

バルト海における油回収の実践に関する最新の考察 および氷中における機械を用いた油濁対応の発展

ヨルマ・リトコーネン

フィンランド環境研究所

汚染対応グループ長・調査研究マネージャー

摘 要

機械的油回収という概念は、フィンランドの油流出対応機関が使用している主な方針の一つです。この概念は、バルト海諸国の間ではよく知られており、現在、堅い回転ブラシと油を回収タンクに移送するスクリュウポンプとを備えた油回収バケットを基本にした、多くの市販品があります。基本システムは、低温環境下や氷中でも使用できることが確認されています。長年の開発を経て、基本システムは、様々な油種の回収に使用できるようになっており、粘性油を使ったテストも行われ、また北極環境での有効性テストも行われています。本論文では、まず、氷中の油回収作業に有効な機械的油回収システムを簡単に説明します。次に、ブラシ式回収ユニットの開発を、いくつかのケーススタディおよびテスト結果に焦点を置いて紹介します。大型氷中航行船舶用の最新システムの開発については、中規模テストおよび実機規模実証テストによって裏付けられた試作システムによって説明します。最後に、ブラシ式システムのより一般的な氷中航行船舶への適応を、設計図案で説明します。

序 論

バルト海諸国は、北部に位置していることから、低温および氷海条件での作業効率を改善するために、流出油回収および清掃法に特別の要求がなされます。実際に、高粘度油の回収能力が基本条件であり、課題です。清掃作業は、油の凝固点以下の温度で行われることがよくありますが、軽質油回収用の従来型の水面油回収機は不適格です。（参考文献 2 : Lampela, K. & Rytönen, J. 2012）

低温・凍結条件において万能な流出油対応法はありません。油回収方式および技術は、いくつかありますが、状況や気候条件が異なるため、氷結範囲がケース毎に異なり、一つの事故に対応中でさえ状況が変化することがあり、対応ツールにも様々な選択肢があることが必要になります。

大抵の資機材は、専用の対応船とともに使用するよう設計されていますが、一部は、臨時支援船にも使用して、使える対応船団を大きくすることができます。ブラシ法は、バルト海諸国の氷海条件においては最も一般的な対応法です。即ち、油が水面に浮いているまたは氷にくっついている場合に、油を水面や氷上から機械的に分離するのです。

油回収機を氷結または低温状態で使用する場合、これらの特殊な状況に合わせて改造しなければなりません。油回収機および回収油を水蒸気、温水などで加熱することが必要になることがよくあり、また、使用するポンプは、重質、粘性油を輸送することができなければなりません。北欧諸国は、これらの国々で使用する油回収機およびポンプの低温環境における作動状況を調査しました。

氷海条件用の一般的な機械的油回収装置の例として、次のものが挙げられます。

- Rope Mop skimmers
- Arctic skimmer (LAMOR Ltd)
- Polar Bear skimmer
- Polaris Ice skimmer
- Lori Ice Cleaner
- Oil Ice Separator, LOIS
- Oil recovery bucket

これらの機材の詳細は、（参考文献 2 : Lampela K.& Rytkönen, J. 2012）に説明されています。

油回収バケットは、既に 20 年以上にわたって、フィンランドで研究開発が進められてきました。油が堅い回転ブラシに付着するのが、油回収バケットの原理です。ドラムが回転すると、油はブラシから取り除かれてバケットへ入ります。スクリューポンプが、その油を回収タンクへ移送します。油回収バケットは、3 つのサイズがあり、最小の装置は、掃集幅が 60 cm、中間サイズのものは 1.6 m、最大のものは 3 m です。 ブラシホイールの直径は、800 mm です。大型と中型の油回収バケットは、油圧式クレーンまたは油圧掘削機に接続して、運転することができます（図 1 および 2 参照）。 最大のバケットは、大型油回収船のクレーンで操作するよう開発されました。油回収バケットは、フィンランドにおいては、氷中における少量流出の場合に対する標準機材になっており、他の一部のバルト海諸国でも使用されています。



図 1.油回収バケット (LORI および LAMOR の製品) の以前のテスト



図 2. 油圧掘削機に接続された油回収バケット。2009 年に氷中でテスト (撮影: J. Pirttijärvi)

