendt i forholdsvis lavpermeable aflejringer herunder kalk eller grundfjeld samt under bygninger.

A-4.2 Oprensningsprincip

Elektromagnetisk energi (dielektriske opvarmning med radio- eller mikrobølge) i radiofrekvensbåndet benyttes til opvarmning af de flygtige forureningskomponenter og porevand til mellem 40 og 100°C. De flygtige komponenter mobiliseres og opsamles i gasform ved hjælp af SVE-ekstraktionsboringer.

A-4.3 Fordele og ulemper

Fordelen med metoden er at opvarmning ikke er afhængig af en permeabel geologi (SEE) og kan derfor anvendes i forskellige geologier.

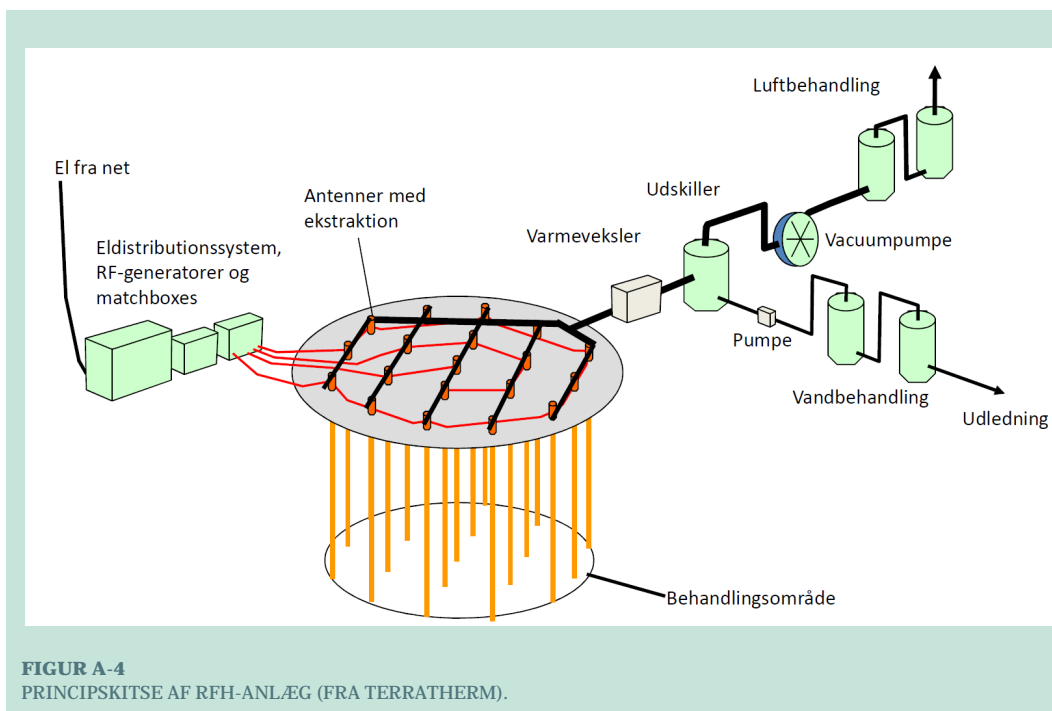
Ulemper er at teknikken stiller store krav til optimering af design og at energieffektiviteten er forholdsvis lav, som gør det uegnet i større skala.

A-4.4 Anlægsopbygning

De vigtigste anlægskomponenter under en oprensning ved RFH er vist i figur A-4.

De vigtigste anlægselementer er:

- El distributionssystem
 - Transformere som leverer strøm til RF generator
 - Kontakter, målere og kontrolenheder
 - Kabler til radiobølgeelektroderne
- Overjordiske elementer
 - Faradaybur (afskærmning af radiobølge)
 - Manifold
 - Transportledninger for ekstraherede gasser og væsker
- In situ elementer
 - Ekstraktionsboringer for gasser og væsker
 - Temperaturmoniteringsboringer
- Behandlingsystem for ekstraherede gasser og væsker
 - Varmevexler (rustfri stål)
 - Køleanlæg
 - Udskiller (rustfri stål)
 - Beholder til friprodukt
 - Vakuumpumpe (carbon stål)
 - Aktivt kulanlæg (behandling af gasfasen)



Typisk bruges endvidere en kontorcontainer til overvågning og dataopsamling i oprensningsperioden. Dataopsamlingen kan efter behov automatiseres.

BILAG B ISTD - Materiale- og energiforbrug

Indhold

B-1 Baseline site - 180 m²	65
B-1.1 Transport.....	65
B-1.2 Materials.....	66
B-1.3 Machines	66
B-1.4 Utilities	66
B-1.5 Volume and heat capacity.....	67
B-1.6 Energy balance	67
B-1.7 Number of wells	68
B-1.8 Process equipment.....	68
B-2 Baseline site – 1.300 m²	69
B-2.1 Transport.....	69
B-2.2 Materials.....	69
B-2.3 Machines	70
B-2.4 Utilities	70
B-2.5 Volume and heat capacity.....	71
B-2.6 Energy balance	71
B-2.7 Number of wells	72
B-2.8 Process equipment.....	72
B-3 Diskontinuert opvarmning – 1.300 m²	73
B-3.1 Baseline scenarie – 1.300 m ²	73
B-3.2 Sammenfatning	74
B-3.3 Transport.....	74
B-3.4 Machines	74
B-3.5 Utilities	75
B-3.6 Volume and heat capacity.....	75
B-3.7 Energy balance	76
B-3.8 Number of wells	77
B-3.9 Process equipment.....	78

B-1 Baseline site - 180 m²

B-1.1 Transport

TRANSPORTATION	UNIT	NUMBER
TRAVEL BY CAR	km	13.035
TRAVEL BY AIR	km	0
SHIPPING BY TRUCK, VAN/SMALL TRUCK (DAY TO DAY DELIVERIES)	km	11.187
SHIPPING BY TRUCK, BULK TRANSPORT (LARGE TRUCK, EQUIPMENT AND MATERIAL DELIVERIES)	km	880
SHIPPING BY AIR	km	0
SHIPPING BY SHIP	km	4.500

B-1.2 Materials

MATERIALS USAGE	UNIT	WELLFIELD	ABOVE GRADE
SAND	kg	3.872	
HIGH TEMP GROUT	kg	1.956	
VAPOR CAP CONCRETE	kg	63.529	
VAPOR GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg	2.646	
LIQUID GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg	405	
CARBON STEEL	kg	6.637	3.893
CARBON STEEL, SHEET PILE	kg	52.128	
STAINLESS STEEL	kg	1.264	422
NICKEL	kg	22	
COBBER	kg	312	
FIBERGLASS	kg	45	
PE	kg	0	782
TEFLON	kg	0	

B-1.3 Machines

MACHINE USAGE	UNIT	NUMBER
MINI-RIG, GEO PROBE	hr	0
DRILL JUMBO, UNIMOG	hr	181
BOB CAT/MINI-EXCAVATOR	hr	45
UTILITY GENERATOR	hr	564
EXCAVATOR	hr	0
GRADER	hr	0
FORK LIFT	hr	206
COMPRESSOR	hr	1.010
WELDER	hr	7
CRANE	hr	28
RIG, DIRECTIONAL DRILLING	hr	0

B-1.4 Utilities

UTILITY USAGE	UNIT	NUMBER
STEAM USAGE, TOTAL	kg	0
POWER USAGE, TOTAL	kWh	766.000
- HEROF USED BY TREATMENT SYSTEM	kWh	126.000
- HEREOF INJECTED INTO THE SUBSURFACE	kWh	640.000
NATURAL GAS USAGE, TOTAL	MM Btu	0
GASOLINE USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	846
DIESEL USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	3.773
DISCHARGE WATER, TOTAL	m ³	400
DISCHARGE VAPOR, TOTAL	m ³	553.000

B-1.5 Volume and heat capacity

VOLUME AND HEAT CAPACITY	UNIT	NUMBER
TREATMENT AREA	m ²	180
UPPER DEPTH OF TREATMENT	m	0
LOWER DEPTH OF TREATMENT	m	7
VOLUME, TTZ	m ³	1.175
SOLIDS VOLUME	m ³	705
POROSITY	[-]	0
POROSITY VOLUME	m ³	470
INITIAL SATURATION	[-]	65
SOIL WEIGHT	kg soil	1.867.851
WATER WEIGHT	kg water	305.858
SOIL HEAT CAPACITY	MJ/C	1.955
WATER HEAT CAPACITY	MJ/C	1.281
TOTAL HEAT CAPACITY, WHOLE TTZ	MJ/C	3.236

B-1.6 Energy balance

ENERGY BALANCE	UNIT	NUMBER
STEAM INJECTION RATE	kg/hr	0,0
TCH POWER INPUT RATE	kW	349,0
ET-DS TM POWER INPUT RATE	kW	0,0
ET-DSP TM WATER INJECTION RATE	m ³ /hr	0,0
WATER EXTRACTION RATE DURING HEATUP	m ³ /hr	0,0
AVERAGE EXTRACTED WATER TEMPERATURE	C	73,8
PERCENT OF INJECTED STEAM EXTRACTED AS STEAM	%	32,0
STEAM EXTRACTED, AVERAGE	kW	115,0
ENERGY FLUX INTO TREATMENT VOLUME	kW	348,8
ENERGY FLUX IN EXTRACTED GROUNDWATER	kW	0,2
ENERGY FLUX IN EXTRACTED STEAM	kW	111,6
NET ENERGY FLUX INTO TREATMENT VOLUME	kW	237,0
HEATING PER DAY	C/day	6,3
START TEMPERATURE	C	10
TARGET TEMPERATURE	C	105
ESTIMATED HEAT LOSS, WORST CASE	%	100
OPERATING TIME		
SHAKE-DOWN	days	7

ENERGY BALANCE	UNIT	NUMBER
DEWATERING	days	4
HEATING TO BOILING POINT	days	28
BOILING AND DRYING	days	30
HEATING TO TARGET TEMPERATURE	days	1
SAMPLING/ANALYSIS PHASE	days	14
POST TREATMENT VAPOR EXTRACTION	days	13
TOTAL OPERATING TIME	days	97

B-1.7 Number of wells

NUMBERS OF WELLS	UNIT	NUMBER
HO BORINGS, HIGH TEMPERATURE APPLICATION	[-]	0
HV WELLS, HIGH TEMPERATURE APPLICATION	[-]	0
HEATER BORINGS, REGULAR APPLICATION	[-]	53
VERTICAL SVE WELL, REGULAR APPLICATION	[-]	21
MULTIPHASE EXTRACTION WELL, SLURPING	[-]	0
MULTIPHASE EXTRACTION WELL, PUMPING	[-]	3
GROUNDWATER CONTROL WELLS	[-]	0
HORIZONTAL SVE WELLS	[-]	0
STEAM INJECTION WELLS	[-]	0
STEAM EXTRACTION WELLS	[-]	0
ELECTRODE LOCATIONS, ET-DSP™	[-]	0
TEMPERATURE MONITORING HOLES	[-]	20
PRESSURE MONITORING WELLS AND AIR INLET WELLS	[-]	24

B-1.8 Process equipment

PROCESS EQUIPMENT	UNIT	NUMBER
ISTD POWER SUPPLY	kW	350
ET-DSP™ POWER SUPPLY	kW	0
TREATMENT SYSTEM POWER SUPPLY	kW	60
TOTAL POWER NEED TO SITE	kW	510
ESTIMATED TRANSFORMER SIZE, 480 V	kVA	600
WATER SOFTENER FEED RATE	m ³ /hr	0
STEAM GENERATOR CAPACITY	kg/hr	0
VAPOR EXTRACTION RATE, TOTAL	m ³ /hr	476

PROCESS EQUIPMENT	UNIT	NUMBER
NON-CONDENSABLE VAPOR	m ³ /hr	238
ESTIMATED STEAM EXTRACTION	m ³ /hr	238
LIQUID EXTRACTION RATE	m ³ /hr	0
CONDENSED LIQUID RATE	m ³ /hr	0
WATER TREATMENT RATE	m ³ /hr	0
VAPOR TREATMENT TYPE		GAC
DOMINANT CONTAMINANT OF CONCERN		PCE
ESTIMATED COC MASS	kg	405
ESTIMATED COC MASS TREATED BY VAPOR SYSTEM	kg	397
ESTIMATED MASS GENERATED AS NAPL	kg	8
ESTIMATED MAXIMUM MASS REMOVAL RATE	kg/day	9

B-2 Baseline site – 1.300 m²

B-2.1 Transport

TRANSPORTATION	UNIT	NUMBER
TRAVEL BY CAR	km	19.918
TRAVEL BY AIR	km	0
SHIPPING BY TRUCK, VAN/SMALL TRUCK (DAY TO DAY DELIVERIES)	km	16.008
SHIPPING BY TRUCK, BULK TRANSPORT (LARGE TRUCK, EQUIPMENT AND MATERIAL DELIVERIES)	km	1.421
SHIPPING BY AIR	km	0
SHIPPING BY SHIP	km	4.500

B-2.2 Materials

MATERIALS USAGE	UNIT	WELLFIELD	ABOVE GRADE
SAND	kg	27.866	
HIGH TEMP GROUT	kg	2.731	
VAPOR CAP CONCRETE	kg	413.337	
VAPOR GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg	15.984	
LIQUID GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg	120	
CARBON STEEL	kg	22.707	5.593
CARBON STEEL, SHEET PILE	kg	0	

MATERIALS USAGE	UNIT	WELLFIELD	ABOVE GRADE
STAINLESS STEEL	kg	3.456	656
NICKEL	kg	60	
COBBER	kg	866	
FIBERGLASS	kg	127	
PE	kg	0	782
TEFLON	kg	0	

B-2.3 Machines

MACHINE USAGE	UNIT	NUMBER
MINI-RIG, GEO PROBE	hr	0
DRILL JUMBO, UNIMOG	hr	272
BOB CAT/MINI-EXCAVATOR	hr	58
UTILITY GENERATOR	hr	684
EXCAVATOR	hr	0
GRADER	hr	0
FORK LIFT	hr	238
COMPRESSOR	hr	99
WELDER	hr	19
CRANE	hr	52
RIG, DIRECTIONAL DRILLING	hr	0

B-2.4 Utilities

UTILITY USAGE	UNIT	NUMBER
STEAM USAGE, TOTAL	kg	0
POWER USAGE, TOTAL	kWh	3.982.000
- HEROF USED BY TREATMENT SYSTEM	kWh	185.000
- HEREOF INJECTED INTO THE SUBSURFACE	kWh	3.797.000
NATURAL GAS USAGE, TOTAL	MM Btu	0
GASOLINE USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	1.027
DIESEL USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	5.160
DISCHARGE WATER, TOTAL	m ³	1.500
DISCHARGE VAPOR, TOTAL	m ³	4.006.000

B-2.5 Volume and heat capacity

VOLUME AND HEAT CAPACITY	UNIT	NUMBER
TREATMENT AREA	m ²	1288
UPPER DEPTH OF TREATMENT	m	0
LOWER DEPTH OF TREATMENT	m	9
VOLUME, TTZ	m ³	11509
SOLIDS VOLUME	m ³	7591
POROSITY	[-]	0,34
POROSITY VOLUME	m ³	3911
INITIAL SATURATION	%	90
SOIL WEIGHT	kg soil	20.110.634
WATER WEIGHT	kg water	3.523.378
SOIL HEAT CAPACITY	MJ/C	21.050
WATER HEAT CAPACITY	MJ/C	14.752
TOTAL HEAT CAPACITY, WHOLE TTZ	MJ/C	35.802

B-2.6 Energy balance

ENERGY BALANCE	UNIT	NUMBER
STEAM INJECTION RATE	kg/hr	0,0
TCH POWER INPUT RATE	kW	925,1
ET-DSP™ POWER INPUT RATE	kW	0,0
ET-DSP™ WATER INJECTION RATE	m ³ /hr	0,0
WATER EXTRACTION RATE DURING HEATUP	m ³ /hr	0,0
AVERAGE EXTRACTED WATER TEMPERATURE	C	73,8
PERCENT OF INJECTED STEAM EXTRACTED AS STEAM	%	41,0
STEAM EXTRACTED, AVERAGE	kW	195,4
ENERGY FLUX INTO TREATMENT VOLUME	kW	924,7
ENERGY FLUX IN EXTRACTED GROUNDWATER	kW	0,6
ENERGY FLUX IN EXTRACTED STEAM	kW	189,7
NET ENERGY FLUX INTO TREATMENT VOLUME	kW	734,3
HEATING PER DAY	C/day	3,6
START TEMPERATURE	°C	20,0
TARGET TEMPERATURE	°C	105,0
ESTIMATED HEAT LOSS, WORST CASE	%	68,0
OPERATING TIME		

ENERGY BALANCE	UNIT	NUMBER
SHAKE-DOWN	days	0
DEWATERING	days	0
HEATING TO BOILING POINT	days	88
BOILING AND DRYING	days	73
HEATING TO TARGET TEMPERATURE	days	2
SAMPLING/ANALYSIS PHASE	days	12
POST TREATMENT VAPOR EXTRACTION	days	33
TOTAL OPERATING TIME	days	209

B-2.7 Number of wells

NUMBERS OF WELLS	UNIT	NUMBER
HO BORINGS, HIGH TEMPERATURE APPLICATION	[-]	0
HV WELLS, HIGH TEMPERATURE APPLICATION	[-]	0
HEATER BORINGS, REGULAR APPLICATION	[-]	147
VERTICAL SVE WELL, REGULAR APPLICATION	[-]	14
MULTIPHASE EXTRACTION WELL, SLURPING	[-]	0
MULTIPHASE EXTRACTION WELL, PUMPING	[-]	0
GROUNDWATER CONTROL WELLS	[-]	0
HORIZONTAL SVE WELLS	[-]	2
STEAM INJECTION WELLS	[-]	0
STEAM EXTRACTION WELLS	[-]	0
ELECTRODE LOCATIONS, ET-DSP™	[-]	0
TEMPERATURE MONITORING HOLES	[-]	30
PRESSURE MONITORING WELLS AND AIR INLET WELLS	[-]	10

B-2.8 Process equipment

PROCESS EQUIPMENT	UNIT	NUMBER
ISTD POWER SUPPLY	kW	930
ET-DSP™ POWER SUPPLY	kW	0
TREATMENT SYSTEM POWER SUPPLY	kW	40
TOTAL POWER NEED TO SITE	kW	1.210
ESTIMATED TRANSFORMER SIZE, 480 V	kVA	1.500
WATER SOFTENER FEED RATE	m ³ /hr	0

PROCESS EQUIPMENT	UNIT	NUMBER
STEAM GENERATOR CAPACITY	kg/hr	0
VAPOR EXTRACTION RATE, TOTAL	m ³ /hr	1.223
NON-CONDENSABLE VAPOR	m ³ /hr	816
ESTIMATED STEAM EXTRACTION	m ³ /hr	408
LIQUID EXTRACTION RATE	m ³ /hr	0,01
CONDENSED LIQUID RATE	m ³ /hr	0,30
WATER TREATMENT RATE	m ³ /hr	0,31
VAPOR TREATMENT TYPE		GAC
DOMINANT CONTAMINANT OF CONCERN		PCE
ESTIMATED COC MASS	kg	2.400
ESTIMATED COC MASS TREATED BY VAPOR SYSTEM	kg	2.398
ESTIMATED MASS GENERATED AS NAPL	kg	0
ESTIMATED MAXIMUM MASS REMOVAL RATE	kg/day	27

B-3 Diskontinuert opvarmning – 1.300 m²

Der er udført en vurdering af konsekvenser for driftsperioden og energi forbrug ved pulvis opvarmning om natten med henblik på at udnytte en større grad af vindenergi end ved anvendelse i perioder med spidsbelastning og øgede behov for kapacitetsforøgelse på kulkraftværker. Der er udført følgende tre scenarier:

Baseline scenarie	Konstant varmetilførelse
Sommer scenarie	6 timer 4 gange ugentligt på 20% af max. Fuld kraft resten af tiden.
Vinter scenarie	2 timer 5 gange ugentligt på 20% max. Fuld kraft resten af tiden.

B-3.1 Baseline scenarie – 1.300 m²

GENNEMSNITLIG HEATER EFFEKT	925	kW
LÆNGDE AF HEATERE	1526	m
GENNEMSNITLIG INDFYRET EFFEKT	606	W/m
GENNEMSNITLIG INDFYRET EFFEKT	185	W/ft

B-3.2 Sammenfatning

		BASELINE SCENARIO	SOMMER- SCENARIO	VINTER- SCENARIO
		FULD OPVARMNING	6 TIMER LAV BLUS 4 DAGE OM UGEN	12 TIMER LAV BLUS 5 DAGE OM UGEN
MAX STRØMINPUT	W/ft	184	200	232
MIN STRØMINPUT	W/ft	184	40	46,4
UGENTLIG TIMEANTAL PÅ MAX	timer	168	144	108
UGENTLIG TIMEANTAL PÅ MIN	timer	-	24	60
GENNEMSITLIG INPUT	W/ft	184	177	166
PROCENT TID MED LAVT INPUT	%	0%	14%	36%
PROCENT LAVERE INPUT I GENNEMSIT	%	0%	4%	10%
TOTAL DRIFTSTID	dage	209	215	227
TOTAL STRØMFORBRUG	kWh	3.982.000	4.019.156	4.091.634
STIGNING DRIFTSTID IFT. BASELINE	%	0%	2,9%	8,5%
STIGNING ELFORBRUG IFT. BASELINE	%	0%	0,9%	2,8%

B-3.3 Transport

TRANSPORT	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER- SCENARIO	VINTER- SCENARIO	
TRAVEL BY CAR	km	19.918	20.227	20.819	Stiger pga længere driftstid
TRAVEL BY AIR	km	0	0	0	
SHIPPING BY TRUCK, VAN/SMALL TRUCK (DAY TO DAY DELIVERIES)	km	16.008	16.164	16.466	Stiger pga længere driftstid
SHIPPING BY TRUCK, BULK TRANSPORT (LARGE TRUCK, EQUIPMENT AND MATERIAL DELIVERIES)	km	1.421	1.421	1.421	
SHIPPING BY AIR	km	0	0	0	
SHIPPING BY SHIP	km	4.500	4.500	4.500	

B-3.4 Machines

MACHINE USAGE	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER- SCENARIO	VINTER- SCENARIO
MINI-RIG, GEO PROBE	hr	0	0	0
DRILL JUMBO, UNIMOG	hr	272	272	272
BOB CAT/MINI-EXCAVATOR	hr	58	58	58
UTILITY GENERATOR	hr	684	683	682

MACHINE USAGE	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER-SCENARIO	VINTER-SCENARIO
EXCAVATOR	hr	0	0	0
GRADER	hr	0	0	0
FORK LIFT	hr	238	238	237
COMPRESSOR	hr	99	99	99
WELDER	hr	19	19	19
CRANE	hr	52	52	52
RIG, DIRECTIONAL DRILLING	hr	0	0	0

B-3.5 Utilities

UTILITY USAGE	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER-SCENARIO	VINTER-SCENARIO	
STEAM USAGE, TOTAL	kg	0	0	0	
POWER USAGE, TOTAL	kWh	3.982.000	4.019.156	4.091.634	Stiger pga. længere driftstid og derfor større varmetab
- HEREOF USED BY TREATMENT SYSTEM	kWh	185.000	190.000	201.000	Stiger pga. længere driftstid
- HEREOF INJECTED INTO THE SUBSURFACE	kWh	3.797.000	3.829.156	3.890.634	Stiger pga. længere driftstid og derfor større varmetab
NATURAL GAS USAGE, TOTAL	MM Btu	0	0	0	
GASOLINE USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	1.027	1.025	1.023	Falder pga. mindre installationstid
DIESEL USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	5.160	5.158	5.156	Falder pga. mindre installationstid
DISCHARGE WATER, TOTAL	m ³	1.500	1.500	1.500	
DISCHARGE VAPOR, TOTAL	m ³	4.006.000	4.121.000	4.343.000	Stiger pga. længere driftstid

B-3.6 Volume and heat capacity

VOLUME AND HEAT CAPACITY	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER-SCENARIO	VINTER-SCENARIO
TREATMENT AREA	m ²	1288	1288	1288
UPPER DEPTH OF TREATMENT	m	0	0	0
LOWER DEPTH OF TREATMENT	m	9	9	9
VOLUME, TTZ	m ³	11509	11509	11509
SOLIDS VOLUME	m ³	7591	7591	7591
POROSITY	[-]	0	0	0
POROSITY VOLUME	m ²	3911	3911	3911

VOLUME AND HEAT CAPACITY	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER-SCENARIO	VINTER-SCENARIO
INITIAL SATURATION	%	90	90	90
SOIL WEIGHT	kg soil	20110634	20110634	20110634
WATER WEIGHT	kg water	3523378	3523378	3523378
SOIL HEAT CAPACITY	MJ/C	21050	21050	21050
WATER HEAT CAPACITY	MJ/C	14752	14752	14752
TOTAL HEAT CAPACITY, WHOLE TTZ	MJ/C	35802	35802	35802

B-3.7 Energy balance

ENERGY BALANCE	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER-SCENARIO	VINTER-SCENARIO
STEAM INJECTION RATE	kg/hr	0,0	0,0	0,0
TCH POWER INPUT RATE	kW	925,1	889,9	829,6
ET-DSP™ POWER INPUT RATE	kW	0,0	0,0	0,0
ET-DSP™ WATER INJECTION RATE	m³/hr	0,0	0,0	0,0
WATER EXTRACTION RATE DURING HEATUP	m³/hr	0,0	0,0	0,0
AVERAGE EXTRACTED WATER TEMP.	C	73,8	73,8	73,8
PERCENT OF INJECTED STEAM EXTRACTED AS STEAM	%	41,0	41,0	41,0
STEAM EXTRACTED, AVERAGE	kW	195,4	188,0	175,2
ENERGY FLUX INTO TREATMENT VOLUME	kW	924,7	889,5	829,2
ENERGY FLUX IN EXTRACTED WATER	kW	0,6	0,6	0,6
ENERGY FLUX IN EXTRACTED STEAM	kW	189,7	182,5	170,1
NET ENERGY FLUX INTO TREATMENT VOLUME	kW	734,3	706,4	658,4
HEATING PER DAY	C/day	3,6	3,4	3,2
START TEMPERATURE	C	20,0	20,0	20,0
TARGET TEMPERATURE	C	210,0	210,0	210,0
ESTIMATED HEAT LOSS, WORST CASE	%	68,0	68,0	68,0
OPERATING TIME				
SHAKE-DOWN	days	0,0	0,0	0,0
DEWATERING	days	0,0	0,0	0,0

ENERGY BALANCE	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER-SCENARIO	VINTER-SCENARIO
HEATING TO BOILING POINT	days	88,1	91,6	98,3
BOILING AND DRYING	days	73,5	76,0	80,8
HEATING TO TARGET TEMPERATURE	days	2,3	2,4	2,5
SAMPLING/ANALYSIS PHASE	days	12,0	12,0	12,0
POST TREATMENT VAPOR EXTRACTION	days	33,0	33,0	33,0
TOTAL OPERATING TIME	days	208,9	214,9	226,6

Stigende pga. lavere effekt.

B-3.8 Number of wells

NUMBERS OF WELLS	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER-SCENARIO	VINTER-SCENARIO
HO BORINGS, HIGH TEMPERATURE APPLICATION	[-]	0	0	0
HV WELLS, HIGH TEMPERATURE APPLICATION	[-]	0	0	0
HEATER BORINGS, REGULAR APPLICATION	[-]	147	147	147
VERTICAL SVE WELL, REGULAR APPLICATION	[-]	14	14	14
MULTIPHASE EXTRACTION WELL, SLURPING	[-]	0	0	0
MULTIPHASE EXTRACTION WELL, PUMPING	[-]	0	0	0
GROUNDWATER CONTROL WELLS	[-]	0	0	0
HORIZONTAL SVE WELLS	[-]	2	2	2
STEAM INJECTION WELLS	[-]	0	0	0
STEAM EXTRACTION WELLS	[-]	0	0	0
ELECTRODE LOCATIONS, ET-DSP™	[-]	0	0	0
TEMPERATURE MONITORING HOLES	[-]	30	30	30
PRESSURE MONITORING WELLS AND AIR INLET WELLS	[-]	10	10	10

B-3.9 Process equipment

PROCESS EQUIPMENT	UNIT	BASELINE SCENARIO	SOMMER-SCENARIO	VINTER-SCENARIO	
ISTD POWER SUPPLY	kW	930	890	830	Faldende pga af lavere effekt
ET-DSP™ POWER SUPPLY	kW	0	0	0	
TREATMENT SYSTEM POWER SUPPLY	kW	40	40	40	
TOTAL POWER NEEDED TO SITE	kW	1.210	1.160	1.090	Faldende pga af lavere effekt
ESTIMATED TRANSFORMER, 480 V	kVA	1.500	1.500	1.400	Faldende pga af lavere effekt
WATER SOFTENER FEED RATE	m ³ /hr	0	0	0	
STEAM GENERATOR CAPACITY	kg/hr	0	0	0	
VAPOR EXTRACTION RATE, TOTAL	m ³ /hr	1.223	1.206	1.172	Faldende pga af lavere effekt
NON-CONDENSABLE VAPOR	m ³ /hr	816	816	816	
ESTIMATED STEAM EXTRACTION	m ³ /hr	408	391	357	Faldende pga af lavere effekt
LIQUID EXTRACTION RATE	m ³ /hr	0	0	0	
CONDENSED LIQUID RATE	m ³ /hr	0	0	0	
WATER TREATMENT RATE	m ³ /hr	0	0	0	
VAPOR TREATMENT TYPE		GAC	GAC	GAC	
DOMINANT CONTAMINANT		PCE	PCE	PCE	
ESTIMATED COC MASS	kg	2.400	2.400	2.400	
ESTIMATED COC MASS TREATED BY VAPOR SYSTEM	kg	2.398	2.398	2.398	
ESTIMATED MASS GENERATED AS NAPL	kg	0	0	0	
ESTIMATED MAXIMUM MASS REMOVAL RATE	kg/day	27,2	25,4	22,7	

BILAG C Life cycle assessment and environmental optimization of In Situ Thermal Desorption - ISTD

Gitte Lemming, DTU

TABLE OF CONTENTS

C-1 Introduction.....	79
C-2 Life cycle inventory	79
C-3 Life cycle impact assessment methods	80
C-4 Results of the ISTD baseline scenario	80
C-4.1. On-site electricity use	83
C-4.2. Above grade materials	83
C-4.3. Well field materials	84
C-4.4. Transportation	85
C-4.5. Sheet pile wall	86
C-4.6. Toxic versus non-toxic impacts	86
C-5 Environmental optimization of ISTD	86
C-5.1. Heating outside peak demand periods (discontinued heating)	87
C-5.2. Use of certified hydropower	89
C-5.3. Alternative vapor cap constructions.....	90
C-5.4. Biobased activated carbon.....	92
C-5.5. Substitution of materials used in heaters and liners of the well field.....	93
C-6 Conclusions and recommendations	95
C-7 References	97
C-8 Appendices.....	99
C-8.1. Referenced literature:	107

C-1 Introduction

This note presents the results of the conducted life cycle assessments (LCAs) of remediation with In Situ Thermal Desorption (ISTD) at two case sites. Initially the results of the baseline scenario are presented for each case. The baseline scenario represents the currently used practice for ISTD in relation to material use and heating strategy. Based on this, the main contributing parts of the remediation system contributing to environmental impacts and resource depletion are identified. Next, alternative materials and heating strategies are suggested in order to reduce the environmental impacts associated with the remediation method and these possible changes are tested using LCA.

C-2 Life cycle inventory

A thorough data collection phase was completed in order to make an inventory of all materials and energy used for the remediation projects. The inventory was made for a smaller site (180 m²) and a larger site (1,300 m²) represented by the Skuldelev site and the Reerslev site respectively - both

located in Denmark. However, although the inventories were based on two actual sites, where ISTD has been carried out, the inventories were made more general (e.g. in terms of transportation distances for equipment and personnel) to make them more comparable. An exception for this generalization is that the sheet pile wall used at Skuldelev was included in the inventory even though the use of such a wall is only rarely necessary. It was, however, included in order to study how the use of a sheet pile wall would impact the environmental profile of a thermal remediation project. The inventory of materials and energy use for ISTD at the two sites is seen in Appendix 1.

LCA “cradle-to-gate” data was mainly taken from the Ecoinvent database (Frischknecht et al. 2007) with a few additional data from the ELCD database (EC, 2009). An end-of-life phase was added to all materials based on the expected fate. An overview of the applied LCA data and adjustments made is seen in Appendix 2.

C-3 Life cycle impact assessment methods

The EDIP2003 methodology (Hauschild and Potting, 2005) was chosen as the impact assessment method for all non-toxic impacts (global warming, ozone formation, eutrophication, acidification) except respiratory impacts from particulate matter (respiratory inorganics), which was quantified using the method from Humbert et al. (2009). Toxic impacts (ecotoxicity, human toxicity cancer, human toxicity non-cancer) were estimated using the USEtox™ method (Rosenbaum et al. 2008). All environmental impacts are normalized to person equivalents (PE) by dividing with the annual impact from an average European¹ using 2004 normalization references (Laurent et al, 2011a; Laurent et al. 2011b). The EDIP97 methodology (Wenzel et al. 1997) was applied for depletion of resources (energy resources and scarce metals). All resource consumption results are converted to person reserves (PR), i.e. normalized to person equivalents and weighted by the reciprocal supply horizon for each resource. The applied normalization references and weighting factors for resource use are based on 2004 data (LCA Center, 2005).

C-4 Results of the ISTD baseline scenario

The LCA results for the baseline scenario of remediation with ISTD have been divided into a number of subcategories and are shown in Figure C-1 (environmental impacts) and Figure C-2 (resource depletion). The contents of the various subcategories (transportation, materials (well field), materials (above grade), machines, electricity use and sheet pile wall) are described in Table C-1.

¹ For global impacts (global warming) and resource consumption the normalization reference is based on an average world citizen. For all other impacts (local and regional) the normalization reference is based on an average European.

TABLE C-1
DESCRIPTION OF THE CONTENTS OF EACH SUBCATEGORY IN FIGURE C-1 AND C-2. A MORE DETAILED DESCRIPTION IS GIVEN IN APPENDIX 2.

Subcategory	Content
ON-SITE ELECTRICITY	INCLUDES ELECTRICITY USED FOR THE WELL FIELD (HEATING) AND FOR THE TREATMENT SYSTEM
MATERIALS (ABOVE GRADE)	INCLUDES MATERIALS AND EQUIPMENT USED ABOVE GROUND: VAPOR CAP, ACTIVATED CARBON, HEAT EXCHANGERS, COOLERS, TANKS, ETC., AND THE TRANSPORTATION FROM THE PRODUCER TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK
MATERIALS (WELL FIELD)	INCLUDES MATERIALS AND EQUIPMENT FOR THE WELL FIELD: SAND, GROUT, HEATER CANS, LINERS, HEATERS, EXTRACTION WELLS, MANIFOLDS, COPPER WIRES, ETC., AND THE TRANSPORTATION FROM THE PRODUCER TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK
MACHINES	INCLUDES FUEL USE AND EMISSIONS FROM MACHINES USED ON SITE: DRILL RIGS, GRADERS, COMPRESSORS, GENERATORS, FORKLIFTS, ETC.
TRANSPORTATION	TRANSPORTATION (90 KM RETURN TRIP) OF MATERIALS, EQUIPMENT AND PERSONNEL TO SITE. HEATERS WERE ASSUMED TO BE TRANSPORTED BY FREIGHT SHIP FROM THE US.
SHEET PILE WALL	INCLUDES THE STEEL, THE CONSTRUCTION AND UPTAKE OF THE WALL, AND THE TRANSPORTATION OF THE STEEL FROM THE PRODUCER TO THE LOCAL SUPPLIER AND FINALLY TO THE CONTAMINATED SITE.

The environmental impacts given in person equivalents (PE) per site remediated are shown in Figure C-1. On-site electricity use is the main driver of the non-toxic environmental impacts (i.e. global warming, ozone formation, acidification, eutrophication and respiratory impacts from inorganics) followed by the above grade materials. Electricity consumption alone contributes 74-89% of the non-toxic impacts at the large site and 66-84% at the small site. The above grade materials contribute 6-22% of the environmental impacts.

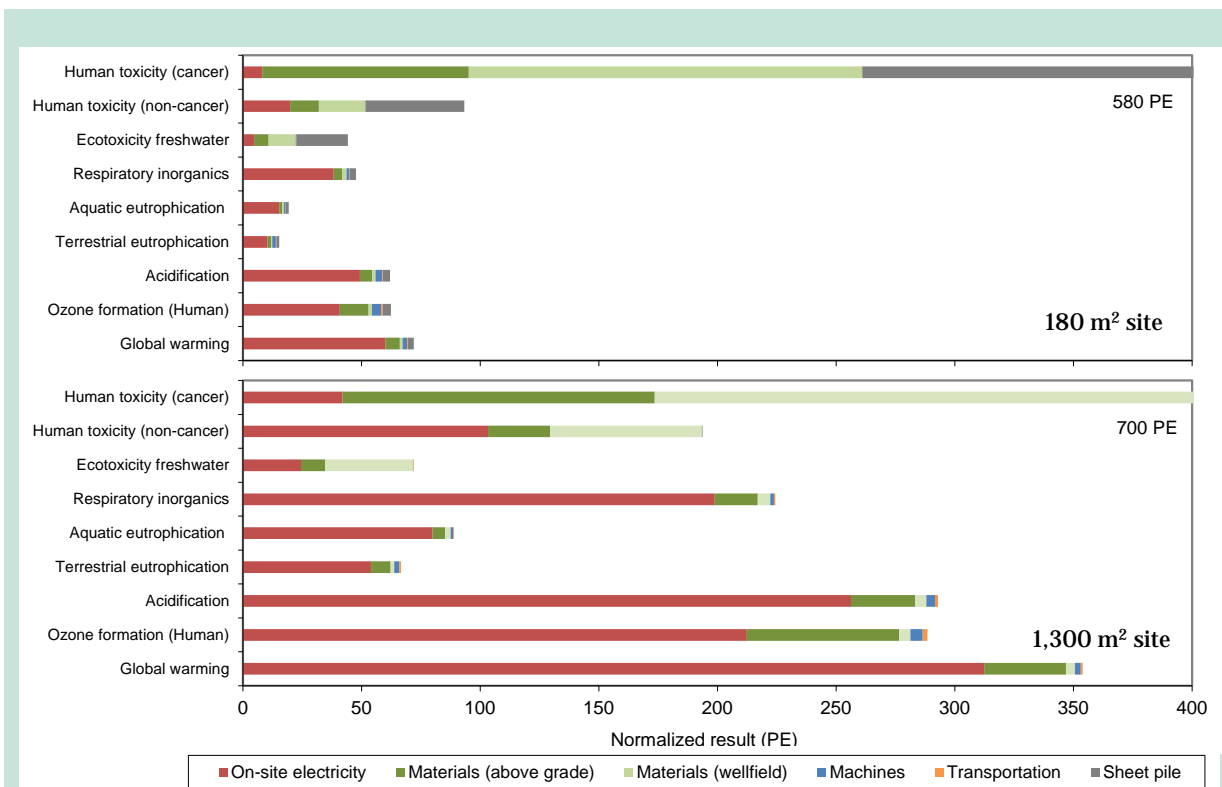


FIGURE C-1
ENVIRONMENTAL IMPACTS ASSOCIATED WITH ISTD REMEDIATION AT A SMALLER (180 M²) AND A LARGER SITE (1,300 M²).

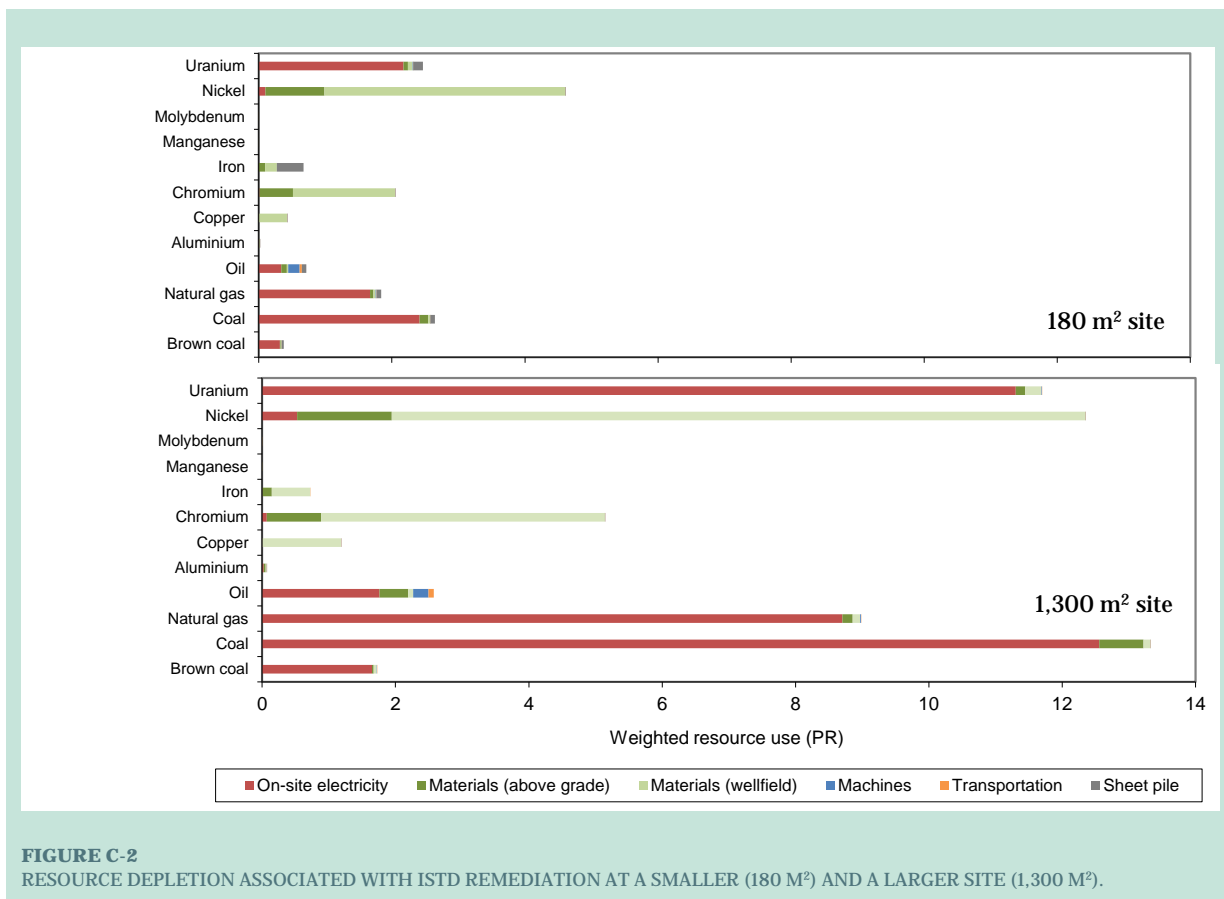


FIGURE C-2
RESOURCE DEPLETION ASSOCIATED WITH ISTD REMEDIATION AT A SMALLER (180 M²) AND A LARGER SITE (1,300 M²).

The well field material and the above grade material are the largest contributors to the toxic impact categories, i.e. human toxicity (cancer and non-cancer impacts) and ecotoxicity. As mentioned above, it was necessary to install a sheet pile wall at the small site due to a high degree of water intrusion. The life cycle results for this site show that the sheet pile wall contributes 45-55% of the toxic impacts and 3-7% of non-toxic impacts. Thus using a sheet pile wall adds significant impact to the remediation impacts even though it is assumed that the sheet piles can be reused on two more remediation projects.

Regarding the resource depletion shown in Figure C-2, on-site electricity use is the main source to depletion of energy resources (oil, coal, brown coal, natural gas, uranium), whereas the well field materials, and the above grade materials are the main source to depletion of metals especially nickel, chromium and copper. The sheet pile wall especially contributes to the depletion of iron, but also to the use of energy resources.

As seen in Figure C-1 and C-2, transportation and the use of heavy machinery contribute relatively little to the environmental impacts and resource depletion. The fuel use for the machinery, however, contributes significantly to the depletion of oil.

In Figure C-3, the results are given as environmental impacts in PE per m³ of soil treated at the two sites. The treated soil volume at the large site (11,500 m³) is almost 10 times larger than at the small site (1200 m³). In order to make a more general comparison of the impacts for a smaller and a larger site respectively the impacts related to the sheet pile wall was disregarded in Figure C-3.

The comparison in Figure C-3 show that ISTD becomes more environmentally efficient for a larger site, since the environmental impacts per unit volume of treated soil are halved compared to the

smaller site. This is especially due to a larger heat loss for the small site compared to the large site, but also due to a larger relative amount of installations as heater wells are placed more closely at the small site. Likewise, the resource depletion for the large site per unit volume of treated soil is also halved compared to the small site (results not shown).

