

Litteraturstudie om sorbenter

DOK.NR. 20180838-01-R

REV.NR. 2 / 2019-08-19

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentsiteteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



Prosjekt

Prosjekttittel: Konsulentbistand for utarbeidelse av testprosedyrer for sorbenter
Dokumenttittel: Litteraturstudie om sorbenter
Dokumentnr.: 20180838-01-R
Dato: 2019-01-18
Rev.nr. / Rev.dato: 2 / 2019-08-19

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: Kystverket
Kontaktperson: Torunn Østmann
Kontrakthereferanse: Kontrakt signert 2018-10-30

for NGI

Prosjektleder: Christian Totland
Utarbeidet av: Christian Totland, Ingvild Fladvad Størdal og Heidi Knutsen
Kontrollert av: Paul S. Cappelen

Summary

There is a wide variety of materials used as oil sorbents. The three main categories of materials include natural organic, synthetic organic and inorganic materials. Material properties, such as sorption capacity -and rate for various hydrocarbons and conditions, as well as floating ability, varies greatly for materials in the three categories. Moreover, there is significant variation within each category. Consequently, choosing the best suited sorbent for a given situation can be challenging.

This report gives a survey of available literature on the topic. The different material categories are described, as well as the most common sorbent materials within each category. In addition to the three common categories of commercially available sorbent materials, this report describes potential future materials that are in an earlier stage of development, including aerogels and nanocarbon materials.

Based on available literature, the properties of various sorbent materials are quantified with regards to sorbent capacity for the various oils that are used in the reviewed studies, and floating ability. Sorption capacity for each material is presented graphically. Based on a multivariate analysis of the material properties and performance, the materials are tentatively grouped based on properties. However, since this analysis is based on existing data, there is uncertainty in the variance between performed studies, and also most of the sorbents are tested for only one, or a couple of oil types. There is therefore insufficient data available in literature for a complete and correct analysis, and future experimental work should focus on developing a standardized, more systematic quantification of sorbtion capacity for materials.

Besides sorption capacity and floating ability, other practical aspects relevant for use of the sorbents are not evaluated.

In general, syntethic organic sorbents have the best floating ability and highest sorption capacity, regardless of oil properties. Inorganic sorbents overall have the lowest sorption capacity and poorest floating ability. Natural organic sorbents constitute a broad selection of materials, and sorbent properties therefore varies significantly. However, there are several exceptions; for example, some expanded/exfoliated inorganic minerals show good floating abilities, and both inorganic and natural materials exist that can rival or exceed the sorption capacity of synthetic organic materials. Some new experimental materials show extreme sorption capacities but are currently limited by their high production costs and/or limited availability.

Sammendrag

Det eksisterer et bredt utvalg av ulike materialer til bruk som oljesorbenter. Materialene kan i hovedsak deles inn i tre hovedkategorier: naturlig organiske, syntetisk organiske og uorganiske sorbenter. Materialeegenskaper som sorpsjonskapasitet, sorpsjonsrate og flyteevne varierer betydelig mellom materialkategoriene, og også innad i hver kategori. Det kan derfor være utfordrende å velge den best egnede sorbenten for en gitt situasjon.

Denne rapporten gir en oversikt over tilgjengelig litteratur på oljesorbenter. De ulike materialkategoriene er beskrevet, i tillegg til de mest vanlige sorbentmaterialene i hver kategori. Eksperimentelle materialer som fortsatt er i et utviklingsstadium er også beskrevet i et eget delkapittel.

Informasjon om sorpsjonskapasitet for ulike oljer og flyteevne for de ulike sorbentmaterialene er samlet fra litteraturen. Basert på en multivariat analyse av materialeegenskaper, er materialene forsøkt kategorisert basert på egenskaper, og ikke materialkategori. Det bemerkes imidlertid at det inngår noe usikkerhet i denne analysen grunnet mangelfullt datagrunnlag i litteraturen. Det kan videre være betydelige forskjeller mellom studier som rapporterte verdier for samme sorbentmateriale, noe som øker usikkerheten. Slike forskjeller skyldes til dels at det benyttes ulike testprosedyrer og oljer i litteraturen. Eksisterende standard testprosedyrer benyttes i liten grad i publisert litteratur.