バルト海諸国間の油流出対応における協力は、いくつかの協定によって規定されています。油および化学薬品の流出対応における協力に関して、各国が二国間、三国間協定を締結しています。基本的な協定の 1 つが、ノルウェー、アイスランドを含む全北欧諸国間のコペンハーゲン協定です。バルト海域の中心機関は、ヘルシンキ委員会（バルト海環境保護委員会、HELCOM としても知られている）です。現在の締約国は、デンマーク、エストニア、欧州共同体、フィンランド、ドイツ、ラトビア、リトアニア、ポーランド、ロシア、スウェーデンです。ヘルシンキ委員会の決定は、関係政府に対する勧告として尊重されます（参考文献 2 : Lampela K. & Rytönen J. 2012）。

また HELCOM は、バルト海諸国の対応船およびチームが油流出対応における協力を実践できる対応演習を、毎年計画しています。昨年、バルト海域でこれまでで最大規模の演習 Balex Delta 2012 が、フィンランドにより、HELCOM と EU's Civil Protection Unit DG ECHO（欧州委員会人道援助総局）との協力の下で、Helsinki Capitol 地区の沖合で実施されました（参考文献 4：Rytkönen, J. & Haapasaari, H. 2013）。

HELCOM のこれらの勧告により、バルト海諸国の流出油対応法の開発は、冬季でも海から油を機械的に回収できる能力にほぼ集中しています。更に、機械的回収システムは、北極地方にも適していると思われ、従って、フィンランド環境研究所（SYKE）は、最近では、北極地方での使用のための、より堅牢な遠隔制御システムの開発に焦点を合わせています。優れた性能と研究室や現場で学んだ教訓から、SYKE スタッフは、油回収バケットの開発に関する研究開発努力を続けるという考えを益々強くし、新たな目標が設定されました。それは、氷海条件でもっと優れた性能を発揮した北極地方の環境にも適した、大型装置です。開発の基本理念は、2006 年のフィンランド湾海域での Runner-4 事故後に承認されました。

Runner-4 事故

Runner-4 は、アルミニウムを積載したドミニカ船籍の貨物船で、マルタ船籍の貨物船 Svjatoi Apostol Andrey と共に、ロシアの砕氷船に先導されてフィンランド湾東部を航行していました。Runner-4 には、102 トンの重質燃料油、35 トンの軽質燃料油、600 リットルの潤滑油が積載されていました。東経 26 度 19 分 84 秒、北緯 59 度 52 分 92 秒の地点で、Runner-4 は、Svjatoi Apostol Andrey に衝突され、3 月 5 日夜、フィンランド湾に沈没しました（参考文献 5：Wang et al 2008）。

この衝突で、油も流出しましたが、厳しい氷海条件であったため、最初の 1 週間は、流出油を発見するのが非常に困難でした。浮氷塊が風に押しやられ、外洋海域で流出油が観測されるようになって、対応作業が開始されました。流出油の回収作業が、3 月 15～19 日と 4 月 9 日の 2 回行われました。