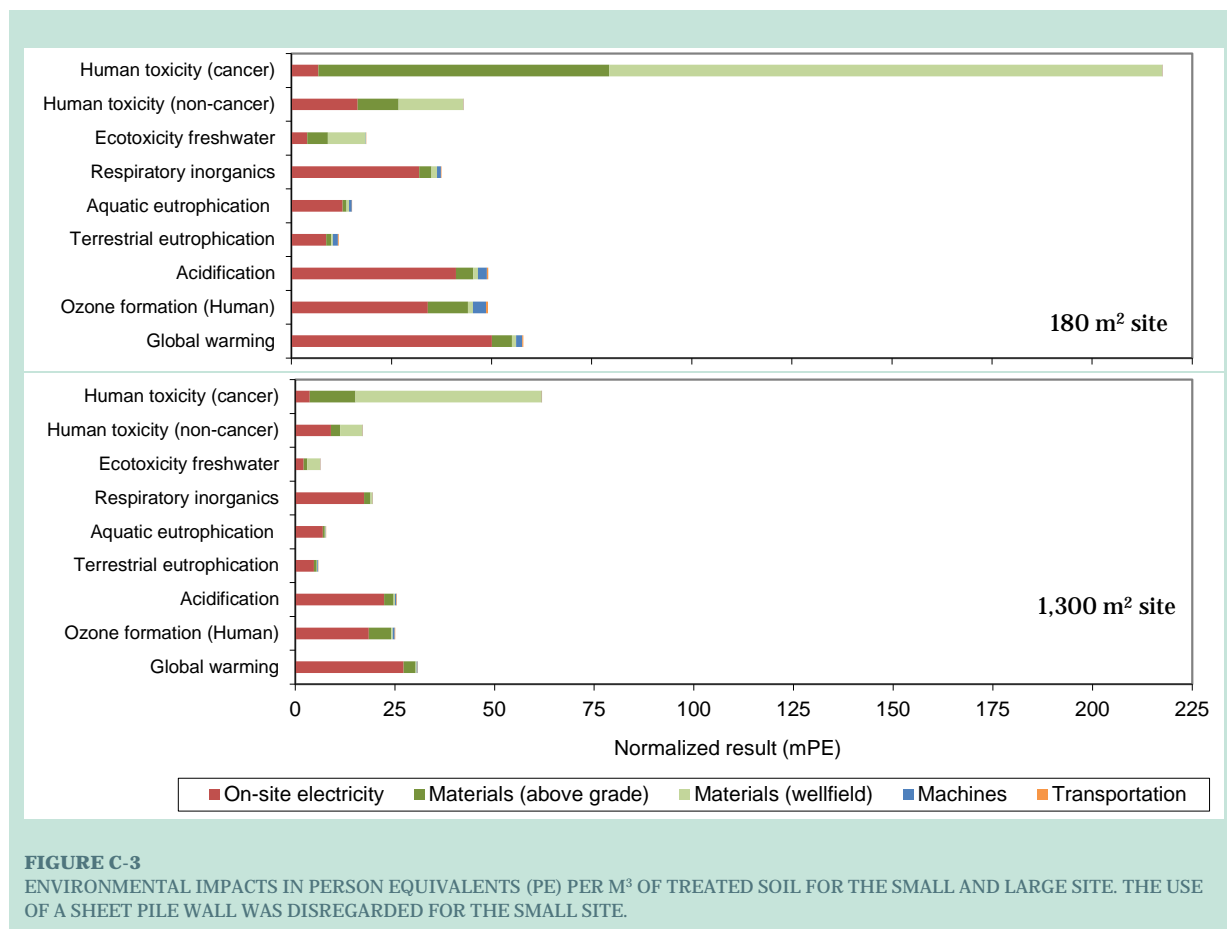


FIGURE C-3
ENVIRONMENTAL IMPACTS IN PERSON EQUIVALENTS (PE) PER M³ OF TREATED SOIL FOR THE SMALL AND LARGE SITE. THE USE OF A SHEET PILE WALL WAS DISREGARDED FOR THE SMALL SITE.

C-4.1. On-site electricity use

The results in Figure C-1 and C-2 clearly showed that on-site electricity consumption is the main cause of non-toxic environmental impacts and depletion of energy resources. The main part of the on-site electricity use is associated with the heating system (95% for the large site and 80% for the small site) and the remaining part is used for the on-site treatment systems. This analysis assumes an average Danish electricity generation mix including imports based on the Ecoinvent database.

C-4.2. Above grade materials

Materials used above grade are the second largest contributor to non-toxic impacts. Figure C-4 shows a more detailed result of the impacts associated with the above grade materials for both the small and the large site. The figure shows that the main contributors to the non-toxic impacts are activated carbon used for vapor treatment and foam concrete used for the vapor cap. Activated carbon production causes high levels of especially ozone formation, acidification, whereas foam concrete production has a high impact on global warming, eutrophication and acidification.

Although steel and stainless steel is only used in small amounts for the above grade installations, the steels become the main source of toxic impacts for this subcategory due to the high toxic impacts associated with the production of steel.

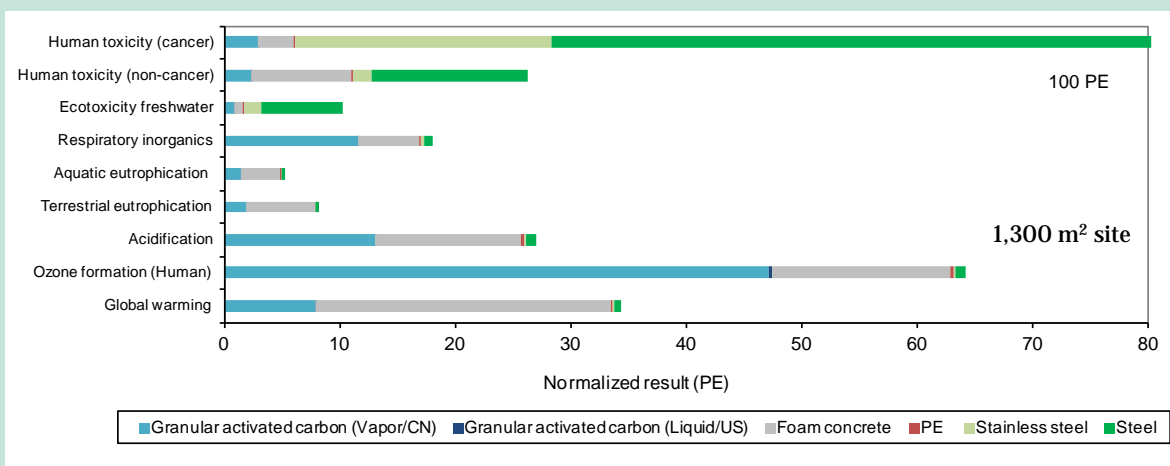
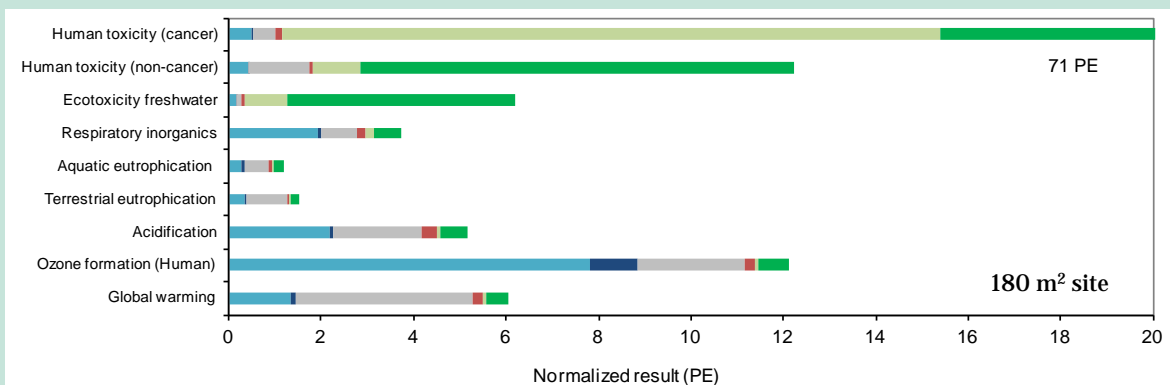


FIGURE C-4
 DETAILED RESULT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS RELATED TO THE MATERIALS USED ABOVE GRADE FOR THE TWO SITES.
 NOTE THE DIFFERENT SCALES ON THE TWO FIGURES.

C-4.3. Well field materials

The well field materials are the third most contributing subcategory to non-toxic impacts, however the contribution to the total impacts is relatively low. In contrast, the well field materials are the primary contributor to ecotoxic and human toxic impacts. In Figure C-5, a detailed result of the impacts associated with the well field is shown for the larger site. It shows that the toxic impacts are associated with the use of stainless steels and steel. This is due to toxic releases to the environment during the mining, processing and manufacturing of steel products. Furthermore, the well field is the main cause of nickel and chromium depletion due to the large amounts of these alloying metals used in the stainless steel installations (heaters, well liners). The well field materials are also the main cause of copper depletion due to the use of large amounts of copper wires used.

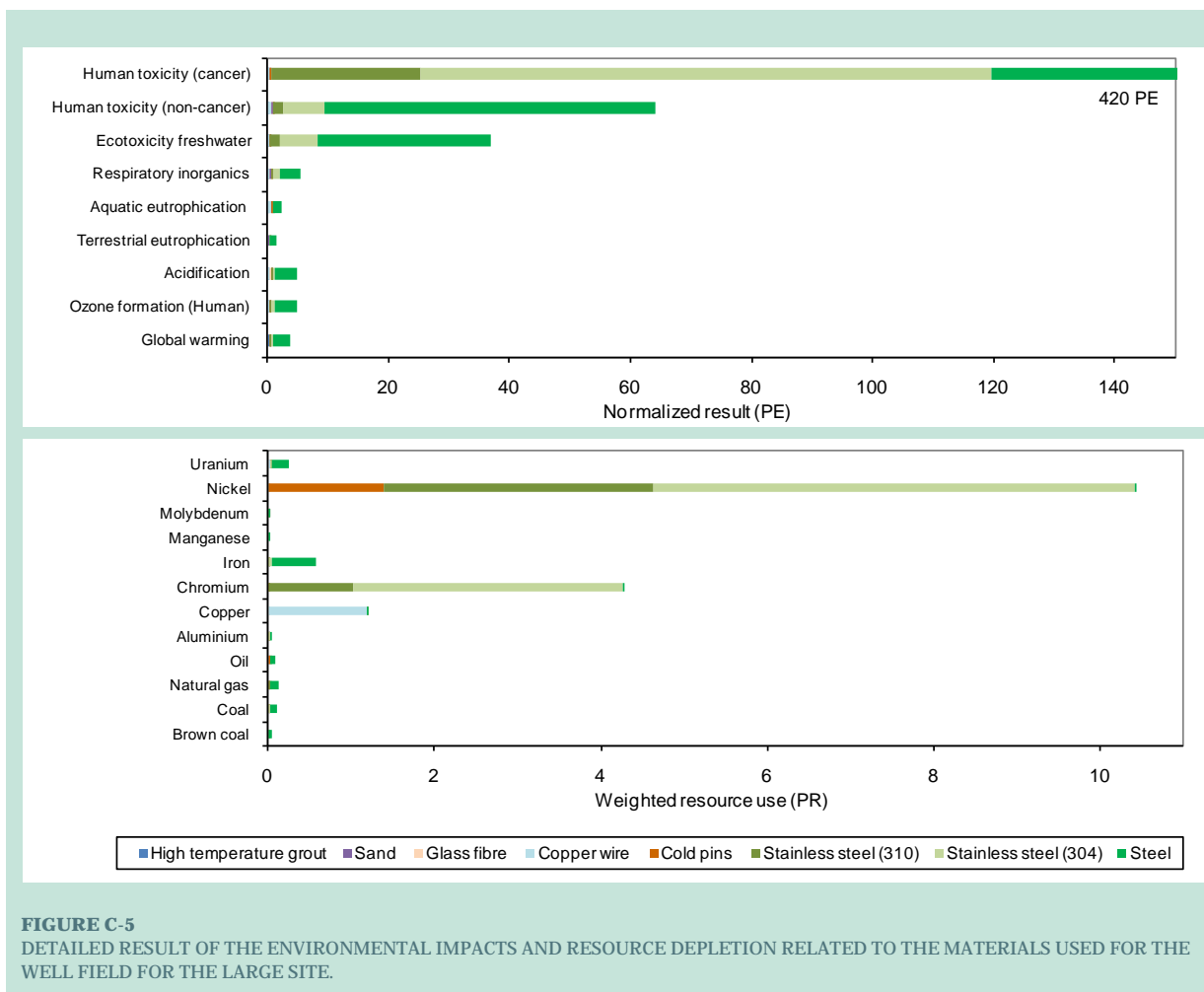


FIGURE C-5
 DETAILED RESULT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS AND RESOURCE DEPLETION RELATED TO THE MATERIALS USED FOR THE WELL FIELD FOR THE LARGE SITE.

C-4.4. Transportation

As seen in Figure C-1, the impacts associated with transportation of materials, equipment and personnel to and from the site are generally relatively low with the chosen distance (90 km return trip). Transportation contributes especially to the impact categories ozone formation, acidification and oil depletion. Figure C-6 shows the detailed result for transportation at the large site. It shows that the transportation of the above grade materials constitutes the relatively larger parts of the transportation impacts followed by the transportation of personnel to and from the site. The high impact associated with the aboveground materials is due to the fact that the total weight of these materials is much higher than for the well field materials. It should be noted that the “Transportation” subcategory only includes the local transportation from a local supplier/-contractor/consultant to the site. It does not include the transportation from the producer to the local supplier. Steel, plastics, activated carbon, etc. are produced outside Denmark and the transportation of these goods from the producer to the local supplier in Denmark is included in the inventory for each specific material and is therefore included in the material categories. The applied transportation distances can be seen in Appendix 2. As an example, steel and stainless steel is assumed to be transported 700 km from the producer to the local supplier in Denmark. The transportation to Denmark is responsible for 2 to 20% of the total impacts depending on which impact is studied. The highest contributions are seen in the impacts eutrophication and ozone formation.

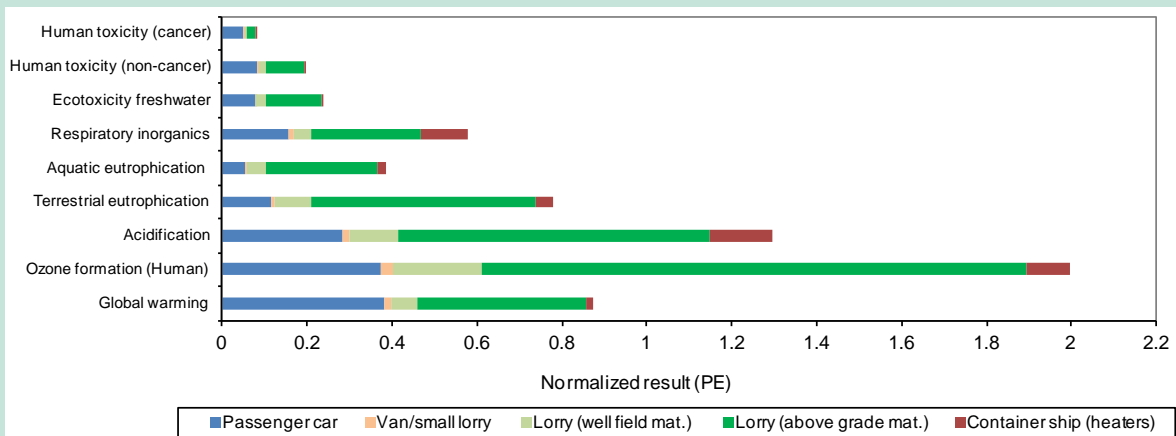


FIGURE C-6
ENVIRONMENTAL IMPACTS FROM TRANSPORTATION (LARGE SITE)

C-4.5. Sheet pile wall

The sheet pile wall which is included in the design of the ISTD at the small site uses a relatively large amount of steel. This gives a relatively large contribution to the toxic impact categories as well as an important contribution to iron depletion (see Figure C-1 and C-2). This is the case even though it is assumed that the sheet piles can be reused on two other projects before they are worn out. The main part of impacts (80-95%) from the sheet pile wall is associated with the production of the steel and only a smaller fraction is ascribed to the transportation, installation and removal after use.

C-4.6. Toxic versus non-toxic impacts

The results of the life cycle assessments generally show that the toxic impacts are higher than the non-toxic impacts in terms of PE. When comparing toxic and non-toxic impacts, it should however be kept in mind that the impact assessment of toxic impacts is associated with a much higher uncertainty due to the large number of chemicals included in the assessment, but uncertainty in the actual characterization factors describing the relative toxicity between different toxic substances. In this analysis, the toxic impacts are mainly ascribed to releases of heavy metals during production of steel and stainless steel. However, whereas the characterization factors for organic contaminants are well developed in LCA, the metal characterization factors are still interim and will be updated in the near future. Today, the characterization of metals is done by considering the total concentration of metals emitted. However improved characterization factors are underway that consider the speciation and the biologically available fraction of the metals. This will probably lead to lower toxicity related to metal emission. Thus for now, the toxic impacts can be held relative to each other, but the magnitude should not be compared directly to the non-toxic impacts.

C-5 Environmental optimization of ISTD

The life cycle assessment results for ISTD showed that electricity consumption for heating of the site is the main driver of non-toxic environmental impacts. This is followed by the above grade materials, especially the use of activated carbon for vapor treatment and the use of foam concrete for the vapor cap.

The toxic impacts mainly stem from the use of steel and stainless steel, which especially is consumed in relatively large amount in the well field installations and for a sheet pile wall if this is necessary at the site.

Depletion of energy resources is also mainly due to the on-site electricity use, whereas the use of scarce metals (especially nickel, chromium and copper) also primarily stems from the stainless steel used in the well field.

In order to address these identified environmental “hotspots”, a number of improvement scenarios are investigated, these are:

- Heating outside peak demand periods (discontinued heating)
- Use of certified hydropower
- Alternative vapor cap constructions
- Use of bio-based activated carbon
- Substitution of stainless steel and nickel types used in heaters, liners and cold pins (part of the well field materials)

In all the scenarios, the remediation efficiency is assumed to be equal to that of the baseline scenario.

C-5.1. Heating outside peak demand periods (discontinued heating)

Electricity use on-site was found to be the most important contributor to environmental impacts. Therefore it was investigated, whether it is beneficial to heat less during daytime and heat more during night time, where there might be excess electricity available within the grid with a higher percentage of wind energy.

An hourly energy composition within the grid is not available on e.g. the website of Nordpool, where energy is traded in the Nordic countries. Therefore an unrealistic best case scenario was evaluated instead. In this scenario, all energy use outside the main peak period of the day (the 12 hours from 8 pm to 8 am) is assumed to be produced by wind energy. Figure C-7 shows the result of this analysis. Here the baseline scenario assumes constant heating throughout the day, meaning that 50% of the electricity is coal-based and 50% is wind-based. In the optimization scenario, which is assumed to take place in winter, heating is done mainly during the 12 hours during night and kept as low as possible during day time. In the weekend, heating is at full power during all 24 h of the day, due to the generally lower energy consumption in Denmark as a whole compared to week days. This heating strategy gives a longer total operation time (9% increase) and a total higher electricity use (2.8% increase). As a result of the changed heating strategy, the composition of the electricity changes to 70% wind- and 30% coal-based production and gives a 40% reduction in all environmental impacts and resource use compared to the baseline scenario (see Figure C-7).

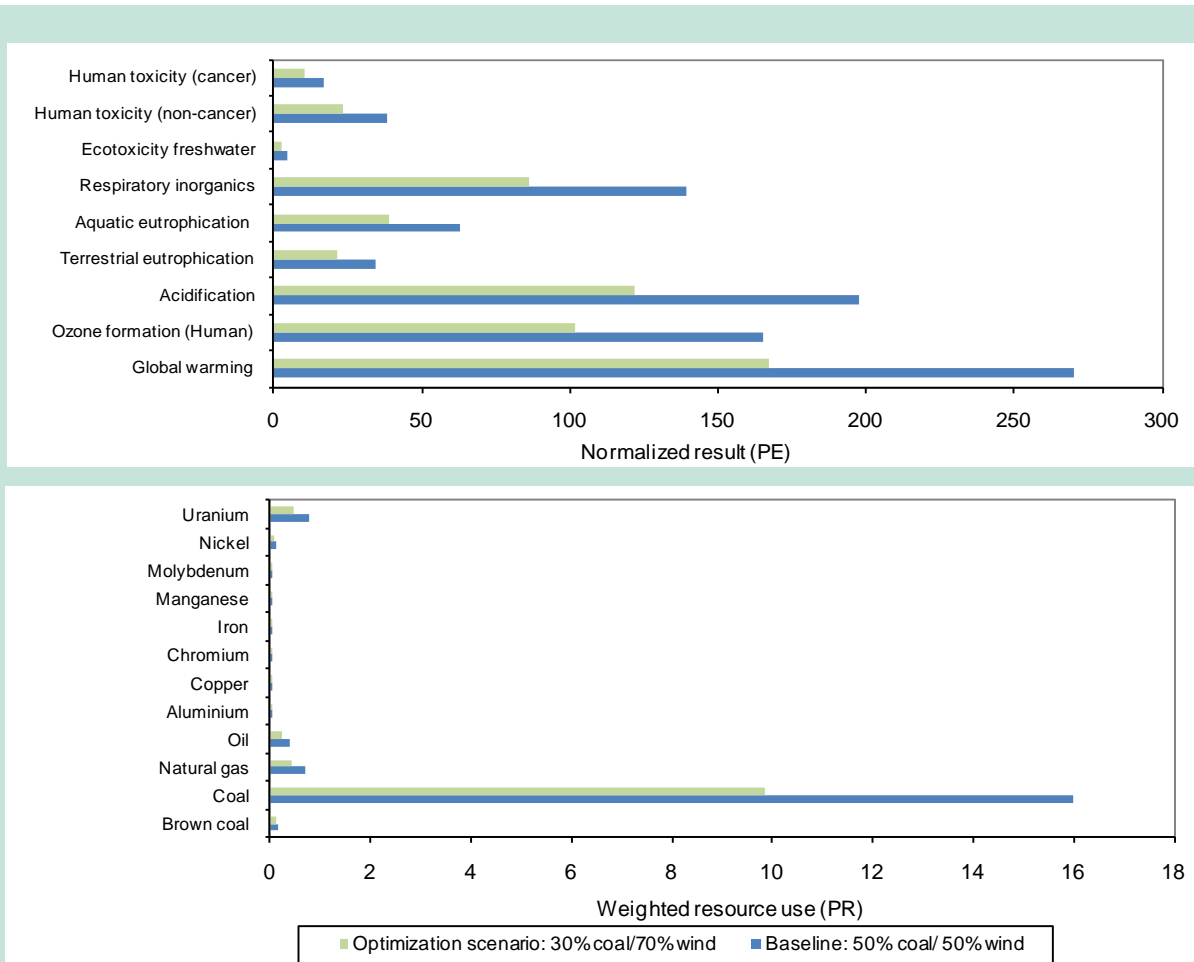


FIGURE C-7
 COMPARISON OF BASELINE SCENARIO WITH CONSTANT HEATING OF THE SOIL AND AN OPTIMIZATION SCENARIO WHERE HEATING MAINLY TAKES PLACES DURING NIGHT. THE ANALYSIS ASSUMES THAT THERE IS 12 HOURS OF WIND ENERGY AVAILABLE FROM 8 PM TO 8 AM.

However, the assumption that there is 12 hours of wind energy available is probably very unrealistic. A more likely best case scenario might be that there is 6 hours of wind energy available. In this case the energy composition will be 75% coal and 25% wind in the baseline scenario and 65% coal and 35% wind in the optimization scenario with increased energy use during night. In this case, the optimization scenario results in a 10% reduction in all environmental impacts and resource use compared to the baseline scenario (see Figure C-8).

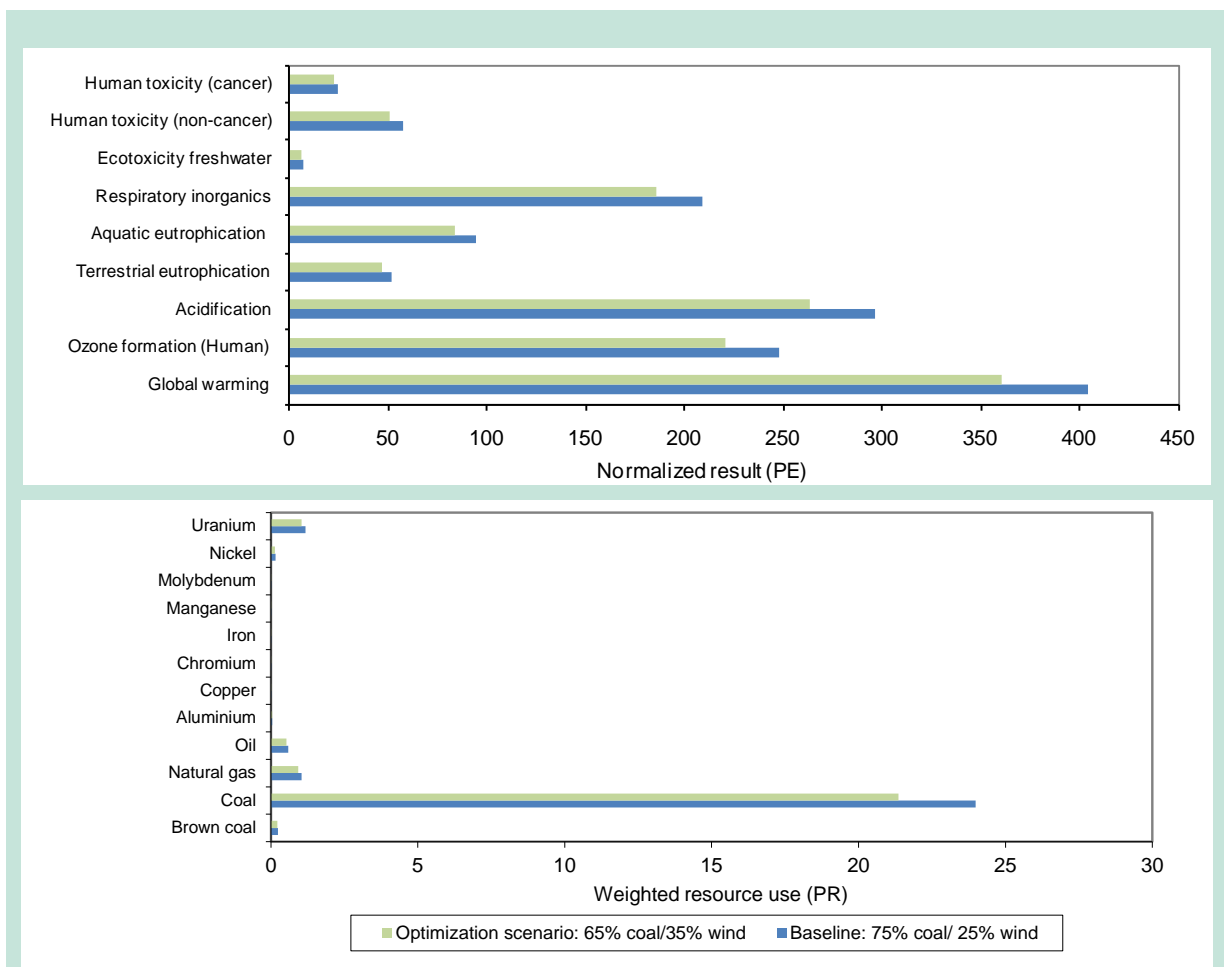


FIGURE C-8
 COMPARISON OF BASELINE SCENARIO WITH CONSTANT HEATING OF THE SOIL AND AN OPTIMIZATION SCENARIO WHERE HEATING MAINLY TAKES PLACE DURING NIGHT. THE ANALYSIS ASSUMES THAT THERE IS 6 HOURS OF WIND ENERGY AVAILABLE FROM 12 AM TO 6 AM.

C-5.2. Use of certified hydropower

The actual remediation project with ISTD at the large site bought certified hydropower to be used on-site. Theoretically, using 100% hydropower instead of the average Danish electricity mix would give a significant reduction in the overall environmental impacts and resource use of an ISTD project (see Figure C-9). However, buying certified hydropower only ensures that a certain amount of hydropower is available within the grid; it does not ensure that the total amount of electricity produced by hydropower is increased. Hydropower is already fully expanded in the Nordic countries. Thus buying certified hydropower will not impact the electricity mix in Denmark. Therefore, the use of certified hydropower will not give any environmental improvement in Denmark. This conclusion may not hold in other regions.

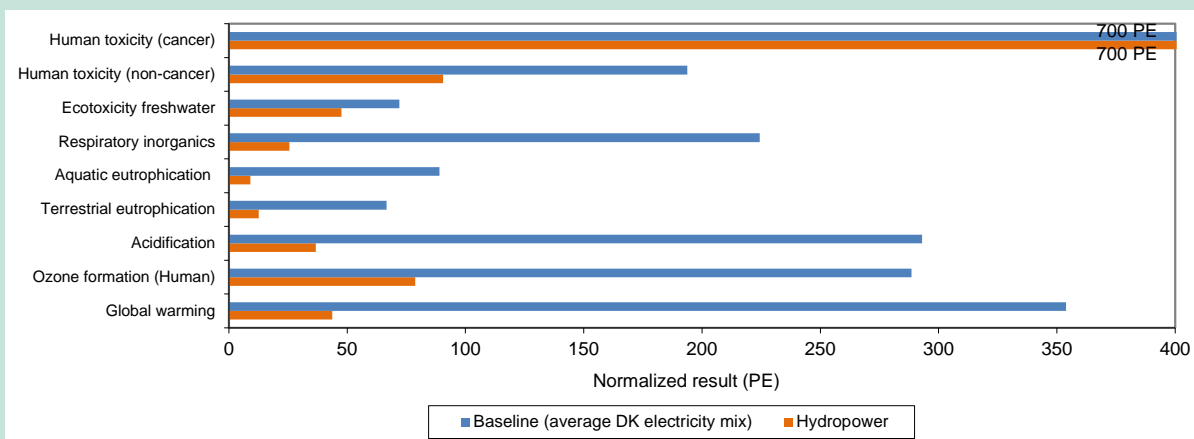


FIGURE C-9
ENVIRONMENTAL IMPACTS OF ISTD (LARGE SITE) USING AVERAGE DANISH ELECTRICITY MIX OR 100% HYDROPOWER FOR THE ON-SITE ELECTRICITY CONSUMPTION

C-5.3. Alternative vapor cap constructions

In the baseline scenario, a 40 cm foam concrete with a density of 400 kg/m³ is used as a vapor cap. This corresponds to the actual cap material used at the Reerslev and Skuldelev sites. Four alternative vapor cap constructions with equal or better insulation properties have been investigated:

- Alt. 1: Foam concrete with a density of 300 kg/m³, (depth 26 cm)
- Alt. 2: Concrete sandwich with 10 cm expanded polystyrene insulation (EPS)
- Alt. 3: Concrete sandwich with 21 cm lightweight expanded clay aggregate (leca) beads
- Alt. 4: Concrete sandwich with 30 cm sea shells

To provide the necessary structural integrity, all concrete sandwich alternatives are composed of a 5 cm concrete bottom and a 4 cm concrete top. The concrete for the sandwich constructions is a spray concrete with a density of 2,100 kg/m³. Further details on transportation distances and end-of-life assumptions for the different materials used in the vapor caps are given in Table C-2. Generally, it is assumed that 90% of the vapor cap material is collected for reuse and/or recycling. All types of concrete are assumed to be reused locally as fill materials for road construction and similar and thus substitute the production of gravel for this purpose. Therefore, the environmental impacts from producing the “saved” amount of gravel are credited. For EPS, it is assumed that 5% is recycled to secondary EPS granulate and that 85% is incinerated in a waste incineration plant where the EPS produces energy corresponding to the same amount of oil. The production of oil is therefore credited. 90% of the leca pearls are assumed to be transported back to the factory and used in the production of low density concrete blocks. Thus, only the 10% lost are accounted for. Likewise, only 10% of the production of sea shells is accounted for as 90% of the shells are assumed to be reused locally for draining purposes or the like.

TABLE C-2.

DETAILS REGARDING ASSUMPTIONS ON END-OF-LIFE, TRANSPORTATION DISTANCES AND ENERGY USE FOR HANDLING THE 5 TYPE OF MATERIALS USED FOR THE DIFFERENT VAPOR CAP CONSTRUCTIONS.

Material type	End-of-life	Transport distance (km)		Diesel use (L/m ³)			Substituted products (% of mass)
		Out	After	Layout	Removal	Shredding	
FOAM CONCRETE	CRUSHED AND USED FOR ROAD BUILDING ETC.	45 ¹⁾	45 ²⁾	INCLUDED IN LCA PROCESS	0.25 ³⁾	0.25 ³⁾	GRAVEL (90%)
SPRAY CONCRETE	CRUSHED AND USED FOR ROAD BUILDING ETC.	45 ¹⁾	45 ²⁾	INCLUDED IN LCA PROCESS	0.50 ⁴⁾	0.50 ⁴⁾	GRAVEL (90%)
EPS	5% RECYCLED AS GRANULATE, 85% INCINERATED WITH ENERGY PRODUCTION	142 ⁵⁾	45 ²⁾	NEGLIGIBLE	0.25 ³⁾	NEGLECTED DUE TO SMALL RECYCLED FRACTION	EPS GRANULATE (5%), OIL (85%)
LECA	REUSED IN PRODUCTION OF LECA BLOCKS	333 ⁶⁾	333 ⁶⁾	NEGLIGIBLE	0.25 ³⁾	N.A.	LECA (90%)
SHELLS	REUSED FOR DRAINS ETC.	387 ⁷⁾	45 ²⁾	NEGLIGIBLE	0.25 ³⁾	N.A.	SHELLS (90%)

1) Local producer assumed

2) Local reuse assumed,

3) Diesel use approximated by the energy for excavating the same volume of soil

4) Diesel use approximated by two times that of the same volume of soil

5) From producer in Maribo, Denmark

6) From/to producer in Randers, Denmark

7) From producer in Mors, Denmark.

The LCA results (Figure C-10) show that all the tested vapor cap alternatives lead to lower environmental impacts and resource depletion than the baseline scenario. Alternative 1 is very similar to the baseline scenario, except that the foam concrete has a lower density and thereby higher insulating properties. This results in a much lower material use and thereby reduces all environmental impacts and resource consumption by roughly 50%.

The use of a concrete sandwich with either EPS, leca or sea shells can for some impacts give even larger reductions in environmental impacts and resource use. The differences between using EPS, leca or sea shells are minor, but the use of sea shells seems to be slightly preferable compared to leca and EPS. In some impact categories as well as oil depletion, leca has a larger impact than EPS and sea shells, which is due to the long transportation distance before and after use as it is assumed to be reused in the production process at the factory. In contrast, the other materials are assumed reused/recycled/incinerated locally.

In connection with the practical implementation of the alternative vapor caps, it should be noted that in regard to EPS there might be a problem with shrinkage towards the end of the end of the heating period due to the elevated temperatures. This will reduce the insulating properties of the vapor cap. Refer to BILAG G for further details about the vapor caps and the practical implementation of them.

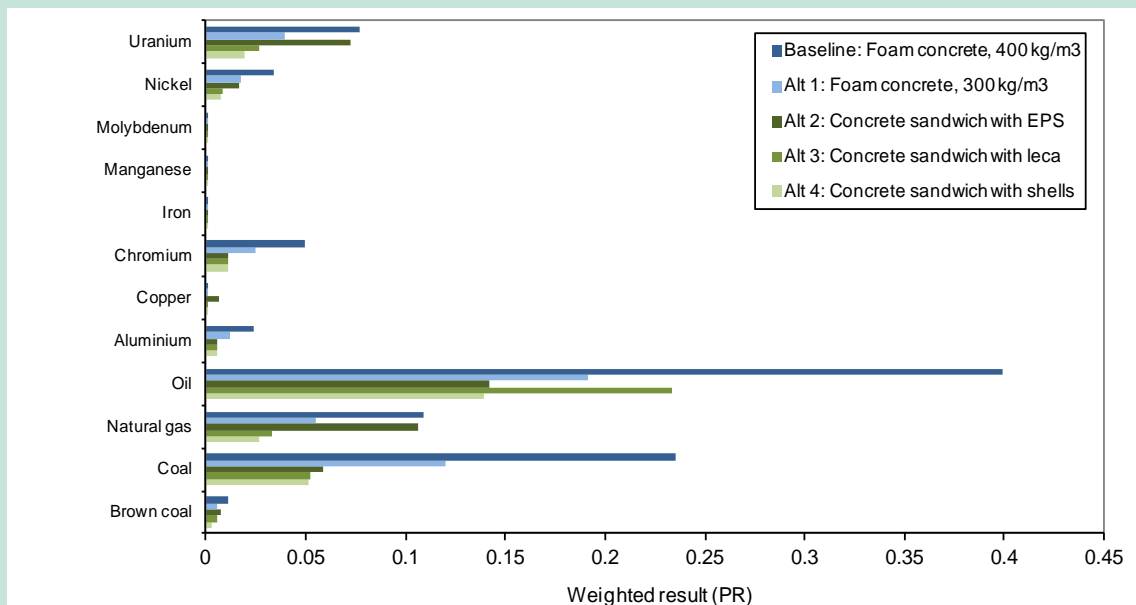
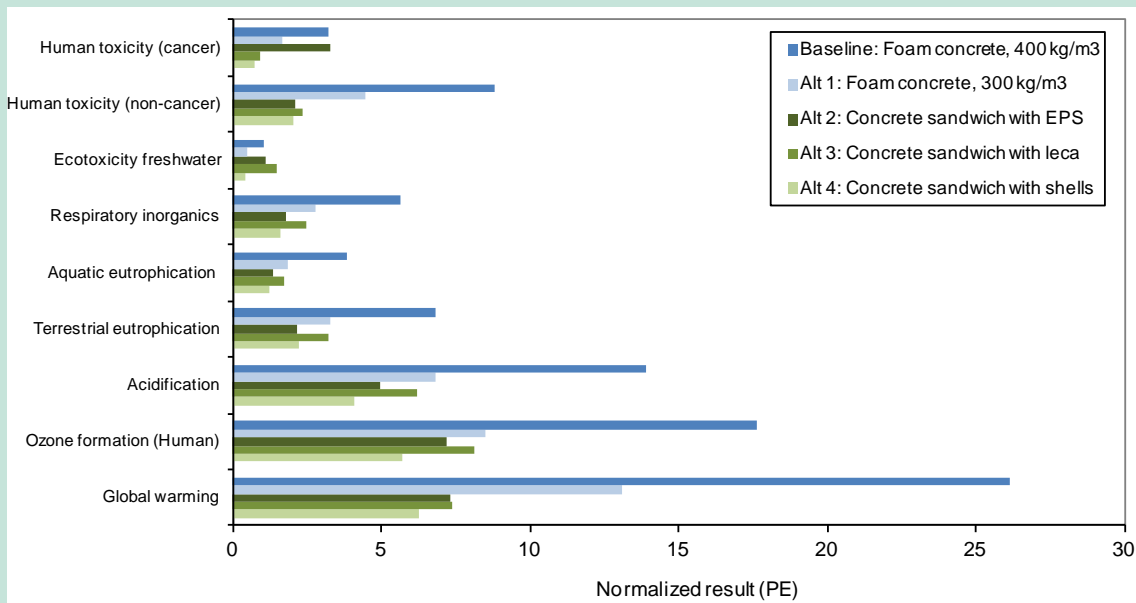


FIGURE C-10. ENVIRONMENTAL IMPACTS AND RESOURCE DEPLETION ASSOCIATED WITH THE BASELINE VAPOR CAP AND THE FOUR ALTERNATIVE VAPOR CAPS.

C-5.4. Biobased activated carbon

The activated carbon (AC) used for the vapor treatment generates relatively large environmental impacts. Therefore it is investigated whether it would be environmentally preferable to use a biobased activated carbon, which is made from coconut shells (a waste product). Anthracite based AC is assumed to be mined and produced in China, whereas the biobased AC is produced in Malaysia. The inventory for the two production processes is adapted from Sparrevik et al. (2011). After use, both AC types are assumed to be transported to Nyborg, Denmark and incinerated in a specialized incineration plant for hazardous waste. The produced energy from this incineration process is assumed to replace the use of fossil coal. As seen in Figure C-11, a change to biobased activated carbon can give a relatively large reduction in environmental impacts in the categories ozone formation (80% reduction), global warming (50% reduction), respiratory impacts (40% reduction) and aquatic entrophication (10%). In contrast, there is an increase in the terrestrial

eutrophication and human toxicity (non cancer). The impact scores in the categories human toxicity (cancer), ecotoxicity freshwater and acidification are unchanged.

The main resource consumption related to anthracite AC production is the hard coal. Changing to biobased coal removes the depletion of coal and actually gives a net gain in coal reserves as the energy use from incinerating the biobased AC after use is assumed to substitute the use of coal.

Overall, this comparison shows that a change from anthracite based to biobased AC does have a positive impact on the environmental profile of the AC used for the vapor treatment. A similar comparison was made for the AC for water treatment; however, here the biobased AC is less preferable than the anthracite AC, because a doubling of the amount of AC is necessary if biobased AC is used in order to ensure the same absorption efficiency. For vapor treatment the necessary amounts of biobased and anthracite AC is the same (Zwicky, 2011).

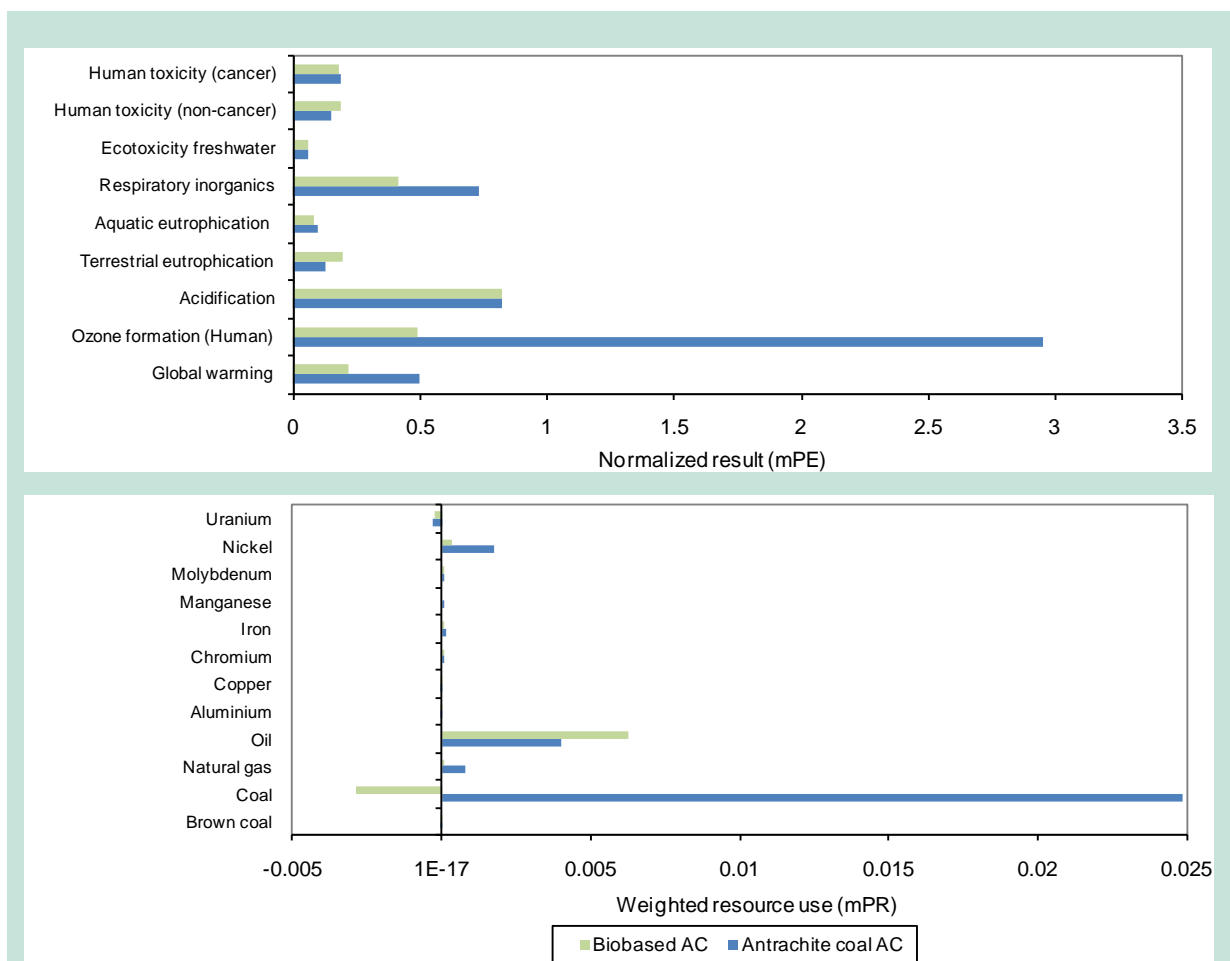


FIGURE C-11. COMPARISON OF ENVIRONMENTAL IMPACTS AND RESOURCE DEPLETION RELATED TO 1 KG OF BIOBASED AND ANTHRACITE COAL BASED ACTIVATED CARBON (AC) RESPECTIVELY.