Andre praktisk aspekter ved bruk av sorbentmaterialene, bortsett fra flyteevne og sorpsjonskapasitet, er ikke vurdert i denne rapporten.

Generelt har syntetisk organiske sorbenter best flyteevne og sorpsjonskapasitet, mens uorganiske materialer sorberer og flyter dårligst. Naturlig organiske sorbenter inkluderer et bredt utvalg av ulike materialer, og det er derfor stor variasjon i egenskaper for denne materialkategorien. Det er imidlertid flere unntak; enkelte ekspanderte/eksfolierte uorganiske materialer har god flyteevne, og enkelte uorganiske og naturlig organiske materialer har sorpsjonskapasitet som overgår syntetisk uorganiske sorbenter. Enkelte eksperimentelle materialer har ekstrem sorpsjonskapasitet, men er begrenset grunnet høye kostnader og begrenset eller ingen tilgjengelighet.

Ordforklaring / forkortelser

Absorpsjon	Prosess der et stoff trenger inn i et annet stoff (medfører ekspansjon av absorbentmaterialet).
Adsorpsjon	Prosess der gass eller væske bindes til overflaten av et fast stoff.
Allotropi	At et grunnstoff kan opptre med flere krystallingske former.
CNT	Karbon nanorør.
Emulgering	Å lage en emulsjon (blanding av to væsker som egentlig ikke er blandbare) kalles emulgering.
Flygeaske	Små askepartikler (< 100 µm) som følger med røykgassene fra kullfyrte brennkamre.
HDPE	Linear high density polyethylene: Lineær polyetylen med høy tetthet.
Herdeplast	Endelig form ved første gangs oppvarming.
Hydrofob	Lav affinitet til vann (apolare stoffer, løses dårlig i vann).
Hydrofil	Høy affinitet til vann.
Isoelektrisk punkt	Den pH-verdien hvor et molekyl har en nettoladning lik null.
Katalysator	Et stoff som øker hastigheten på en kjemisk reaksjon uten at det selv (permanent) forandres.
LDPE/LLDPE	Linear low density polyethylene: Lineær polyetylen med lav tetthet.
MB	Meltblown: smelteblåst.
Naturlig organisk	Sorbentmateriale bestående av naturprodukter, som bark eller naturlige polymerer.
NP	Needle punched: nålefilt.
Oleofil	Affinitet til olje (tiltrekker olje).
Oljelense	Avgrenser oljesøl på vann ved å samle, konsentrere, lede, ringe inn, stope eller absorbere olje som flyter.
PCA	Principal Component Analysis: Prinsipalkomponentanalyse – flervariabel / multivariat statistisk analysemetode.
PET	Polyethylene terephthalate: Polyetylentereftalat.
Porøsitet	Porøsiteten til et materiale er et mål for forholdet mellom volumet av porer i materialet og totalvolumet.
PP	Polypropylene: Polypropylene.
PS	Polystyrene: Polystyren.
PU	Polyurethane: Polyuretan.
PVC	Polyvinylchloride: Polyvinylklorid.
Pyrolyse	Forbrenning uten tilgang på oksygen.
Retensjon	Evne til å holde på noe, f. eks. en sorbents evne til å holde på olje etter opptak / sorpsjon.
Råolje	Naturlig forekommende flytende petroleum som finnes i reservoarer i berggrunnen og utvinnes som råstoff i petroleumsindustrien.
SB	Stich bonded: filt.
SEM	Scanning electron microscopy.
Skimmer	Fjerner fri fase olje fra vannoverflaten.