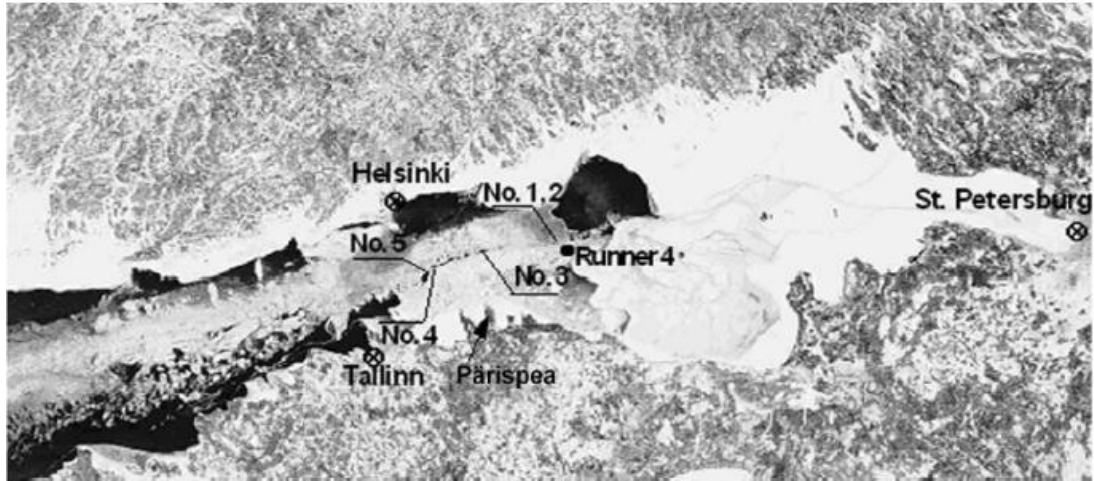


図 3. フィンランド湾における、2006 年 3 月 13 日の氷海条件に 3 月 15 日に観測した流出油をあてはめたもの。画像は、NASA/GSFC の MODIS 迅速対応プロジェクトの好意による (Keguang Wang 氏により修正) ものです。油塊 No.1 と No.2 は Runner 4 の難破地点に非常に近く、油塊 No.4 と No.5 は水路にあり、油塊 No.3 は水路と砕氷の周辺の多量の油を表しています (参考文献 5 : Wang et al 2008)

三隻のフィンランドの船舶、Seili、Halli、Hylje が、3 月の回収第一期の流出油対応に参加しました。フィンランドの船舶は、約 15 トンの油を回収できましたが、大型回収船が進めな浅海域へ風によって油が押しやられて、中止を余儀なくされました。その後、油にまみれた浮氷が再び漂流方向を変えると、二隻のフィンランドの船舶、Merikarhu と Hylje が、4 月 9 日の午後から、Runner-4 の難破地点で流出油回収作業を開始しました。この二度目の回収作業は、エストニアの油流出対応船 Kati と共に行われましたが、油膜が非常に薄くまた氷中の油で汚染された範囲が狭かったため、間もなく中止されました。図 4 は、Runner-4 流出事故対応作業中のフィンランドの油流出対応船 Halli です。



図 4. Runner-4 流出事故対応作業中のフィンランドの油流出対応船 Halli

新世代ブラシバケットの進化

Runner-4 をはじめとする過去の事故で得られた経験から、氷海条件用のより大型で堅牢な機械的回収装置を開発する必要性が確認されたため、SYKE は、大型の氷中航行多目的船または砕氷船に取り付けるという新しいコンセプトによる開発を開始しました。屋内・屋外のテストを数回行った後、最初の試作装置が 2005 年に製造されました。以降の章では、2006 年の屋外テストから厳しい氷海条件下で 2013 年 4 月に行われた、最近の実機規模の回収テストまでの進化の過程を概説します。

2006 年のKokkola港外での初期段階のテスト

厳しい氷海条件用に既存の油回収バケットのコンセプトが修正されました。つまり、ドラムの長さでブラシシステムの直径とを大きくすることにより、回転ブラシシステムが改造されました。内蔵の加熱パネルによって、油の掻き出しシステムにも改良が加えられました。修正、改良した回収バケットの機能とポンプ装置の高粘度油での有効性のテストが行われました。

最初の試作装置は長さが 2000mm、直径が 1800mm でした。このシステムのテストは、特別に屋外に作られた溜池に油と氷を入れて行われました（下図 5 参照）。テストの実施によって、開発者はある程度自信を持ちましたが、一方で氷海条件においては異なる油種に応じて異なるブラシの剛毛の材料が必要であることが明らかになりました。



図 5. 氷中の油テスト後の試作機

2006 年 4 月下旬、海岸線沖の油のない実際の氷海条件で、このシステムがテストされました。主な狙いは、氷海条件で長い剛毛の動作と耐久性をテストすることでした。

2007 年の Pietarsaari での実機規模の回収実験

上述の試作機は、2007 年 3 月 29 日に Pietarsaari 港沖で行われた実機規模のテストのために改造されました。テスト現場は、平均厚さ 30cm の氷原を砕氷して開いた水路でした。以前の装置と比較した主な改造箇所は、より剛性を高めた毛、バケットシステム内の加熱式回収タンク、冷気中でも連続油回収を確保するための加熱式掻き出しユニットでした。しかし、テスト中の気温が 0 度よりわずかに高かったため、着氷によるテストへの影響はまったくありませんでした。

1300ℓ の重質燃料油（POR 220）を使い、油で汚染されたテスト区域で回収船を後退させ、試作装置を用いて油を回収する方法で、水路で 3 回のテストが行われました。船の推進力と操作を変更する修正を行った後、最初の 2 回のテストで 170ℓ と 80ℓ の回収率が得られました。600ℓ の油を水路へ注いで行った 3 回目のテストでは、250ℓ、つまり、全量の 40%を超える回収率が得られました。これは、1 回のテスト中に遭遇する油量が少ないために、非常に良い結果を表していると考えられました（参考文献 1：ILS 2007）。