C-5.5. Substitution of materials used in heaters and liners of the well field

Within the context of the ISTD cases considered, the well field materials are the largest contributors to depletion of nickel and chromium due to the use of stainless steels for the well liners, the heater rods and nickel in the heater cold pins. In the baseline scenario, the heater rods are made from alloy 1, the liners are made from alloy 2 and the heater cold pins are made from alloy 3. In order to reduce the depletion of nickel and chromium lower alloyed well materials has been suggested to

replace the alloys normally used in the heater rods and liners. An overview of the materials and amounts used in the baseline scenario and the alternative scenario are given in Table C-3 below.

Note that the amount of steel needed for the heater rods increase when the alternative alloy 1 is used in place of alloy 1 to ensure the same properties. Furthermore, it should be noted, that engineering and implementation issues related to replacing the materials normally used have not yet been fully investigated.

The resource depletions associated with the two scenarios are shown on Figure C-12. The combined effect of changing the three materials is an 80% reduction in the nickel depletion and a 2% reduction in the chromium depletion.

TABLE C-3
SUMMARY OF MATERIAL TYPES AND AMOUNTS USED FOR HEATER RODS, HEATER LINER AND HEATER COLD PIN FOR THE 1300 M² SITE.

Summary – Large site	Baseline scenario		Alternative scenario	
	Material	Weight [kg]	Material	Weight [kg]
HEATER ROD	ALLOY 1	667	ALTERNATIVE ALLOY 1	1864
HEATER SLEEVE/LINER	ALLOY 2	1107	ALTERNATIVE ALLOY 2	1107
HEATER COLD PIN	ALLOY 3	61	ALTERNATIVE ALLOY 3	60

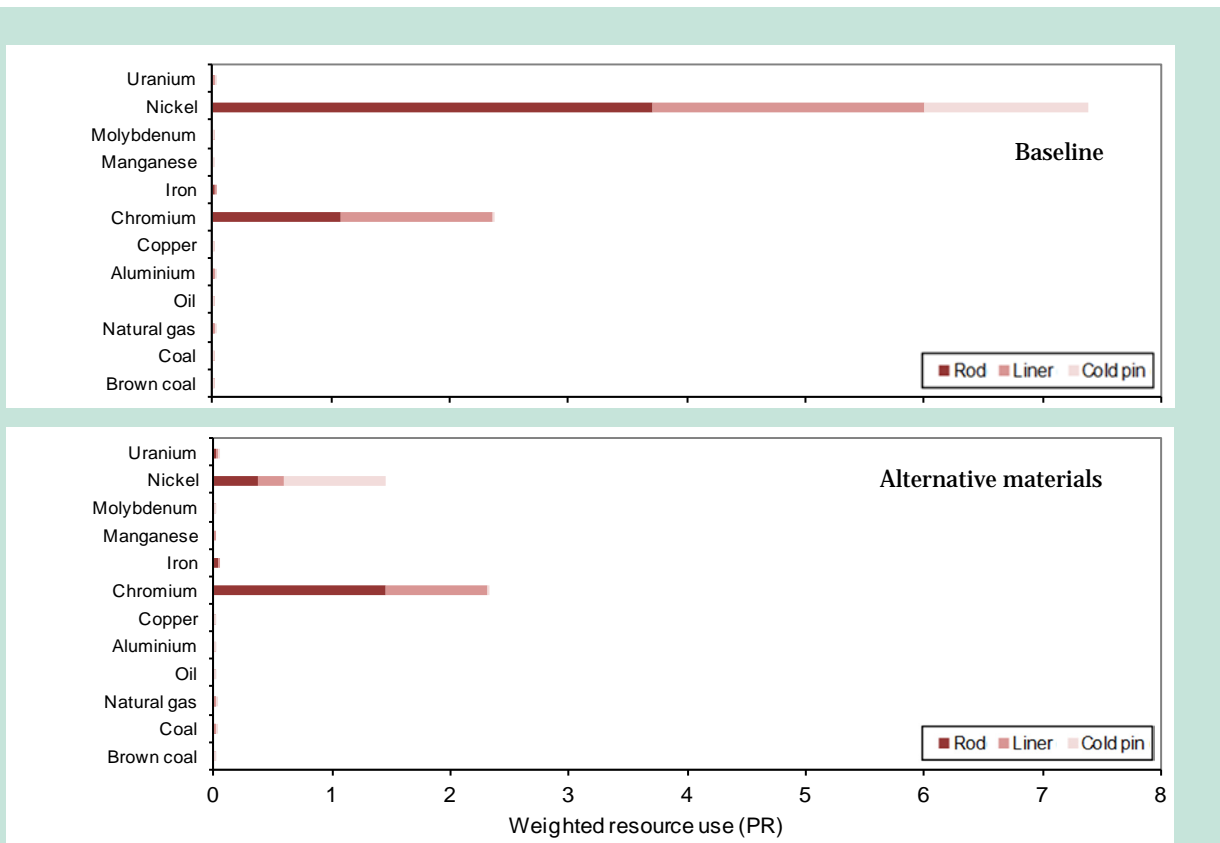


FIGURE C-12. RESOURCE DEPLETION ASSOCIATED WITH THE BASELINE SCENARIO AND THE ALTERNATIVE MATERIAL SCENARIO FOR THE LARGE SITE

C-6 Conclusions and recommendations

Based on the life cycle assessments made, the main contributors of environmental impacts of remediation with ISTD are identified:

- On-site electricity use is the most important source to non-toxic environmental impacts (74-89% of total impacts at large site and 66-84% of total impacts at small site) and depletion of energy resources.
- After electricity use, materials used above ground are the most important source to non-toxic environmental impacts. The main materials used above ground are vapor cap concrete and activated carbon.
- The main sources to eco- and human toxic impacts as well as depletion of scarce metals (nickel and chromium) are the use of steel and stainless steel. Steels are mainly used for the well field and for sheet piling if necessary at the site.
- Environmental impacts and resource depletion associated with the transportation of materials, equipment and personnel to and from the site is minor with the chosen transportation distance (90 km).
- Environmental impacts and resource depletion associated with the use of various machines on site is minor except for depletion of oil.

In order to reduce the environmental impacts and resource depletion associated with ISTD a number of possible optimization scenarios were tested using LCA. Based on this, the following recommendations for environmental optimization of ISTD are made:

- There are several possibilities for environmental optimization of the vapor cap construction that will reduce impacts and resource use associated with the vapor cap. These are:
 - (1) Using a foam concrete with a lower density (300 kg/m^3), this reduce all environmental impacts with approximately 50%,
 - (2) Using a concrete sandwich construction with EPS, leca or sea shells as insulation material.

With the assumptions made in this study, the concrete sandwich with sea shells is slightly preferable to the other concrete sandwich options and will reduce the environmental impacts with 65-75%.

- Replacement of anthracite-based activated vapor carbon with biobased activated carbon made from coconut shells can give large reductions in ozone formation (80%), global warming (60%), respiratory impacts (40%) and coal use. For water treatment, anthracite-based activated carbon is preferable, since a doubling of the amount of biobased activated carbon is necessary in order to ensure the same absorption efficiency.
- Changing to a heating strategy that heats the soil mainly during night will have a potential to reduce the overall impacts from the electricity use in the order of maximum 10%.

The combined effect of implementing the three improvement options mentioned above will give a reduction in the overall impacts of the large remediation project of 12-25% for the non-toxic impacts and 1-9% for the toxic impacts. In terms of the total PE associated with remediation, a reduction of 10% will be the result of introducing the three improvement options. Half of this improvement is due to the heating at night, whereas the rest is evenly distributed between the vapour cap and the biobased activated carbon (see also Table C-4).

In addition to the improvement options mentioned above another option addressing the high depletion of alloying metals was identified:

- It is possible to reduce the nickel depletion related to the heater rods, well liners and heater cold pins by 80% by using alternative steel types. For the large project, this saves 6PR of nickel which corresponds to an overall reduction of 50% in the total amount of nickel used for the remediation.

It should be noted that there are some uncertainties related to determining the improvement potential of the above initiatives. The actual improvement in changing to night heating depends on many factors especially the amount of wind, and is therefore difficult to determine precisely. The LCA inventory of the bio-based activated carbon furthermore stems from the literature (Sparrevik et al., 2011) and not from a reviewed LCA inventory database such as Ecoinvent. Finally it should be noted, that engineering and implementation issues related to replacing the materials for the heaters, liners and cold pins have not yet been fully investigated in terms of function and durability.

Table C-4 summarises the identified improvement options, the certainty of effect and the combined reduction in environmental impacts and resource depletion. Furthermore, it shows the distribution of the reductions in environmental impacts and resource depletion between the four improvement options.

TABLE C-4. SUMMARY OF IDENTIFIED IMPROVEMENT INITIATIVES FOR ISTD, THE CERTAINTY OF THE IMPROVEMENT AND THE COMBINED REDUCTION POTENTIAL AND DIVISION BETWEEN THE FOUR INITIATIVES.

Improvement initiative	Certainty of effect ¹⁾	Combined reduction potential and division between initiatives
DISCONTINUED HEATING (12 H/DAY)	+	<p>ENVIRONMENTAL IMPACTS: 10%</p>
CONCRETE SANDWICH VAPOUR CAP	++	
BIO-BASED ACTIVATED CARBON	+	
SUBSTITUTION OF NICKEL AND STAINLESS STEEL ALLOYS	+	<p>RESOURCE DEPLETION: 20%</p>
IMPROVEMENT INITIATIVE	CERTAINTY OF EFFECT ¹⁾	
DISCONTINUED HEATING (12 H/DAY)	+	

¹⁾ ++: High certainty of positive effect of initiative. +: Certainty of positive effect, but magnitude of improvement uncertain

C-7 References

- EC. 2009. European Commission – Joint Research Centre (JRC), European Reference Life Cycle Database (ELCD core database), version II.
<http://lct.jrc.ec.europa.eu/assessment/data>.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., and Wernet, G. 2007. Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.
- Hauschild, M.Z. and Potting, J. 2005. Spatial differentiation in life cycle impact assessment - the EDIP-2003 methodology. Environmental news No. 80 2005, Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment.
- Humbert S., Marshall J., Shaked S., Nishioka Y., Preiss P., Spadaro J., Horvath A., and Jolliet O. 2009. Intake fractions and characterization factors for particulate matter: review and recommendations (in review).
- Laurent, A., Lautier, A., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I., and Hauschild, M.Z. 2011a. Normalization references for Europe and North America for application with USEtox (TM) characterization factors. International Journal of Life Cycle Assessment 16, 728-738.
- Laurent, A., Olsen, S.I., and Hauschild, M.Z. 2011b. Normalization in EDIP97 and EDIP2003: updated European inventory for 2004 and guidance towards a consistent use in practice. The International Journal of Life Cycle Assessment 16, 401-409.
- LCA Center. 2005. List of EDIP factors downloaded from LCA Center Denmark 04-11-2008 at <http://www.lca-center.dk/cms/site.aspx?p=1595>.

- Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Joliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., and Hauschild, M.Z. 2008. USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13, 532-546.
- Sparrevik, M., Saloranta, T., Cornelissen, G., Eek, E., Fet, A.M., Breedveld, G.D., and Linkov, I. 2011. Use of Life Cycle Assessments To Evaluate the Environmental Footprint of Contaminated Sediment Remediation. *Environmental Science & Technology* 45, 4235-4241.
- Wenzel, H., Hauschild, M., and Alting, L. 1997. Environmental assessment of products. - 1: Methodology, tools, and case studies in product development. Chapman & Hall, United Kingdom, 1997, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA. USA.
- Zwicky, F. (2011). Personal communication with Flemming Zwicky, Chemviron A/S on July 14th 2011.

C-8 Appendices

Appendix 1: Overview of consumption data for the two sites

TRANSPORTATION	Unit	SMALL SITE	LARGE SITE
TRAVEL BY CAR	personkm	13,035	19,918
TRAVEL BY AIR	personkm	0	0
SHIPPING BY VAN/SMALL TRUCK (DAY TO DAY DELIVERIES)	kgkm	55,935	80,040
SHIPPING BY TRUCK (ABOVE GRADE MATERIALS)	kgkm	5,760,270	28,704,240
SHIPPING BY TRUCK (WELL FIELD MATERIALS)	kgkm	1,233,959	4,614,579
SHIPPING BY AIR	kgkm	0	0
SHIPPING BY SHIP	kgkm	4,476,247	16,171,005
TRAVEL DISTANCE, ROUND TRIP	km	90	90
TRAVEL DISTANCE, SHIP	km	4,500	4,500

MATERIALS USAGE	Unit	SMALL SITE		LARGE SITE	
		WELLFIELD	ABOVE GRADE	WELLFIELD	ABOVE GRADE
SAND	kg	3,872		27,866	
HIGH TEMP GROUT	kg	1,633		2,731	
VAPOR CAP CONCRETE	kg		41,600		275,200
VAPOR GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg		2,646		15,984
LIQUID GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg		405		120
CARBON STEEL	kg	6,637	3,893	22,707	5,593
STAINLESS STEEL TYPE 1	kg	1,086	422	2,789	656
STAINLESS STEEL TYPE 2	kg	178		667	
NICKEL	kg	22		60	
COBBER	kg	312		866	
FIBERGLASS	kg	45		127	
PE	kg		782		782
CARBON STEEL, SHEET PILE	kg	17,376			

UTILITY USAGE	UNIT	SMALL SITE	LARGE SITE
POWER USAGE, TOTAL	kWh	766,000	3,982,000
- HEROF USED BY TREATMENT SYSTEM	kWh	126,000	185,000
- HEREOF INJECTED INTO THE SUBSURFACE	kWh	640,000	3,797,000
GASOLINE USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	846	1,031
DIESEL USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	3,773	5,177

Note that the material usage only includes the fraction of the materials used on this specific project as some components can be used several times. The applied reuse rates are listed below: 100% means that the material is not recycled, but ascribed 100% to this project. 25% means that the material is used on 4 projects and therefore only 25% is ascribed to this project and so forth.

UNIT AMOUNTS AND REUSE RATES FOR WELL FIELD MATERIALS (REUSE RATES GIVEN AS PERCENT OF MATERIAL ASCRIBED TO THIS PROJECT)						
	NUMBER OF UNITS		MATERIAL	WEIGHT PER UNIT(KG)		% ASCRIBED TO PROJECT
	SMALL SITE	LARGE SITE		SMALL SITE	LARGE SITE	
HEATER WELLS	53	147	CARBON STEEL (HEATER CAN)	109	144.5	100
			STAINLESS STEEL TYPE 1 (LINER)	22.9	30.1	25
HEATER ELEMENTS	53	147	STAINLESS STEEL TYPE 2 (HEATER ROD)	13.5	18.2	25
			NICKEL (HEATER COLD PIN)	2.1	2.1	20
VERTICAL SVE WELL	21	14	SAND	118	198	100
			HIGH TEMP. GROUT	23.7	23.7	100
			CARBON STEEL	6.6	6.6	100
			STAINLESS STEEL	12.4	21	100
MULTIPHASE EXTRACTION WELL, PUMPING	3	-	SAND	201		100
			HIGH TEMP. GROUT	89		100
			CARBON STEEL	19.6		100
			STAINLESS STEEL	32.6		100
HORIZONTAL SVE WELLS	-	2	SAND		12,294	100
			CARBON STEEL		8.3	100
			STAINLESS STEEL		561	100
TEMPERATURE MONITORING HOLES	20	30	HIGH TEMP. GROUT	53.6	78.3	100
			CARBON STEEL	28.4	40.4	100
PRESSURE MONIT. WELLS AND AIR INLET WELLS	24	10	SAND	33.4	50.4	100
			HIGH TEMP. GROUT	5.0	5.0	100
			CARBON STEEL	2.2	2.2	100
			STAINLESS STEEL	17.6	26.6	100
MAIN MANIFOLD, FIBERGLASS, 4"	1	-	CARBON STEEL	149	-	30
			FIBERGLASS	149		
MAIN MANIFOLD, FIBERGLASS, 6"	-	1	CARBON STEEL	-	424	30
			FIBERGLASS		424	
	Length (m) Small site	Length (m) Large site	Material	Weight per unit length (kg/m)		
CABLE	862	2391	COPPER	1.45		25

UNIT AMOUNTS AND REUSE RATES FOR ABOVE GRADE MATERIALS (REUSE RATES GIVEN AS PERCENT OF MATERIAL ASCRIBED TO THIS PROJECT)						
EQUIPMENT FOR THE ABOVE GRADE TREATMENT SYSTEM						
	DESCRIPTION	SUBELEMENT	MATERIAL	Weight per unit (kg)		% ASCRIBED TO PROJECT
				LARGE SITE	SMALL SITE	
VAPOR TREATMENT SYSTEM:						
KOP1	KNOCK OUT POT	-	CARBON STEEL	160	1,600	5%
HX1	HEAT EXCHANGER	-	STAINLESS STEEL	500	1,500	25%
KOP2	KNOCK OUT POT	-	CARBON STEEL	160	1,400	5%
SVE-CONTAINER	CONTAINER WITH BLOWER	CONTAINER BLOWER (DINGO 125)	CARBON STEEL CARBON STEEL	2,400 200	2,400 200	10% 25%
A-GAC	CARBON FILTERS FOR AIR TREATMENT	CARBON FILTERS X 3	PE CARBON STEEL	2,400 300	2,400 300	25% 25%
		HYDRASIL FILTER	PE CARBON STEEL	300 62	300 62	25% 25%
COOLER	CONTAINER WITH PUMPS FOR CIRCULATION OF COOLING WATER	CONTAINER GRUNDFOSS PUMPS (2)	CARBON STEEL STAINLESS STEEL	825 280	825 280	25% 50%
		HEAT EXCHANGER WATER	STAINLESS STEEL	50	50	50%
DC	DRY COOLERS (DC1)	-	CARBON STEEL	2,100	4,000	50%
WATER TREATMENT SYSTEM:						
ST1	STORAGE TANK	-	CARBON STEEL	1,000	1,000	25%
FPT1	FREE PRODUCT TANK	-	PE	50	50	25%
WATER TREATMENT	CONTAINER WITH CARBON FILTERS FOR WATER	CONTAINER CARBON FILTER (4 SAME SIZE)	CARBON STEEL STAINLESS STEEL	2,400 464	2,400 464	25% 25%
		BUFFER TANK	PE	376	376	25%
CONTAINERS:						
OFFICE CONTAINER	CONTAINER WITH CONTROL PC	CONTAINER	CARBON STEEL	825	825	25%
WORKSHED CONTAINER	CONTAINER WITH TOOLS ETC.	CONTAINER	CARBON STEEL	2,400	2,400	25%
ELECTRICAL CONTROLLER	CONTAINER WITH ELECTRICAL INPUT CONTROLS	CONTAINER	CARBON STEEL	4,800	4,800	25%
SHEET PILE WALL USED AT SMALL SITE:						
SHEET PILE WALL	-	-	CARBON STEEL	52,128		33%

Appendix 2: Overview of categories, assumptions and LCA data

OVERVIEW OF INCLUDED CONTENT IN EACH CATEGORY AND ASSUMPTIONS MADE
TRANSPORTATION
INCLUDES: TRANSPORT OF EQUIPMENT, PERSONNEL AND DAY-TODAY DELIVERIES IN DK FROM LOCAL SUPPLIER TO SITE (90 KM RETURN). HOWEVER FOR HEATING ELEMENTS TRANSPORT IS FROM THE PRODUCER IN THE US.
ASSUMPTIONS: PERSON TRANSPORT: ALL VEHICLES ASSUMED PETROL FUELLED. VAN TRANSPORT: ASSUMED 5 KG LOAD IN AVERAGE. LARGE TRUCK: FOR WELL MATERIALS IT IS ASSUMED THAT GRAVEL AND GROUT STAY AT THE SITE, AND IS THUS TRANSPORTED ONLY ONE WAY. SHIP TRANSPORT OF HEATERS: ONLY ONE WAY ASSUMED (4.500 KM) <i>NOTE:</i> TRANSPORT OF SHEET PILE WALL IS INCLUDED IN THE SHEET PILE WALL CATEGORY
MATERIALS (WELL FIELD)
INCLUDES: PRODUCTION AND END-OF-LIFE OF MATERIALS USED FOR THE WELL FIELD (HEATERS, HEATER WELLS, SAND AND GROUT, COPPER WIRES) AND THE TRANSPORTATION FROM EXTRACTION/PRODUCTION SITE TO LOCAL SUPPLIER IN DENMARK. STEEL, FIBERGLASS, COPPER AND NICKEL IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN EUROPE AND TRANSPORTED A DISTANCE OF 700 KM. SAND, CONCRETE AND GROUT IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN DENMARK. CEMENT INPUT TO GROUT AND FOAM CONCRETE IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN AALBORG, DENMARK, AND TRANSPORTED 235 KM TO COPENHAGEN BY SHIP. SAND IS ASSUMED TO BE TRANSPORTED 50 KM FROM EXTRACTION SITE TO LOCAL SUPPLIER.
ASSUMPTIONS: <i>HIGH TEMPERATURE GROUT COMPOSITION:</i> (0.53 KG CEMENT, 0.19 KG SILICA FLOUR, 0.29 KG WATER) PER KG OF GROUT. <i>CARBON STEEL:</i> UNALLOYED STEEL. ASSUMED 20% PRIMARY STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION <i>STAINLESS STEEL TYPE 1:</i> ASSUMED 20% PRIMARY STAINLESS STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION <i>STAINLESS STEEL TYPE 2:</i> ASSUMED 20% PRIMARY STAINLESS STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION. THIS STEEL TYPE IS USED FOR HEATER ELEMENTS ONLY. <i>NICKEL FOR HEATER COLD PINS:</i> ASSUMED 20% PRIMARY STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION. NICKEL IS USED IN THE HEATER PINS. <i>FIBERGLASS:</i> DUE TO SMALL AMOUNT, NO END-OF-LIFE PHASE IS MODELLED. <i>COPPER:</i> ASSUMED 5% PRIMARY COPPER AND 95% SECONDARY COPPER. DIRECT RECYCLING RATES FOR WELL FIELD MATERIALS: SEE APPENDIX 1
MATERIALS (ABOVE GRADE)
INCLUDES: PRODUCTION AND END-OF-LIFE OF MATERIALS USED ABOVE GROUND (ACTIVATED CARBON, CONCRETE VAPOR CAP, COOLERS, HEAT EXCHANGER, CONTAINERS ETC) AND THE TRANSPORTATION FROM EXTRACTION/PRODUCTION SITE TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK IS INCLUDED. STEEL AND POLYETHYLENE (PE) IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN EUROPE AND TRANSPORTED 700 KM TO DENMARK BY TRUCK. FOAM CONCRETE IS PRODUCED IN DENMARK. CEMENT INPUT TO FOAM CONCRETE IS ASSUMED PRODUCED IN AALBORG, DENMARK AND TRANSPORTED 235 KM TO COPENHAGEN BY SHIP. ACTIVATED CARBON INCLUDES TRANSPORT INTERNALLY IN CHINA (905 KM BY TRUCK), TRANSOCEANIC FREIGHT SHIP (19.200 KM) AND TRANSPORT IN EUROPE (700 KM BY TRUCK)
ASSUMPTIONS: <i>VAPOR GRANULAR ACTIVATED CARBON (GAC):</i> PRODUCED FROM HARD COAL IN CHINA (INFO FROM SUPPLIER). THE PRODUCTION IS MODELLED USING DATA FROM SPARREVIK (2011). TRANSPORT TO EUROPEAN SUPPLIER AND TO DENMARK ADDED AS DESCRIBED ABOVE. BY END-OF-LIFE, THE GAC IS TRANSPORTED TO NYBORG (112 KM) AND INCINERATED AT A SPECIALIZED HAZARDOUS WASTE PLANT WITH ENERGY RECOVERY. <i>LIQUID GRANULAR ACTIVATED CARBON (GAC):</i> PRODUCED FROM HARD COAL IN THE US (INFO FROM SUPPLIER). THE PRODUCTION IS MODELLED USING DATA FROM SPARREVIK (2011). TRANSPORT TO EUROPEAN SUPPLIER AND TO DENMARK ADDED AS DESCRIBED ABOVE. BY END-OF-LIFE, THE GAC IS TRANSPORTED TO NYBORG (112 KM) AND INCINERATED AT A SPECIALIZED HAZARDOUS WASTE PLANT WITH ENERGY RECOVERY. <i>CARBON STEEL:</i> UNALLOYED STEEL. ASSUMED 20% PRIMARY STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION <i>STAINLESS STEEL TYPE 1:</i> ASSUMED 20% PRIMARY STAINLESS STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION <i>PE:</i> HIGH DENSITY POLYETHYLENE GRANULATE COMBINED WITH INJECTION MOULDING PROCESS. 20% PRIMARY AND 80% SECONDARY PRODUCTION ASSUMED. SECONDARY PRODUCTION MODELLED USING DATA FROM FREES (2002). <i>VAPOR CAP CONCRETE:</i> FOAM CONCRETE COMPOSITION AND PRODUCTION ENERGY BASED ON INFORMATION FROM THE PRODUCER (UNICON A/S). BY END-OF-LIFE THE CONCRETE IS ASSUMED TO BE EXCAVATED, CRUSHED, AND TRANSPORTED 50KM. 90% OF THE FOAM CONCRETE IS ASSUMED TO BE RECYCLED AS A SUBSTITUTE FOR GRAVEL PRODUCTION. ENERGY FOR REMOVING THE CONCRETE IS SET EQUAL TO EXCAVATION OF THE SAME VOLUME OF SOIL. CRUSHING OF THE CONCRETE IS ASSUMED TO USE THE SAME AMOUNT OF ENERGY AS USED FOR THE UPTAKE. DIRECT RECYCLING RATES FOR ABOVE GRADE MATERIALS: SEE APPENDIX 1
MACHINES
INCLUDES: FUEL USE, COMBUSTION EMISSIONS, LUBRICATING OIL
ASSUMPTIONS: AL MACHINE TYPES ASSUMED TO HAVE SAME COMBUSTION EMISSIONS PER LITER OF DIESEL CONSUMED
SHEET PILE
INCLUDES: PRODUCTION OF STEEL, INSTALLATION AND UPTAKE ENERGY. TRANSPORT TO SITE 90 KM (RETURN) FROM LOCAL SUPPLIER AND TRANSPORT TO DENMARK FROM EUROPEAN PRODUCER (700 KM BY TRUCK)

ASSUMPTIONS:

CARBON STEEL: UNALLOYED STEEL. ASSUMED 20% PRIMARY STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION
INSTALLATION AND UPTAKE OF WALL: THE DIESEL CONSUMPTION FOR INSTALLATION IS ASSUMED TO BE 10 L DIESEL PER TON OF WALL (ESTIMATED BY AARSLEFF). THE UPTAKE OF THE WALL AFTER FINALIZATION OF THE REMEDIATION IS ASSUMED TO CONSUME THE SAME AMOUNT OF ENERGY PER TON OF WALL.
DIRECT RECYCLING RATES FOR SHEET PILES: THE SHEET PILES ARE ASSUMED TO BE USED A TOTAL OF 3 TIMES (AVERAGE ESTIMATE BY AARSLEFF), I.E. ONLY 1/3 OF THE PRODUCTION IS ALLOCATED TO THIS PROJECT.

EXCLUDED ITEMS

COMPUTERS: NOT INCLUDED AS NO DATA ON USE WAS COLLECTED
 IN SITU CO₂ GENERATION FROM OXIDATION OF THE ORGANIC SOIL CONTENT

OVERVIEW OF APPLIED LCA DATA FOR PRODUCTION OF ELECTRICITY, METALS AND PLASTICS

PROCESS	DATA SOURCE	PROCESS NAME (S) IN DATABASE	COMMENT/ADJUSTMENT
ELECTRICITY PRODUCTION			
ELECTRICITY PRODUCTION, DK, LOW VOLTAGE	ECOINVENT	DK: ELECTRICITY, LOW VOLTAGE, AT GRID	AVERAGE DANISH ELECTRICITY INCLUDING IMPORTS. USED FOR ELECTRICITY USE ON-SITE
ELECTRICITY PRODUCTION, DK, MEDIUM VOLTAGE	ECOINVENT	DK: ELECTRICITY, MEDIUM VOLTAGE, AT GRID	AVERAGE DANISH ELECTRICITY INCLUDING IMPORTS. USED FOR INDUSTRIAL ELECTRICITY USE IN DENMARK
ELECTRICITY PRODUCTION, EU	ECOINVENT	UCTE: ELECTRICITY, MEDIUM VOLTAGE, AT GRID	AVERAGE UCTE ELECTRICITY. USED FOR EUROPEAN PRODUCTION PROCESSES (STEEL, PLASTICS)
ELECTRICITY PRODUCTION, CHINA	ECOINVENT	CN: ELECTRICITY, MEDIUM VOLTAGE, AT GRID	AVERAGE ELECTRICITY PRODUCTION, CHINA. USED FOR INDUSTRIAL PRODUCTION IN CHINA (PE RECYCLING)
COAL-BASED ELECTRICITY PRODUCTION, CHINA	ECOINVENT	CN: ELECTRICITY, HARD COAL, AT COAL MINE POWER PLANT	ENERGY USE FOR ACTIVATED CARBON PRODUCTION IN CHINA.
METALS			
STEEL, UNALLOYED, PRIMARY	ECOINVENT	RER: STEEL, CONVERTER, UNALLOYED, AT PLANT	THE NICKEL CONTENT WAS REMOVED
STEEL, UNALLOYED, SECONDARY	ECOINVENT	RER: STEEL, CONVERTER, UN- AND LOWALLOYED, AT PLANT	ALLOYING METALS REMOVED
STAINLESS STEEL, TYPE 1 (18% CR, 8% NI) PRIMARY	ECOINVENT	RER: STEEL, CONVERTER, CHROMIUM STEEL 18/8, AT PLANT	CR AND NI CONTENTS ADJUSTED TO FIT ACTUAL COMPOSITION
STAINLESS STEEL, TYPE 1 (18% CR, 8% NI) SECONDARY	ECOINVENT	RER: STEEL, ELECTRIC, CHROMIUM STEEL 18/8, AT PLANT	CR AND NI CONTENTS ASSUMED RECYCLED WITH STAINLESS STEEL
STAINLESS STEEL, ALLOY A ^{A)} PRIMARY	ECOINVENT	RER: STEEL, CONVERTER, CHROMIUM STEEL 18/8, AT PLANT	CR AND NI CONTENTS ADJUSTED TO FIT ACTUAL COMPOSITION
STAINLESS STEEL, ALLOY A ^{A)} SECONDARY	ECOINVENT	RER: STEEL, ELECTRIC, CHROMIUM STEEL 18/8, AT PLANT	CR AND NI CONTENTS ASSUMED RECYCLED WITH STAINLESS STEEL
NICKEL, PRIMARY	ECOINVENT	ZA: NICKEL, PRIMARY, FROM PLATINUM GROUP METAL PRODUCTION	
NICKEL, SECONDARY	ECOINVENT	NICKEL, SECONDARY, FROM ELECTRONIC AND ELECTRIC SCRAP RECYCLING, AT REFINERY	
COPPER, PRIMARY	ECOINVENT	RER: COPPER, PRIMARY, AT REFINERY	

COPPER, SECONDARY	ECOINVENT	SE: COPPER, SECONDARY, FROM ELECTRONIC AND ELECTRIC SCRAP RECYCLING, AT REFINERY	
METAL PROCESSING			
HOT ROLLING OF STEEL	ECOINVENT	RER: HOT ROLLING STEEL	APPLIED TO STEEL AND STAINLESS STEEL
WIRE DRAWING, COPPER	ECOINVENT	RER: WIRE DRAWING, COPPER	
PLASTICS			
POLYETHYLENE (PE), HIGH DENSITY, GRANULATE, PRIMARY	ELCD	RER: POLYETHYLENE HIGH DENSITY GRANULATE (PE-HD), PRODUCTION MIX, AT PLANT	
POLYETHYLENE (PE), HIGH DENSITY, GRANULATE, SECONDARY	FREES (2002)	UCTE: ELECTRICITY, MEDIUM VOLTAGE, AT GRID (0.29 KWH) CN: ELECTRICITY, MEDIUM VOLTAGE, AT GRID (0.29 KWH) RER: NATURAL GAS, BURNED IN INDUSTRIAL FURNACE > 100 KW (0.5418 MJ)	ONLY INCLUDES ENERGY AND HEAT CONSUMPTION. AMOUNTS REFER TO 1 KG OF OUTSORTED PE PRODUCING 0.926 KG SECONDARY GRANULATE. PRODUCTION TAKES PLACE IN EU (50%) AND CHINA (50%)
FIBERGLASS	ECOINVENT	RER: GLASSFIBER REINFORCED PLASTIC, POLYESTER RESIN, HAND LAY-UP, AT PLANT	
PLASTIC PROCESSING			
INJECTION MOULDING	ECOINVENT	RER: INJECTION MOULDING	APPLIED TO PE GRANULATE

ABBREVIATIONS: CH: SWITZERLAND, CN: CHINA, DK: DENMARK, DE: GERMANY, GLO: GLOBAL, OCE: OCEANIC, RER: EUROPE, RNA: NORTH AMERICA, SE: SWEDEN, UCTE: UNION FOR THE COORDINATION OF TRANSMISSION OF ELECTRICITY, US: USA, ZA: SOUTH AFRICA

^{A)} THE EXACT COMPOSITION IS CONFIDENTIAL.

OVERVIEW OF APPLIED LCA DATA FOR PRODUCTION OF GROUT, CONCRETE, SAND, ACTIVATED CARBON AND LCA DATA FOR TRANSPORTATION AND CONSTRUCTION MACHINES			
PROCESS	DATA SOURCE	PROCESS NAME (S) IN DATABASE	COMMENT/ADJUSTMENT
CEMENT, CONCRETE AND SAND			
CEMENT (PRODUCED IN DK) (INPUT TO CONCRETE)	ECOINVENT	CH: PORTLAND CEMENT, STRENGTH CLASS Z 42.5, AT PLANT	ELECTRICITY FOR PRODUCTION OF CEMENT CHANGED TO DANISH ELECTRICITY. SHIP TRANSPORT FROM PRODUCTION SITE IN AALBORG TO COPENHAGEN ADDED.
HIGH TEMPERATURE GROUT (PRODUCED IN DK)	ECOINVENT	CH: CONCRETE, NORMAL, AT PLANT	COMPOSITION CHANGED TO ACTUAL GROUT COMPOSITION. ELECTRICITY FOR PRODUCTION OF CEMENT CHANGED TO DANISH ELECTRICITY
FOAM CONCRETE (PRODUCED IN DK)	ECOINVENT	CH: CONCRETE, NORMAL, AT PLANT	COMPOSITION OF FOAM CONCRETE WITH A DENSITY OF 400 KG/M ³ AND 300 KG/M ³ CHANGED BASED ON BASF (2008). PRODUCTION ELECTRICITY CHANGED TO DANISH ELECTRICITY. END-OF-LIFE PHASE ADDED, UPTAKE, CRUSHING AND RECYCLING OF 90% AS SUBSTITUTION FOR GRAVEL PRODUCTION. TRANSPORTATION DISTANCE OF 45 KM TO /FROM SITE ADDED.

OVERVIEW OF APPLIED LCA DATA FOR PRODUCTION OF GROUT, CONCRETE, SAND, ACTIVATED CARBON AND LCA DATA FOR TRANSPORTATION AND CONSTRUCTION MACHINES			
PROCESS	DATA SOURCE	PROCESS NAME (S) IN DATABASE	COMMENT/ADJUSTMENT
LECA PEARLS (PRODUCED IN DK)	ECOINVENT	CH: EXPANDED CLAY, AT PLANT	PRODUCTION ELECTRICITY CHANGED TO DANISH ELECTRICITY. END-OF-LIFE PHASE ADDED. UPTAKE AND 90% REUSE AS SUBSTITUTE FOR NEW LECA PEARLS USED FOR LIGHTWEIGHT CONCRETE PRODUCTION. RETURN TRANSPORT FROM RANDERS ADDED.
EXPANDED POLYSTYRENE/STYROLIT (PRODUCED IN DK, GRANULATE PRODUCED IN EUROPE)	ECOINVENT	RER: POLYSTYRENE FOAM SLAB	95% EPS GRANULATE IMPORTED FROM EUROPE, 5% SCRAP. END-OF-LIFE PHASE ADDED WITH 90% INCINERATION WITH ENERGY PRODUCTION REPLACING USE OF CRUDE OIL. TRANSPORT FROM PRODUCTION SITE IN MARIBO ADDED. AFTER USE, TRANSPORTED 45 KM TO INCINERATION PLANT.
SEA SHELLS (FROM DENMARK)		CH: GRAVEL, ROUND AT MINE	PRODUCTION ENERGY ASSUMED EQUAL TO GRAVEL PRODUCTION. ELECTRICITY USE CHANGED TO DANISH ELECTRICITY. DIRECT REUSE OF SHELLS (90%) ASSUMED AND SUBSTITUTES NEW SHELL PRODUCTION. TRANSPORTATION FROM MORS TO COPENHAGEN INCLUDED AND 45 KM TRANSPORT AFTER USE.
SPRAY CONCRETE (PRODUCED IN DENMARK)	ECOINVENT	CH: CONCRETE, NORMAL, AT PLANT	COMPOSITION CHANGED TO A DENSITY OF 2100 KG/M ³ BY REDUCING THE AMOUNT OF GRAVEL. DANISH ELECTRICITY USED IN PRODUCTION. END-OF-LIFE PHASE ADDED, UPTAKE, CRUSHING AND RECYCLING OF 90% AS SUBSTITUTION FOR GRAVEL PRODUCTION. TRANSPORTATION DISTANCE OF 45 KM TO /FROM SITE ADDED.
SAND (PRODUCED IN DK)	ECOINVENT	CH: SAND AT MINE	CHANGED TO DANISH ELECTRICITY

OVERVIEW OF APPLIED LCA DATA FOR PRODUCTION OF GROUT, CONCRETE, SAND, ACTIVATED CARBON AND LCA DATA FOR TRANSPORTATION AND CONSTRUCTION MACHINES

PROCESS	DATA SOURCE	PROCESS NAME (S) IN DATABASE	COMMENT/ADJUSTMENT
ACTIVATED CARBON			
GRANULAR ACTIVATED CARBON FOR VAPOR TREATMENT (FROM CHINA)	SPARREVIK ET AL. (2011)	CN: HARD COAL AT MINE (1.89 KG) CN: ELECTRICITY, HARD COAL, AT POWER PLANT (0.3774 KWH) RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE (0.905 TKM) OCE: TRANSPORT, TRANSOCEANIC FREIGHT SHIP (19.2 TKM) RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE (0.7 TKM) RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE (0.112 TKM) AVOIDED PRODUCTS: DE: HARD COAL SUPPLY MIX (0.526 KG)	THE INPUTS RELATES TO PRODUCTION OF 1 KG OF GAC. THE EMISSIONS FOR THE PRODUCTION STEPS ARE NOT LISTED, BY MAY BE FOUND IN SPARREVIK ET AL. (2011). ALL GAC ASSUMED PRODUCED IN CHINA AND TRANSPORTED BY FREIGHT SHIP AND LORRY TO DENMARK. AFTER USE THE ACTIVATED CARBON IS TRANSPORTED TO KOMMUNEKEMI IN NYBORG AND INCINERATED WITH ENERGY PRODUCTION. THEREFORE A CREDIT IS GIVEN AS THE GAC REPLACES THE USE OF HARD COAL, HOWEVER DUE THE LOWER CALORIFIC VALUE AND A LOWER EFFICIENCY THAN IN TRADITIONAL ELECTRICITY PRODUCTION, 1 KG OF SPENT GAC IS ASSUMED TO REPLACE 0.526 KG OF HARD COAL. THE CALORIFIC VALUE OF THE CONTAINED CHLORINATED SOLVENTS AS WELL AS PRODUCTION OF CHEMICALS ADDED TO THE INCINERATION PROCESS IS DISREGARDED.
GRANULAR ACTIVATED CARBON FOR WATER TREATMENT (FROM USA)	SPARREVIK ET AL. (2011)	RNA: HARD COAL AT MINE (1.89 KG) US: ELECTRICITY, HARD COAL, AT POWER PLANT (0.3774 KWH) RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE (0.905 TKM) OCE: TRANSPORT, TRANSOCEANIC FREIGHT SHIP (4.4 TKM) RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE (0.7 TKM) RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE (0.112 TKM) AVOIDED PRODUCTS: DE: HARD COAL SUPPLY MIX (0.526 KG)	THE INPUTS RELATES TO PRODUCTION OF 1 KG OF GAC. THE EMISSIONS FOR THE PRODUCTION STEPS ARE NOT LISTED, BY MAY BE FOUND IN SPARREVIK ET AL. (2011). ALL GAC ASSUMED PRODUCED IN USA AND TRANSPORTED BY FREIGHT SHIP AND LORRY TO DENMARK. AFTER USE THE ACTIVATED CARBON IS TRANSPORTED TO KOMMUNEKEMI IN NYBORG AND INCINERATED WITH ENERGY PRODUCTION. THEREFORE A CREDIT IS GIVEN AS THE GAC REPLACES THE USE OF HARD COAL, HOWEVER DUE THE A LOWER CALORIFIC VALUE AND A LOWER EFFICIENCY THAN IN TRADITIONAL ELECTRICITY PRODUCTION, 1 KG OF SPENT GAC IS ASSUMED TO REPLACE 0.526 KG OF HARD COAL. THE CALORIFIC VALUE OF THE CONTAINED CHLORINATED SOLVENTS AS WELL AS PRODUCTION OF CHEMICALS ADDED TO THE INCINERATION PROCESS IS DISREGARDED.
GRANULAR ACTIVATED CARBON FROM COCONUT SHELLS (BIOBASED)	SPARREVIK ET AL. (2011)	CN: ELECTRICITY, HARD COAL, AT POWER PLANT (0.924 KWH) RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE (0.905 TKM) GLO: DIESEL BURNED IN BUILDING MACHINE (2.2 MJ) OCE: TRANSPORT, TRANSOCEANIC FREIGHT SHIP (19.2 TKM) RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE (0.7 TKM) RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE (0.112 TKM) AVOIDED PRODUCTS: DE: HARD COAL SUPPLY MIX (0.526 KG)	THE INPUTS RELATES TO PRODUCTION OF 1 KG OF BIOMASS GAC. THE COCONUT SHELLS ARE ASSUMED TO BE A WASTE PRODUCT AND NO EMISSIONS ARE ASSOCIATED WITH THEIR PRODUCTION. ALL GAC ASSUMED PRODUCED IN CHINA AND TRANSPORTED BY FREIGHT SHIP AND LORRY TO DENMARK. AFTER USE THE ACTIVATED CARBON IS TRANSPORTED TO KOMMUNEKEMI IN NYBORG AND INCINERATED WITH ENERGY PRODUCTION. THEREFORE A CREDIT IS GIVEN AS THE GAC REPLACES THE USE OF HARD COAL, HOWEVER DUE THE A LOWER CALORIFIC VALUE AND A LOWER EFFICIENCY THAN IN TRADITIONAL ELECTRICITY PRODUCTION, 1 KG OF SPENT GAC IS ASSUMED TO REPLACE 0.526 KG OF HARD COAL. THE CALORIFIC VALUE OF THE CONTAINED CHLORINATED SOLVENTS AS

OVERVIEW OF APPLIED LCA DATA FOR PRODUCTION OF GROUT, CONCRETE, SAND, ACTIVATED CARBON AND LCA DATA FOR TRANSPORTATION AND CONSTRUCTION MACHINES			
PROCESS	DATA SOURCE	PROCESS NAME (S) IN DATABASE	COMMENT/ADJUSTMENT
			WELL AS PRODUCTION OF CHEMICALS ADDED TO THE INCINERATION PROCESS IS DISREGARDED.
TRANSPORTATION			
PERSON TRANSPORT	ECOINVENT	RER: TRANSPORT, PASSENGER CAR, PETROL, FLEET AVERAGE 2010	
DAY TO DAY DELIVERY BY VAN	ECOINVENT	RER: TRANSPORT, VAN < 3.5T, FLEET AVERAGE	
TRUCK TRANSPORT	ECOINVENT	RER: TRANSPORT, LORRY > 16T, FLEET AVERAGE	
CONSTRUCTION MACHINES			
EMISSIONS FROM DIFFERENT MACHINES: MINI RIG, DRILL RIG, EXCAVATOR, GRADER, COMPRESSOR ETC	ELCD	GLO: EXCAVATOR, TECHNOLOGY MIX, 100 KW, CONSTRUCTION. LUBRICATING OIL ADDED.	AS A SIMPLIFICATION, ALL MACHINE TYPES ARE REPRESENTED BY THE EXCAVATOR.
DIESEL PRODUCTION FOR FUELING OF MACHINES	ECOINVENT	RER: DIESEL, LOW-SULPHUR, AT REGIONAL STORAGE	

ABBREVIATIONS: CH: SWITZERLAND, CN: CHINA, DK: DENMARK, DE: GERMANY, GLO: GLOBAL, OCE: OCEANIC, RER: EUROPE, RNA: NORTH AMERICA, SE: SWEDEN, UCTE: UNION FOR THE COORDINATION OF TRANSMISSION OF ELECTRICITY, US: USA, ZA: SOUTH AFRICA

C-8.1. Referenced literature:

BASF (2008). Skumbeton. Juni 2008. Udgivelse fremsendt af Unicon A/S.