Sorbent	Samler og separerer olje fra vann gjennom absorpsjon og/eller adsorpsjon.
Sorbentkapasitet	Antall gram olje som kan sorberes per gram sorbent.
Sorpsjonseffektivitet	Andelen tilgjengelig olje som sorberes.
Sorpsjonsrate	Tiden en sorbent tar for å sorbere en gitt mengde olje per mengde sorbent.
Surfaktant	Overflateaktive molekyler – reduserer overflatespenningen i en væske slik at den lettere kan blandes med andre væsker.
Syntetisk organisk	Sorbentmateriale bestående av syntetisk fremstilte polymerer.
Termoplast	Kan omformes ved oppvarming.
Uorganisk	Sorbentmateriale bestående av mineralbaserte komponenter.
Van der Waals kraft	Samlebetegnelse på krefter som virker mellom elektrisk nøytrale molekyler (svakere krefter enn kjemiske bindinger).
Viskositet	Et mål for hvor tykt- eller tyntflytende en væske eller gass er.

Innhold

1	Innledning	9
2	Beskrivelse av ulike grupper av sorbenter	9
2.1	Uorganiske sorbenter	9
2.2	Naturlige organiske sorbenter	14
2.3	Syntetiske organiske sorbenter	23
2.4	Nye fremskritt innen sorbenter	26
3	Effektivitet og egenskaper av ulike sorbentgrupper	30
3.1	Sorpsjonskapasitet og flyteevne for sorbentgruppene	31
3.2	Sorpsjonskapasitet	34
3.3	Multivariat analyse	35
4	Tidligere rapporter og oversiktsartikler om oljesorbenter	38
5	Vurdering	42
6	Konklusjon	44
7	Referanser	45

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

En god sorbent skal være både hydrofob (tiltrekker ikke vann) og oleofil (tiltrekker olje), kunne tiltrekke store mengder olje og ha høy opptaksrate. Sorbenten bør også være praktisk å håndtere, også i etterkant av opptak av olje. Det finnes et stort utvalg av sorbenter på markedet, og det er stor variasjon i hvilke materialer som benyttes i sorbentene. Derfor er det også stor variasjon i egenskapene og bruksområdene til ulike sorbenter.

I denne litteraturstudien er målsetningen å klassifisere de ulike sorbentene, samt å angi de grunnleggende egenskapene til de ulike klassene av sorbenter. Gjennom arbeidet vil det dannes en oversikt over tilgjengelig litteratur med en beskrivelse av innhold. Sorbenter vil klassifiseres primært med bakgrunn i sorpsjonskapasitet for ulike oljetyper, samt flyteevene.

2 Beskrivelse av ulike grupper av sorbenter

Sorpsjon er en samlebetegnelse for adsorpsjon og absorpsjon. Ved adsorpsjon vil oljen binde seg til overflaten av sorbenten. Sorbenter som utelukkende baserer seg på adsorpsjon trenger derfor et høyt overflateareal for å være effektive. Ved absorpsjon blir oljen absorbert inn i selve materialet, noe som fører til en ekspansjon i volum. Ofte vil sorbenter virke gjennom en kombinasjon av adsorpsjon og absorpsjon.

Sorbenter deles gjerne inn i tre hovedgrupper:

- Mineralbaserte uorganiske sorbenter.
- Syntetiske organiske sorbenter.
- Naturlige organiske sorbenter.

Naturlige organiske sorbenter inkluderer et vidt spekter av materialer, som bomull, ull, bark og torv. Syntetiske organiske sorbenter er vanligvis basert på ulike syntetiske polymerer som polypropylen, polyuretan eller polyetylen. Uorganiske sorbenter er basert på mineraler som enten er naturlig oljesorberende, eller som har blitt behandlet på en måte som gjør at de kan sorbere olje. I dette kapittelet er de enkelte sorbentene kort beskrevet. Sorpsjonskapasiteten til sorbentene er omtalt i et eget kapittel.

2.1 Uorganiske sorbenter

Uorganiske sorbenter inkluderer alle mineralbaserte sorbenter. I denne kategorien finner man også karbonmineralet grafitt. I tillegg til å bestå utelukkende av karbon, skiller grafitt seg også markant ut i forhold til andre uorganiske sorbenter når det kommer til sorpsjonskapasitet. Andre karbon-baserte materialer er omtalt i andre delkapitler.

Generelt sorberer uorganiske sorbenter mindre olje enn både naturlige og syntetiske organiske sorbenter. Ett unntak er som nevnt grafitt, som har en sorpsjonskapasitet og effektivitet som overgår flere syntetiske organiske sorbenter.