最後に油回収船 HALLI の油回収バケットを使って、テスト現場の残存油の清掃が行われ、事実上すべてのテスト油が海上から除去されました。

このテストは、試作システムが氷海条件で機能することを示しました。得られた教訓の中で最も大切なことは、船を後退モードで操作する適切な方法についてでした。つまり、このテ

ストで、適切な操船方法によって回収率が向上し、船尾への氷の蓄積が防止されることが分かりました。このテストから、コンセプトを改善する新たなアイデアも生まれました。また、既存の油回収バケットを長いクレーンに取り付けると、油で汚染された区域を効果的に清掃する優れたツールになることも確認されました。

実験室でのテストおよび新しいコンセプトによるデザイン

初期の実機規模テスト後、屋内および屋外テストで新しいアイデアが試されました。ブラシシステムの長さは 4000mm に伸ばされ、新しい直径は 2000mm 近くになりました。いくつかの剛毛タイプがテストされ、新しい試作機はスチールフレームで製作されました。図 6 は、2 種の剛毛タイプを持つ開水域でのテスト用に作られた新世代試作機を示しています。

この新しいデザインは、さらなる改良のための「マザー」ツールを象徴するように選ばれました。そして下記の目標を達成すべく様々なサブプロジェクトが遂行されました。

- 全重量の軽量化
- 様々な氷海条件での十分な回収能力
- 過酷な環境条件に対する堅牢さ
- 多様な油種についての安定性
- 遠隔操作
- 一隻の回収船上で複数装置の同時使用



図 6. デザイン画像（左）と製造された試作機（開放水域でのテスト前）。

長さ = 4000mm、直径 = 2000mm.

実験室テストも実機規模テストも 2009 年～2012 年に毎年行いました。油と種々の種類の剛毛材料を使って屋内／屋外の実験室テストを行いました。回収船上の実機規模テストは油な

しで、ただし異なる氷海条件で行いました。これらのテストによって一定の性能基準が確認され、異なる氷海条件によって必要となる操作モードに関する貴重な情報が得られました。

2012 年に実験室規模で行ったテストでは、テスト時の氷海条件、油種、剛毛材料によって異なりますが、平均で 30～100m³/h の油回収率が得られました。氷のない開放水域で行ったテストでは、氷海条件用に設計された剛毛の基本設計機能であったため、回収率が低くなりました。つまり、この装置を開放水域条件で使用する場合には、ブラシの剛毛を、現在使用されている標準型の油回収バケットに付いているものと同様のものにする必要があります。

これまでのところ、開放水域でも氷海条件でも理論最高油回収率は未だテストされていません。しかし、良好な運転状況の場合、システムの制限要因はポンプ能力になる可能性が極めて高いと思われます。ブラシ部分の能力に限れば、1 時間に数百トンの油をかき上げることができるでしょう。

最後に、詳細なテスト／設計の過程を経て、複合材料の構成部品一式が製造され、油回収船 LOUHI の船上で組み立てられました。この新しいコンセプトによる回収機は、厳しい氷海条件で 2013 年 4 月に実規模の演習が計画された後、2013 年の早春に港の氷の中で最初のテストが行われました（図 7）。



図 7. (左) 屋外実験室テストでの長さ 4000mm の試作機と (右) 実機規模の沖合演習での油回収ブラシ (長さ 4000mm、直径 2000mm)。

2013 年の Kalajoki での実規模トライアル

演習 Kalajoki 2013「氷中の油」は、北欧諸国の毎年の国際的演習として、またこれらの諸国のコペンハーゲン協定に従って計画されました。この油流出対応演習は主としてフィンランドが主催し計画したもので、ボスニア湾の北部にあるボスニア入江（Kalajoki の Rahja 港外）で 2013 年 4 月 10 日に行われました。