Frees, N (2002), Miljømæssige fordele og ulemper ved genvinding af plast. Eksempler med udgangspunkt i konkrete produkter. Miljøprojekt nr. 657 2002, Miljøstyrelsen, København.

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischer, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., and Wernet, G. 2007. Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.

Sparrevik, M., Saloranta, T., Cornelissen, G., Eek, E., Fet, A.M., Breedveld, G.D., and Linkov, I. 2011. Use of Life Cycle Assessments to Evaluate the Environmental Footprint of Contaminated Sediment Remediation. Environmental Science & Technology 45, 4235-4241.

BILAG D Life cycle assessment and environmental optimization of Steam Enhanced Extraction - SEE

Gitte Lemming, DTU

Table of contents

D-1 Introduction.....	108
D-2 Life cycle inventory	108
D-3 Life cycle impact assessment methods	109
D-4 Results of the SEE baseline scenario	109
D-4.1. On-site energy use.....	112
D-4.2. Above grade materials	113
D-4.3. Well field materials	114
D-4.4. Transportation	115
D-4.5. Toxic versus non-toxic impacts	116
D-5 Environmental optimization of SEE.....	116
D-5.1. Boiler optimization	117
D-5.2. Above grade materials	118
D-5.3. Steel versus fiberglass injection pipes.....	118
D-6 Conclusions and recommendations	119
D-7 References	120
D-8 Appendices.....	122
D-8.1. Referenced literature:	126

D-1 Introduction

This note presents the results of the conducted life cycle assessments (LCAs) of remediation with Steam Enhanced Extraction (SEE) at two case sites. Initially the results of the baseline scenario are presented for each case. The baseline scenario represents the currently used practice for SEE. Based on this, the main contributing parts of the remediation system contributing to environmental impacts and resource depletion are identified. Next, alternative materials and heating strategies are suggested in order to reduce the environmental impacts associated with the remediation method and these possible changes are tested using LCA.

D-2 Life cycle inventory

An inventory of materials and energy use was made for the remediation with SEE for a smaller site (180 m²) and a larger site (1,300 m²) and can be seen in Appendix 1.

LCA “cradle-to-gate” data was mainly taken from the Ecoinvent database (Frischknecht et al. 2007) with a few additional data from the ELCD database (EC, 2009). An end-of-life phase was added to all materials based on the expected fate. An overview of the applied LCA data and adjustments made is seen in Appendix 2.

D-3 Life cycle impact assessment methods

The EDIP2003 methodology (Hauschild and Potting, 2005) was chosen as the impact assessment method for all non-toxic impacts (global warming, ozone formation, eutrophication, acidification) except respiratory impacts from particulate matter (respiratory inorganics), which was quantified using the method from Humbert et al. (2009). Toxic impacts (ecotoxicity, human toxicity cancer, human toxicity non-cancer) were estimated using the USEtox™ method (Rosenbaum et al. 2008). All environmental impacts are normalized to person equivalents (PE) by dividing with the annual impact from an average European² using 2004 normalization references (Laurent et al, 2011a; Laurent et al. 2011b). The EDIP97 methodology (Wenzel et al. 1997) was applied for depletion of resources (energy resources and scarce metals). All resource consumption results are converted to person reserves (PR), i.e. normalized to person equivalents and weighted by the reciprocal supply horizon for each resource. The applied normalization references and weighting factors for resource use are based on 2004 data (LCA center, 2005).

D-4 Results of the SEE baseline scenario

The LCA results for the baseline scenario of remediation with SEE have been divided into a number of subcategories and is shown in Figure D-1 (environmental impacts) and Figure D-2 (resource depletion). The contents of the various subcategories (transportation, materials (well field), materials (above grade), machines and energy use) are described in Table D-1.

Figure D-1 shows that the on-site energy use accounts for 63-85% of the non-toxic environmental impacts at the large site and 54-82% at the small site. After energy use, above grade materials are the second highest contributor to the non-toxic impacts (12-30% of impacts). The contribution from machines is especially significant at the small site, where this subcategory on average contributes 9% of the non-toxic impacts, whereas it only contributes 3% at the large site. The well field materials contribute 1-4% of the non-toxic environmental impacts and transportation contributes only 0.3-3%.

Above grade materials and well field materials are the largest contributors to the toxic impact categories (human toxicity cancer, human toxicity non-cancer and ecotoxicity). This is due to the use of steel and stainless steel, which give rise to high toxic emissions during raw material abstraction and steel manufacturing.

The main resource consumption related to SEE is natural gas for the steam boiler followed by nickel and chromium (see Figure D-2) for the above grade and well field installations.

² For global impacts (global warming) and resource consumption the normalization reference is based on an average world citizen. For all other impacts (local and regional) the normalization reference is based on an average European.

TABLE D-1
DESCRIPTION OF THE CONTENTS OF EACH SUBCATEGORY IN FIGURE D-1 AND D-2. A MORE DETAILED DESCRIPTION IS GIVEN IN APPENDIX 2.

SUBCATEGORY	CONTENT
ON-SITE ENERGY	INCLUDES ENERGY USE FOR THE NATURAL GAS HEAT BOILER AND THE ELECTRICITY USE FOR THE TREATMENT SYSTEM
MATERIALS (ABOVE GRADE)	INCLUDES MATERIALS AND EQUIPMENT USED ABOVE GROUND: VAPOR CAP, ACTIVATED CARBON, HEAT EXCHANGERS, COOLERS, TANKS, ETC., AND THE TRANSPORTATION FROM THE PRODUCER TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK
MATERIALS (WELL FIELD)	INCLUDES MATERIALS AND EQUIPMENT FOR THE WELL FIELD: SAND, GROUT, STEAM WELLS EXTRACTION WELLS, MANIFOLDS, COPPER WIRES, ETC., AND THE TRANSPORTATION FROM THE PRODUCER TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK
MACHINES	INCLUDES FUEL USE AND EMISSIONS FROM MACHINES USED ON SITE: DRILL RIGS, GRADERS, COMPRESSORS, GENERATORS, FORKLIFTS, ETC.
TRANSPORTATION	TRANSPORTATION (90 KM RETURN TRIP) OF MATERIALS, EQUIPMENT AND PERSONNEL TO SITE.

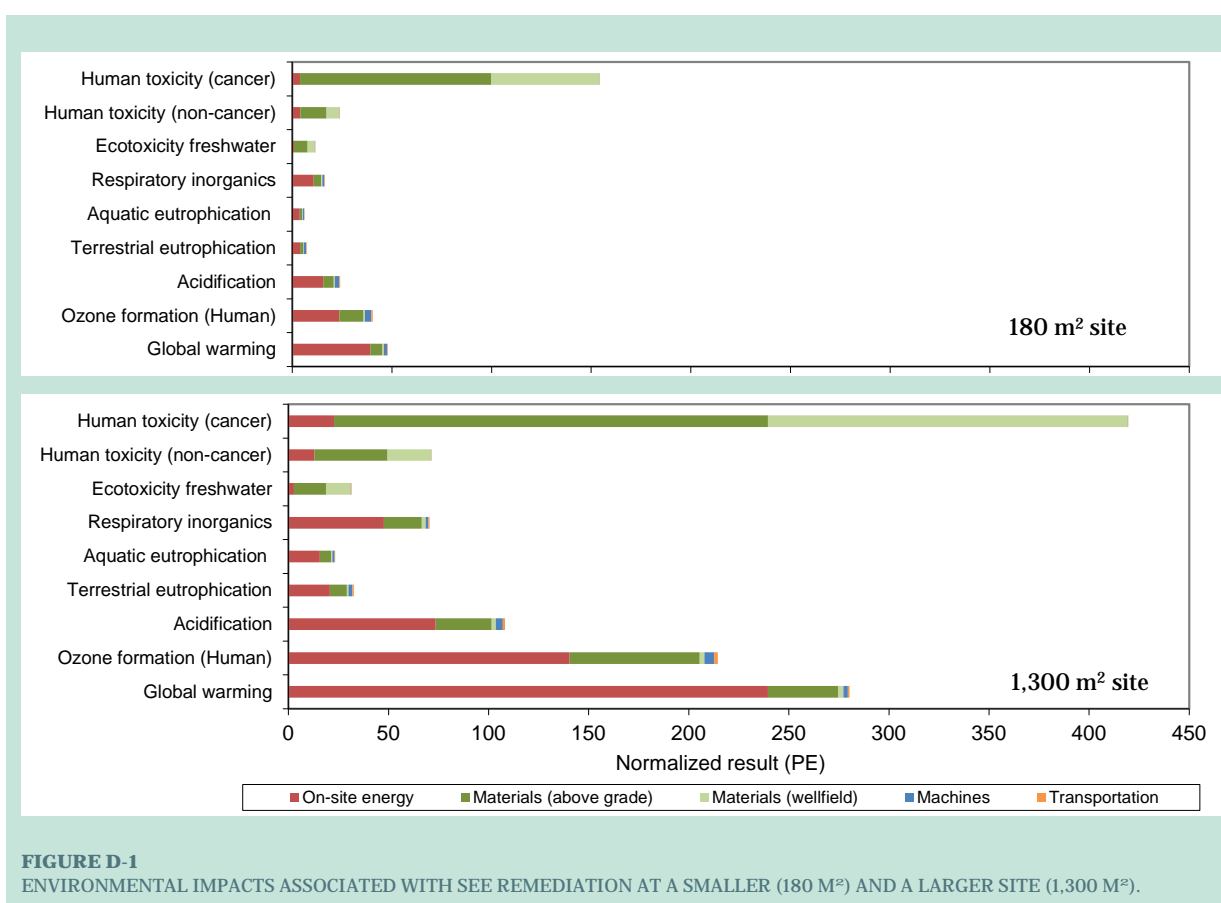


FIGURE D-1
ENVIRONMENTAL IMPACTS ASSOCIATED WITH SEE REMEDIATION AT A SMALLER (180 M²) AND A LARGER SITE (1,300 M²).

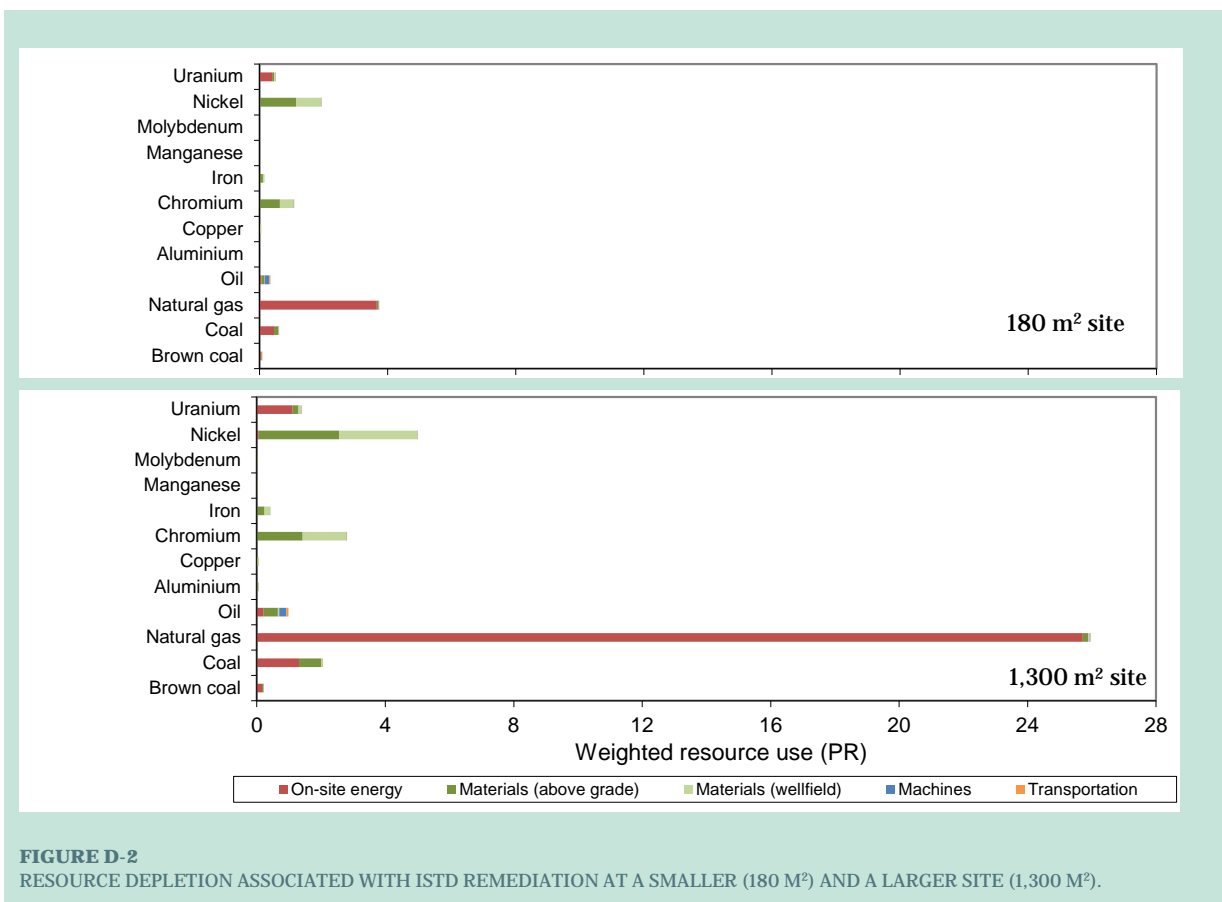


FIGURE D-2
 RESOURCE DEPLETION ASSOCIATED WITH ISTD REMEDIATION AT A SMALLER (180 M²) AND A LARGER SITE (1,300 M²).

In Figure D-3, the results are given as environmental impacts in PE per m³ of soil treated at the two sites. The treated soil volume at the large site (11,500 m³) is almost 10 times larger than at the small site (1,200 m³).

The comparison in Figure D-3 show that similar to ISTD (see BILAG C) SEE becomes more environmentally efficient for a larger site, since the environmental impacts per unit volume of treated soil are halved compared to the smaller site. This is especially due to a larger heat loss for the small site compared to the large site, but also due to a larger relative amount of installations as injection wells are placed more closely at the small site. Likewise, the resource depletion for the large site per unit volume of treated soil is also halved compared to the small site (results not shown).

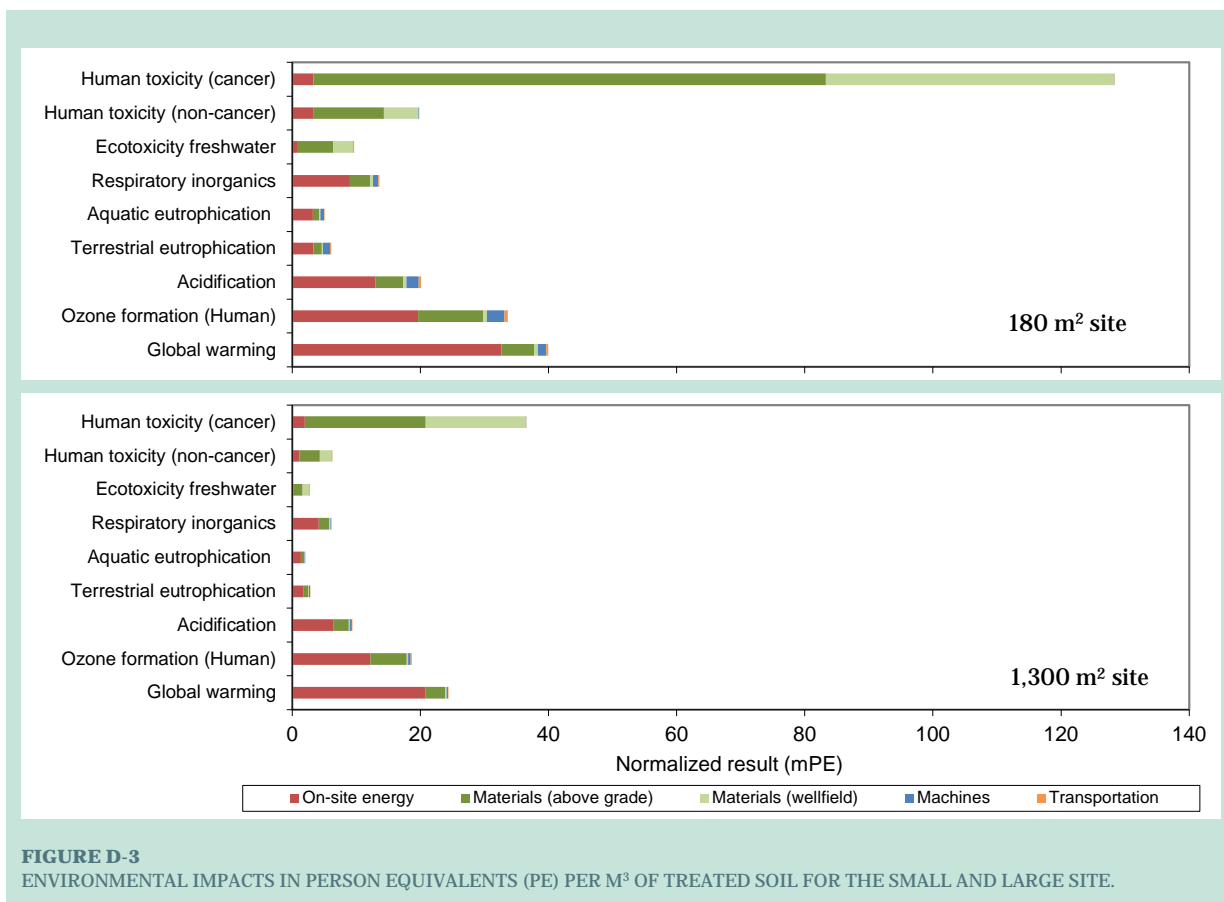


FIGURE D-3
ENVIRONMENTAL IMPACTS IN PERSON EQUIVALENTS (PE) PER M³ OF TREATED SOIL FOR THE SMALL AND LARGE SITE.

D-4.1. On-site energy use

It is clear from the results in Figure D-1 and D-2 that on-site energy consumption is the main cause of non-toxic environmental impacts. On-site energy consumption is also a main contributor to depletion of energy resources, especially natural gas which is used for the steam boilers, but also coal, uranium and brown coal. As shown in Figure D-4, the steam generation at the large site is responsible for the largest part of the impacts from on-site energy use (60-88% of the non-toxic impacts), whereas the treatment system is responsible for the remaining 40-12% of the impacts. For the small site, the treatment system is responsible for a larger part of the total impacts related to on-site energy use and the impacts associated with the steam only constitutes 32-73%.

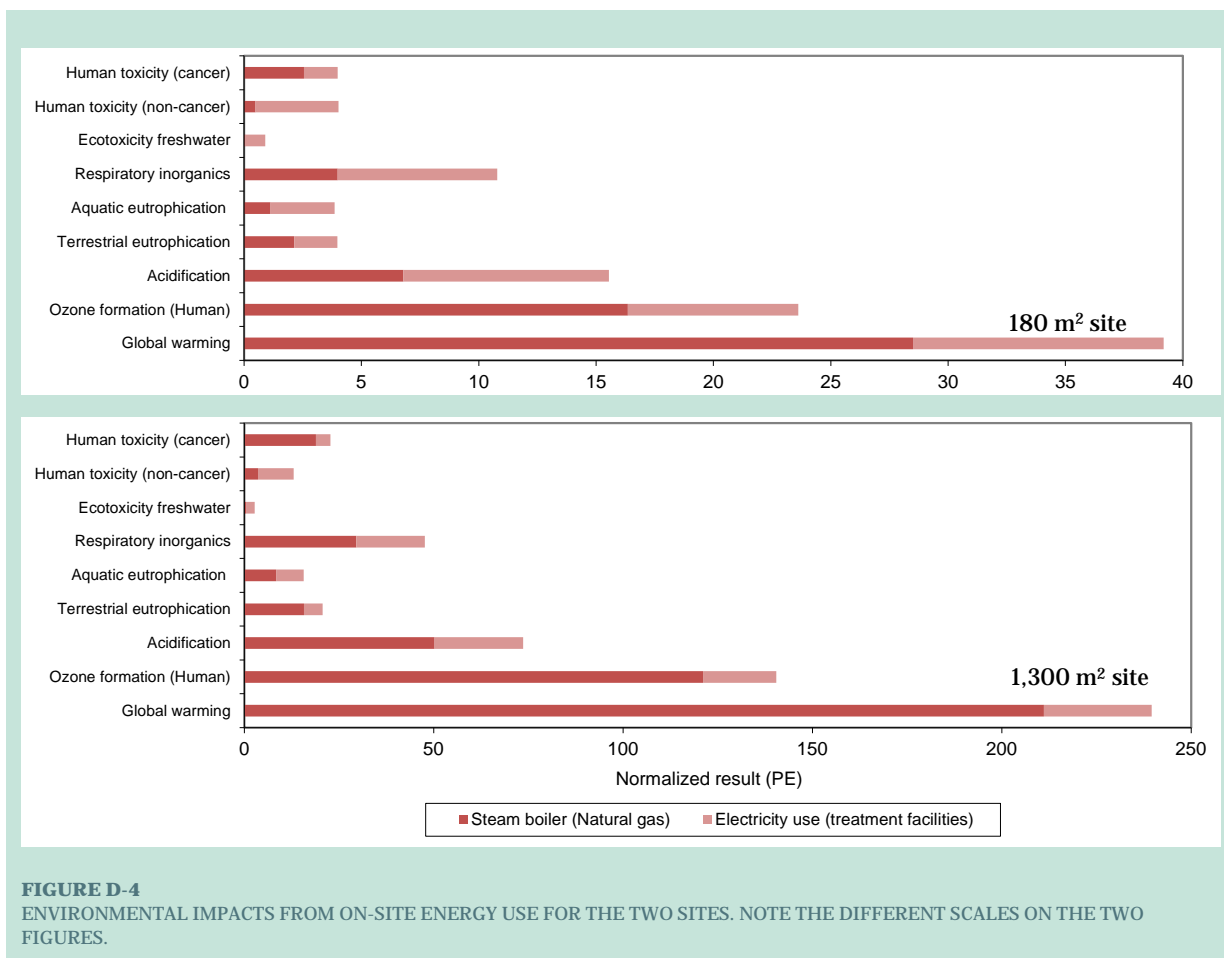
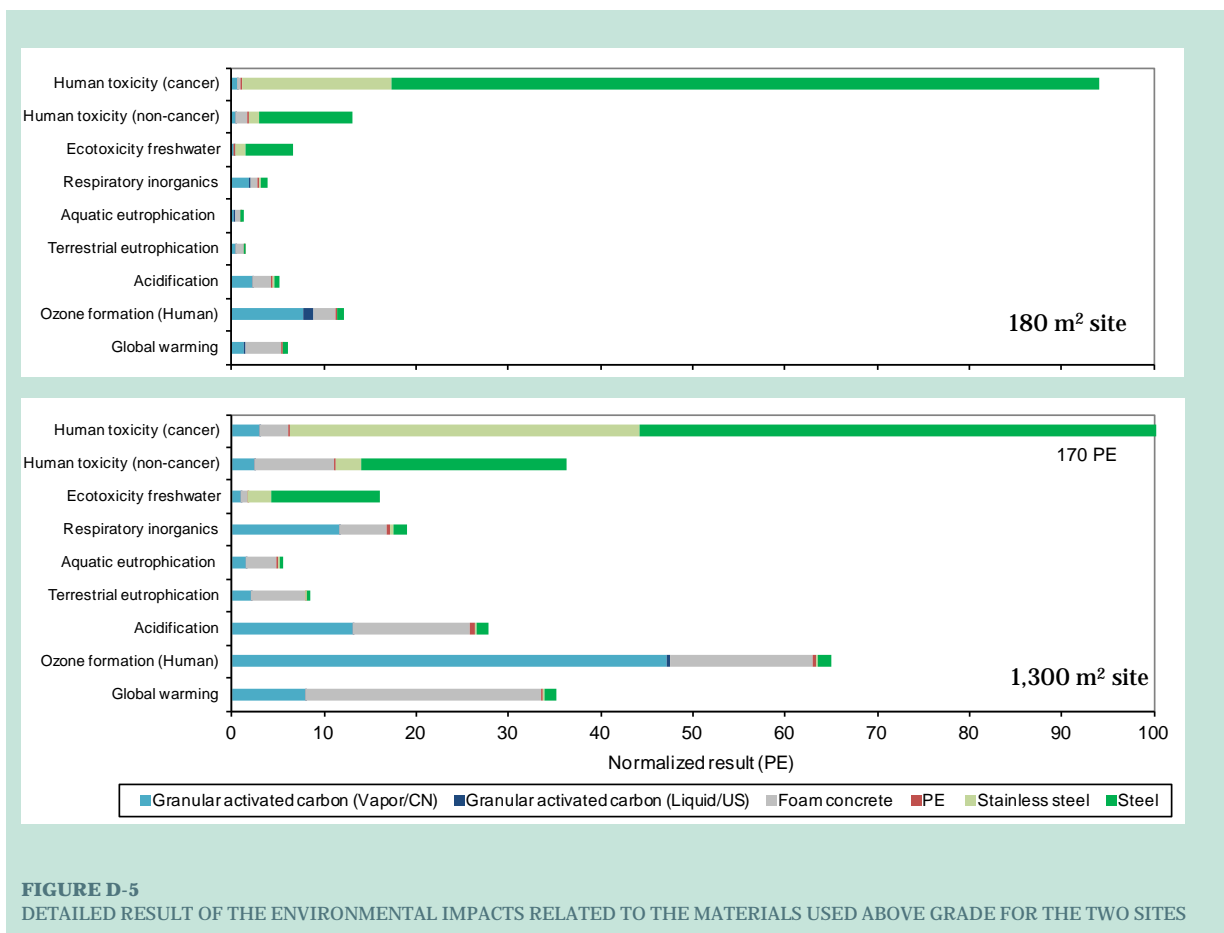


FIGURE D-4
ENVIRONMENTAL IMPACTS FROM ON-SITE ENERGY USE FOR THE TWO SITES. NOTE THE DIFFERENT SCALES ON THE TWO FIGURES.

D-4.2. Above grade materials

After electricity consumption, the materials used above ground are the major contributor to non-toxic impacts. Furthermore, above grade impacts are the largest contributor to toxic impacts. Figure D-5 shows a more detailed result of the impacts associated with the above grade materials for both sites. The main causes of the non-toxic impacts are activated carbon used for vapor treatment and foam concrete used for the vapor cap. The activated carbon especially causes high levels of ozone formation, acidification and respiratory impacts, whereas the foam concrete has a high impact on global warming, eutrophication and acidification.

Steels which are used for the steam boiler, containers and storage tanks are the main source of high toxic impacts for this subcategory. The use of stainless steel also results in a high depletion of the alloying metals nickel and chromium as seen in Figure D-2.



D-4.3. Well field materials

The well field materials are the third most contributing subcategory to non-toxic impacts, however the contribution to the total impacts is relatively low. Furthermore, the well field materials are the second largest to ecotoxic and human toxic impacts. In Figure D-6, a detailed result of the impacts associated with the well field is shown for the larger site. It shows that the toxic impacts are associated with the use of stainless steels and steel. This is due to toxic releases to the environment during the mining, processing and manufacturing of steel products. The use of stainless steel for well installations results in a high depletion of nickel and chromium.

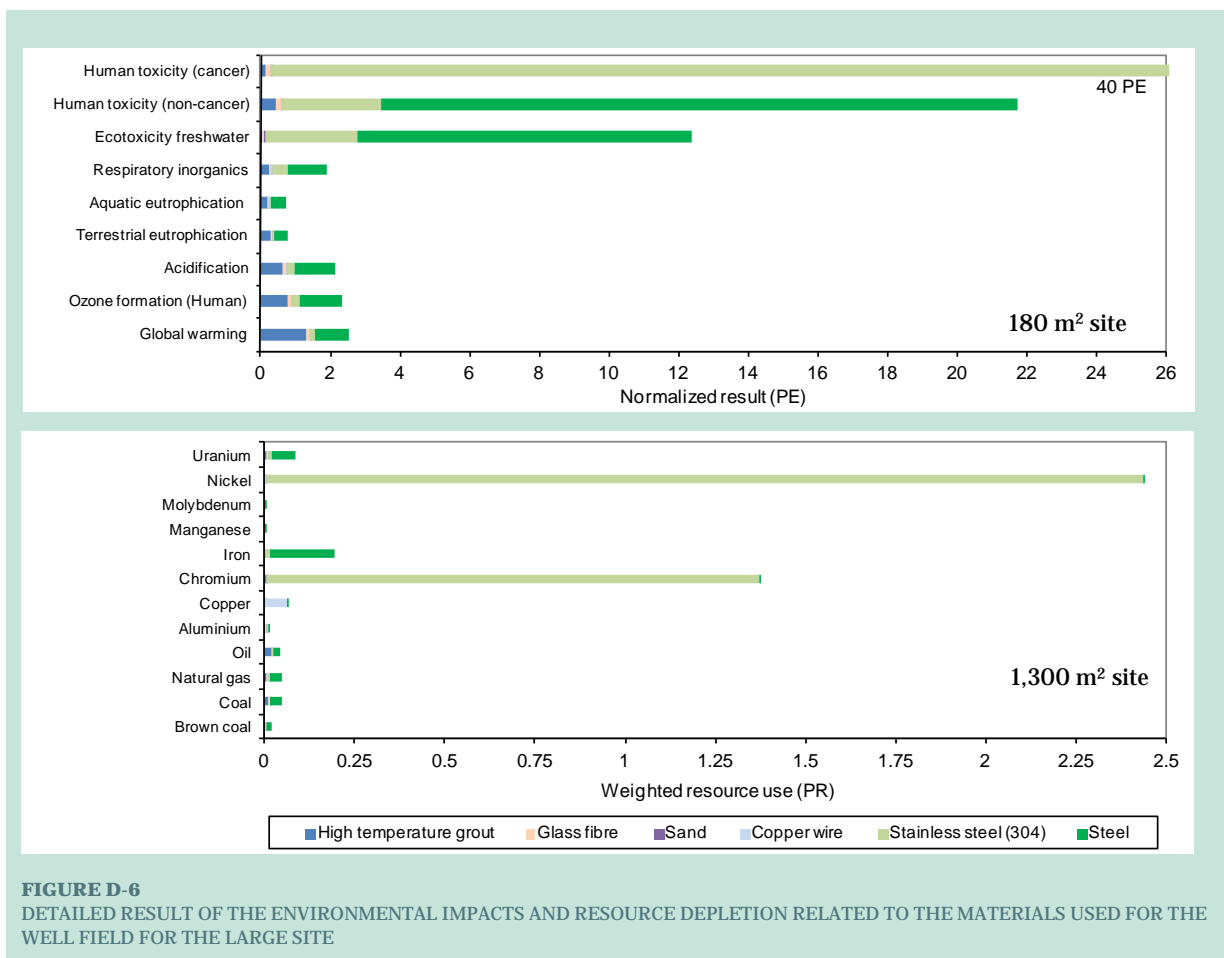


FIGURE D-6
 DETAILED RESULT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS AND RESOURCE DEPLETION RELATED TO THE MATERIALS USED FOR THE WELL FIELD FOR THE LARGE SITE

D-4.4. Transportation

As seen in Figure D-1, the impacts associated with transportation of materials, equipment and personnel to and from the site are generally relatively low with the chosen distance (90 km return trip). The largest impacts from transport are seen in the categories ozone formation, acidification and oil depletion. Figure D-7 shows the detailed result for transportation at the large site. It shows that the transportation of the above grade materials constitutes the largest parts of the transportation impacts followed by the transportation of personnel to and from the site. The high impact associated with the aboveground materials is due to the fact that the total weight of these materials is much higher than for the well field materials. It should be noted that the “Transportation” subcategory only includes the local transportation from a local supplier/-contractor/consultant to the site. It does not include the transportation from the producer to the local supplier. Steel, plastics, activated carbon, etc. are produced outside Denmark and the transportation of these goods from the producer to the local supplier in Denmark is included in the inventory for each specific material and is therefore included in the material categories. The applied transportation distances can be seen in Appendix 2. As an example, steel and stainless steel is assumed to be transported 700 km from the producer to the local supplier in Denmark. The transportation to Denmark is responsible for 2 to 20% of the total impacts depending on which impact is studied. The highest contributions are seen in the impacts eutrophication and ozone formation.

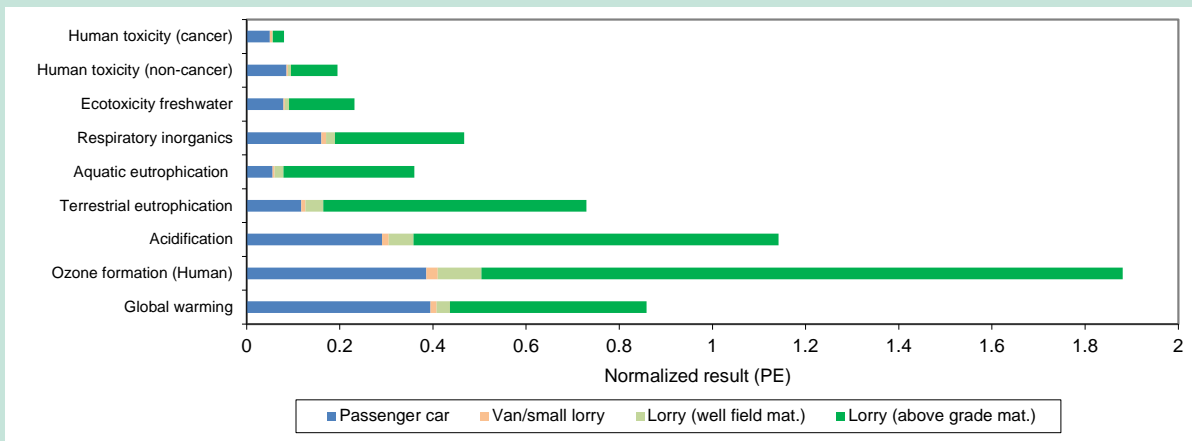


FIGURE D-7
ENVIRONMENTAL IMPACTS FROM TRANSPORTATION (LARGE SITE)

D-4.5. Toxic versus non-toxic impacts

The results of the life cycle assessments generally show that the toxic impacts are higher than the non-toxic impacts in terms of PE. When comparing toxic and non-toxic impacts, it should however be kept in mind that the impact assessment of toxic impacts is associated with a much higher uncertainty due to the large number of chemicals included in the assessment, but also in the actual characterization factors describing the relative toxicity between different toxic substances. In this analysis, the toxic impacts are mainly ascribed to releases of heavy metals during production of steel and stainless steel. However, whereas the characterization factors for organic contaminants are well developed in LCA, the metal characterization factors are still interim and will be updated in the near future. Today, the characterization of metals is done by considering the total concentration of metals emitted. However improved characterization factors are underway that consider the speciation and the biological available fraction of the metals. This will probably lead to lower toxicity related to metal emission. Thus for now, the toxic impacts can be held relative to each other, but the magnitude should not be compared directly to the non-toxic impacts.

D-5 Environmental optimization of SEE

The life cycle assessment results for SEE showed that on-site energy consumption is the main driver of non-toxic environmental impacts. This is followed by the use of activated carbon for vapor treatment and the use of foam concrete for the vapor cap.

The toxic impacts mainly stem from the use of steel and stainless steel, which especially is consumed in a large amount in the well field installations.

Depletion of energy resources is also mainly due to the on-site electricity use, whereas the use of scarce metals (especially nickel, chromium and copper) primarily stems from the stainless steel used in the well field.

As shown in Figure C-10, it is possible to reduce the impacts related to the above grade materials significantly by changing the construction of the vapor cap and using biobased activated carbon. In the following, we study the effect of changing to a condensing heat boiler as well as using a light fuel oil powered heat boiler.

D-5.1. Boiler optimization

Figure D-8 shows a comparison of the environmental impacts and resource use associated with producing 1 MJ of heat with different boiler types for the generation of steam. In the baseline scenario, a non-condensing natural gas-fired boiler is assumed. By changing to a condensing heat boiler it is possible to reduce the use of natural gas by 7%. As a consequence, the environmental impacts associated with using the boiler also drops by an average 7%.

At some sites, natural gas is not available and a light fuel oil (LFO) boiler is used instead. Changing from a non-condensing natural gas-fired boiler to a non-condensing LFO-fired boiler causes an increase of all environmental impacts except ozone formation by 22-200%. The environmental impacts from the condensing LFO boiler are on average 6% lower than a non-condensing LFO boiler.

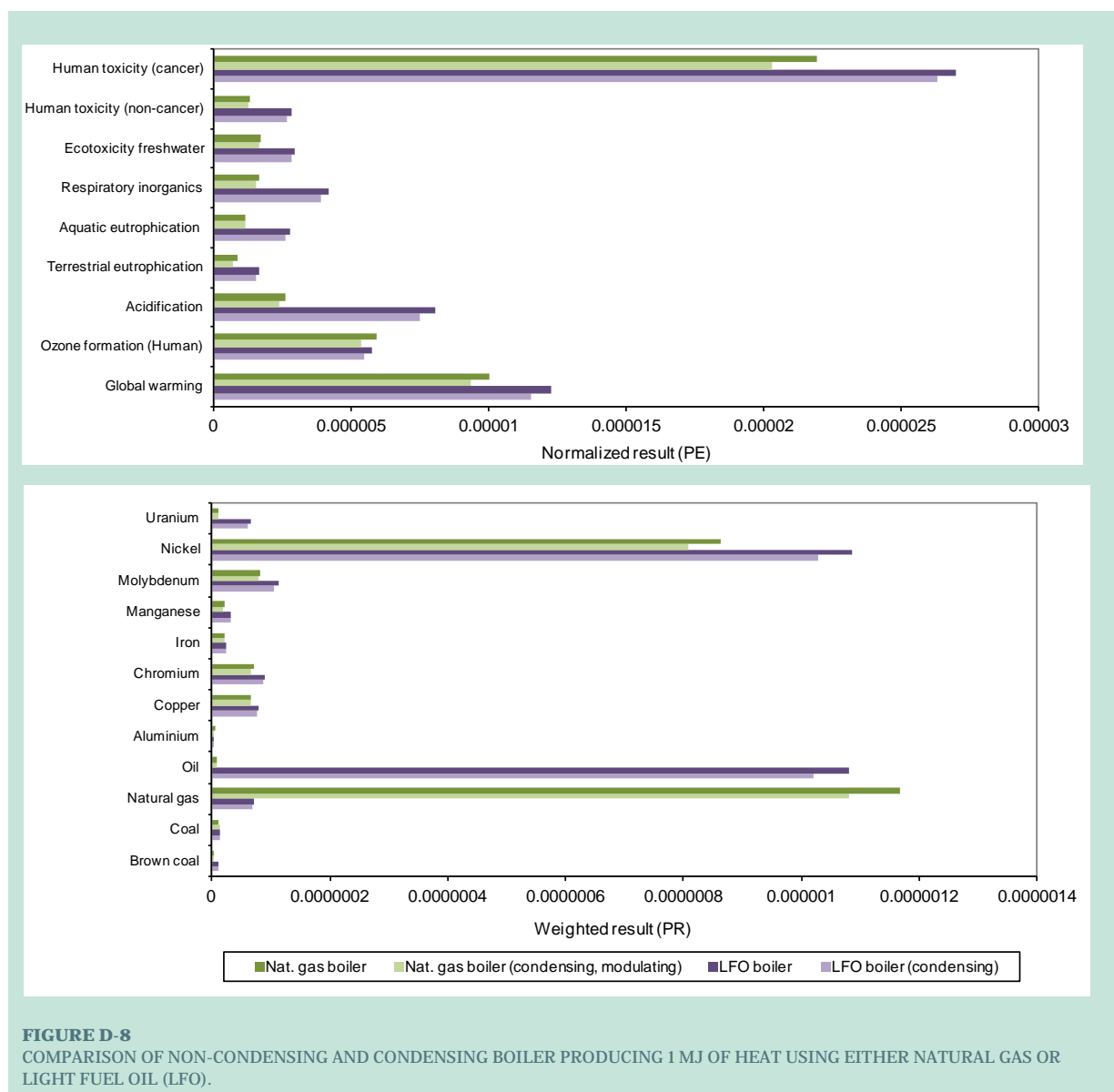


FIGURE D-8
 COMPARISON OF NON-CONDENSING AND CONDENSING BOILER PRODUCING 1 MJ OF HEAT USING EITHER NATURAL GAS OR LIGHT FUEL OIL (LFO).

D-5.2. Above grade materials

In analogue to the findings for ISTD (BILAG C), the environmental impacts of the above grade materials can be reduced significantly by:

- Changing the vapor cap to a concrete sandwich with seashells as the insulating material
- Changing to bio-based activated carbon for vapor treatment.

Refer to BILAG C for more details.

D-5.3. Steel versus fiberglass injection pipes

The large amounts of steel used in SEE remediation contributes significantly to human- and ecotoxic impacts due to emissions related to steel production. Furthermore, it also contributes significantly to iron depletion. The steel used for injection pipes for steam injection to the subsurface (part of the well field material category) can potentially be substituted with fiberglass. As fiberglass has a lower density than steel this can lead to material savings. An LCA comparing the use of steel pipes and fiberglass pipes for the large site was conducted in order to test if a switch to fiberglass pipes also results in reduction of environmental impacts and resource depletion. The material input for the two pipe types is seen in Table D-2. The end-of-life assumptions of the materials are as generally specified, that 80% of the steel and stainless steel is assumed to be used in secondary steel production, whereas 80% of the fiberglass is assumed to be incinerated in a combined heat and power plant, where 3 kg substitutes 1 kg of oil.

TABLE D-2
MATERIAL USE FOR THE TWO TYPES OF INJECTION WELLS FOR THE LARGE SITE

Material	Scenario: Steel pipes	Scenario: Fiberglass pipes
STEEL	4,304 kg	
STAINLESS STEEL	269 kg	
FIBERGLASS		1,400 kg

The result of the comparison is seen in Figure D-9. The primary benefit of using fiberglass pipes instead of steel pipes are the reductions in human and ecotoxic impacts as well as reductions in respiratory impacts and in iron, chromium and nickel and coal consumption. However, at the same time global warming, acidification and natural gas depletion increases.

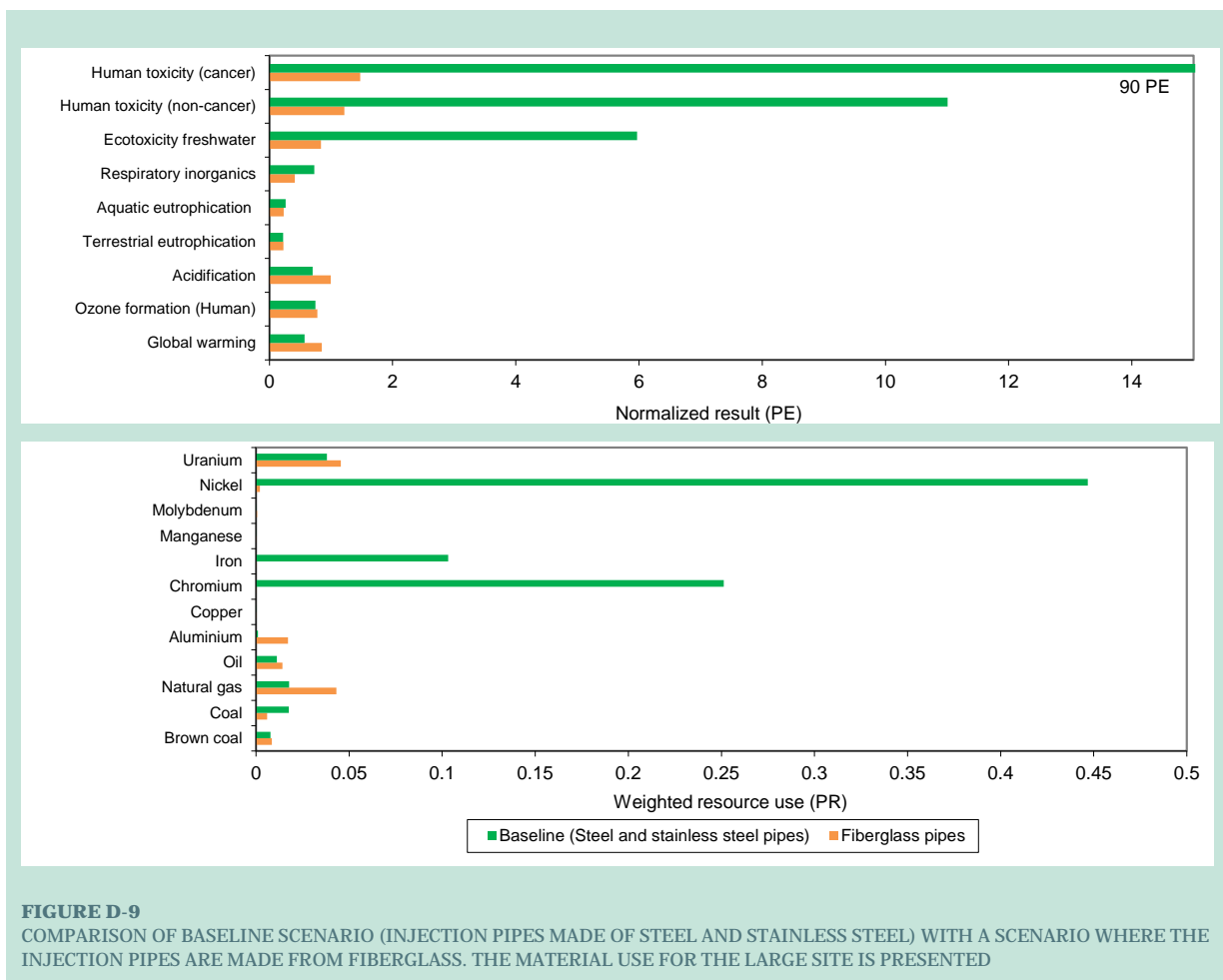


FIGURE D-9
 COMPARISON OF BASELINE SCENARIO (INJECTION PIPES MADE OF STEEL AND STAINLESS STEEL) WITH A SCENARIO WHERE THE INJECTION PIPES ARE MADE FROM FIBERGLASS. THE MATERIAL USE FOR THE LARGE SITE IS PRESENTED

D-6 Conclusions and recommendations

The following improvement options were identified for SEE:

- The use of a condensing steam boiler instead of a non-condensing boiler. This will reduce the environmental impacts and resource use for the steam generation with an average 7%.
- A change from a foam concrete vapor cap to a concrete sandwich vapour cap with sea shells as insulating material. This will reduce the environmental impacts and resource use for the vapour cap with up to 65%.
- Replacement of anthracite-based activated carbon for vapour treatment with bio-based activated carbon made from coconut shells can give large reductions in ozone formation (80%), global warming (60%), respiratory impacts (40%) and coal use.
- A substitution of the steel and stainless steel in the steam injection wells with fiberglass will give reductions of 86-98% in the toxic impacts and eliminate the nickel and chromium use for the injection wells.

Table D-3 below summarises the identified improvement options, the certainty of effect and the combined reduction in environmental impacts and resource depletion on the combined SEE project

for the large site. Furthermore, it shows the distribution of the reductions in environmental impacts and resource depletion between the four improvement options.

TABLE D-3

SUMMARY OF IDENTIFIED IMPROVEMENT INITIATIVES FOR SEE, THE CERTAINTY OF THE IMPROVEMENT AND THE COMBINED REDUCTION POTENTIAL AND DIVISION BETWEEN THE FOUR INITIATIVES.

Improvement initiative	Certainty of effect ¹⁾	Combined reduction potential and division between initiatives
CONDENSING STEAM BOILER	++	<p>ENVIRONMENTAL IMPACTS: 21%</p>
CONCRETE SANDWICH VAPOUR CAP	++	
BIO-BASED ACTIVATED CARBON	+ (DATA QUALITY)	
CHANGE TO FIBERGLASS INJECTION WELLS	+ (FUNCTION/DURABILITY)	<p>RESOURCE DEPLETION: 9%</p>
CONDENSING STEAM BOILER	++	
CONCRETE SANDWICH VAPOUR CAP	++	

¹⁾ ++: High certainty of positive effect of initiative. +: Certainty of positive effect, but magnitude of improvement uncertain

D-7 References

- EC. 2009. European Commission – Joint Research Centre (JRC), European Reference Life Cycle Database (ELCD core database), version II.
<http://lct.jrc.ec.europa.eu/assessment/data>.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., and Wernet, G. 2007. Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.
- Hauschild, M.Z. and Potting, J. 2005. Spatial differentiation in life cycle impact assessment - the EDIP-2003 methodology. Environmental news No. 80 2005, Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment.
- Humbert S., Marshall J., Shaked S., Nishioka Y., Preiss P., Spadaro J., Horvath A., and Jolliet O. 2009. Intake fractions and characterization factors for particulate matter: review and recommendations (in review).
- Laurent, A., Lautier, A., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I., and Hauschild, M.Z. 2011a. Normalization references for Europe and North America for application with USEtox (TM) characterization factors. International Journal of Life Cycle Assessment 16, 728-738.
- Laurent, A., Olsen, S.I., and Hauschild, M.Z. 2011b. Normalization in EDIP97 and EDIP2003: updated European inventory for 2004 and guidance towards a consistent use in practice. The International Journal of Life Cycle Assessment 16, 401-409.

- LCA Center. 2005. List of EDIP factors downloaded from LCA Center Denmark 04-11-2008 at <http://www.lca-center.dk/cms/site.aspx?p=1595>.
- Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Joliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., and Hauschild, M.Z. 2008. USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13, 532-546.
- Sparrevik, M., Saloranta, T., Cornelissen, G., Eek, E., Fet, A.M., Breedveld, G.D., and Linkov, I. 2011. Use of Life Cycle Assessments to Evaluate the Environmental Footprint of Contaminated Sediment Remediation. *Environmental Science & Technology* 45, 4235-4241.
- Wenzel, H., Hauschild, M., and Alting, L. 1997. Environmental assessment of products. - 1: Methodology, tools, and case studies in product development. Chapman & Hall, United Kingdom, 1997, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA. USA.

D-8 Appendices

Appendix 1: Overview of consumption data for the two sites

TRANSPORTATION	Unit	SKULDELEV	REERSLEV
TRAVEL BY CAR	personkm	15,451	20,586
TRAVEL BY AIR	personkm	0	0
SHIPPING BY VAN/SMALL TRUCK (DAY TO DAY DELIVERIES)	kgkm	52,520	68,127
SHIPPING BY TRUCK (ABOVE GRADE MATERIALS)	kgkm	6,029,910	30,719,279
SHIPPING BY TRUCK (WELL FIELD MATERIALS)	kgkm	610,179	2,063,740
SHIPPING BY AIR	kgkm	0	0
SHIPPING BY SHIP	kgkm	0	0
TRAVEL DISTANCE, ROUND TRIP	km	90	90

MATERIALS USAGE	UNIT	SKULDELEV		REERSLEV	
		WELLFIELD	ABOVE GRADE	WELLFIELD	ABOVE GRADE
SAND	kg	2,105		6,804	
HIGH TEMP GROUT	kg	5,775		21,620	
VAPOR CAP CONCRETE	kg		41,600		275,200
VAPOR GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg		2,646		15,984
LIQUID GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg		405		120
CARBON STEEL	kg	1,949	3,893	6,365	9,263
STAINLESS STEEL TYPE 1	kg	377	480	1,175	1,120
COBBER	kg	33		44	
FIBERGLASS	kg	45		129	
PE	kg		835		1208

UTILITY USAGE	UNIT	SKULDELEV	REERSLEV
POWER USAGE, TREATMENT SYSTEM	kWh	136,000	363,000
NATURAL GAS USAGE (HEAT BOILER)	MM BTU1	2,740	20,290
GASOLINE USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	810	1,094
DIESEL USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	3,111	4,760

11 MM BTU = 1E6 BTU

Note that the material usage only includes the fraction of the materials used on this specific project as some components can be used several times. The applied reuse rates are listed below: 100%

means that the material is not recycled, but ascribed 100% to this project. 25% means that the material is used on 4 projects and therefore only 25% is ascribed to this project and so forth.

UNIT AMOUNTS AND REUSE RATES FOR WELL FIELD MATERIALS (REUSE RATES GIVEN AS PERCENT OF MATERIAL ASCRIBED TO THIS PROJECT)						
	NUMBER OF UNITS		MATERIAL	Weight per unit(kg)		% ASCRIBED TO PROJECT
	SMALL SITE	LARGE SITE		SMALL SITE	LARGE SITE	
STEAM INJECTION WELLS	18	52	CARBON STEEL (HEATER CAN)	58.2	82.8	100
			STAINLESS STEEL TYPE 1 (LINER)	5.2	5.2	100
			SAND	40.8	40.8	100
			HIGH TEMP. GROUT	230	347.4	100
MULTIPHASE EXTRACTION WELL, PUMPING	6	13	SAND	201	322	100
			HIGH TEMP. GROUT	89	89	100
			CARBON STEEL	19.6	19.6	100
			STAINLESS STEEL	32.6	49.2	100
TEMPERATURE MONITORING HOLES	20	30	HIGH TEMP. GROUT	53.6	78.3	100
			CARBON STEEL	28.4	40.4	100
PRESSURE MONIT. WELLS AND AIR INLET WELLS	5	10	SAND	33.4	50.4	100
			HIGH TEMP. GROUT	5.0	5.0	100
			CARBON STEEL	2.2	2.2	100
			STAINLESS STEEL	17.6	26.6	100
WATER SYSTEM MANIFOLD	1	1	CARBON STEEL	331	815	30
MAIN MANIFOLD, FIBERGLASS, 4"	1	1	FIBERGLASS	149	431	30
STEAM MANIFOLD, 3"	1	1	CARBON STEEL	568	2449	50
PUMPS	6	13	CARBON STEEL	17.6	25.2	100
	Length (m) Small site	Length (m) Large site	Material	Weight per unit length (kg/m)		
CABLE	91.5	122	COPPER	1.45		25

UNIT AMOUNTS AND REUSE RATES FOR ABOVE GRADE MATERIALS (REUSE RATES GIVEN AS PERCENT OF MATERIAL ASCRIBED TO THIS PROJECT)							
EQUIPMENT FOR THE ABOVE GRADE TREATMENT SYSTEM							
VAPOR TREATMENT SYSTEM: (AMOUNTS AND REUSE RATES EQUAL TO ISTD, SEE BILAG C)							
WATER TREATMENT SYSTEM: (REUSE RATES EQUAL TO ISTD, AMOUNTS MULTIPLIED BY A SCALING FACTOR DUE TO LARGER WATER QUANTITIES IN SEE)							
		LARGE SITE	SMALL SITE				
SCALING FACTOR (BASED ON ISTD AMOUNTS)		5	1.5				
CONTAINERS:(AMOUNTS AND REUSE RATES EQUAL TO ISTD)							
OFFICE CONTAINER	CONTAINER WITH CONTROL PC	CONTAINER	CARBON STEEL	825	825	25%	
WORKSHED CONTAINER	CONTAINER WITH TOOLS ETC.	CONTAINER	CARBON STEEL	2,400	2,400	25%	
ELECTRICAL CONTROLLER	CONTAINER WITH ELECTRICAL INPUT CONTROLS	CONTAINER	CARBON STEEL	4,800	4,800	25%	
SPECIAL EQUIPMENT FOR SEE							
	DESCRIPTION	NUMBER OF UNITS		MATERIAL	Weight per unit (kg)		% ASCRIBED TO PROJECT
		SMALL SITE	LARGE SITE		LARGE SITE	SMALL SITE	
HURST BOILER	STEAM GENERATOR	1	1	CARBON STEEL	9797	2951	15%
WATER SOFTENER SYSTEM		2	2	STAINLESS STEEL	116	116	25%

Appendix 2: Overview of Categories, assumptions and LCA data

OVERVIEW OF INCLUDED CONTENT IN EACH CATEGORY AND ASSUMPTIONS MADE
TRANSPORTATION
INCLUDES: TRANSPORT OF EQUIPMENT, PERSONNEL AND DAY-TODAY DELIVERIES IN DK FROM LOCAL SUPPLIER TO SITE (90 KM RETURN). HOWEVER FOR HEATING ELEMENTS TRANSPORT IS FROM THE PRODUCER IN THE US.
ASSUMPTIONS: PERSON TRANSPORT: ALL VEHICLES ASSUMED PETROL FUELLED. VAN TRANSPORT: ASSUMED 5 KG LOAD IN AVERAGE. LARGE TRUCK: FOR WELL MATERIALS IT IS ASSUMED THAT GRAVEL AND GROUT STAY AT THE SITE, AND IS THUS TRANSPORTED ONLY ONE WAY.
MATERIALS (WELL FIELD)
INCLUDES: PRODUCTION AND END-OF-LIFE OF MATERIALS USED FOR THE WELL FIELD (STEAM INJECTION WELLS, SAND AND GROUT, COPPER WIRES) AND THE TRANSPORTATION FROM EXTRACTION/PRODUCTION SITE TO LOCAL SUPPLIER IN DENMARK. STEEL, FIBERGLASS AND COPPER IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN EUROPE AND TRANSPORTED A DISTANCE OF 700 KM. SAND, CONCRETE AND GROUT IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN DENMARK. CEMENT INPUT TO GROUT AND FOAM CONCRETE IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN AALBORG, DENMARK, AND TRANSPORTED 235 KM TO COPENHAGEN BY SHIP. SAND IS ASSUMED TO BE TRANSPORTED 50 KM FROM EXTRACTION SITE TO LOCAL SUPPLIER.
ASSUMPTIONS: HIGH TEMPERATURE GROUT COMPOSITION: (0.53 KG CEMENT, 0.19 KG SILICA FLOUR, 0.29 KG WATER) PER KG OF GROUT. CARBON STEEL: UNALLOYED STEEL. ASSUMED 20% PRIMARY STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION STAINLESS STEEL TYPE1: ASSUMED 20% PRIMARY STAINLESS STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION FIBERGLASS: 80% IS ASSUMED COLLECTED, SHREDDED AND INCINERATED IN A COMBINED HEAT AND POWER PLANT COPPER: ASSUMED 5% PRIMARY COPPER AND 95% SECONDARY COPPER. DIRECT RECYCLING RATES FOR WELL FIELD MATERIALS: SEE APPENDIX 1
MATERIALS (ABOVE GRADE)
INCLUDES: PRODUCTION AND END-OF-LIFE OF MATERIALS USED ABOVE GROUND (ACTIVATED CARBON, CONCRETE VAPOR CAP, COOLERS, HEAT EXCHANGER, CONTAINERS ETC) AND THE TRANSPORTATION FROM EXTRACTION/PRODUCTION SITE TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK IS INCLUDED. STEEL AND POLYETHYLENE (PE) IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN EUROPE AND TRANSPORTED 700 KM TO DENMARK BY TRUCK. FOAM CONCRETE IS PRODUCED IN DENMARK. CEMENT INPUT TO FOAM CONCRETE IS ASSUMED PRODUCED IN AALBORG, DENMARK AND TRANSPORTED 235 KM TO COPENHAGEN BY SHIP. ACTIVATED CARBON INCLUDES TRANSPORT INTERNALLY IN CHINA (905 KM BY TRUCK), TRANSOCEANIC FREIGHT SHIP (19.200 KM) AND TRANSPORT IN EUROPE (700 KM BY TRUCK)
ASSUMPTIONS: VAPOR GRANULAR ACTIVATED CARBON (GAC): PRODUCED FROM HARD COAL IN CHINA (INFO FROM SUPPLIER). THE PRODUCTION IS MODELLED USING DATA FROM SPARREVIK (2011). TRANSPORT TO EUROPEAN SUPPLIER AND TO DENMARK ADDED AS DESCRIBED ABOVE. BY END-OF-LIFE, THE GAC IS TRANSPORTED TO NYBORG (112 KM) AND INCINERATED AT A SPECIALIZED HAZARDOUS WASTE PLANT WITH ENERGY RECOVERY. LIQUID GRANULAR ACTIVATED CARBON (GAC): PRODUCED FROM HARD COAL IN THE US (INFO FROM SUPPLIER). THE PRODUCTION IS MODELLED USING DATA FROM SPARREVIK (2011). TRANSPORT TO EUROPEAN SUPPLIER AND TO DENMARK ADDED AS DESCRIBED ABOVE. BY END-OF-LIFE, THE GAC IS TRANSPORTED TO NYBORG (112 KM) AND INCINERATED AT A SPECIALIZED HAZARDOUS WASTE PLANT WITH ENERGY RECOVERY. CARBON STEEL: UNALLOYED STEEL. ASSUMED 20% PRIMARY STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION STAINLESS STEEL TYPE1 : ASSUMED 20% PRIMARY STAINLESS STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION PE: HIGH DENSITY POLYETHYLENE GRANULATE COMBINED WITH INJECTION MOULDING PROCESS. 20% PRIMARY AND 80% SECONDARY PRODUCTION ASSUMED. SECONDARY PRODUCTION MODELLED USING DATA FROM FREES (2002). VAPOR CAP CONCRETE: FOAM CONCRETE COMPOSITION AND PRODUCTION ENERGY BASED ON INFORMATION FROM THE PRODUCER (UNICON A/S). BY END-OF-LIFE THE CONCRETE IS ASSUMED TO BE EXCAVATED, CRUSHED, AND TRANSPORTED 50KM. 90% OF THE FOAM CONCRETE IS ASSUMED TO BE RECYCLED AS A SUBSTITUTE FOR GRAVEL PRODUCTION. ENERGY FOR REMOVING THE CONCRETE IS SET EQUAL TO EXCAVATION OF THE SAME VOLUME OF SOIL. CRUSHING OF THE CONCRETE IS ASSUMED TO USE THE SAME AMOUNT OF ENERGY AS USED FOR THE UPTAKE. DIRECT RECYCLING RATES FOR ABOVE GRADE MATERIALS: SEE APPENDIX 1
MACHINES
INCLUDES: FUEL USE, COMBUSTION EMISSIONS, LUBRICATING OIL
ASSUMPTIONS: AL MACHINE TYPES ASSUMED TO HAVE SAME COMBUSTION EMISSIONS PER LITER OF DIESEL CONSUMED
EXCLUDED ITEMS
COMPUTERS: NOT INCLUDED AS NO DATA ON USE WAS COLLECTED IN SITU CO2 GENERATION FROM OXIDATION OF THE ORGANIC SOIL CONTENT

The applied LCA data are seen in Bilag C, here only additional LCA data used for the SEE technology are shown.

OVERVIEW OF APPLIED LCA DATA FOR PRODUCTION OF ELECTRICITY, METALS AND PLASTICS			
PROCESS	DATA SOURCE	PROCESS NAME (S) IN DATABASE	COMMENT/ADJUSTMENT
HEAT BOILER, STEAM GENERATION			
HEAT BOILER, NATURAL GAS	ECOINVENT	RER: HEAT, NATURAL GAS, AT BOILER ATMOSPHERIC NON-MODULATING <100KW	NON-CONDENSING AND NON-MODULATING BOILER ELECTRICITY USE CHANGED TO AVERAGE DANISH ELECTRICITY
PLASTICS			
FIBERGLASS		RER: GLASSFIBER REINFORCED PLASTIC, POLYESTER RESIN, HAND LAY-UP, AT PLANT	END-OF-LIFE PHASE ADDED: 80% IS ASSUMED COLLECTED, SHREDDED AND INCINERATED IN A COMBINED HEAT AND POWER PLANT, WHERE 3 KG OF FIBERGLASS CAN REPLACE THE USE OF 1 KG OF OIL (VINDBØRSEN, 2011)

ABBREVIATIONS: RER: EUROPE

D-8.1. Referenced literature:

BASF (2008). Skumbeton. Juni 2008. Udgivelse fremsendt af Unicon A/S.

Frees, N (2002), Miljømæssige fordele og ulemper ved genvinding af plast. Eksempler med udgangspunkt i konkrete produkter. Miljøprojekt nr. 657 2002, Miljøstyrelsen, København.

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischer, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., and Wernet, G. 2007. Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.

Sparrevik, M., Saloranta, T., Cornelissen, G., Eek, E., Fet, A.M., Breedveld, G.D., and Linkov, I. 2011. Use of Life Cycle Assessments to Evaluate the Environmental Footprint of Contaminated Sediment Remediation. Environmental Science & Technology 45, 4235-4241.

Vindbørsen 2011. Den reelle risiko ved glasfibervinger og styren.
http://www.vindborsen.dk/asp/nyheder_lang.asp?id=622 17-6-2011

BILAG E Life cycle assessment and environmental optimization of Electro-Thermal Dynamic Stripping Process - ET-DSP™

Gitte Lemming, DTU

Table of contents

E-1 Introduction.....	127
E-2 Life cycle inventory	127
E-3 Life cycle impact assessment methods	128
E-4 Results of the ET-DSP™ baseline scenario	128
E-4.1. On-site electricity use	131
E-4.2. Above grade materials	131
E-4.3. Well field materials	132
E-4.4. Transportation	133
E-4.5. Toxic versus non-toxic impacts	134
E-5 Environmental optimization of ET-DSP™.....	135
E-5.1. Heating outside peak demand periods	135
E-5.2. Use of local experts and equipment	136
E-6 Conclusions and recommendations	137
E-7 References	138
E-8 Appendices.....	140

E-1 Introduction

This note presents the results of the conducted life cycle assessments (LCAs) of remediation with Electro-Thermal Dynamic Stripping process (ET-DSP™) at two case sites. Initially the results of the baseline scenario are presented for each case. Based on this, the main contributing parts of the remediation system contributing to environmental impacts and resource depletion are identified. Next, alternative materials and heating strategies are suggested in order to reduce the environmental impacts associated with the remediation method and these possible changes are evaluated using LCA.

E-2 Life cycle inventory

A thorough data collection phase was completed in order to make an inventory of all materials and energy used for the remediation projects. The inventory was made for a hypothetical smaller site (180 m²) and a hypothetical larger site (1,300 m²). The inventory of materials and energy use for ET-DSP™ at the two sites is seen in Appendix 1.

LCA “cradle-to-gate” data was mainly taken from the Ecoinvent database (Frischknecht et al. 2007) with a few additional data from the ELCD database (EC, 2009). An end-of-life phase was added to all materials based on the expected fate. An overview of the applied LCA data and adjustments made is seen in Appendix 2.

E-3 Life cycle impact assessment methods

The EDIP2003 methodology (Hauschild and Potting, 2005) was chosen as the impact assessment method for all non-toxic impacts (global warming, ozone formation, eutrophication, acidification) except respiratory impacts from particulate matter (respiratory inorganics), which was quantified using the method from Humbert et al. (2009). Toxic impacts (ecotoxicity, human toxicity cancer, human toxicity non-cancer) were estimated using the USEtox™ method (Rosenbaum et al. 2008). All environmental impacts are normalized to person equivalents (PE) by dividing with the annual impact from an average European³ using 2004 normalization references (Laurent et al, 2011a; Laurent et al. 2011b). The EDIP97 methodology (Wenzel et al. 1997) was applied for depletion of resources (energy resources and scarce metals). All resource consumption results are converted to person reserves (PR), i.e. normalized to person equivalents and weighted by the reciprocal supply horizon for each resource. The applied normalization references and weighting factors for resource use are based on 2004 data (LCA center, 2005).

E-4 Results of the ET-DSP™ baseline scenario

The LCA results for the baseline scenario of remediation with ET-DSP™ have been divided into a number of subcategories and are shown in Figure E-1 (environmental impacts) and Figure E-2 (resource depletion). The contents of the various subcategories (transportation, materials (well field), materials (above grade), machines and energy use) are described in Table E-1.

As seen in Figure E-1, the on-site electricity use is the largest contributor to all impacts except the human toxicity (cancer) for both the small and the large site. For the large, the electricity use is responsible for an average 81% of the non-toxic impacts, whereas for the small site, it is only responsible for 73% of the non-toxic impacts. After electricity use, above ground materials followed by transportation are the main contributors to non-toxic impacts. The well field materials are a large contributor to toxic impacts.

Regarding resource depletion, both the electricity use and the above grade and well field materials all contribute significantly (see Figure E-2). The electricity causes depletion of coal, natural gas, oil, brown coal and uranium and the well field and the above grade materials causes depletion of especially nickel and chromium (from stainless steel) and copper (from the power distribution system and the wires). In addition, the well field materials consumes 2.3 PR (small site) – 4.7 PR (large site) of tin due to the use of bronze in the water circulation units (WCS) used to add water to the electrodes to prevent them from drying out during operation.

In Figure E-3, the environmental impacts for remediation of the two sites are compared in terms of impacts per m³ of soil remediated. The figure shows, that when a small site is remediated, the non-toxic impacts per m³ of soil are approximately 2 times higher than for the large site, and the toxic impacts per m³ of soil are approximately 3 times higher. This is a considerable difference and reflects the fact that the loss of heat is larger at a small site, due to a larger surface to volume ratio. Furthermore, the amounts of materials used above ground are relatively larger for the small site, since some equipment e.g. the power distribution systems (PDS), the water circulation units, office container and parts of the treatment system come in standardised sizes that cannot be scaled down easily. In addition, impact from transportation is also only slightly lower for the small site than for the large site, since e.g. transport of personnel and equipment by air is the same cf. Figure E-6. In

³ For global impacts (global warming) and resource consumption the normalization reference is based on an average world citizen. For all other impacts (local and regional) the normalization reference is based on an average European.

analogue, the resource depletion per m³ of soil is also approximately 2 times higher for the small site than for the large site (results per m³ not shown).

TABLE E-1

DESCRIPTION OF THE CONTENTS OF EACH SUBCATEGORY IN FIGURE E-1 AND E-2. A MORE DETAILED DESCRIPTION IS GIVEN IN APPENDIX 2.

SUBCATEGORY	CONTENT
ON-SITE ELECTRICITY	INCLUDES ELECTRICITY USED BY THE ELECTRODES AND THE ELECTRICITY USE FOR THE TREATMENT SYSTEM
MATERIALS (ABOVE GRADE)	INCLUDES MATERIALS AND EQUIPMENT USED ABOVE GROUND: VAPOR CAP, ACTIVATED CARBON, HEAT EXCHANGERS, COOLERS, TANKS ETC. SPECIAL EQUIPMENT FOR THE ET-DSP™ ARE POWER DISTRIBUTION SYSTEM (PDS) UNITS AND WATER CIRCULATION UNITS (WCU). FOR THE LARGE SITE, TWO OF EACH UNITS ARE USED AND FOR THE SMALL SITE ONLY ONE OF EACH. THE MATERIAL COMPOSITION OF THE PDS AND THE WCU CAN BE SEEN IN APPENDIX 1. THE TRANSPORTATION OF THE MATERIALS TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK IS INCLUDED HERE TOO. HOWEVER, THE PDS AND WATER CIRCULATION UNIT ARE TRANSPORTED SPECIFICALLY FROM CANADA AND THE TRANSPORT OF THESE IS INCLUDED IN THE <i>TRANSPORTATION</i> SUBCATEGORY.
MATERIALS (WELL FIELD)	INCLUDES MATERIALS AND EQUIPMENT FOR THE WELL FIELD: SAND, GROUT, BENTONITE, GRAPHITE, ELECTRODES, EXTRACTION WELLS, MANIFOLDS, WATER SUPPLY LINES, COPPER WIRES, ETC. THE ELECTRODES CONTAIN STEEL, COPPER AND NYLON. THE COMPOSITION CAN BE SEEN IN APPENDIX 1. THE TRANSPORTATION FROM THE PRODUCER TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK IS FURTHERMORE INCLUDED.
MACHINES	INCLUDES FUEL USE AND EMISSIONS FROM MACHINES USED ON SITE: DRILL RIGS, GRADERS, COMPRESSORS, GENERATORS, FORKLIFTS, ETC.
TRANSPORTATION	TRANSPORTATION (90 KM RETURN TRIP) OF MATERIALS, EQUIPMENT AND PERSONNEL TO SITE. FOR ET-DSP™ IT IS FURTHERMORE ASSUMED THAT EXPERIENCED PERSONNEL FROM CANADA ARE TRANSPORTED BY AIR (2 PERSONS OF 2 RETURN TRIPS EACH) TO DENMARK. FURTHERMORE, THE ELECTRODES, THE PDS UNIT AND THE WATER CIRCULATION UNITS ARE ASSUMED TO BE TRANSPORTED TO DENMARK FROM CANADA BY TRAIN (4,200 KM) AND SHIP (4,500 KM) AND RETURNED TO CANADA AFTER USE (EXCEPT THE ELECTRODES, WHICH ARE SINGLE-USE). IT IS FURTHERMORE ASSUMED THAT 50 KG OF EQUIPMENT IS SHIPPED TO DENMARK BY AIRFREIGHT 3 TIMES DURING THE REMEDIATION PROJECT.

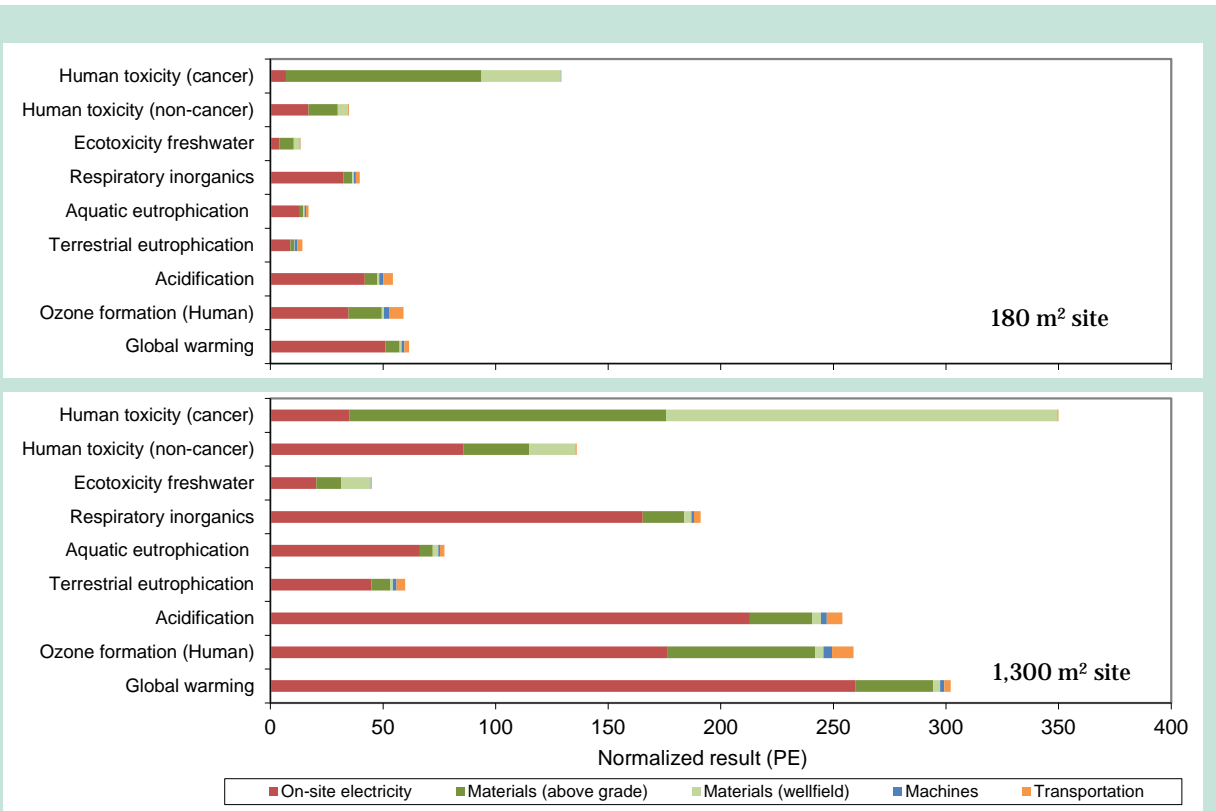


FIGURE E-1
ENVIRONMENTAL IMPACTS ASSOCIATED WITH REMEDIATION BY ET-DSP™ AT A SMALLER (180 M²) AND A LARGER SITE (1,300 M²).

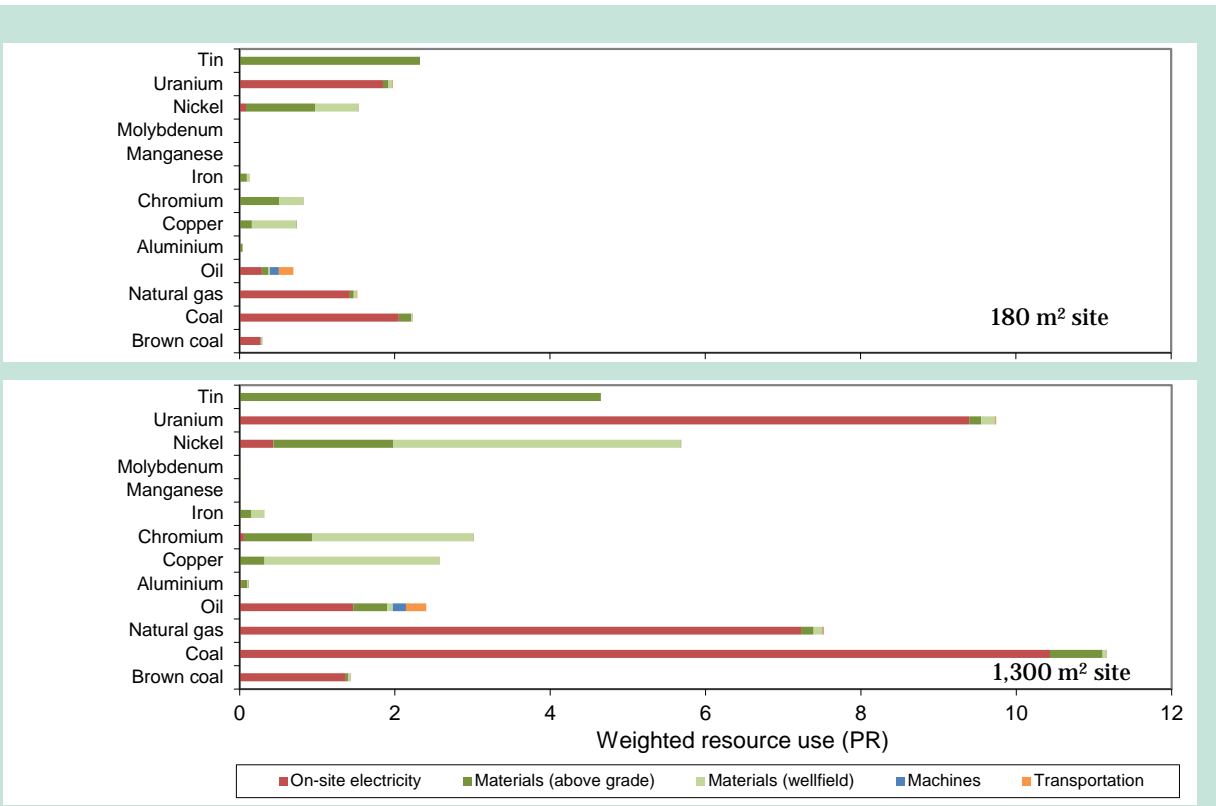


FIGURE E-2
RESOURCE DEPLETION ASSOCIATED WITH REMEDIATION BY ET-DSP™ AT A SMALLER (180 M²) AND A LARGER SITE (1,300 M²).

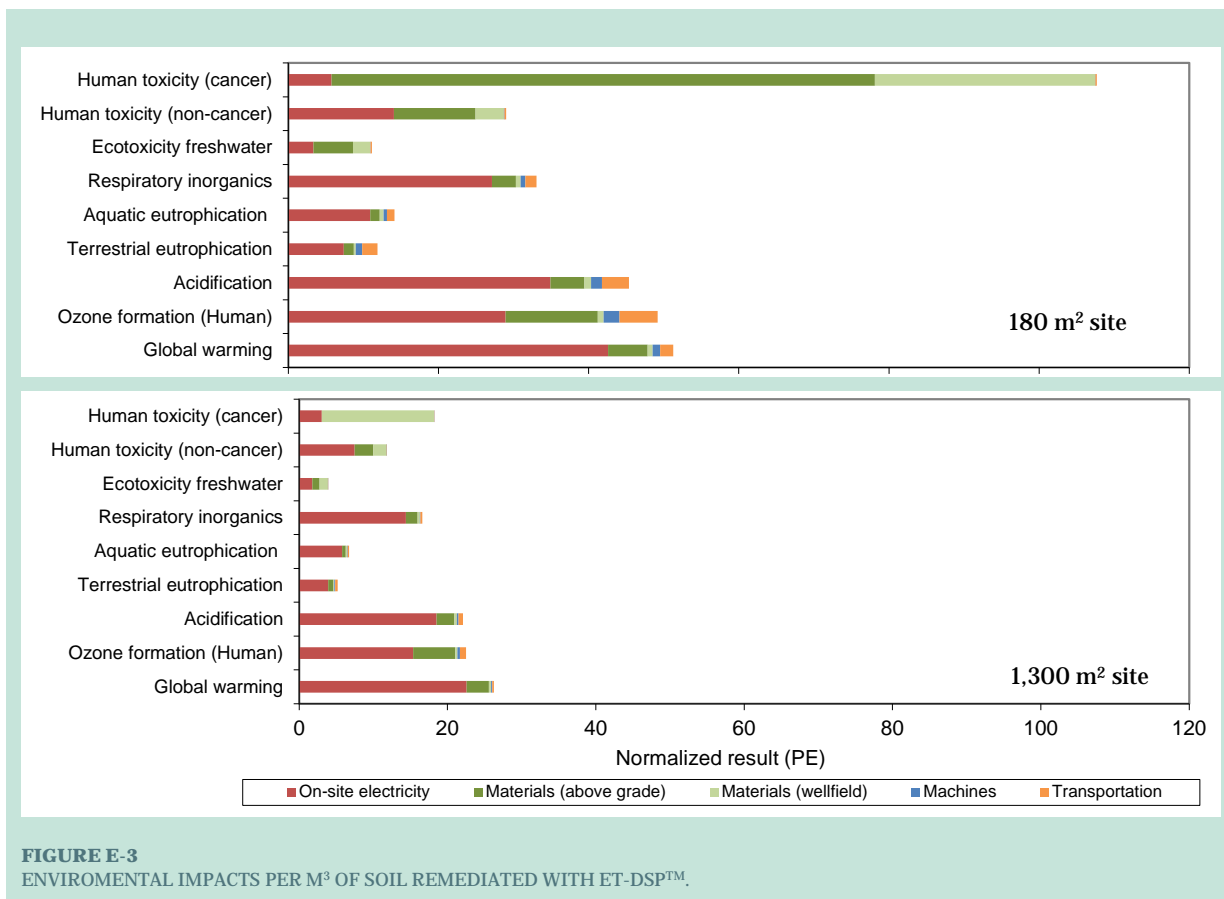


FIGURE E-3
ENVIRONMENTAL IMPACTS PER M³ OF SOIL REMEDIATED WITH ET-DSP™.

E-4.1. On-site electricity use

As mentioned above, electricity use on site is the main cause of non-toxic environmental impacts. The largest part of the electricity use is due to the electricity input to the ET-DSP™ process via the electrodes. For the large site only a minor part (5%) of the electricity is used for the above grade system for vapor and water treatment, whereas for the small site 23% of the electricity is used for this purpose.

E-4.2. Above grade materials

After electricity consumption, the materials used above grade are the major contributor to non-toxic impacts. A detailed result of the environmental impacts and resource depletion associated with the above grade materials can be seen in Figure E-4 for the large site. As for ISTD and SEE, the main causes of the non-toxic impacts are the activated carbon used for vapor treatment and the foam concrete used for the vapor cap. The activated carbon especially causes high levels of ozone formation, acidification and respiratory impacts, whereas the foam concrete has a high impact on global warming, eutrophication and acidification.

Steels which are used for PDS, WCU, containers, storage tanks etc. are the main source of toxic impacts for this subcategory. The use of stainless steel also results in a high depletion of the alloying metals nickel and chromium as seen in Figure E-4. Activated carbon use results in high depletion of coal and oil, whereas the foam concrete causes a high depletion of all energy resources. Copper depletion is due to the use of copper wires and copper in the PDS and bronze/brass is a constituent of the WCU. The bronze causes a high depletion of tin as seen in Figure E-4.

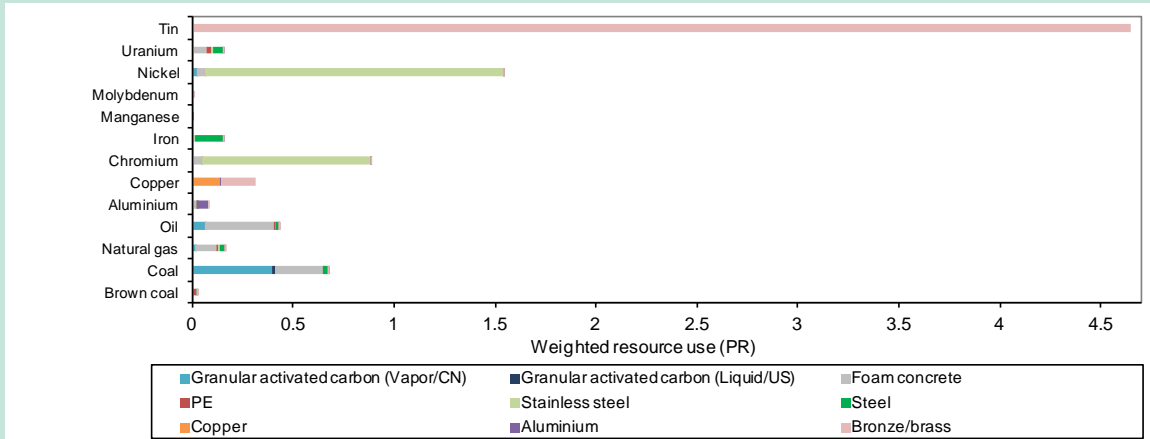
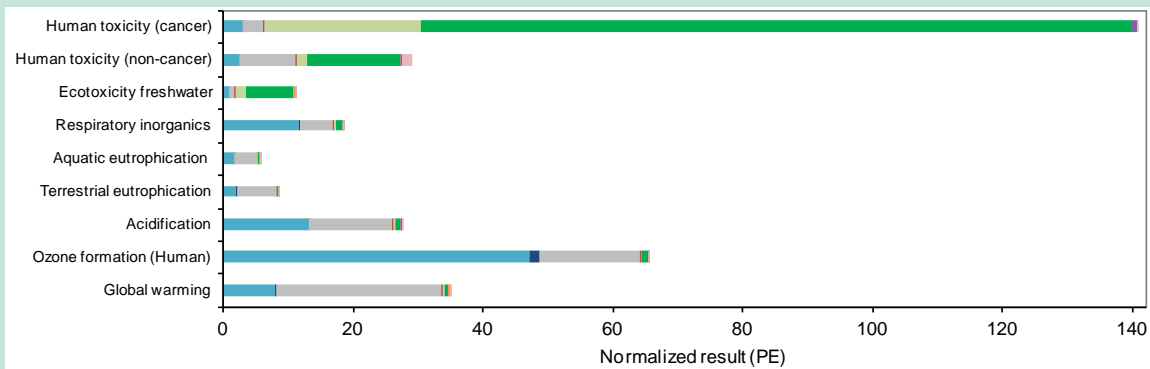
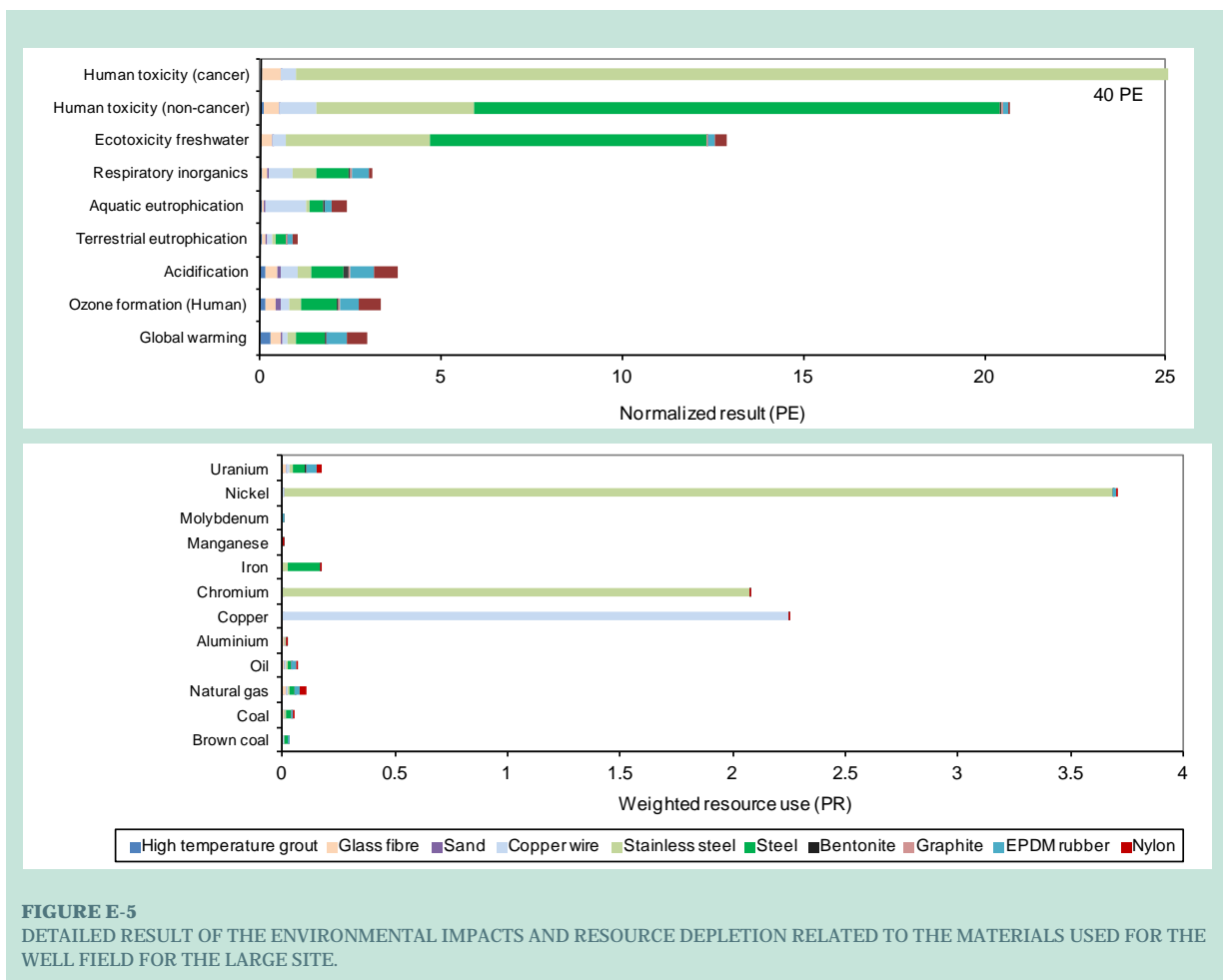


FIGURE E-4
 DETAILED RESULT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS AND RESOURCE DEPLETION RELATED TO THE MATERIALS USED ABOVE GRADE FOR THE LARGE SITE.