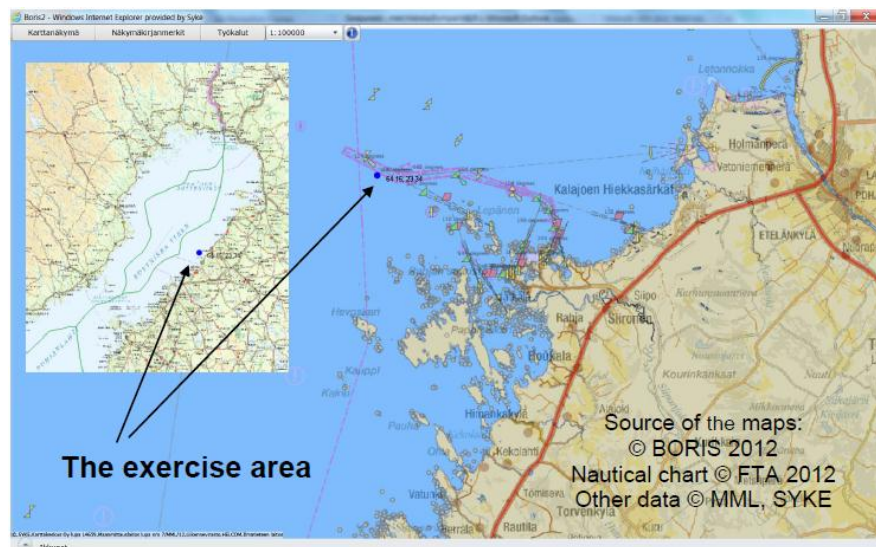


図 8. ボスニア湾海域の演習区域

この演習の主催者および責任組織は、フィンランド環境研究所（SYKE）で、スウェーデン沿岸警備隊と協力して実施しました。また、フィンランド当局では、フィンランド海軍、ELY Centre South Ostrobothnia（フィンランドの経済開発、運輸、環境センターの一つ）、国有企業 Meritaito Ltd（SeaHow）が支援しました。Kalajoki の Rahja 港は、演習のために停泊施設やその他の港湾施設を提供しました。

演習のシナリオは、約 5000 トンの重質燃料油を積んだ「FART TYG II」という二重殻構造のオイルタンカーの極めて激しい座礁が 2013 年 3 月 13 日に緯度 64 度 20 分 02 秒'経度 023 度 26 分 52 秒の地点（フィンランド、Kalajoki の Rahja 港から北西 18km の Ulkokalla）で発生したという想定に基づいていました。

座礁の結果、約 500 トンの重質燃料油が流出しました。想定では、氷中の油の大部分はフィンランド船 2 隻とスウェーデン船 1 隻によって事故後 3 月 14 日から数日間で回収されました。4 月になって、事故現場から Rahja 港までの航路の海水の間に油が発見され、スウェーデンから氷海条件用の油回収船 1 隻の支援要請が新たに出されました。

表 1. 2013 年 4 月 10 日、Kalajoki の「氷中の油」演習への参加機材

国	船 名	船 種	氷中の油回収システム	油貨物タンクの容量 (m ³)
フィンランド	LOUHI	油回収／海軍補給船	後部ブラシ 4 基 油回収バケット /LAMOR 1 基	1200
フィンランド	SEILI	油回収／航路整備船	後部ブラシ 1 基	200
スウェーデン	KBV 181 GOTLAND	油回収／沿岸警備隊巡視艇	エンドレスロープ式/FOXTAIL	ポータブルタンク

LOUHIとSEILIは氷海条件用の新世代油回収ブラシを使用しました。SEILIはブラシ1基、LOUHIは4基を夫々の船尾に搭載していました。LOUHIの4基のブラシユニットについては、氷中の全掃集幅は16m近くありました。演習時間は数時間で、操作員は仮想回収率を250トン以上と推定しました。