E-4.3. Well field materials

The well field materials only contribute little to the non-toxic impacts (average 2% of total impacts), but are a large contributor to the toxic impacts (20-30%). In Figure E-5, a detailed result of the impacts associated with the well field is shown for the larger site. It shows that the toxic impacts are associated with the use of stainless steels and steel. This is due to toxic releases to the environment during the mining, processing and manufacturing of steel products.

The well field materials are furthermore the main source to depletion of nickel, chromium and copper due to the use of stainless steel and copper wires.



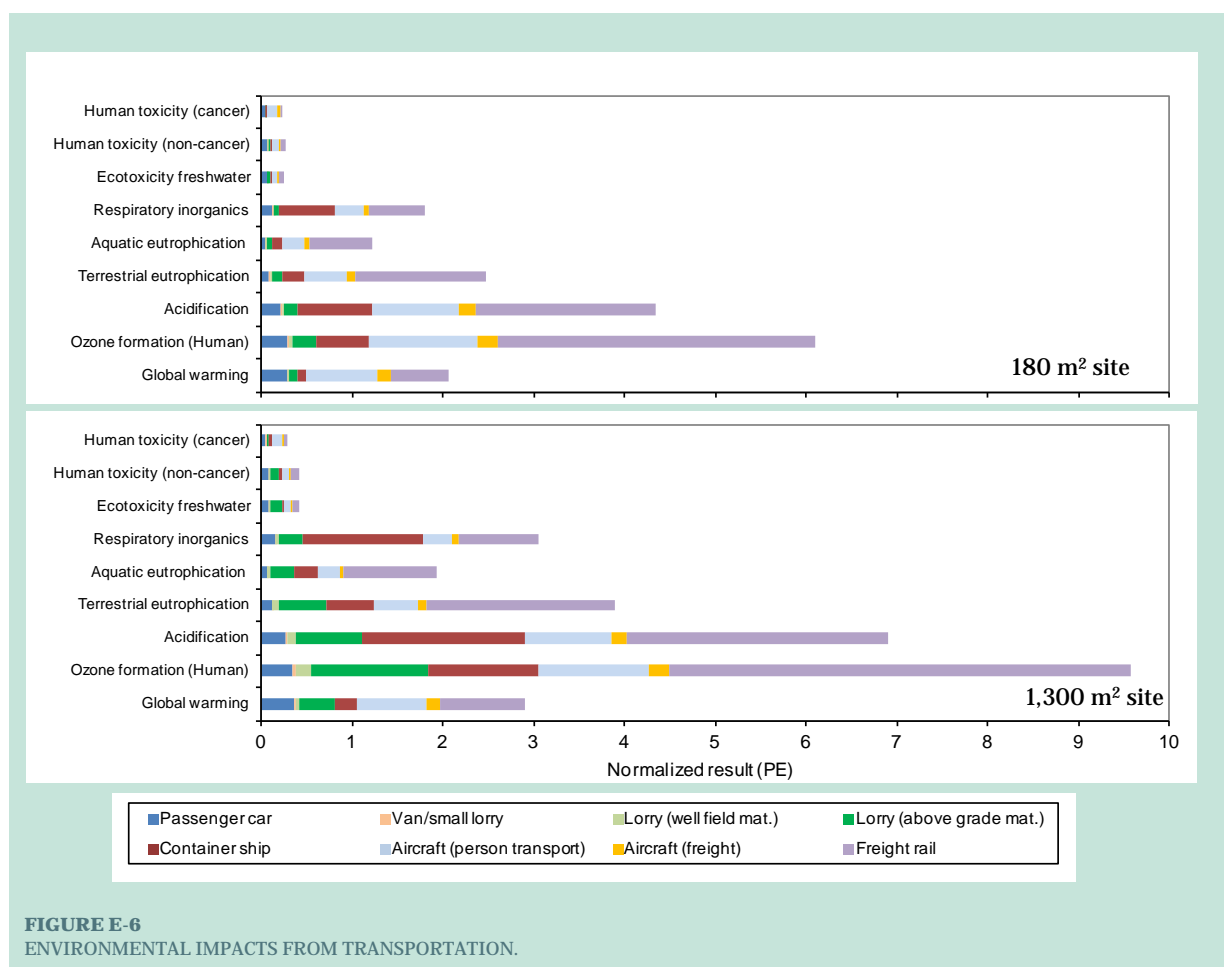
E-4.4. Transportation

For ISTD and SEE, the environmental impacts from transportation were almost negligible, whereas for ET-DSP™ transportation is the third most contributing subcategory to the non-toxic impacts and gives a higher contribution than the well field. For the small site, transportation is responsible for 8% of the non-toxic impacts and for the large site it is responsible for 3%. The reason for the increased transport-related impacts is that it is assumed that it is necessary to fly in experienced personnel from Canada to supervise the ET-DSP™ as the experience with this technology is limited in Denmark. Furthermore, a large part of the equipment is assumed to be shipped from Canada to Denmark by rail and ship transport, and spare parts for the system is assumed to be sent by air 3 times during the process. See appendix 1 and 2 for more details about the transportation.

Figure E-6 shows the detailed result for transportation at the two sites. It shows that the freight of the ET-DSP™ equipment to Denmark by rail (4,200 km) and ship (4,500 km) and person transportation by air (7200 km) are the most contributing processes for the small site, whereas the local transportation by lorry in Denmark (90 km in return) of above grade materials also contributes importantly. Note that all person transport (by car or by air) impacts are of the same size for the two sites, i.e. these do not depend on the size of the site.

It should also be noted that the “Transportation” subcategory only includes the local transportation from a local supplier/contractor/consultant to the site, except for the equipment that is assumed to be shipped from Canada. Thus, the transport from the producer to the local supplier is included in the inventory for each specific material and is included in the impacts of the “Well field material”

and “Above grade material” subcategories. The applied transportation distances can be seen in Appendix 2.



E-4.5. Toxic versus non-toxic impacts

The results of the life cycle assessments generally show that the toxic impacts are higher than the non-toxic impacts in terms of PE. When comparing toxic and non-toxic impacts, it should however be kept in mind that the impact assessment of toxic impacts is associated with a much higher uncertainty due to the large number of chemicals included in the assessment, but also in the actual characterization factors describing the relative toxicity between different toxic substances. In this analysis, the toxic impacts are mainly ascribed to releases of heavy metals during production of steel and stainless steel. However, whereas the characterization factors for organic contaminants are well developed in LCA, the metal characterization factors are still interim and will be updated in the near future. Today, the characterization of metals is done by considering the total concentration of metals emitted. However improved characterization factors are underway that consider the speciation and the biological available fraction of the metals. This will probably lead to lower toxicity related to metal emission. Thus for now, the toxic impacts can be held relative to each other, but the magnitude should not be compared directly to the non-toxic impacts.

E-5 Environmental optimization of ET-DSP™

The life cycle assessment results for ET-DSP™ showed that on-site energy consumption is the main driver of non-toxic environmental impacts. This is by the use of above grade materials, especially the use of activated carbon for vapor treatment and the use of foam concrete for the vapor cap.

The third most contributing subcategory to non-toxic impacts, after electricity use and above grade materials, is transportation. This is due to the fact that it was assumed that if ET-DSP™ is conducted in Denmark then it is necessary to use Canadian experts and specialised equipment shipped from Canada.

The toxic impacts mainly stem from the use of steel and stainless steel, which especially is consumed in a large amount in the well field installations.

Depletion of energy resources is also mainly due to the on-site electricity use, whereas the use of scarce metals (especially nickel, chromium and copper) primarily stems from the stainless steel and copper wires used in the well field.

The findings made for ISTD regarding the optimization of the vapor cap and the activated carbon can directly be transferred to the ET-DSP™ technology. In addition, the improvement obtained by heating outside peak demand periods and the use of local remediation experts and equipment is investigated.

E-5.1 Heating outside peak demand periods

In analogue to the analysis made for ISTD (see BILAG C), we modelled a scenario, where heating is done mainly during the 12 hours from 8 pm to 8 am on week days and kept as low as possible during the day. On weekends, heating is carried out throughout the day. For ET-DSP™, this results in an increased operation time of 18% and an increased total energy use of 5.6%.

Under the assumption that there is 6 hours of wind energy available in the grid during night, and that the electricity is coal-based during the remaining 18 hours, the composition of the energy is 75% coal and 25% wind in the baseline scenario, and 35% coal and 65% wind in the optimization scenario. Due to the significantly longer operation time in the 12 hour heating scenario, extra transportation is added to cover transport of personnel and day-to-day deliveries.

Figure E-7 shows the results of the analysis made for the large site. The changed heating strategy (the optimization scenario) gives a reduction of 8% on average of environmental impacts and resource depletion. The added transport in the optimization scenario doesn't influence the result significantly.

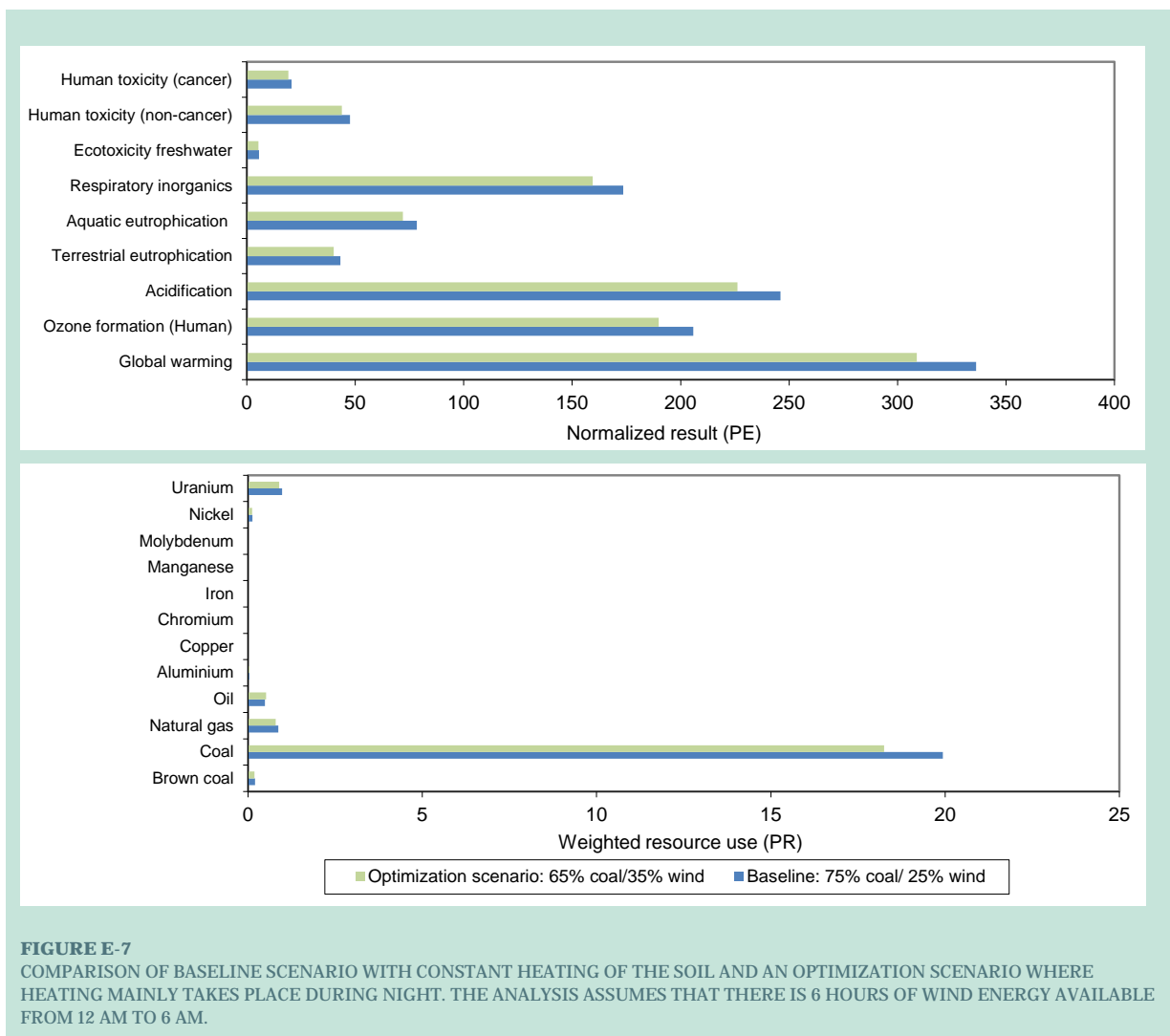


FIGURE E-7
 COMPARISON OF BASELINE SCENARIO WITH CONSTANT HEATING OF THE SOIL AND AN OPTIMIZATION SCENARIO WHERE HEATING MAINLY TAKES PLACE DURING NIGHT. THE ANALYSIS ASSUMES THAT THERE IS 6 HOURS OF WIND ENERGY AVAILABLE FROM 12 AM TO 6 AM.

E-5.2. Use of local experts and equipment

In the baseline scenario, it is assumed that some of the materials (PDS and water circulation units) are transported to Denmark from Canada and that experienced personnel (2 persons of 2 return trips each) from Canada are needed. This is however a worst case assumption. If local equipment and experts are available, the impacts associated with transportation can be reduced by 70% on average. In addition, resource depletion from transportation is reduced by 60%. A comparison of the environmental impacts and resource use associated with the two transportation scenarios is shown in Figure E-8.

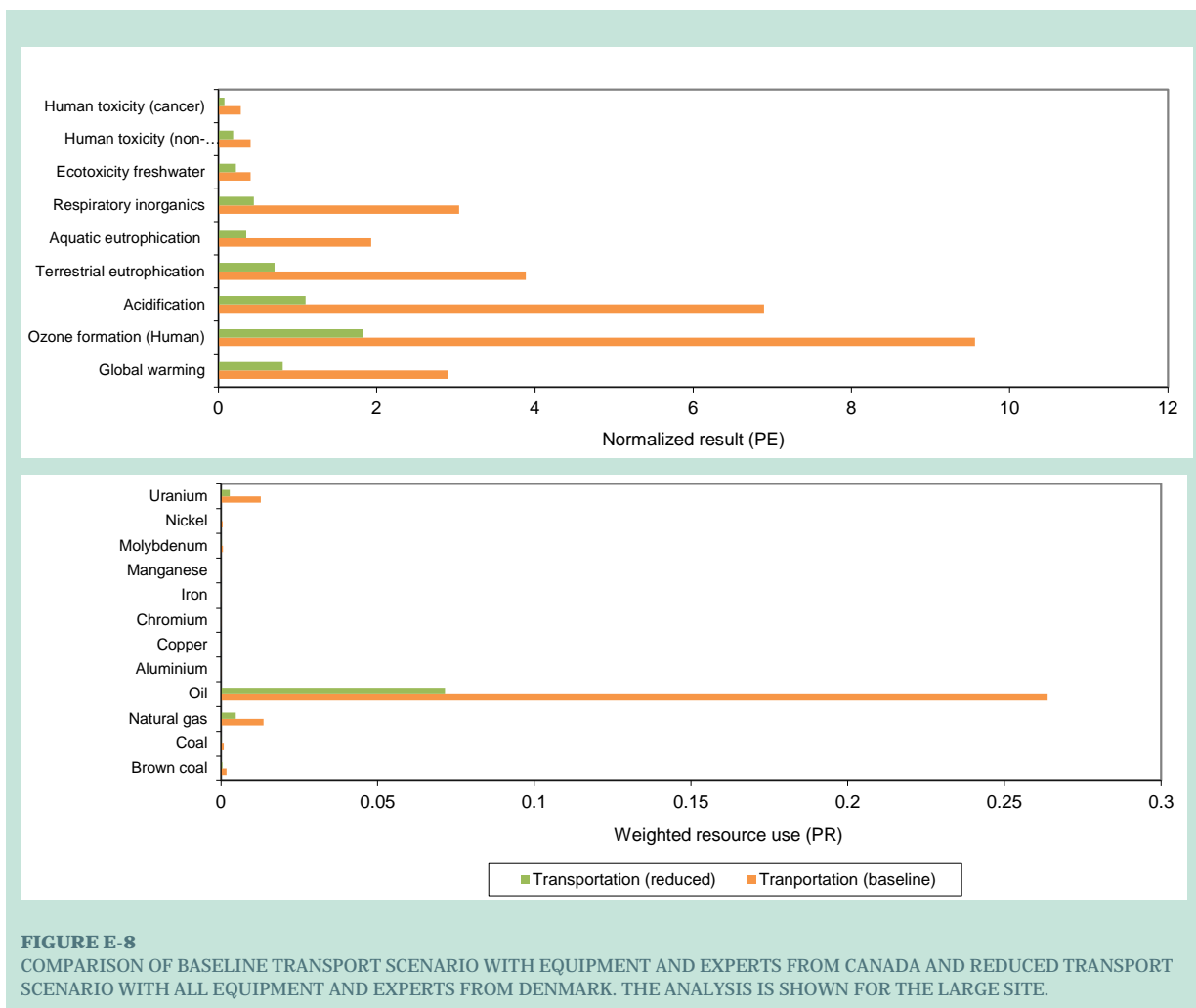


FIGURE E-8 COMPARISON OF BASELINE TRANSPORT SCENARIO WITH EQUIPMENT AND EXPERTS FROM CANADA AND REDUCED TRANSPORT SCENARIO WITH ALL EQUIPMENT AND EXPERTS FROM DENMARK. THE ANALYSIS IS SHOWN FOR THE LARGE SITE.

E-6 Conclusions and recommendations

The following improvement options were identified for ET-DSP™:

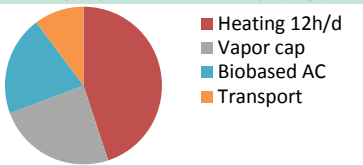
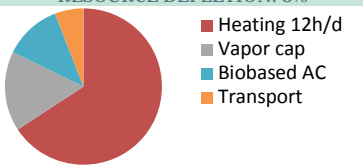
- Changing to a heating strategy that heats the soil mainly during night will have a potential to reduce the overall impacts from the electricity use in the order of maximum 8%.
- A change from a foam concrete vapor cap to a concrete sandwich vapour cap with sea shells as insulating material. This will reduce the environmental impacts and resource use for the vapour cap with up to 65%.
- Replacement of anthracite-based activated carbon for vapour treatment with bio-based activated carbon made from coconut shells can give large reductions in ozone formation (80%), global warming (60%), respiratory impacts (40%) and coal use.
- The use of local experts and equipment instead of Canadian. This will reduce the environmental impacts of transportation by 70% and the resource depletion by 60%.

Table E-2 summarises the identified improvement options, the certainty of effect and the combined reduction in environmental impacts and resource depletion on the combined ET-DSP™ project for

the large site. Furthermore, it shows the distribution of the reductions in environmental impacts and resource depletion between the four improvement options.

TABLE E-2

SUMMARY OF IDENTIFIED IMPROVEMENT INITIATIVES FOR SEE, THE CERTAINTY OF THE IMPROVEMENT AND THE COMBINED REDUCTION POTENTIAL AND DIVISION BETWEEN THE FOUR INITIATIVES.

Improvement initiative	Certainty of effect ¹⁾	Combined reduction potential and division between initiatives
Discontinued heating (12 h/day)	+ (amount of wind uncertain)	<p>ENVIRONMENTAL IMPACTS: 13%</p> 
Concrete sandwich vapour cap	++	
Bio-based activated carbon	+ (data quality)	<p>RESOURCE DEPLETION: 8%</p> 
Use of local experts and equipment	++	

¹⁾ ++: High certainty of positive effect of initiative. +: Certainty of positive effect, but magnitude of improvement uncertain

E-7 References

- EC. 2009. European Commission – Joint Research Centre (JRC), European Reference Life Cycle Database (ELCD core database), version II. <http://lct.jrc.ec.europa.eu/assessment/data>.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., and Wernet, G. 2007. Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.
- Hauschild, M.Z. and Potting, J. 2005. Spatial differentiation in life cycle impact assessment - the EDIP-2003 methodology. Environmental news No. 80 2005, Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment.
- Humbert S., Marshall J., Shaked S., Nishioka Y., Preiss P., Spadaro J., Horvath A., and Jolliet O. 2009. Intake fractions and characterization factors for particulate matter: review and recommendations (in review).
- Laurent, A., Lautier, A., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I., and Hauschild, M.Z. 2011a. Normalization references for Europe and North America for application with USEtox (TM) characterization factors. International Journal of Life Cycle Assessment 16, 728-738.
- Laurent, A., Olsen, S.I., and Hauschild, M.Z. 2011b. Normalization in EDIP97 and EDIP2003: updated European inventory for 2004 and guidance towards a consistent use in practice. The International Journal of Life Cycle Assessment 16, 401-409.
- LCA Center. 2005. List of EDIP factors downloaded from LCA Center Denmark 04-11-2008 at <http://www.lca-center.dk/cms/site.aspx?p=1595>.

- Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Joliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., and Hauschild, M.Z. 2008. USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13, 532-546.
- Wenzel, H., Hauschild, M., and Alting, L. 1997. *Environmental assessment of products. - 1: Methodology, tools, and case studies in product development*. Chapman & Hall, United Kingdom, 1997, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA. USA.

E-8 Appendices

Appendix 1: Overview of consumption data for the two sites

TRANSPORTATION	UNIT	SMALL SITE	LARGE SITE
TRAVEL BY CAR	personkm	14,503	18,351
TRAVEL BY AIR	personkm	57,600	57,600
SHIPPING BY VAN/SMALL TRUCK (DAY TO DAY DELIVERIES)	kgkm	52,245	72931
SHIPPING BY TRUCK (ABOVE GRADE MATERIALS)	kgkm	6,151,680	28,725,930
SHIPPING BY TRUCK (WELL FIELD MATERIALS)	kgkm	806,008	3,683,332
SHIPPING BY AIR	kgkm	1,080,000	1,080,000
SHIPPING BY FREIGHT RAIL	kgkm	85,680,000	185,640,000
SHIPPING BY FREIGHT SHIP	kgkm	91,800,000	198,900,000
TRAVEL DISTANCE, PERSON CAR, TRUCK, SMALL VAN (ROUND TRIP) ¹	km	90	90
TRAVEL DISTANCE, AIR (ONE WAY CANADA-DENMARK) ²	km	7,200	7,200
TRAVEL DISTANCE, FREIGHT RAIL (ONE WAY) ³	km	4,200	4,200
TRAVEL DISTANCE, FREIGHT SHIP (ONE WAY) ⁴	km	4,500	4,500

¹ Distance used for local transport of equipment and personnel to and from site

² Distance used for air transport of equipment and personnel from Canada to Denmark and return trip (only personnel)

³ Distance used for freight rail transport internally in Canada of equipment (PDS, WCU and electrodes) and return trip (only PDS and WCU)

⁴ Distance used for freight ship transport from Canada to Denmark (PDS, WCU and electrodes) and return trip (only PDS and WCU)

TOTAL MATERIALS USAGE	UNIT	SMALL SITE		LARGE SITE	
		WELLFIELD	ABOVE GRADE	WELLFIELD	ABOVE GRADE
SAND	kg	5,427		33,066	
HIGH TEMP GROUT	kg	1,720		4,412	
VAPOR CAP CONCRETE	kg		41,600		275,200
VAPOR GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg		2,484		15,920
LIQUID GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg		1,620		600
CARBON STEEL	kg	1,383	3,856	6,039	5,943
STAINLESS STEEL TYPE 1	kg	266	422	1,778	714
COPPER	kg	423	50	1645	100
ALUMINIUM	kg		75		150

TOTAL MATERIALS USAGE	UNIT	SMALL SITE		LARGE SITE	
		WELLFIELD	ABOVE GRADE	WELLFIELD	ABOVE GRADE
BRONZE/BRASS ¹	kg		75		150
EPDM - RUBBER	kg	486			1890
FIBERGLASS	kg	220		496	
PE	kg		799		870

¹ 50% bronze and 50% brass assumed

UTILITY USAGE	UNIT	SMALL SITE	LARGE SITE
POWER USAGE, TREATMENT SYSTEM	kWh	167,000	152,000
POWER USAGE (INJECTED INTO SUBSURFACE)	kWh	503,000	3,276,000
GASOLINE USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	779	2,259
DIESEL USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	990	3,554

Note that the material usage only includes the fraction of the materials used on this specific project as some components can be used several times. The applied reuse rates are listed below: 100% means that the material is not recycled, but ascribed 100% to this project. 25% means that the material is used on 4 projects and therefore only 25% is ascribed to this project and so forth. The tables below show furthermore that the material composition and number of units used for the well field materials and above grade materials respectively.

UNIT AMOUNTS AND REUSE RATES FOR WELL FIELD MATERIALS (REUSE RATES GIVEN AS PERCENT OF MATERIAL ASCRIBED TO THIS PROJECT)						
	NUMBER OF UNITS		MATERIAL	Weight per unit(kg)		% ASCRIBED TO PROJECT
	SMALL SITE	LARGE SITE		SMALL SITE	LARGE SITE	
ET-DSP™ ELECTRODES	36	140	CARBON STEEL	37	74	100
			COPPER	3	6	100
			NYLON	4	8	100
ELECTRODE WELLS	18	70	SAND	39	188	100
			HIGH TEMP. GROUT	45.6	45.6	100
			BENTONITE	6	6	100
			GRAPHITE	121	140	100
TEMPERATURE/PRESSURE MONITORS	20	30	SAND	150	232	100
			HIGH TEMP. GROUT	28	14	100
			BENTONITE	1.4	1.4	100
			FIBERGLASS	9	12	100
EXTRACTION – SLURPER TUBE	8	38	SAND	87	430	100
			HIGH TEMP. GROUT	17	26.6	100
			BENTONITE	1.7	5.3	100
			CARBON STEEL	6.5	20.5	100
			STAINLESS STEEL	53.2	2	25
WATER SYSTEM MANIFOLD	1	1	CARBON STEEL	99	245	100

UNIT AMOUNTS AND REUSE RATES FOR WELL FIELD MATERIALS (REUSE RATES GIVEN AS PERCENT OF MATERIAL ASCRIBED TO THIS PROJECT)						
	NUMBER OF UNITS		MATERIAL	Weight per unit(kg)		% ASCRIBED TO PROJECT
	SMALL SITE	LARGE SITE		SMALL SITE	LARGE SITE	
VAPOR MANIFOLD	1	1	FIBERGLASS	45	134	100
	Length (m) Small site	Length (m) Large site	Material	Weight per unit length (kg/m)		
CABLE BETWEEN ELECTRODE AND POWER SUPPLY	100	100	COPPER	0.35		25
WATER SUPPLY LINE BELOW GRADE	7.5	7.5	EPDM RUBBERA)	0.2		100
WATER SUPPLY LINE ABOVE GRADE	60	50	EPDM RUBBERA)	0.2		100

ETHYLENE PROPYLENE DIENE MONOMER RUBBER

UNIT AMOUNTS AND REUSE RATES FOR ABOVE GRADE MATERIALS (REUSE RATES GIVEN AS PERCENT OF MATERIAL ASCRIBED TO THIS PROJECT)						
<i>EQUIPMENT FOR THE ABOVE GRADE TREATMENT SYSTEM</i>						
<i>VAPOR TREATMENT SYSTEM: (AMOUNTS AND REUSE RATES EQUAL TO ISTD, SEE BILAG C)</i>						
<i>WATER TREATMENT SYSTEM: (REUSE RATES EQUAL TO ISTD, AMOUNTS FOR THE LARGE SITE MULTIPLIED BY A SCALING FACTOR DUE TO LARGER WATER QUANTITIES IN ET-DSP™)</i>						
		LARGE SITE	SMALL SITE			
SCALING FACTOR (BASED ON ISTD AMOUNTS)		1.5	1			
CONTAINERS:(AMOUNTS AND REUSE RATES EQUAL TO ISTD)						
OFFICE CONTAINER	CONTAINER WITH CONTROL PC	CONTAINER	CARBON STEEL	825	825	25%
WORKSHED CONTAINER	CONTAINER WITH TOOLS ETC.	CONTAINER	CARBON STEEL	2,400	2,400	25%
ELECTRICAL CONTROLLER	CONTAINER WITH ELECTRICAL INPUT CONTROLS	CONTAINER	CARBON STEEL	4,800	4,800	25%
SPECIAL EQUIPMENT FOR ET-DSP™						
	DESCRIPTION	NUMBER OF UNITS		MATERIAL	WEIGHT (KG)	% ASCRIBED TO PROJECT
		SMALL SITE	LARGE SITE			
WATER CIRCULATION UNIT (WCU)	CIRCULATES WATER TO THE ELECTRODES TO PREVENT THEM FROM DRYING OUT DURING OPERATION	1	2	CARBON STEEL PE COPPER BRONZE/BRASS	262.5 12.5 25 75	25%
1330 KVA PDS UNIT (PDS)	POWER DISTRIBUTION SYSTEM	1	2	CARBON STEEL PE COPPER ALUMINIUM	295 5 25 75	5%

Appendix 2: Overview of categories, assumptions and LCA data

OVERVIEW OF INCLUDED CONTENT IN EACH CATEGORY AND ASSUMPTIONS MADE
<p>TRANSPORTATION</p> <p>INCLUDES: TRANSPORT OF EQUIPMENT, PERSONNEL AND DAY-TODAY DELIVERIES IN DK FROM LOCAL SUPPLIER TO SITE (90 KM RETURN). HOWEVER ELECTRODES, WATER CIRCULATION UNITS (WCUS) AND POWER DISTRIBUTION SYSTEMS (PDS) ARE ASSUMED TO BE TRANSPORTED FROM CANADA TO DENMARK (4200 KM TRAIN + 4500 KM SHIP). AFTER USE, WCUS AND PDSS ARE RETURNED TO CANADA, WHEREAS ELECTRODES ARE SINGLE-USE AND DISCARDED IN DENMARK. FURTHERMORE IT IS ASSUMED THAT 2 EXPERTS FROM CANADA VISIT DENMARK 2 TIMES DURING THE REMEDIATION PROJECT (AIR TRAVEL) AND THAT 50 KG OF EQUIPMENT SPARE PARTS ARE TRANSPORTED BY AIR TO DENMARK 3 TIMES.</p> <p>ASSUMPTIONS: PERSON TRANSPORT: ALL VEHICLES ASSUMED PETROL FUELLED. VAN TRANSPORT: ASSUMED 5 KG LOAD IN AVERAGE. LARGE TRUCK: FOR WELL MATERIALS IT IS ASSUMED THAT GRAVEL, GROUT, BENTONITE AND GRAPHITE STAY AT THE SITE, AND IS THUS TRANSPORTED ONLY ONE WAY.</p>
<p>MATERIALS (WELL FIELD)</p> <p>INCLUDES: PRODUCTION AND END-OF-LIFE OF MATERIALS USED FOR THE WELL FIELD (ELECTRODES, COPPER WIRES, EPDM RUBBER HOSES AND GRAPHITE, SAND, GROUT AND BENTONITE FOR THE ELECTRODE WELLS) AND THE TRANSPORTATION FROM EXTRACTION/PRODUCTION SITE TO LOCAL SUPPLIER IN DENMARK. STEEL, FIBERGLASS, BENTONITE, NYLON, COPPER, GRAPHITE AND EPDM RUBBER IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN EUROPE AND TRANSPORTED A DISTANCE OF 700 KM. SAND, CONCRETE AND GROUT IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN DENMARK. CEMENT INPUT TO GROUT AND FOAM CONCRETE IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN AALBORG, DENMARK, AND TRANSPORTED 235 KM TO COPENHAGEN BY SHIP. SAND IS ASSUMED TO BE TRANSPORTED 50 KM FROM EXTRACTION SITE TO LOCAL SUPPLIER.</p> <p>ASSUMPTIONS: HIGH TEMPERATURE GROUT COMPOSITION: (0.53 KG CEMENT, 0.19 KG SILICA FLOUR, 0.29 KG WATER) PER KG OF GROUT. CARBON STEEL: UNALLOYED STEEL. ASSUMED 20% PRIMARY STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION STAINLESS STEEL TYPE 1: ASSUMED 20% PRIMARY STAINLESS STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION NYLON, FIBERGLASS AND EPDM RUBBER: ASSUMED INCINERATED BY END-OF-LIFE, WHERE IT REPLACES THE USE OF CRUDE OIL. COPPER: ASSUMED 5% PRIMARY COPPER AND 95% SECONDARY COPPER. DIRECT RECYCLING RATES FOR WELL FIELD MATERIALS: SEE APPENDIX 1</p>
<p>MATERIALS (ABOVE GRADE)</p> <p>INCLUDES: PRODUCTION AND END-OF-LIFE OF MATERIALS USED ABOVE GROUND (WATER CIRCULATION UNITS, POWER DISTRIBUTION SYSTEMS, ACTIVATED CARBON, CONCRETE VAPOR CAP, COOLERS, HEAT EXCHANGER, CONTAINERS ETC.) AND THE TRANSPORTATION FROM EXTRACTION/PRODUCTION SITE TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK IS INCLUDED. STEEL, STAINLESS STEEL, POLYETHYLENE (PE), ALUMINIUM, BRONZE AND BRASS IS ASSUMED TO BE PRODUCED IN EUROPE AND TRANSPORTED 700 KM TO DENMARK BY TRUCK. FOAM CONCRETE IS PRODUCED IN DENMARK. CEMENT INPUT TO FOAM CONCRETE IS ASSUMED PRODUCED IN AALBORG, DENMARK AND TRANSPORTED 235 KM TO COPENHAGEN BY SHIP. ACTIVATED CARBON INCLUDES TRANSPORT INTERNALLY IN CHINA (905 KM BY TRUCK), TRANSOCEANIC FREIGHT SHIP (19.200 KM) AND TRANSPORT IN EUROPE (700 KM BY TRUCK)</p> <p>ASSUMPTIONS: VAPOR GRANULAR ACTIVATED CARBON (GAC): PRODUCED FROM HARD COAL IN CHINA (INFO FROM SUPPLIER). THE PRODUCTION IS MODELLED USING DATA FROM SPARREVIK (2011). TRANSPORT TO EUROPEAN SUPPLIER AND TO DENMARK ADDED AS DESCRIBED ABOVE. BY END-OF-LIFE, THE GAC IS TRANSPORTED TO NYBORG (112 KM) AND INCINERATED AT A SPECIALIZED HAZARDOUS WASTE PLANT WITH ENERGY RECOVERY. LIQUID GRANULAR ACTIVATED CARBON (GAC): PRODUCED FROM HARD COAL IN THE US (INFO FROM SUPPLIER). THE PRODUCTION IS MODELLED USING DATA FROM SPARREVIK (2011). TRANSPORT TO EUROPEAN SUPPLIER AND TO DENMARK ADDED AS DESCRIBED ABOVE. BY END-OF-LIFE, THE GAC IS TRANSPORTED TO NYBORG (112 KM) AND INCINERATED AT A SPECIALIZED HAZARDOUS WASTE PLANT WITH ENERGY RECOVERY. CARBON STEEL: UNALLOYED STEEL. ASSUMED 20% PRIMARY STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION STAINLESS STEEL TYPE 1: ASSUMED 20% PRIMARY STAINLESS STEEL PRODUCTION AND 80% SECONDARY STEEL PRODUCTION ALUMINIUM: ASSUMED 80% SECONDARY AND 20% PRIMARY PRODUCTION COPPER: ASSUMED 95% SECONDARY AND 5% PRIMARY PRODUCTION PE: HIGH DENSITY POLYETHYLENE GRANULATE COMBINED WITH INJECTION MOULDING PROCESS. 20% PRIMARY AND 80% SECONDARY PRODUCTION ASSUMED. SECONDARY PRODUCTION MODELLED USING DATA FROM FREES (2002). VAPOR CAP CONCRETE: FOAM CONCRETE COMPOSITION AND PRODUCTION ENERGY BASED ON INFORMATION FROM THE PRODUCER (UNICON A/S). BY END-OF-LIFE THE CONCRETE IS ASSUMED TO BE EXCAVATED, CRUSHED, AND TRANSPORTED 50KM. 90% OF THE FOAM CONCRETE IS ASSUMED TO BE RECYCLED AS A SUBSTITUTE FOR GRAVEL PRODUCTION. ENERGY FOR REMOVING THE CONCRETE IS SET EQUAL TO EXCAVATION OF THE SAME VOLUME OF SOIL. CRUSHING OF THE CONCRETE IS ASSUMED TO USE THE SAME AMOUNT OF ENERGY AS USED FOR THE UPTAKE. DIRECT RECYCLING RATES FOR ABOVE GRADE MATERIALS: SEE APPENDIX 1</p>

MACHINES
INCLUDES: FUEL USE, COMBUSTION EMISSIONS, LUBRICATING OIL
ASSUMPTIONS: AL MACHINE TYPES ASSUMED TO HAVE SAME COMBUSTION EMISSIONS PER LITER OF DIESEL CONSUMED
EXCLUDED ITEMS
COMPUTERS: NOT INCLUDED AS NO DATA ON USE WAS COLLECTED IN SITU CO ₂ GENERATION FROM OXIDATION OF THE ORGANIC SOIL CONTENT

The applied LCA data are seen in BILAG C. Only additional LCA data used for the ET-DSP™ technology are shown below.

OVERVIEW OF APPLIED LCA DATA FOR PRODUCTION OF ELECTRICITY, METALS AND PLASTICS			
PROCESS	DATA SOURCE	PROCESS NAME(S) IN DATABASE	COMMENT/ADJUSTMENT
METALS			
ALUMINIUM	ECOINVENT	RER: ALUMINIUM, SECONDARY, FROM NEW SCRAP, AT PLANT RER: ALUMINIUM, PRIMARY, AT PLANT	ASSUMED 80% SECONDARY AND 20% PRIMARY ALUMINIUM CONTENT
BRONZE	ECOINVENT	CH: BRONZE, AT PLANT	COPPER CONTENT ASSUMED TO BE 95% SECONDARY AND 5% PRIMARY COPPER
BRASS	ECOINVENT	CH: BRASS, AT PLANT	COPPER CONTENT ASSUMED TO BE 95% SECONDARY AND 5% PRIMARY COPPER
PLASTICS			
NYLON	ECOINVENT	RER: NYLON 66, AT PLANT	END-OF-LIFE PHASE ADDED. NYLON IS ASSUMED TO BE INCINERATED IN A COMBINED HEAT AND POWER PLANT, WHERE 1KG REPLACES 1 KG OF OIL ^{A)}
EPDM RUBBER	ECOINVENT	RER: SYNTHETIC RUBBER, AT PLANT	END-OF-LIFE PHASE ADDED. NYLON IS ASSUMED TO BE INCINERATED IN A COMBINED HEAT AND POWER PLANT, WHERE IT REPLACES OIL 0.7 KG OIL ^{A)}
GRAPHITE AND BENTONITE			
GRAPHITE	ECOINVENT	RER: GRAPHITE, AT PLANT	
BENTONITE	ECOINVENT	DE: BENTONITE, AT PROCESSING	
TRANSPORTATION			
PERSON TRANSPORT, AIRCRAFT	ECOINVENT	RER: TRANSPORT, AIRCRAFT, PASSENGER, INTERCONTINENTAL	
FREIGHT TRANSPORT, AIRCRAFT		RER: TRANSPORT, AIRCRAFT, FREIGHT, INTERCONTINENTAL	
FREIGHT TRANSPORT, TRAIN		US: TRANSPORT, FREIGHT, RAIL, DIESEL	

Abbreviations: CH: Switzerland, DE: Germany, RER: Europe

^{a)} Based on the relative heating values of oil and plastic product

BILAG F Life cycle assessment of Radio Frequency Heating - RFH

Gitte Lemming, DTU

Table of contents

F-1 Introduction.....	145
F-2 Life cycle inventory	145
F-3 Life cycle impact assessment methods	146
F-4 Results of the RFH baseline scenario	146
F-4.1. On-site electricity use	150
F-4.2. Above grade materials	150
F-4.3. Well field materials	152
F-4.4. Toxic versus non-toxic impacts	153
F-5 Suggestions for environmental optimization of RFH.....	153
F-6 References	154
F-7 Appendices.....	156

F-1 Introduction

This note presents the results of the conducted life cycle assessments (LCAs) of remediation with Radio Frequency Heating. Based on this, the main contributing parts of the remediation system contributing to environmental impacts and resource depletion are identified and options for reducing the environmental impacts suggested.

F-2 Life cycle inventory

The inventory was based on a small scale RFH pilot project conducted by Orbicon at Ådalsparkvej 63 in Hørsholm. The RFH remediation at the site was terminated prior to reaching the remediation goals due to technical issues. However, in the inventory the total energy usage, activated carbon usage, etc. is estimated as if the remediation had been completed as scheduled. The pilot site had a treatment area covering 25 m², and the contamination was located 4-8 meters below grade. Thus, a contaminated volume of 100 m³ was treated.

Furthermore, an inventory was made for site size of 180 m² and a contaminated soil volume of 1,200 m³, i.e. equivalent to the “small site” used for the assessment of the other technologies. The RFH technology has so far only been used at relatively small sites, and thus it was considered unrealistic to scale up the technology to a case equivalent to the “large site” used to evaluate the other technologies. The inventory of materials and energy use for RFH at the two sites are presented in Appendix 1.

LCA “cradle-to-gate” data was mainly taken from the Ecoinvent database (Frischknecht et al. 2007) with a few additional data from the ELCD database (EC, 2009). An end-of-life phase was added to

all materials based on the expected fate. An overview of the applied LCA data and adjustments made is seen in Appendix 2.

F-3 Life cycle impact assessment methods

The EDIP2003 methodology (Hauschild and Potting, 2005) was chosen as the impact assessment method for all non-toxic impacts (global warming, ozone formation, eutrophication, acidification) except respiratory impacts from particulate matter (respiratory inorganics), which was quantified using the method from Humbert et al. (2009). Toxic impacts (ecotoxicity, human toxicity cancer, human toxicity non-cancer) were estimated using the USEtox™ method (Rosenbaum et al. 2008). All environmental impacts are normalized to person equivalents (PE) by dividing with the annual impact from an average European⁴ using 2004 normalization references (Laurent et al, 2011a; Laurent et al. 2011b). The EDIP97 methodology (Wenzel et al. 1997) was applied for depletion of resources (energy resources and scarce metals). All resource consumption results are converted to person reserves (PR), i.e. normalized to person equivalents and weighted by the reciprocal supply horizon for each resource. The applied normalization references and weighting factors for resource use are based on 2004 data (LCA center, 2005).

F-4 Results of the RFH baseline scenario

The LCA results for the baseline scenario of remediation with RFH for the two sites of 25 m² and 180 m² respectively have been divided into a number of subcategories and are shown in Figure F-1 and F-3 (environmental impacts) as well as Figure F-2 and F-4 (resource depletion). The results are given both as impacts generated per site and per m³ of soil remediated. The contents of the various subcategories (transportation, materials (well field), materials (above grade), machines and energy use) are described in Table F-1.

On-site electricity use is the subcategory that contributes the most to the non-toxic environmental impacts at both sites (63-88% of total impacts). Above grade material gives the second highest contribution to non-toxic impacts (7-22%) followed by machines (3-12%). Well field materials and transportation contributes relatively little to non-toxic impacts. Regarding the toxic impacts, above grade materials is the largest contributor followed by well field materials and electricity use.

On-site electricity use is the main contributor to depletion of energy resources, whereas well field and above grade materials are responsible for the depletion of nickel, chromium, iron and copper.

⁴ For global impacts (global warming) and resource consumption the normalization reference is based on an average world citizen. For all other impacts (local and regional) the normalization reference is based on an average European.

TABLE F-1
 DESCRIPTION OF THE CONTENTS OF EACH SUBCATEGORY IN FIGURE E-1 AND E-2. A MORE DETAILED DESCRIPTION IS GIVEN IN APPENDIX 2.

SUBCATEGORY	CONTENT
ON-SITE ELECTRICITY	INCLUDES ELECTRICITY USED FOR THE RADIO FREQUENCY ANTENNAS AND THE ELECTRICITY USE FOR THE TREATMENT SYSTEM. AN EFFICIENCY OF THE RFH POWER GENERATOR OF 50% WAS ASSUMED. NEXT GENERATIONS OF RFH POWER GENERATORS ARE EXPECTED TO HAVE AN EFFICIENCY CLOSE TO 80%.
MATERIALS (ABOVE GRADE)	<p>INCLUDES MATERIALS AND EQUIPMENT USED ABOVE GROUND: VAPOUR CAP, ACTIVATED CARBON, HEAT EXCHANGERS, COOLERS, TANKS ETC. SPECIAL EQUIPMENT FOR THE RFH ARE THE POWER GENERATORS, MATCHBOXES AND COBBER SHIELDS AND LEADS. THE MATERIAL COMPOSITION OF THIS EQUIPMENT IS SHOWN IN APPENDIX 1.</p> <p>THE TRANSPORTATION OF THE MATERIALS TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK IS INCLUDED HERE TOO. HOWEVER, THE POWER GENERATOR, MATCHBOX AND COPPER SHIELD AND LEADS ARE TRANSPORTED SPECIFICALLY FROM LEIPZIG, GERMANY, AND THIS TRANSPORTATION IS INCLUDED IN THE <i>TRANSPORTATION</i> SUBCATEGORY.</p>
MATERIALS (WELL FIELD)	INCLUDES MATERIALS AND EQUIPMENT FOR THE WELL FIELD: SAND, BENTONITE, RFH ANTENNAS, TEMPERATURE MONITORING POINTS, MANIFOLDS, COPPER WIRES, ETC. THE ANTENNAS ARE MADE OF A COMBINATION OF STAINLESS STEEL AND FIBERGLASS AND THE EXTRACTION OF VAPOUR IS DONE DIRECTLY THROUGH THESE. THE COMPOSITION OF OTHER MATERIALS CAN BE SEEN IN APPENDIX 1. THE TRANSPORTATION FROM THE PRODUCER TO A LOCAL SUPPLIER IN DENMARK IS FURTHERMORE INCLUDED.
MACHINES	INCLUDES FUEL USE AND EMISSIONS FROM MACHINES USED ON SITE: DRILL RIGS, EXCAVATORS, GRADERS, COMPRESSORS, GENERATORS, FORKLIFTS, CRANES ETC.
TRANSPORTATION	<p>TRANSPORTATION (90 KM RETURN TRIP) OF MATERIALS, EQUIPMENT AND PERSONNEL TO SITE.</p> <p>FURTHERMORE, THE POWER GENERATOR, MATCHBOX AND COPPER SHIELD AND LEADS ARE ASSUMED TO BE TRANSPORTED TO DENMARK FROM LEIPZIG, GERMANY, BY LORRY (650 KM) AND RETURNED TO GERMANY AFTER USE.</p>

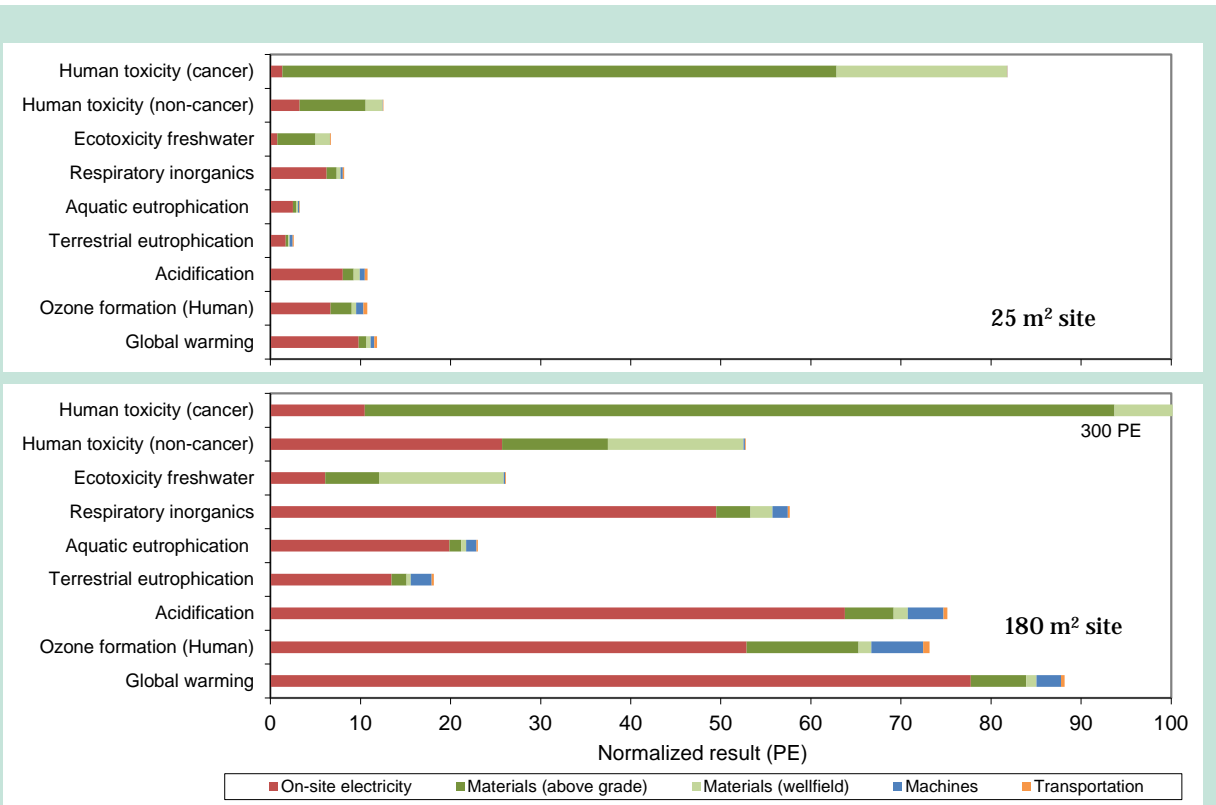


FIGURE F-1
ENVIRONMENTAL IMPACTS ASSOCIATED WITH REMEDIATION BY RFH GIVEN PER SITE IN PE

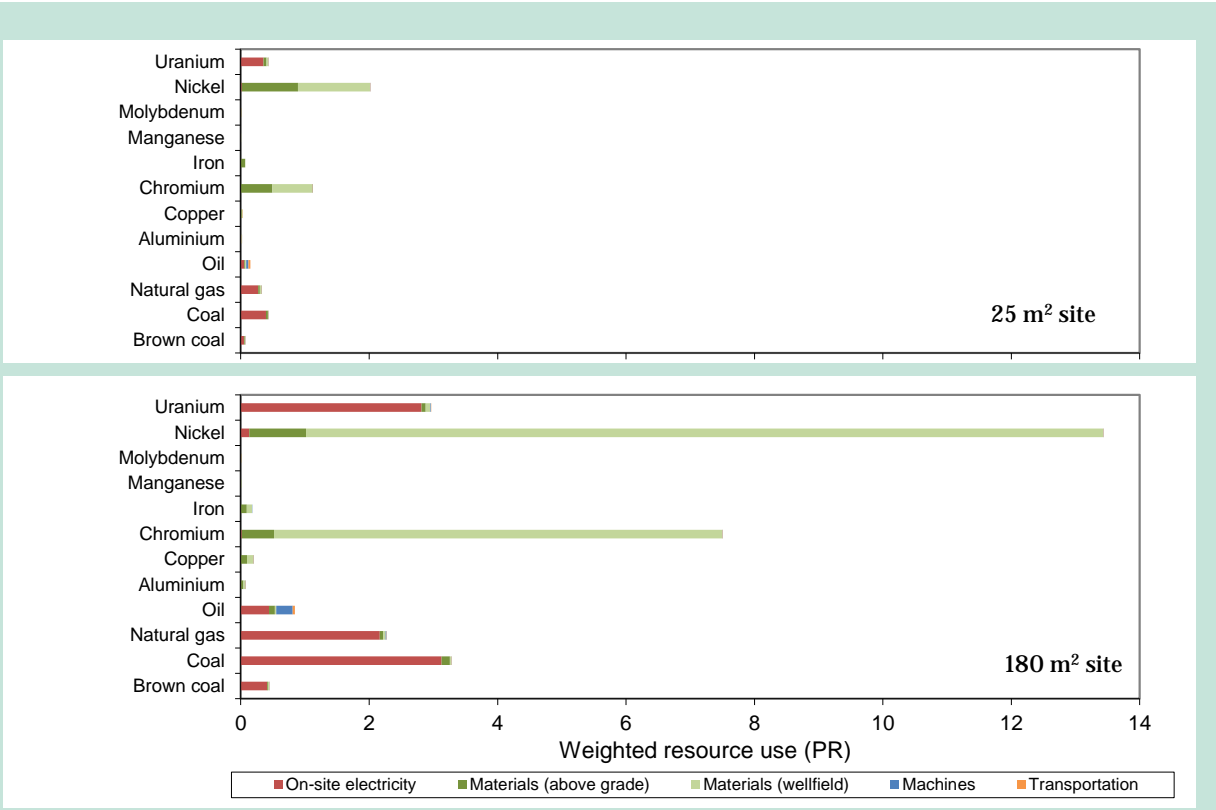


FIGURE F-2
RESOURCE DEPLETION ASSOCIATED WITH REMEDIATION BY RFH GIVEN PER SITE IN PR

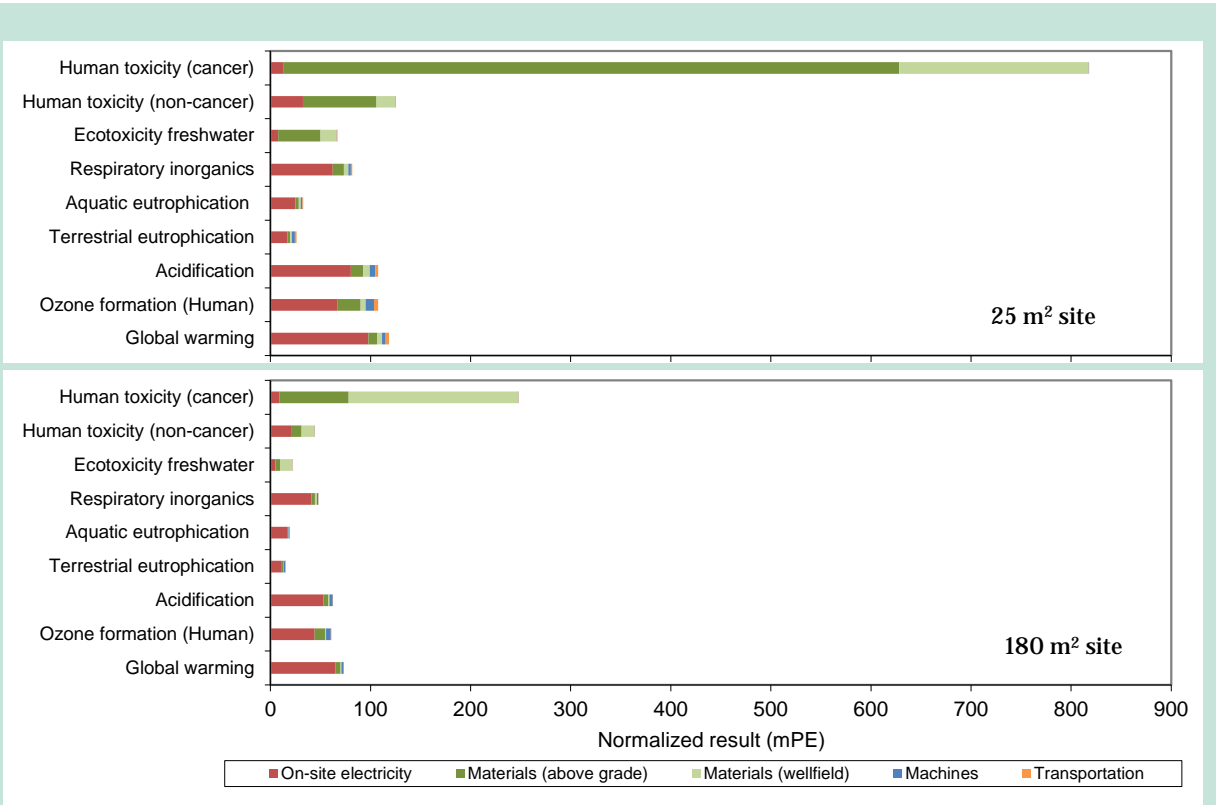


FIGURE F-3
ENVIRONMENTAL IMPACTS ASSOCIATED WITH REMEDIATION BY RFH PER M³ OF SOIL IN MPE.

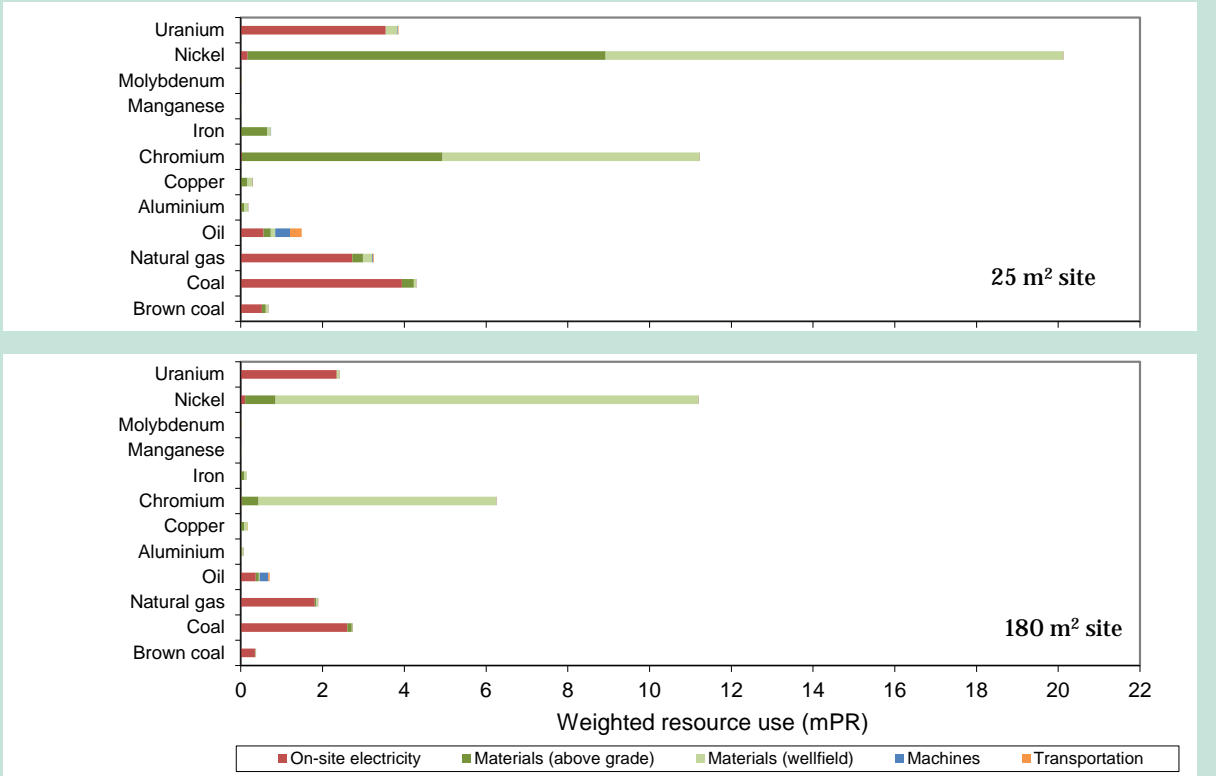


FIGURE F-4
RESOURCE DEPLETION ASSOCIATED WITH REMEDIATION BY RFH GIVEN PER M³ OF SOIL IN MPR

F-4.1. On-site electricity use

As mentioned above, electricity use on-site is the main cause of non-toxic environmental impacts. The largest part of the electricity use (64% at the 25 m² site and 88% at the 180 m² site) is due to the electricity input to the RFH antennas for the heating of the soil. The remaining energy is used for the extraction and treatment of the contaminated vapor and water extracted from the subsurface.

F-4.2. Above grade materials

After electricity consumption, the materials used above grade are the major contributor to non-toxic impacts. A detailed result of the environmental impacts and resource depletion associated with the above grade materials can be seen in Figure F-5. At the 25 m² site, the main causes of the non-toxic impacts are the activated carbon used for vapor treatment and the steel and polyethene (PE) used for the treatment system. At the pilot test site, which the inventory for the 25 m² site is based on, no vapor cap was used, since the top of treatment was 4 m bgs. Therefore a foam concrete cap was not included in the assessment. However, a vapor cap is usually necessary during RFH and this will add significant impacts to the above grade materials as seen in the result for the 180 m² site.

The activated carbon especially causes high levels of ozone formation, acidification and respiratory impacts, whereas the foam concrete has a high impact on global warming, eutrophication and acidification.

Steels which are used for containers, storage tanks etc. are the main source of toxic impacts for this subcategory. The use of stainless steel also results in a high depletion of the alloying metals nickel and chromium as seen in Figure F-6. Activated carbon use results in high depletion of coal, whereas the PE especially contributes to the depletion of oil, natural gas and uranium. Copper depletion is due to the use of copper wires and copper in the power distributor.

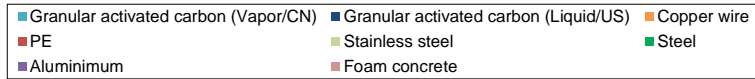
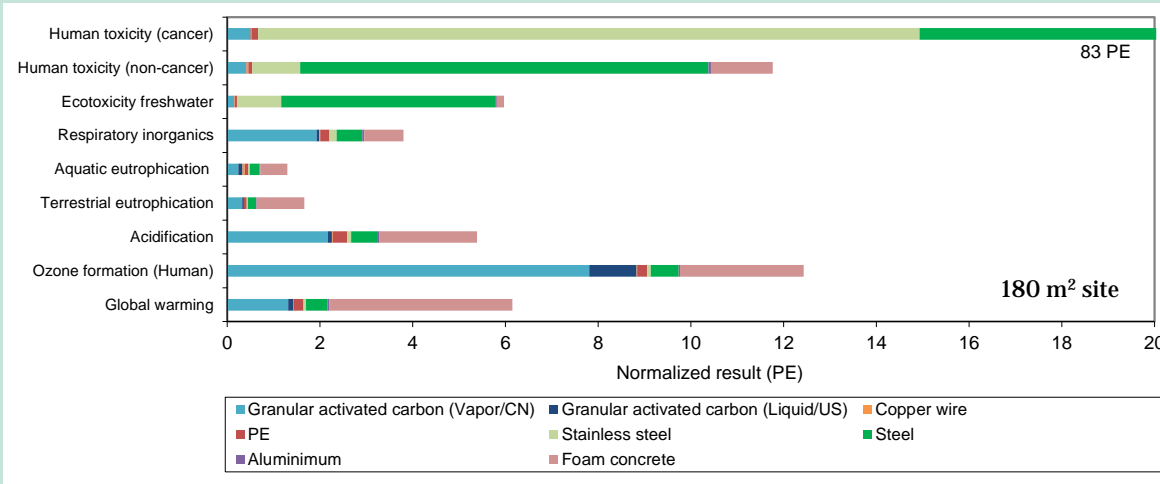
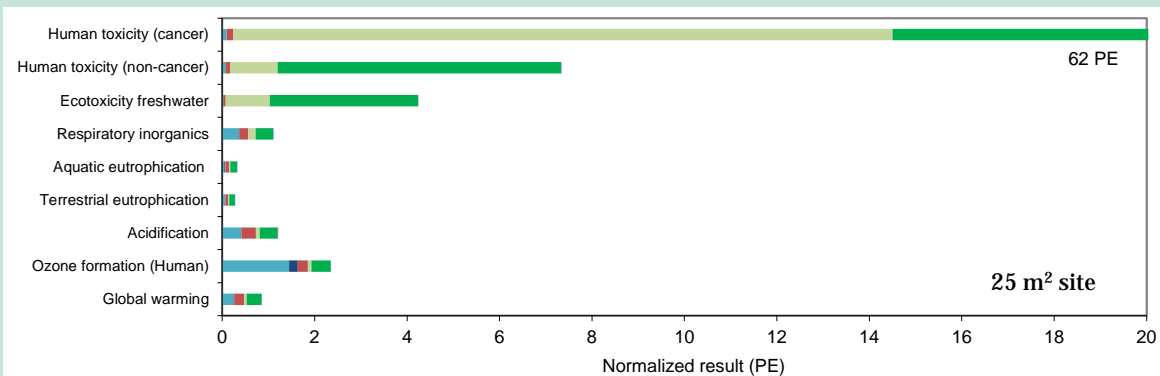
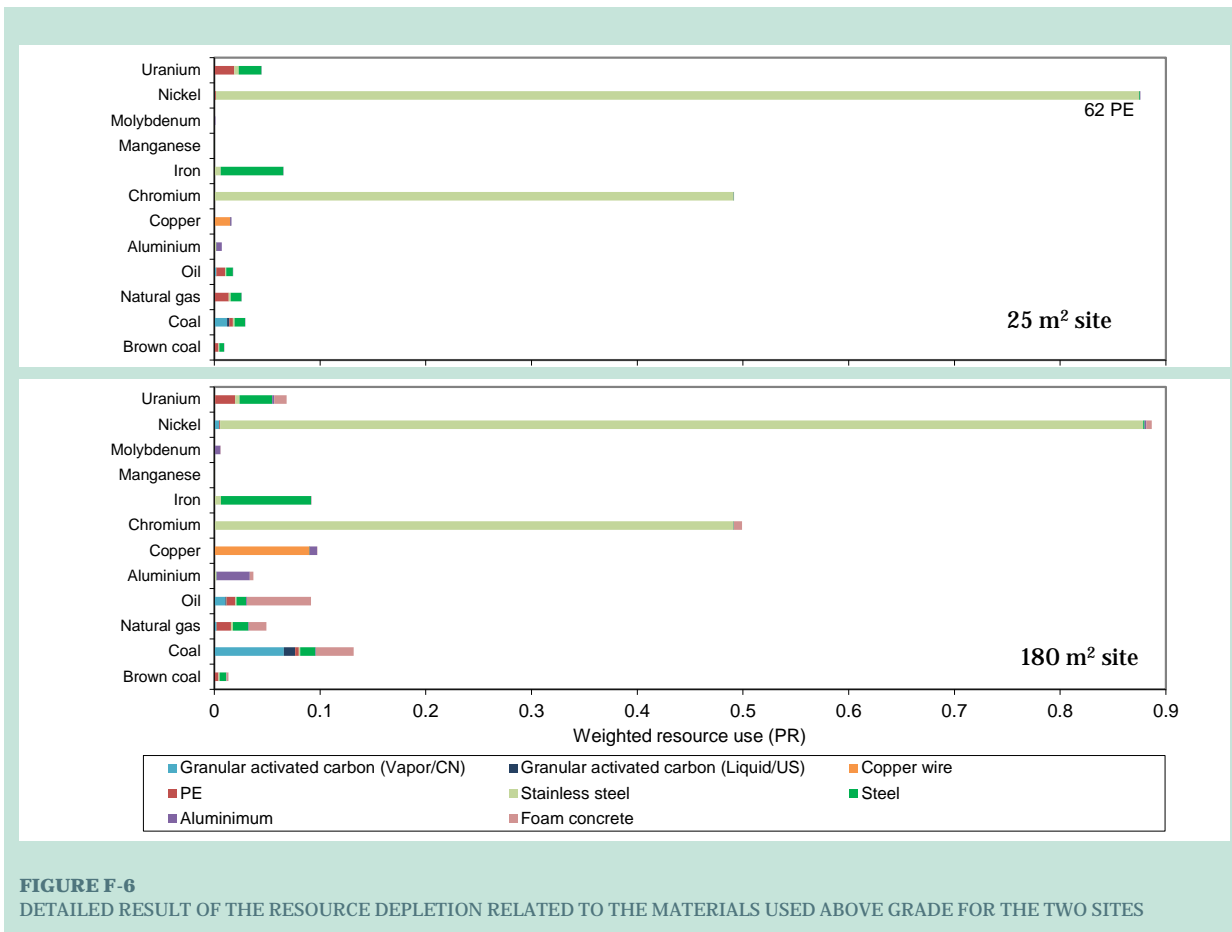


FIGURE F-5
DETAILED RESULT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS RELATED TO THE MATERIALS USED ABOVE GRADE FOR THE TWO SITES



F-4.3. Well field materials

The well field materials only contribute little to the non-toxic impacts (average 3% of total impacts), but are a large contributor to the toxic impacts (12-23%). In Figure F-7, a detailed result of the impacts associated with the well field is shown for the pilot scale site. It shows that the toxic impacts are associated with the use of stainless steel, which is used for the RFH antennas. This is due to toxic releases to the environment during the mining, processing and manufacturing of the stainless steel.

Fiberglass is the largest contributor to non-toxic impacts. The fiberglass is also used for the RFH antennas. The non-toxic impacts of the well field materials are, however, relatively small compared to the total non-toxic impacts of the entire RFH project (see Figure F-1)

The well field materials are furthermore the main source to depletion of nickel, chromium and copper due to the use of stainless steel and copper wires.

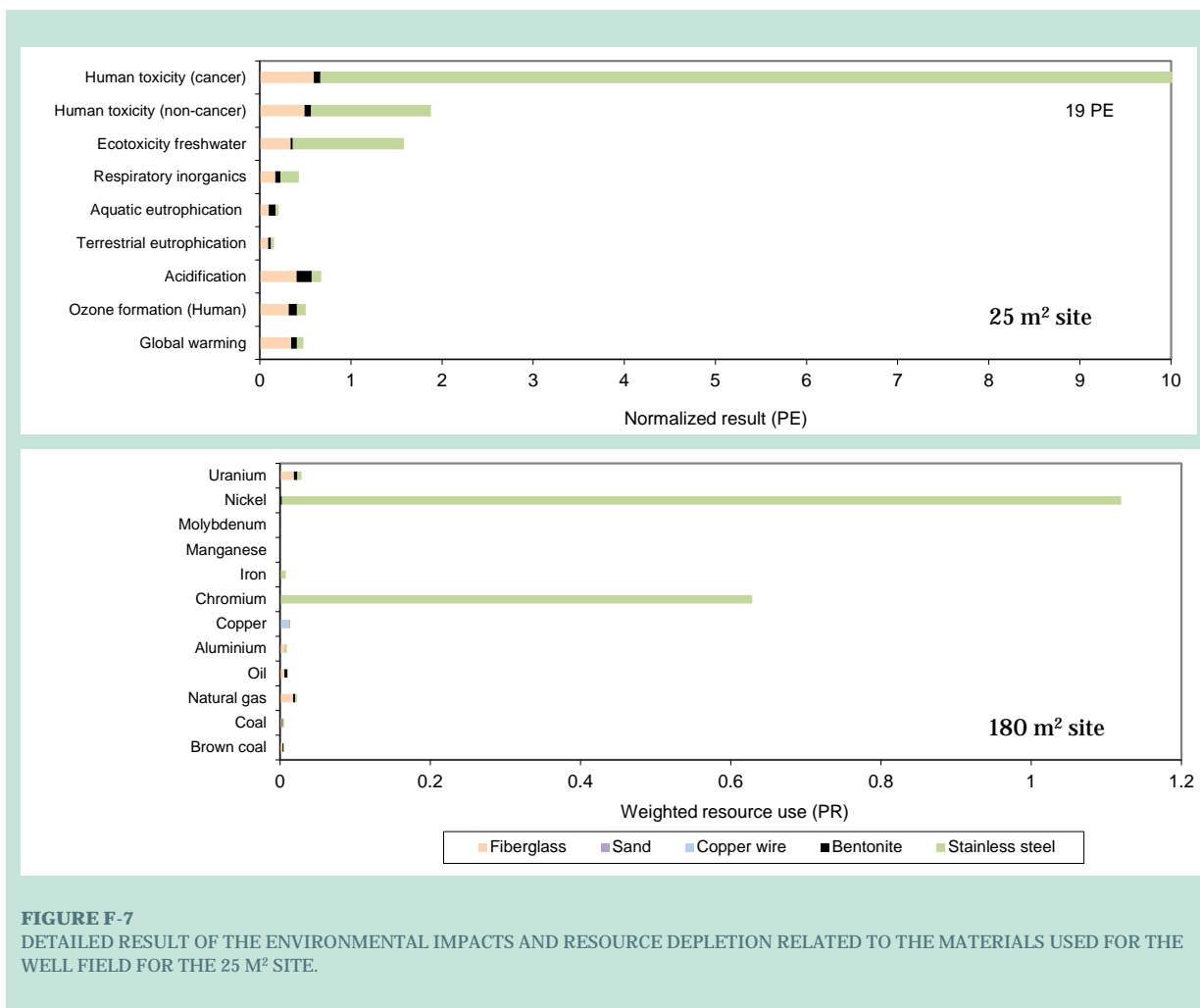


FIGURE F-7
 DETAILED RESULT OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS AND RESOURCE DEPLETION RELATED TO THE MATERIALS USED FOR THE WELL FIELD FOR THE 25 M² SITE.

F-4.4. Toxic versus non-toxic impacts

The results of the life cycle assessments generally show that the toxic impacts are higher than the non-toxic impacts in terms of PE. When comparing toxic and non-toxic impacts, it should however be kept in mind that the impact assessment of toxic impacts is associated with a much higher uncertainty due to the large number of chemicals included in the assessment, but also in the actual characterization factors describing the relative toxicity between different toxic substances. In this analysis, the toxic impacts are mainly ascribed to releases of heavy metals during production of steel and stainless steel. However, whereas the characterization factors for organic contaminants are well developed in LCA, the metal characterization factors are still interim and will be updated in the near future. Today, the characterization of metals is done by considering the total concentration of metals emitted. However improved characterization factors are underway that consider the speciation and the biological available fraction of the metals. This will probably lead to lower toxicity related to metal emission. Thus for now, the toxic impacts can be held relative to each other, but the magnitude should not be compared directly to the non-toxic impacts.

F-5 Suggestions for environmental optimization of RFH

The life cycle assessment results for RFH showed that on-site electricity consumption is the main driver of non-toxic environmental impacts. This is followed by the use of above grade materials.

The toxic impacts mainly stem from the use of steel and stainless steel, which is consumed in the well field installations and for the above grade installations.

Depletion of energy resources is also mainly due to the on-site electricity use, whereas the use of scarce metals (especially nickel, chromium and copper) primarily stems from the stainless steel and copper wires used in the well field.

As shown in BILAG C, it is possible to reduce the impacts related to the above grade materials significantly by changing the construction of the vapor cap and using biobased activated carbon. Furthermore, changing to heating more at night and less during the daytime, might improve the environmental profile as excess electricity in the grid can be exploited. This was also studied in BILAG C.

The further development in RFH power generators will be beneficial for reducing the environmental impacts related to the on-site electricity use. Currently, the power generators have an efficiency of only 50%, meaning that only 50% of the produced energy ends up in the subsurface. The next generation of power generators is expected to have an efficiency of 80%. This is, however, still low compared to ISTD and ET-DSP™ that have efficiencies close to 100%.

F-6 References

- EC. 2009. European Commission – Joint Research Centre (JRC), European Reference Life Cycle Database (ELCD core database), version II.
<http://lct.jrc.ec.europa.eu/assessment/data>.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., and Wernet, G. 2007. Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.
- Hauschild, M.Z. and Potting, J. 2005. Spatial differentiation in life cycle impact assessment - the EDIP-2003 methodology. Environmental news No. 80 2005, Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment.
- Humbert S., Marshall J., Shaked S., Nishioka Y., Preiss P., Spadaro J., Horvath A., and Jolliet O. 2009. Intake fractions and characterization factors for particulate matter: review and recommendations (in review).
- Laurent, A., Lautier, A., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I., and Hauschild, M.Z. 2011a. Normalization references for Europe and North America for application with USEtox (TM) characterization factors. International Journal of Life Cycle Assessment 16, 728-738.
- Laurent, A., Olsen, S.I., and Hauschild, M.Z. 2011b. Normalization in EDIP97 and EDIP2003: updated European inventory for 2004 and guidance towards a consistent use in practice. The International Journal of Life Cycle Assessment 16, 401-409.
- LCA Center. 2005. List of EDIP factors downloaded from LCA Center Denmark 04-11-2008 at <http://www.lca-center.dk/cms/site.aspx?p=1595>.
- Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., and Hauschild, M.Z. 2008. USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and

freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13, 532-546.

Wenzel, H., Hauschild, M., and Alting, L. 1997. *Environmental assessment of products. - 1: Methodology, tools, and case studies in product development*. Chapman & Hall, United Kingdom, 1997, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA. USA.

F-7 Appendices

Appendix 1: Overview of consumption data for the two sites

TRANSPORTATION	UNIT	SMALL SITE (180 M ²)	PILOT SCALE SITE (25 M ²)
TRAVEL BY CAR	personkm	13,056	14,205
SHIPPING BY VAN/SMALL TRUCK (DAY TO DAY DELIVERIES)	kgkm	52,961	55,505
SHIPPING BY TRUCK (ABOVE GRADE MATERIALS)	kgkm	2,006,280	1,338,030
SHIPPING BY TRUCK (WELL FIELD MATERIALS)	kgkm	1,752,483	258,138
SHIPPING BY TRUCK FROM LEIPZIG	kgkm	6,000,000	1,596,000
TRAVEL DISTANCE, PERSON CAR, TRUCK, SMALL VAN (ROUND TRIP) ¹	km	90	90
TRAVEL DISTANCE, TRUCK (RETURN TRIP FROM LEIPZIG) ²	km	1,200	1,200

¹ DISTANCE USED FOR LOCAL TRANSPORT OF EQUIPMENT AND PERSONNEL TO AND FROM SITE

² DISTANCE USED FOR TRANSPORT OF EQUIPMENT (POWER GENERATOR, MATCHBOX ETC., 1200 KG SHIPPED FOR PILOT SCALE SITE AND 5000 KG SHIPPED FOR SMALL SITE) FROM LEIPZIG, GERMANY, TO DENMARK AND RETURN TRIP.

TOTAL MATERIALS USAGE	UNIT	SMALL SITE (180 m ²)		PILOT SCALE SITE (25 M ²)	
		WELLFIELD	ABOVE GRADE	WELLFIELD	ABOVE GRADE
SAND	kg	11,794		1,172	
BENTONITE	kg			917	
HIGH TEMPERATURE GROUT	kg	905			
VAPOR CAP CONCRETE	kg	41,600			0
VAPOR GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg		2,646		490
LIQUID GRANULAR ACTIVATED CARBON	kg		405		75
CARBON STEEL	kg		3659		2548
STAINLESS STEEL TYPE 1	kg	6000	422	540	422
COPPER	kg	74	66	9	11
ALUMINIUM	kg		90		15
EPDM - RUBBER	kg				
FIBERGLASS	kg	219		120	
PE	kg		791		783

UTILITY USAGE	UNIT	SMALL SITE (180 M2)	PILOT SCALE SITE (25 M2)
POWER USAGE, TREATMENT SYSTEM	kWh	121,580	45,430
POWER USAGE (INJECTED INTO SUBSURFACE)	kWh	869,520	79,480
GASOLINE USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	6055	567
DIESEL USAGE, TOTAL (MACHINES)	liter	800	0

Note that the material usage only includes the fraction of the materials used on this specific project as some components can be used several times. The applied reuse rates are listed below: 100% means that the material is not recycled, but ascribed 100% to this project. 25% means that the material is used on 4 projects and therefore only 25% is ascribed to this project and so forth. The tables below show furthermore that the material composition and number of units used for the well field materials and above grade materials respectively.

REUSE RATES FOR WELL FIELD MATERIALS (GIVEN AS PERCENT OF MATERIAL ASCRIBED TO THIS PROJECT)						
	NUMBER OF UNITS		MATERIAL	WEIGHT PER UNIT (kg)		% ASCRIBED TO PROJECT
	SMALL SITE (180 M2)	PILOT SCALE SITE (25 M2)		SMALL SITE (180 M2)	PILOT SCALE SITE (25 M2)	
RFH ANTENNAS	50	9	STAINLESS STEEL FIBERGLASS	120 4	60 49	100
ANTENNA WELLS	50	9	SAND BENTONITE	235.9 6.5	117.9 91.7	100 100
TEMPERATURE MONITORS	20	8	HIGH TEMP. GROUT BENTONITE FIBERGLASS	45.2 8.7	11.5 9.4	100 100 100
VAPOR MANIFOLD	1	1	FIBERGLASS	45	45	100
	Length (m) Small site	Length (m) Pilot scale site	Material	Weight per unit length (kg/m)		
CABLE BETWEEN ANTENNA AND POWER SUPPLY	7	5	COPPER	0.35		40

REUSE RATES FOR ABOVE GRADE MATERIALS (GIVEN AS PERCENT OF MATERIAL ASCRIBED TO THIS PROJECT)						
EQUIPMENT FOR THE ABOVE GRADE TREATMENT SYSTEM						
	DESCRIPTION	SUBELEMENT	MATERIAL	WEIGHT PER UNIT (kg)		% ASCRIBED TO PROJECT
				SMALL SITE (180 M2)	PILOT SCALE SITE (25 M2)	
KOP1	KNOCK OUT POT	-	CARBON STEEL	160	160	5%
HX1	HEAT EXCHANGER	-	STAINLESS STEEL	500	500	25%
KOP2	KNOCK OUT POT	-	CARBON STEEL	160	160	5%
SVE-CONTAINER	CONTAINER WITH BLOWER	CONTAINER BLOWER (DINGO 125)	CARBON STEEL CARBON STEEL	2,400 200	2,400 200	10% 25%
A-GAC	CARBON FILTERS FOR AIR TREATMENT	CARBON FILTERS X 3	PE CARBON STEEL	2,400 300	2,400 300	25% 25%
		HYDRASIL FILTER	PE CARBON STEEL	300 62	300 62	25% 25%
COOLER	CONTAINER WITH PUMPS FOR CIRCULATION OF COOLING WATER	CONTAINER GRUNDFOSS PUMPS (2)	CARBON STEEL	825 280	825 280	25% 50%
		HEAT EXCHANGER WATER	STAINLESS STEEL STAINLESS STEEL	50	50	50%
ST1	STORAGE TANK	-	CARBON STEEL	1,000	1,000	25%
FPT1	FREE PRODUCT TANK	-	PE	50	50	25%
DC	DRY COOLERS (DC1)	-	CARBON STEEL	2,100	2,100	50%
WATER TREATMENT	CONTAINER WITH CARBON FILTERS FOR WATER	CONTAINER CARBON FILTER (4 SAME SIZE) BUFFER TANK	CARBON STEEL	2,400	2,400	25%
			STAINLESS STEEL	464	464	25%
			PE	376	376	25%
OFFICE CONTAINER	CONTAINER WITH CONTROL PC	CONTAINER	CARBON STEEL	825	0	25%
WORKSHED CONTAINER	CONTAINER WITH TOOLS ETC.	CONTAINER	CARBON STEEL	2,400	0	25%
ELECTRICAL CONTROLLER	CONTAINER WITH ELECTRICAL INPUT CONTROLS	CONTAINER	CARBON STEEL	4,800	4,800	25%

SPECIAL EQUIPMENT FOR RFH						
	DESCRIPTION	NUMBER OF UNITS		MATERIAL	WEIGHT PER UNIT (KG)	% ASCRIBED TO PROJECT
		SMALL SITE (180 M2)	PILOT SCALE SITE (25 M2)			
POWER GENERATOR	GENERATORS CONVERTING THE POWER TO MICROWAVES.	6	1	CARBON STEEL PE COPPER ALUMINIUM	590 10 50 150	10%
MATCHBOX	OPTIMIZE THE RADIO FREQUENCY SIGNAL FOR THE RF ANTENNA	6	1	CARBON STEEL PE COPPER	20 5 5	10%
COPPER SHIELD AND LEADS	SHIELDS TO CONTROL MICRO WAVES AT THE SURFACE (FARADAYS CAGE) AND COPPER LEADS FROM THE POWER GENERATORS TO THE RFH ANTENNAS	6	1	COPPER	10	10%

Appendix 2: Overview of LCA data

The modeling and application of LCA data for materials, energy etc. are covered by the LCA processes already presented for ISTD, SEE and ET-DSP™ and can be seen in BILAG C, BILAG D and BILAG E.

BILAG G Optimering af vapor cap

Indhold

G-1 Funktion af vapor cap	161
G-2 Eventuelt fladedræn	162
G-3 Undersøgte vapor cap's	163
G-4 Materialevalg	165
G-4.1. Skumbeton	165
G-4.2. Sprøjtebeton.....	166
G-4.3. Polystyren plader – EPS	167
G-4.4. Leca letklinker.....	168
G-4.5. Muslingskaller	169
G-5 Vurdering af materialer i forhold til funktionskrav	170
G-6 Sammenfatning af alternative vapor caps	171
G-7 Ordliste	172
G-8 Referencer	172

G-1 Funktion af vapor cap

Dampe fra oprensingsprocessen opsamles via et vakuum ventilationssystem. I den forbindelse fungerer vapor cap som en barriere for etablering af en afskærende dampopsamling. Samtidig skal vapor cap også isolere mod varmetab, så der opnås en tilstrækkelig høj temperatur i jordens øvre lag. Sidst skal vapor cappen minimere infiltreringen af kølende overfladevand til det opvarmede område.

Vapor cap's opbygges ens uanset valg af termisk oprensingsmetode. Cap'en opbygges direkte på et afrettet terræn over oprensingsområdet og går typisk op til ca. 3-4 meter ud på ydersiden af oprensingsområdet. Hvis toppen af oprensingsområdet ligger dybere end ca. 2,5-3,0 meter er det ikke nødvendigt med en varmeisolerende vapor cap. De overliggende jordlag vil virke tilstrækkelig isolerende. En luft- og vandtæt membran er dog stadig påkrævet.

Hidtil har der på danske oprensninger været anvendt skumbeton til opbygning af vapor cap, idet det tilgodeser funktionskrav til dampbarriere, afskæring af overfladevand og isolering. Samtidig kan en vapor cap i skumbeton relativt let udlægges.

Dette projekt inkluderer en sammenlignende analyse af alternative udformninger med skumbeton og sandwichkonstruktioner med forskellige valg af isolerende lag. En sandwichkonstruktion omfatter følgende lag:

ATMOSFÆRE
TOPAFDÆKNING
ISOLERING
BARRIERE
EVENTUEL FLADED RÆN
JORD

Topafdækningen skal fungere som tætning mod ventilering af isolering, afskærmning mod nedbør og kunne bære let trafik. Der er i alle sandwichkonstruktioner valgt en sprøjtebeton til topafdækning.