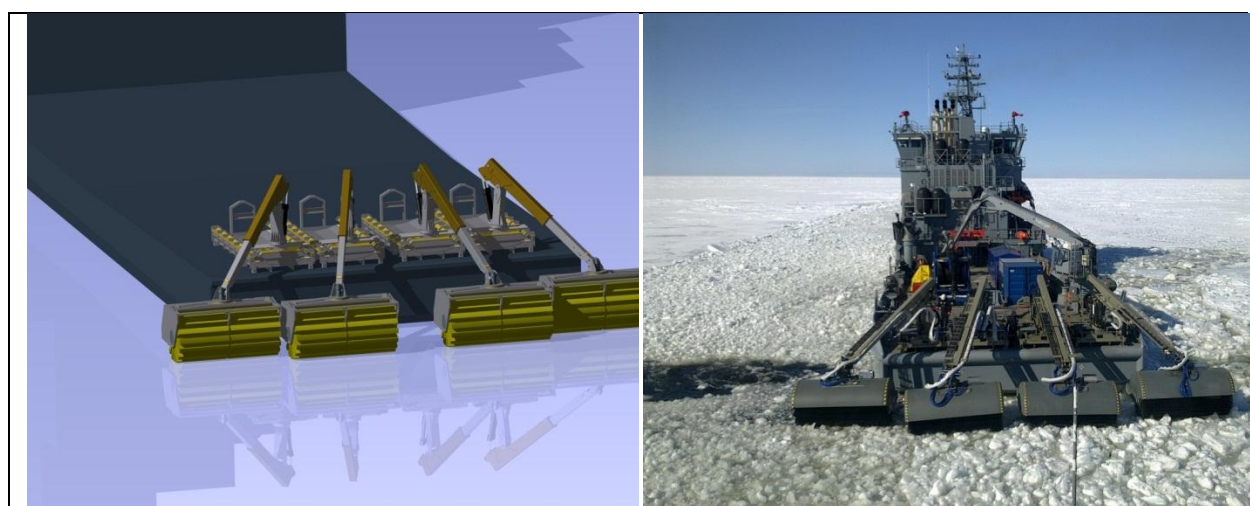


図 9. デザイン画像（左）とフィンランドの最新の油対応船 *Louhi* に取付けられた新しい回収装置。各装置 長さ：4000mm、直径：2000mm。

得られた教訓と将来の計画

この論文の主旨は、フィンランド環境研究所（SYKE）が行った機械的油回収に関するコンセプトに基づいた開発について概説することでした。氷海で使用するための大口径の回収バケットという考えは、多くの油回収船で現在使用されている比較的小型のものとほとんど同じ位古くからあるものです。氷中の油流出およびテストでも、小型の装置は氷海条件で好結果を示しています。多くの油流出事故で、小型の油回収バケットが氷海で使うべき唯一のツ

ールとなっていました。欠点はサイズが小さいこと、そして厳しい氷海条件では限界があると考えられることです。

新世代の氷中の油回収バケットは、対応ツールの選択肢として追加すべき新しいツールです。最初の性能テストで、システムが設計通り機能することが証明されました。最大 50% が氷に覆われた氷海条件で十分な性能が得られる可能性が高いと予想されています。最大 70% が覆われたさらに厳しい氷海条件に耐えられるように、剛毛、ドラム、制御ユニットの改造を行う予定です。

テストと実機規模の演習から学んだ教訓は、船舶でこの装置を使用する場合には、正しい操作が重要であるということです。つまり、回収作業中の操船の手際が回収率に多大の影響を及ぼすということです。

今後、次の事項が注目されるでしょう。

- 各装置を独立して使用できるようにするための遠隔操作式装置の開発、
- 氷中の油を検出する新しいセンサのテスト、これによって作業中の回収率を高めることができる、
- 北極の氷海条件での使用を確認し、また要求されるブラシ／剛毛のタイプを確認するための、流氷中でのシステムの堅牢性のテスト、
- 種々の船舶に取り付けられる新しい「一般的な (generic)」システムの開発、
- より長いクレーンでのシステムのテスト；補給船等の A フレームへの取り付け。



図 10. LOUHI の船尾デッキに搭載された輸送モードの油回収バケット
(撮影 : J. Rytönen 2013)

参考文献

1. ILS 2007. Oil recovery tests off Pietarsaari in March 29, 2007. Technical Report, date 12.4.2007.
2. Lampela, K. & Rytkönen, J. 2012. Baltic Sea experiences in Mechanical Oil Recovery in Ice. 21st IAHR Symposium on Ice. Dalian China, June 11 to 15, 2012. Pp. 781 – 792.
3. Rytkönen, J & Haapasaari, H.(Editors) 2013. Full Scale Oil Combating Exercise related to Balex Delta 2012. Final Report. Finnish Environment Institute. EU Dno. 230301/2011/611720/SUB/A5. March 2013, 83 p.
4. SYKE. 2013. Report of an Operational Oil Spill Response Exercise between Finland and Sweden 10 April 2013. Technical report for the 17th HELCOM response meeting in Klaipeda, Lithuania on the basis of the Copenhagen agreement.
5. Wang, et al 2008. The drift and spreading of the Runner 4 oil spill and the ice conditions in the Gulf of Finland, winter 2006. Estonian Journal of Earth Sciences, 2008, 57, 3, p. 181 – 191.