Varmeisoleringen skal sikre, at den fornødne temperatur opnås overalt i de terrænnære jordlag. Under opvarmningsprocessen spredes varmeenergi fra heatere ud til alle dele af det forurenede legeme i jorden. For at varmefronten kan brede sig må der nødvendigvis være en temperaturgradient. En isolering af vapor cap, der resulterer i højere temperaturer end nødvendigt under vapor cap, vil kun have marginal betydning for varmefrontens videre spredning.

Erfaringsmæssigt bør vapor cap'ens samlede konstruktion have en varmetransmissionskoefficient U på ca. $0,38 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (Terratherm, 2012). Med mindre varmeenergien i jorden genvindes vil en forbedret isolering blot medføre en midlertidigt højere temperaturer under vapor cap indtil opvarmningen stopper, hvorefter energien tabes til omgivelserne. Isoleringsgraden indgår derfor ikke som en optimeringsparameter.

De vapor cap's, der indgår i beregningsscenarier i denne rapport har varmetransmissionskoefficienter mellem $0,36 - 0,39 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, hvorved de isoleringsmæssigt er direkte sammenlignelige. Beregnede varmetransmissionskoefficienter fremgår af tabel G-2 sidst i bilaget.

Isoleringsmaterialer skal dels kunne bære topafdækning, ikke optage eventuel damp genereret i jorden og samtidig kunne tåle de aktuelle temperaturer. Den maksimale temperatur lige under vapor cap kan komme op på 100°C for ISTD, ET-DSP™ og SEE. For ISTD's vedkommende kan temperaturen tæt ved heatere komme op på ca. $200-300^\circ\text{C}$. Ved højtemperatur ISTD oprensninger kan temperaturen under cappen komme på ca. $100-150^\circ\text{C}$ og endnu højere tæt på heatere.

Barrieren under isoleringen skal være damptæt og kunne klare et aggressivt miljø i de uger som oprensningen varer. Dampe fra oprensning af klorerede stoffer kan være korrosiv, idet kondensat kan indeholde saltsyre, der dannes på grund af de høje temperaturer tæt på heatere.

Jorden under vapor cap kan have varierende geotekniske egenskaber, der kan medføre endog store differenssætninger under opvarmning, som kan give gennemgående revner i barrieren. Dette gør sig i særlig grad gældende for moseaflejringer og anden jord med højt vandindhold, idet disse aflejringer vil sætte sig i takt med at vandet fordamper.

Såfremt jorden har en vis luftpermeabilitet kan vapor cap opbygges direkte på jorden, idet dampe ledes direkte til vakuumentilationsboringer. I tilfælde af en begrænset permeabilitet eller inhomogene forhold kan det være nødvendigt at udlægge et gruslag under vapor cap, der kan fungere som et afskærende fladedræn.

G-2 Eventuelt fladedræn

Et fladedræn kan opbygges af sorteret grus, der eksempelvis kan være baseret på nedknuste genbrugsmaterialer af beton. Kalkholdige og porøse materialer i øvrigt er erfaringsmæssigt ikke et problem, idet der ikke vil ske kondensation af forureningen, hvis temperaturen under cap'en er over de forurenende stoffernes kogepunkt. Det bør tilstræbes at udstøbe barrieren direkte på gruslaget, idet beton med vedhæftet grus vil kunne bortskaffes til genbrug. Hvis der udstøbes på en plastfolie eller lignende vil dette hæfte til betonen, hvorved mulighederne for genbrug reduceres.

Sorteret grus er let at udlægge og fjerne. Evt. mindre ujævnheder vil kunne optages som variationer i lagtykkelsen af fladedrænet, hvorved gruslaget også kan fungere som et afretningslag. Sorteret

grus koster i indkøb typisk 50 – 100 kr. pr. m³. Det vurderes at grus vil kunne genbruges efter at det er dokumenteret at være rent.

Fladedrænet anbefales opbygget i materialer og med en tykkelse (og dermed transmissivitet), der tillader anvendelse af punktsug fra drænlaget. Herved vil der ikke være behov for at udlægge linedræn i rustfri materialer i selve gruslaget. Drænrør i rustfri materialer udgør i sig selv en relativt stor miljøbelastning. Ekstraherede dampe fremføres i sugeledninger over vapor cap. Sugeledninger over vapor cap har hidtil i Danmark været udført i sort jern, men udføres normalt i glasfiberrør i USA, når temperaturen ikke overstiger ca. 110°C.

G-3 Undersøgte vapor cap's

Flere alternative udformninger af vapor cap vil kunne imødekomme de opstillede funktionskrav. I det følgende er der foretaget en sammenlignende undersøgelse af fem alternative opbygninger af vapor cap. De fem konstruktioner er udvalgt for at kvantificere forskelle i LCA miljøprofil og beskrive de udførelsesmæssige forskelle, mulighederne for genbrug samt indikation af prisforskelle.

De undersøgte fem alternative vapor cap's omfatter:

- Alt. 0: Skumbeton, normal: Densitet 400 kg/m³. Samlet højde 40 cm.
- Alt. 1: Skumbeton, højporøs: Densitet 300 kg/m³. Samlet højde 26 cm.
- Alt. 2: Betonsandwich med 10 cm polystyren plader (EPS) og Leca letklinker omkring heatere.
- Alt. 3: Betonsandwich med 21 cm Leca letklinker.
- Alt. 4: Betonsandwich med 30 cm muslingskaller.

Alternativ 0 benævnes også base line senarie, idet denne konstruktion har været anvendt på projekter i Danmark. Principper for design fremgår af figur G-1.

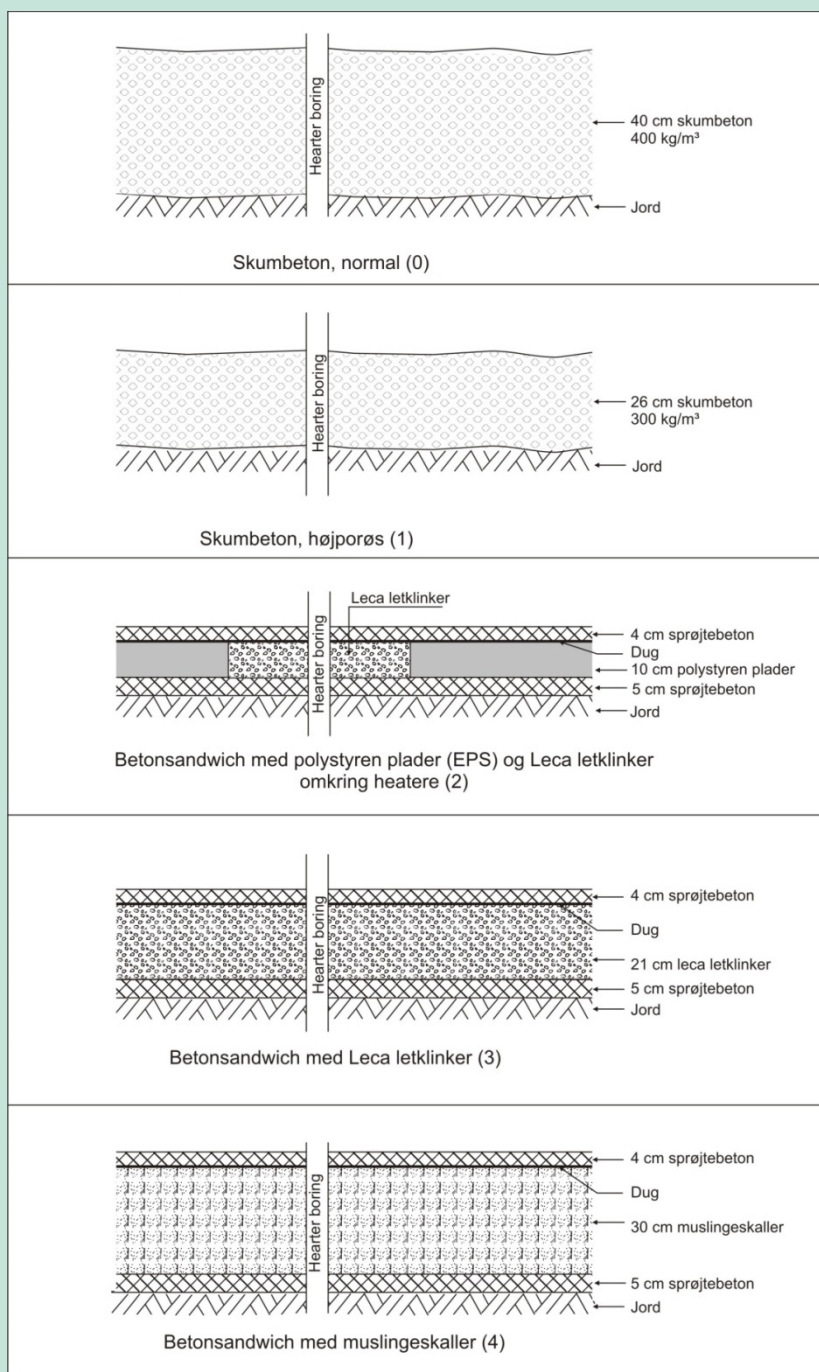
Vapor cap udført i skumbeton har den meget store fordel, at den er relativt nem at udlægge, selv om der er mange boringer, sonder med videre. Endelig er der ikke krav til særlige arbejdsmiljøforanstaltninger.

Vapor cap udført som en betonsandwich konstruktion kræver flere arbejds gange og stiller større krav til præcision i udlægningen af de relativt tynde lag af sprøjtebeton. I alle betonsandwich konstruktioner indgår en topafdækning med 4 cm sprøjtebeton og en barriere i bunden med 5 cm sprøjtebeton. I USA har man traditionel anvendt en 2" topafdækning og en 2-3" barriere i bunden, idet det afrettede underlag altid vil være lidt ujævnt. Det vurderes, at topafdækningen kan reduceres til ca. 4 cm, mens barrieren i bunden ikke bør være tyndere. I det omfang tværsnit mindskes, stilles der tilsvarende højere krav til udførelsen, idet ujævnheder i underlag vil resultere i en varierende reel tykkelse af betonlagene.

Barrieren skal udlægges direkte på jorden eller på et eventuelt fladedræn. Der vil være mange gennemføringer fra boringer og sonder, hvorfor en udlægning af præfabrikerede membraner vil være arbejdskrævende. Der ses derfor kun på in situ støbte betonbarrierer.

Tidligere har det været normalt at lade vapor cap gå ca. 3,0 meter ud på ydersiden af oprensingsområdet, hvor tendensen i dag er at reducere dette til ca. 2,5 m, hvilket er forudsat i de

aktuelle beregningsscenarier. For et cirkulært oprensingsområde på 1.000 m² betyder dette at det samlede vapor cap areal reduceres fra 1.364 m² til 1.300 m², svarende til 5%.



FIGUR G-1
TVÆRSNIT I UNDERSØGTE ALTERNATIVE VAPOR CAP'S. (ALT. 0 – 4)

Mineraluld har været overvejet som isoleringsmateriale. Terratherm har afprøvet mineraluld med forskellig densitet i flere projekter (Terratherm, 2012). Deres erfaring er, at selv bats med høj densitet ikke tåler vedvarende trafik og efterhånden presses sammen. Dertil kommer problemer med opugning af damp og vand og et deraf følgende tab af isoleringsevne. Endelige er udlægning og tilpasning af bats omkring borer, sonder med videre relativt arbejdskrævende og kræver arbejdsmiljøforanstaltninger. En anvendelse af mineraluld vil således kræve en indbygning i en

sandwichkonstruktion. På den baggrund er det valgt i dette projekt alene at medtage anvendelse af polystyrenplader, der har omtrent den samme isoleringsevne som mineraluld.

Der er udlagt en tynd diffusion åben membrandug (Tyvek) over det isolerende lag. Dugen sikrer at den våde beton ikke trænger ned isolering med store åbne porer (Leca og muslingeskaller) og ikke klæber til isoleringen, der derved lettere kan separeres og genbruges. Der er en risiko for at det kan være vanskeligt at separere dugen fra betonlaget i forbindelse med nedbrydningen.

I designfase bør behov for evt. terrassering overvejes. I givet fald gøres dette ved terrænregulering eller udlægning af et afretningslag inden opbygning af vapor cap. Ligeledes skal håndtering og bortledning af regnvand fra vapor cap'en adresseres i forbindelse med etableringen af afretningslag.

Det bør overvejes at udlægge en dug for at kunne separere EPS plader fra toplaget af beton. Dug vil givetvis hæfte til toplaget af beton, hvilket kan vanskeliggøre genbrug. For Leca letklinker og muslingeskaller bør dette undlades, hvis vedhæftning til betonen ikke hindrer genbrug heraf.

G-4 Materialevalg

G-4.1. Skumbeton

Råstoffer, produktion og typisk anvendelse

Skumbeton anvendes typisk til præfabrikerede elementer i husbyggeri, men kan også støbes på brugsstedet, hvilket gør den velegnet til brug for vapor cap. Se afsnit om udlægning/indbygning.

Skumbeton er en letbeton, som fremstilles af cementmørtel og et uspecificeret skumningsmiddel, der tilsættes under produktionen. Skum fremkommer derved under mørtelens fremstilling i blandemaskinen. Densiteten varierer normalt fra 300 kg/m³ til 1.200 kg/m³ (Aalborg Portland, 2011).

Beton er grundet indholdet af cement "klinker" et relativt miljøbelastende produkt, idet cement er energikrævende af fremstille. Flyveaske, der er et restprodukt fra kulbaserede kraftværker, indgår i reglen i produktionen af beton, idet det har lidt de samme egenskaber som "klinker", men styrken udvikler sig væsentligt langsommere. Fuld styrke opnås typisk efter 1 – 2 uger.

Som et særligt dansk fænomen tilsættes flyveasken først på betonværkerne. Her har de siloer med cement og flyveaske og blander selv det produkt, som kunden efterspørger.

I cementproduktionen på Aalborg Portland anvendes kun en mindre mængde flyveaske som aluminiumskilde. Andelen af flyveaske udgør typisk 10%, men restprodukter fra aluminiumsproduktion og andet kan også indgå som aluminiumskilde.

Aalborg Portland tilsætter - for at fremme miljøprofilen – afhængig af produkttype op til 16% udbrændt kalkfiller.

Additiver i skumbeton er ikke kortlagt.

Transport og mellemlagring

Skumbeton leveres normalt færdigblandet for direkte udlægning.

Udlægning/indbygning

Skumbeton udlægges i flere lag for at forebygge, at luften presses ud under vægten af den overliggende beton. Mangelfuld udførelse kan indebære en for høj densitet og dermed ringere

isoleringsevne. Endvidere kan porer blive for store med ringere isolerings- og styrkeegenskaber til følge. Endelig kan porer i en vis udstrækning blive åbne, hvorved vapor cap kan optage dampe eller nedbør med ringere isoleringsevner til følge.

Erfaringsmæssigt kan skumbeton ved en densitet på 400 kg/m³ (vådvægt under udlægningen) produceres så det opfylder de ønskede funktionskrav ved korrekt dimensionering og udførelse. Varmeledningsevnen ved denne densitet er ca. 0,15 W/m K.

Alternativ 1 med en højporøs skumbeton med en densitet på 300 kg/m³ og en varmeledningsevne på ca. 0,10 W/m K må betragtes som en konstruktion, der forudsætter særlige krav til udførelsesmetode og kvalitetskontrol, idet ovennævnte risici for mangler vil være endnu højere for denne type vapor cap. Det skal dog nævnes, at skumbeton produceret på stedet er beskrevet som en mulighed til bygningsisolering ved densiteter ned til 200 kg/m³ (Jensen & Vahlgren, 2011). Styrken af skumbeton ved meget lav densitet er imidlertid så ringe, at den ikke nødvendigvis kan tåle let trafik.

Det har været overvejet at medtage en betonsandwichkonstruktion med top og barriere i sprøjtebeton og skumbeton ved en densitet ned til 250 kg/m³ som isoleringsmedie. Dette er fravalgt, idet det samlede betonforbrug alligevel bliver relativt højt og fordi der – som for de øvrige sandwichkonstruktioner – tilføres to ekstra arbejdsgange til vapor cap støbningen, idet hvert lag skal nå at afbinde før næste lag udlægges.

Skumbeton bør udlægges på et tilnærmelsesvist vandret underlag, idet den udlagte beton vil have tendens til at flyde. Det kan derfor være nødvendigt at foretage en terrænregulering af vapor cap området eller om nødvendigt en terrasserings.

Opbrydning, genanvendelse og bortskaffelse

Skumbeton kan relativt let opbrydes og vil normalt kunne bortskaffes til genbruges i stedet for grus. Det bør tilstræbes at undgå at udstøbe på geotekstiler eller folier, der kan hæfte til skumbetonen. Når skumbetonen brydes op kan det være vanskeligt at separere fra geotekstil eller folie, hvorved betonen skal bortskaffes som affald.

I denne rapport antages det at 90% af den anvendte skumbeton kan nedknuzes og genbruges.

G-4.2. Sprøjtebeton

Råstoffer, produktion og typisk anvendelse

Sprøjtebeton anvendes typisk til reparation af betonkonstruktion, der er svært tilgængelige eller som er udsat for et aggressivt miljø. Eksempler er reparation af broer, dragere, søjler, altaner, facader mv.

Sprøjtebeton er en cementbaseret tørtørtelemprodukt, der produceres til tørsprøjtning eller vådsprøjtning. Ved tørsprøjtning tilsættes vand simultant under udlægningen. Ved vådsprøjtning sker der en effektiv opblanding med vand til en pumpbar beton, der kan sprøjtes. Vådsprøjtning vurderes mest hensigtsmæssigt til opbygning af vapor cap, idet produktionsprocessen bedre kan kontrolleres. Tilslagsmaterialet i sprøjtebeton er ovntørret kvartssand, hvorfor densiteten af det færdige produkt typisk er ca. 2.000 – 2.100 kg/m³. Varmeledningsevnen ved denne densitet er ca. 1,3 W/m K.

Tørmørtelen er tilsat uspecificerede plastificerende og klæbeforbedrende additiver (Marlon, 2011).

I forbindelse med dette projekt er muligheden for at erstatte tilslagsmaterialer af ovntørret kvartssand med finkornet Leca diskuteret med en producent. Producent mener ikke umiddelbart, at

der er noget til hinder herfor, men anbefaler en afprøvning i praksis. En substitution af sand med Leca vil bringe densiteten ned og isoleringsevnen op, hvilket vil være en fordel i opbygning af en vapor cap. Eksempelvis vil det kunne eliminere risikoen for smeltning af polystyren plader og mindske materialeforbruget som helhed.

Den anvendte cement er en såkaldt "ren" Portland cement, der typisk indeholder indtil 5% kalkfiller. Se nærmere omtale af cementproduktion i afsnit om skumbeton.

Transport og mellemlagring

Tørmørtel til on site produktion af sprøjtebeton transporteres til lokaliteten i big-bags, der skal opbevares tørt indtil brug på byggepladsen.

Udlægning/indbygning

Sprøjtebeton kan blandes på stedet og vådsprøjtes kontinuert så støbeskel undgås. Udlægningen af sprøjtebeton kræver ikke forskalling og kan udføres på områder med svær geometri omkring rør og på hældende eller vertikale flader (Aalborg Portland, 2011).

Tilsættelse af propylen fibre har været overvejet for at give betonen en højere trækstyrke for at mindske revnedannelse. Det vurderes kun at have effekt i topafslutningen, idet opvarmningen i barrierelaget vil reducere propylenfibretrækstyrke.

Nedbrydning, genanvendelse og bortskaffelse

Sprøjtebeton i tynde lag kan relativt let opbrydes og vil normalt kunne bortskaffes til genbrug i stedet for grus. Vedhæftning på rør mv. må forudses. Det bør tilstræbes at undgå at udstøbe på geotekstiler eller folier, der kan hæfte til sprøjtebetonen. Når sprøjtebetonen brydes op kan det være vanskeligt at separere fra geotekstil eller folie, hvorved betonen skal bortskaffelse som affald.

I denne rapport antages det, at 90% af den anvendte sprøjtebeton kan nedknuses og genbruges.

G-4.3. Polystyren plader – EPS

Råstoffer, produktion og typisk anvendelse

Polystyren plader kendes også under navnet flamingo plader og flere varemærkenavne. På engelske hedder det expandede polystyrene (EPS). Polystyren anvendes typisk til bygningsisolering, emballage mv. Særlige fordele ved produktet er en lav densitet kombineret med en relativt god bæreevne samt et lille fugtoptag.

Densiteten varierer afhængig af produkttype mellem 13 - 36 kg/m³. Til opbygning af en vapor cap vurderes produkter med en densitet på 15 kg/m³ for velegnet. Varmeledningsevnen ved denne densitet er ca. 0,037 W/m K.

EPS - råvarer fremstilles i udlandet ud fra styren (Schmidt, 2006), men støbes til isoleringsplader bla. i Danmark. Under fremstillingsprocessen polymeriseres styren til polystyren. Processen foregår i vandigt miljø tilsat suspensionsmidler. Det færdige polymerisationsprodukt forefindes som små kugler (beads) svævende i den vandige fase. Ekspansionsmidlet (pentan) opløses i kuglerne efter, at polymerisationsprocessen er forløbet. Når pentantilsætningen er tilendebragt sigtes kuglerne i forskellige størrelsesfraktioner. Kuglerne påføres en coating, som modvirker, at kuglerne utidigt smelter sammen under de efterfølgende forarbejdningsprocesser hos EPS-producenterne. Sammen med coatingen kan evt. additiver tilsættes. Den færdige EPS-råvare har form af små kugler, som for standardproduktets vedkommende består af ca. 94 pct. polystyren og ca. 6 pct. pentan, der efterfølgende afdamper.

Producenter af polystyren plader angiver typisk en anvendelsestemperatur op til 80 – 85°C samt en korttidsbelastning ved 100°C. Ved temperaturer over 80 – 85°C må det forventes, at pladerne gradvist bliver bløde og begynder at smelte ved temperaturer nær 100°C. Man skal derfor være opmærksom på risikoen for smeltning af dette materiale, især nær heatere, hvor temperaturen overstiger 100°C.

Tænker man sig polystyren plader anvendt, vil temperaturen under vapor cap først nå 100°C efter fuld opvarmning af de øvre jordlag, dvs. efter at forureninger som klorerede stoffer er mobiliseret. Herefter skal man blot sikre sig at forurening ikke efterfølgende kondenserer i tilfælde af et temperaturfald.

Den nedre barriere af sprøjtebeton vil i sig selv yde en mindre isolering. Temperaturforskellen over dette betonlag under fuld opvarmning beregnes til mindre end 2°C ved en isoleringstykkelse af polystyrenplader på 100 mm og en temperaturforskel mellem over- og underside af cap på 92°C. Polystyren kan formentlig holde sig nogenlunde stabil til ca. 90 – 95°C.

Ved at gå til grænsen – og påtage sig risikoen for mulig mindre smeltning – vurderes det muligt at anvende polystyren plader som vapor cap isolering. Med henblik på at verificere dette bør det overvejes at indbygge et prøvefelt med en polystyren plade og temperaturovervågning i en vapor cap i et kommende projekt med en traditionelt udført vapor cap.

Der findes mere kemisk og termisk stabile produkter til bygningsisolering, men det findes så vidt vides ikke på det danske marked.

Transport og mellemlagring

Polystyren plader transporteres i pakker på lastbil og kan lages frit på byggepladsen.

Udlægning/indbygning

Polystyren plader udlægges på et afrettet plant underlag. En betydelig del af isoleringsevnen tabes, hvis der er mellemrum under og mellem de enkelte plader. Arbejdet med udlægning og tilpasning af isolationsplader omkring borer, sonder mv. vil være mere arbejdskrævende end udlægning af skumbeton, Leca letklinker eller muslingeskaller. Der er nødvendigt med en udsparring omkring heatere på minimum 0,4 x 0,4 m, idet polystyren ikke tåler de høje temperaturer nær heaterne. Disse huller udfyldes med varmeresistent materiale, eksempelvis Leca letklinker, hvilket beregningsmæssigt er antaget i denne rapport.

Nedbrydning, genanvendelse og bortskaffelse

Polystyren plader fjernes let efter brug, såfremt topafdækningen udstøbes på en dug, der hindrer direkte kontakt. Uskadede polystyren plader kan i reglen bortskaffes lokalt til genbrug. Ekspanderet polystyren (EPS) kan genanvendes ved at blive neddelte og anvendt som løsfyld eller som tilsætning til ny plast ved støbning af ny emballage eller forbrugerprodukter (Schmidt, 2006), men den lokale regulering af affaldshåndtering er afgørende for om det genbruges eller indgår i affaldsforbrænding.

I denne rapport antages det, at brugt EPS forbrændes i affaldsforbrændingsanlæg.

G-4.4. Leca letklinker

Råstoffer, produktion og typisk anvendelse

Leca anvendes eksempelvis til kapillarbrydende lag under gulve, flydelag i gyllebeholdere og i planteproduktion. Desuden produceres Leca blokke til eksempel opbygning af fundamenter.

Leca letklinker 4 – 10 mm vurderes egnede som isoleringsmateriale i vapor cap. Produktet er vandafvisende, kapillarbrydende, termisk stabilt og fleksibelt at udlægge.

Grundmaterialet i Leca letklinker er fed plastisk ler, der brændes i roterovne, hvor leret ekspanderer til små kugleformede letklinker. Ved brændingen udvikles små luftfyldte porer, der omgives af en hård skal af brændt ler. Et eventuelt indhold af organisk materiale forsvinder under forbrændingen.

Densiteten varierer mellem 260 – 325 kg/m³. Varmeledningsevnen er ca. 0,085 W/m K.

Transport og mellemlagring

Leca letklinker kan leveres i big-bags eller i løs vægt på lastbil i mængder på indtil ca. 100 m³/læs, der tippes ved levering.

Udlægning/indbygning

Leca letklinker kan udlægges med gravemaskine eller blæses ud, hvilket utvivlsomt er hensigtsmæssigt med de mange forhindringer, der er i opvarmningsområdet. De udlagte letklinker skal afdækkes med en topafdækning for at opnå den fornødne isoleringsevne. Komprimering er ikke nødvendig før udstøbning af topafdækning.

Nedbrydning, genanvendelse og bortskaffelse

Efter fjernelse af topafdækning vurderes det let af fjerne letklinker ved opgravning, fejning alternativt med slamsuger. Det skønnes at ca. 90% af de anvendte Leca letklinker kan returneres til fabrik og her indgå i produktionen af Leca blokke. Alternativt kan en lokal anvendelse til eksempelvis flydelag i gyllebeholdere tænkes. I denne rapport antages genbrug af 90% de anvendte Leca letklinker.

Det bør afklares om beton med vedhæftet Leca kan bortskaffes til genbrug. Hvis det ikke er muligt bør behov for underlag for udstøbning overvejes. I så fald vil beton med underlag skulle bortskaffes som affald.

G-4.5. Muslingeskaller

Råstoffer, produktion og typisk anvendelse

I Danmark er muslingeskaller et restprodukt fra produktion af fiskekonserves i Glyngøre ved Limfjorden. Muslingeskallerne er hjerte- eller blåmuslinger, der stammer fra muslingefiskeri henholdsvis Vadehavet og Limfjorden. Der landes mere end 100.000 tons muslinger om året i Danmark. Indvinding af muslinger er en sæsonpræget aktivitet. Således ligger fiskeriet som regel stille juli til september. I denne periode kan der blive knaphed på skaller.

Vognmandsfirmaet Fredsø Logistik (Fredsø Logistik, 2011) på Mors har eneret på levering af skaller i Danmark. Muslingeskaller anvendes typisk som underlag på ridebaner, til drænformål, bygningsisolering eller udlagt på havbunden som gydepladsmateriale (Holland). Der må påregnes lang leveringstid, idet muslingeskaller er en sæsonvare og efterspørgslen er varierende.

By og Byg har undersøgt muslingeskaller som et isoleringsmateriale (By og Byg, 2001). Densiteten for muslingeskaller er bestemt til 308 kg/m³ for hele skaller og 655 kg/m³ for knuste skaller. Varmeledningsevnen er ca. 0,12 W/m K for både hele og knuste skaller.

Transport og mellemlagring

Muslingeskaller leveres i løs vægt på lastbil i mængder på indtil ca. 100 m³/læs, der tippes ved levering (Fredsø Logistik, 2011). Under transport flader volumen typisk til ca. 85 m³, hvilket skyldes en tættere pakning af skallerne når de vibreres under kørslen.

Der er i det aktuelle beregninger forudsat en let knusning af skaller svarende til et indbygget volumen på 75 m³ skaller pr. vognlæs.

Transportafstanden fra Mors har relativ stor betydning for prisen. Skaller kan tilbydes "næsten" rengjort mod en merpris. Rengøringsmetode er ikke specificeret.

Udlægning/indbygning

Der foreligger ikke erfaringer med anvendelse af muslingeskaller som isolering i vapor cap, men de vurderes velegnet til etablering af vapor cap såfremt lugtgener forebygges.

Under levnedsmiddel produktionen efterlades kødrester i skallerne. De rådner efterfølgende og giver anledning til kraftig lugt, især når skallerne er stakket. Luften i nærområdet kan under ugunstige forhold som varme sommerdage indeholde så høje koncentrationer af formaldehyd og ammoniumbaserede gasser, at det ikke må indåndes. Skaller skal derfor under alle omstændigheder udlægges i en længere periode til afgasning i et område, hvor naboer ikke generes heraf.

Afgassede skaller kan udlægges med gravemaskine. De udlagte skaller skal afdækkes med en topafdækning for at opnå den fornødne isoleringsevne. Komprimering er ikke nødvendig før udstøbning af topafdækning, men en vis knusning må forventes i forbindelse med udlægning af skallerne. Det har dog ikke væsentlig betydning for isoleringsevnen.

Nedbrydning, genanvendelse og bortskaffelse

Efter fjernelse af topafdækning vurderes det mulig at fjerne den overvejende del af skallerne ved opgravning. En del af skallerne vil formentlig blive fuldstændig knust i det omfang, der køres med maskiner i skallerne. Restmængder af skaller forventes at kunne fjernes ved fejning alternativt med slamsuger. Det skønnes at indtil ca. 90% af de leverede skaller vil kunne genbruges til eksempelvis drænformål. Dette forudsætter dog kontakt til nærliggende projekter, hvor genanvendelse er mulig.

Det bør afklares om beton med vedhæftede skaller kan bortskaffes til genbrug. Hvis det ikke er muligt bør behov for underlag for udstøbning overvejes. I så fald vil beton med underlag skulle bortskaffes som affald.

I denne rapport antages genbrug af 90% af de anvendte skaller.

G-5 Vurdering af materialer i forhold til funktionskrav

Skumbeton er tilstrækkeligt mekanisk, kemisk og termisk stabilt og vurderes velegnet til etablering af vapor cap såfremt det sikres, at en hensigtsmæssig udførelsesmetode anvendes. Ved særlige krav til udførelsesmetoder vurderes det muligt at udlægge en højporøs skumbeton, der har relativt bedre miljøprofil end tidligere udførte vapor cap's i Danmark.

Sprøjtebeton er tilstrækkeligt mekanisk, kemisk og termisk stabilt og vurderes velegnet til udlægning af en tæt barriere i bunden af vapor cap og som topafdækning i en sandwichkonstruktion. For at fremme varmeisoleringssevnen er der stillet forslag til at afprøve muligheden for om tilslagsmaterialer af sand kan erstattes af eksempelvis Leca letklinker, hvilket vil medføre en relativt bedre miljøprofil grundet bedre isoleringsevne, hvorved særligt isolering med polystyrenplader vil blive en relativt mere robust vapor cap.

Polystyrenplader (flamingo) vurderes tilstrækkeligt mekanisk og kemisk stabilt samt betinget termisk stabilt. Polystyrenplader vurderes således egnet til isolering af vapor cap, såfremt en risiko for smeltning i mindre omfang kan accepteres. Hvis den underlæggende barriere har en vis varmeisolerende effekt, så smeltning af polystyrenplader undgås, vurderes materialet velegnet. En

mindre/begyndende smeltning vurderes dog ikke problematisk ved oprensning af stoffer med kogepunkt svarende til klorerede stoffer, idet forureningen mobiliseres før der opnås en kritisk temperatur i undersiden af isoleringen i vapor cap.

Leca letklinker er tilstrækkeligt mekanisk, kemisk og termisk stabilt og vurderes velegnet som isoleringsmateriale i vapor cap, herunder også omkring heatere i løsninger med polystyrenplader.

Muslingeskaller er tilstrækkeligt mekanisk, kemisk og termisk stabilt og vurderes velegnet som isoleringsmateriale i vapor cap, herunder også omkring heatere i løsninger med polystyrenplader. Anvendelse af muslingeskaller forudsætter dog en afgasning af skallerne før brug. Afgasningen indebærer behov for en længerevarende mellemlagring i område, hvor naboer ikke udsættes for lugtgener.

Der er i tabel J-1 gengivet omtrentlige tal for materialernes densitet, varmeledningsevne, isoleringsevne relativt i forhold skumbeton (400 kg/m³) samt prisoverslag for materialer eksklusiv moms og eksklusiv udlægning/indbygning i vapor cap.

Den relative isoleringsevne giver umiddelbart et indtryk af behovet for materialetykkelse i forhold til en vapor cap, der er opbygget af skumbeton.

TABEL G-1
SAMMENFATNING AF DATA FOR MATERIALER, DER INDGÅR I VAPOR CAP I DEN AKTUELLE RAPPORT.

	SKUMBETON, NORMAL/HØJPORØS	SPRØJTEBETON	POLYSTYREN – EPS	LECA LETKLINKER	MUSLINGE- SKALLER
DENSITET (KG/M³)	400/300	2.100	15	215	300 – 500
LAMDA (W/M K)	0,15 / 0,10	1,3	0,037	0,085	0,12
RELATIV ISOLERINGSEVNE	1,0 / 1,5	0,12	4,1	1,8	1,25
LEVERING	FÆRDIGBLANDET MED BETONBIL	TØRMØRTEL	PAKKER MED PLADER	BULK 0 – 4 MM	BULK, HELE SKALLER
UDLÆGNING	VÅDSPRØJTET	BLANDES ON SITE OG VÅDSPRØJTET	TILPASSES OG UDLÆGGES	GRAVNING ELLER UDBLÆSNING	GRAVNING
BEMÆRKNINGER					HERTIL AFGASNING FØR ANVENDELSE

G-6 Sammenfatning af alternative vapor caps

Tværsnit af de vurderede alternative vapor cap's fremgår af Figur J-1 og design parametre fremgår af tabel J-2. LCA beregninger for de alternative vapor caps fremgår af BILAG C og er sammenfattende diskuteret i hovedrapporten.

TABEL G-2
SAMMENFATNING AF EGENSKABER FOR ALTERNATIVE VAPOR CAPS

ALTERNATIV #	0	1	2	3	4
	SKUMBETON, NORMAL	SKUMBETON, HØJPORØS	POLYSTYREN – EPS *)	LECA LETCLINKER	MUSLINGE- SKALLER
TYPE	MONOLIT	MONOLIT	BETONSANDWICH	BETONSANDWICH	BETONSANDWICH
SAMLET TYKKELSE (CM)	40	26	19	30	39
TYKKELSE AF ISOLERENDE LAG (CM)	40	26	10	21	30
BEREGET VARMETRANSMISSIONSKOEFFICIENT U-VÆRDI (W/M ² K)	0.37	0.39	0.36	0.37	0.39
ARBEJDSOMFANG	LILLE	LILLE	STORT	MODERAT	MODERAT
KRAV TIL UDFØRELSESMETODER	NORMAL	FORHØJET	NORMAL	NORMAL	NORMAL
GENANVENDELSE AF MATERIALER **)	JA	JA	NEJ	JA, BETINGET AF NÆRLIGGENDE PROJEKT	JA, BETINGET AF NÆRLIGGENDE PROJEKT
BEMÆRKNINGER		SÆRLIGE KRAV TIL UDFØRELSES- METODE	RISIKO FOR SMELTNING VED TEMPERATURER NÆR 100 °C		SKALLER KNUSES VED TRAFIK DIREKTE PÅ SKALLER

*) Udfyldning med Leca letklinker i 0,4 x 0,4 m felt omkring heatere.

**) Forudsat der ikke anvendes dug, membran eller folie, der kan hæfte til materialerne.

I alle betonsandwich konstruktioner indgår en topafdækning med 4 cm sprøjtebeton og en barriere i bunden med 5 cm sprøjtebeton.

G-7 Ordliste

Lambda-værdi: Varmeledningsevne for et stof i watt per meter kelvin (W/mK)

U-værdi: Varmetransmissionskoefficient der angiver, hvor stor en energimængde, målt i Wh, der i løbet af en time passerer gennem 1 m² af konstruktionen, når temperaturforskellen mellem den indvendige og udvendige flade er 1°C. U-værdien er tykkelsesafhængig og inkluderer alle materialer i den betragtede konstruktion.

G-8 Referencer

By og Byg. 2001. Bestemmelse af varmeledningsevne for store skaller og knuste skaller. Teknologisk Institut. DANAK Prøvningsrapport nr. 01001/rev. og 01002/rev. af 7. juni 2001.

Fredsø Logistik.2011. www.fredsoelogistik.dk (september 2011).

Jensen, J. og Vahlgren, A. 2011. Isolering til superlette konstruktioner i Arktis. Undersøgelse af muligheden for brug af skumbetonmateriale som isolering til superlette konstruktioner i arktiske egne. Afgangprojekt i Arktisk Teknologi ved Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet –Forår 2011 – Projekt nr. 11537.

Marlon Tørmørtel A/S. 2011 <http://www.marlon.dk> (oktober 2011).

Schmidt, A. 2006. Miljø- og sundhedsforhold for plastmaterialer. Miljøprojekt nr. 1103, Miljøstyrelsen.

TerraTherm. 2012. Kommunikation med Steffen Griepke Nielsen.

Aalborg Portland. 2011. <http://www.aalborgportland.dk> (september 2011).

BILAG H Ekstern energiregulering

Som udgangspunkt i LCA antages det, at den anvendte elektricitet er baseret på en normal dansk gennemsnitlig produktion baseret på et elmix fra kraftværker og vedvarende energi, hvis miljøpåvirkning varierer meget afhængig af energibasis og produktionsanlæggenes opbygning og effektivitet.

H-1 "Grønne" elprodukter

Eldistributionsselskaberne udbyder såkaldte "grønne" elprodukter på det danske elmarked (Det Økologiske Råd, 2011).

Energistyrelsen har i samråd med flere organisationer (Energinet.dk, Forbrugerrådet, Det Økologiske Råd, Danmarks Naturfredningsforening og Dansk Energi/Dansk Elhandel lavet en deklARATION på området til belysning af forskelle i klimapåvirkninger ved køb af "grønne" produkter. Typisk vil det ekstra beløb, som betales for "grønne" produkter, bliver brugt til et eller flere CO₂-reducerende tiltag. I henhold til deklARATIONEN opdeles disse i tre forskellige hovedgrupper (Danskelhandel, 2011):

1. Bidrag til opstilling af vedvarende energianlæg. Ekstern revisor skal dokumentere, at de ekstra beløb reelt investeres i anlæg til produktion af vedvarende energi.
2. Oprindelsesgaranti for vedvarende energi (VVE) - RECS-certifikater (renewable electricity certificate). Certifikater kan udstedes for anlæg, som enten er højst 2 år gamle, 10 år gamle eller uden aldersbegrænsning. Ved valg af nye anlæg kan det ekstra beløb som betales for "grøn" el fremrykke investeringer i vedvarende energianlæg. Ved køb af el med oprindelsesgaranti for vedvarende energi er konsekvenserne for miljøet afhængig af, hvorvidt garantien omfatter en aldersbegrænsning for anlægget. Der vil kun forekomme et markedspres for etablering af nye vedvarende energianlæg, såfremt der vælges RECS for nyere anlæg, f.eks. højst 2 år gamle anlæg, idet udbuddet af disse garantier er begrænset. Såfremt efterspørgslen fra de "grønne" kunder efter strøm med VVE-oprindelsesgaranti blot svarer til en eksisterende produktionskapacitet, vil det betyde, at de almindelige kunder får tilbudt strøm med en større andel el fra kulkraftværker, hvorved der reelt ikke opnås nogen miljømæssig forbedring.
3. Reduktion af CO₂ ved annullering af CO₂-kvoter/- kreditter. Herved hindres industrien i at gøre brug af udledningstilladelsen, hvorved man sparer atmosfæren for en udledning, der ellers ville være forekommet på ét eller andet tidspunkt. Annulleringen af kvoter og kreditter medfører reelt, at CO₂-udledningen reduceres mere end de aftalte mål. Det skyldes, at de annullerede kvoter og kreditter reducerer den energitunge industris mulighed for at udlede drivhusgasser. Effekten heraf forudsætter, at der er knaphed af CO₂-kvoter, hvilket ikke er tilfældet for indeværende.

På websiden "Din guide til grønt el-valg" (Grønt el-valg, 2013) er el-produkter med klimavalg inddelt i fire klasser A-D efter vurdering af den positive effekt for klima og udbygningen med vedvarende energi, med klasse A som den bedste. I klasse A betales et tillæg på ca. 5 - 7% som investeres i ny vedvarende energi. Ligeledes i klasse B betales et mindre tillæg som anvendes til investering i ny vedvarende energi, oprindelsesgarantier eller kreditter fra CO₂ reducerende klimaprojekter. Ved valg af klasse C og D er tillæg typisk mindre end 1%, men fører formentlig ikke til yderligere ny vedvarende energi.

Der er nogle elselskaber, som tilbyder el til en reduceret pris om natten, f.eks. mellem midnat og klokken 6 om morgenen, hvor der primært produceres el fra vedvarende energikilder. Vedvarende energikilder omfatter i Danmark primært vindkraft og biomasse, herunder fra affaldsforbrænding. Dertil kommer en betydelig import af vandkraft. På husstands niveau produceres der mindre mængder af solenergi. Bølgeenergi mv. er i Danmark på udviklingsstadium.

Produktionen af el baseret på vedvarende energi udgjorde i 2011 40,7% af den indenlandske danske elforsyning. Heraf bidrog vindkraft med 28,1%, biomasse med 11,5% og biogas med 1%. (Energistyrelsen, 2011).

Det forventes, at der i fremtiden vil være bedre muligheder for anvendelse af en større andel vindenergi til el produktion ved hjælp af et intelligent styret elnet, som giver mulighed for at sikre en stabil, pålidelig og effektiv strømforsyning. Grundlaget for et intelligent elnet er at forbrugerne motiveres (økonomisk og ideologisk) til at indrette forbrugsmønstret svarende til tidspunkter for el produktion fra vedvarende energikilder, dvs. om natten, hvor der er relativt stor VE produktion.

Produktionen af VE baseret på vindkraft varierer naturligvis med vinden og kan i perioder være meget lav, hvorimod VE baseret på biobrændsel og vandkraft kan reguleres med efterspørgslen.

Den maksimale efterspørgsel forekommer i dagtimerne, hvor kraftværker har spidslastproduktion af el. I Danmark baseres den marginale el produktion under spidsbelastning primært på naturgas og stenkul. Elforbruget uden for spidsbelastningsperioder vil have en relativt større andel af VE og er derfor relativt mindre miljøbelastende.

I princippet kan elforbrug ved drift af afværgeprojekter også betragtes som forbrug af en marginal produktionskapacitet, dvs. elforbrug hos kræftværker, som ikke kan annulleres ved køb af "grøn" elektricitet.

H-2 Referencer

Danskelhandel. 2011. Arbejdsgruppen vedr. deklarerung af elprodukter med klimavalg. 31-01-2011.

Det økologiske Råd. 2011. Klimavenlig energiløsninger. <http://www.ecocouncil.dk/>

Energistatistik 2011. Data, tabeller, statistikker og kort. Data, tabeller, statistikker og kort.

Energistyrelsen. 2011. http://www.ens.dk/DA-DK/INFO/TALOGKORT/STATISTIK_OG_NOEGLETAL/AARSSTATISTIK/Sider/Forside.aspx

Grønt el-valg. 2013. Din guide til grønt El-valg. <http://www.grøntelvalg.dk/>

Miljømæssig optimering af termiske oprensningsteknikker

Problematisk jordforurening med flygtige komponenter såsom chlorerede opløsningsmidler kan oprensning effektivt ved anvendelse af in situ termiske metoder, som dog er kendetegnet ved et stort forbrug af materialer og energi. Detaljerede og målrettede undersøgelser og risikovurderinger reducerer miljøpåvirkningerne væsentligt ved at optimere afgrænsning af det område, der skal oprensning, men fokus i dette projekt er dog på de processer, der er tilknyttet de termiske teknikker. Projektet omfatter en systematisk kortlægning af energi- og materialeforbrug for fire termiske oprensningsteknikker og identificerer en række tiltag, som kan reducere miljøpåvirkningerne.



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Strandgade 29
DK - 1401 København K
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

www.mst.dk