Uorganiske sorbenter er ofte billige sammenlignet med andre typer sorbenter. En ulempe med flere typer mineral-baserte sorbenter er imidlertid adsorpsjon av vann og dårlig flyteevne. Unntakene her er enkelte mineraler som ved varmebehandling ekspanderer. Dette gir materialet svært lav tetthet og i noen tilfeller god flyteevne. I delkapitlene er blant annet slike ekspanderte mineralsorbenter beskrevet.

2.1.1 Ekspandert perlitt

Perlitt er et vulkansk mineral hvor silika (silisiumdioksid, SiO_2) er største bestanddel. Mineralet utvinnes hovedsakelig på øyen Milos i Hellas og i USA. Perlitt har et høyt vanninnhold, men ved oppvarming til 850°C fjernes vannet og materialet ekspanderer opptil 16 ganger sitt opprinnelige volum.

Ekspandert perlitt gjøres hydrofobt grunnet sitt organiske innhold. Videre har det svært lav tetthet, noe som gjør at det vil flyte over oljefasen ved et utslipp. Det har derfor blitt brukt som oljesorbentmiddel.¹⁻³ Det er flere kommersielle perlitt-sorbenter på markedet, som gjerne kommer i form av pellets. Ved bruk til oljeutslipp på/i vann, brukes det derfor gjerne sammen med for eksempel lenser (Figur 1).



Figur 1 Perlittperler brukt ved oljesøl i sjø. Bilder fra Perlipol.
(<https://www.perlipol.com.pl/en/hydroperl-hydrofobised-perlite>)

Denne litteraturgjennomgangen viser at ekspandert perlitt har høyest sorpsjonskapasitet for tyngre oljer. Ved utslipp av lette oljer absorberes oljen raskt, men ved tyngre oljer er absorpsjonen tregere. Litteraturgjennomgangen viser at perlitt kan absorbere 3 – 5 ganger sin egen vekt i olje, avhengig av oljens egenskaper og type perlitt som er brukt.

En studie viser at ekspandert perlitt har svært god flyteevne, hvor 100 % av påført ekspandert perlitt i vann flyter etter 6 timer – uavhengig om den har sorbert olje eller ikke.³

2.1.2 Eksfoliert grafitt

Grafitt er et krystallinsk allotrop av karbon. Den største eksportøren av naturlig grafitt er Kina. Materialet består av lag av karbon som holdes sammen av van der Waals krefter. Prosessen med å eksfoliere grafitt innebærer å separerer disse lagene, noe som gjøres ved varmebehandling av såkalt ekspandert grafitt.⁴ Eksfoliering innebærer at grafitt ekspanderer svært mye, gjerne opptil 100 ganger. Resultatet er et luftig materiale med lav tetthet.

Eksfoliert grafitt er en svært effektiv oljesorbent, som absorberer store mengder olje på veldig kort tid.⁵⁻⁹ Det rapporteres i litteraturen at eksfoliert grafitt kan absorbere opp mot 100 gram olje per gram sorbent i løpet av 1 – 2 minutter. Absorpsjonsraten avhenger likevel av viskositeten til oljen, hvor oljer med lav viskositet absorberes mest effektivt. Effektiviteten for oljer med høyere viskositet vil variere basert på hvordan den eksfolierte grafitten er produsert. Lavere tetthet gir bedre absorpsjonevne for slike oljer, noe som oppnås ved bruk av høyere eksfolieringstemperaturer.

Eksfoliert grafitt kan brukes som sorbentmateriale i nett eller lenser, for å øke effektivitet av skimming og for å forhindre emulgering. Grunnet veldig rask sorpsjonsrate og god kapasitet, vil sorbenten raskt kunne samle opp olje på/nær vannoverflaten for deretter å fjernes av en skimmer.

Olje som er absorbert ved hjelp av eksfoliert grafitt kan gjenvinnes ved bruk av sentrifugalkraft eller mekanisk trykk.



Figur 2 Eksfoliert grafitt som ble benyttet ved NGIs tidligere undersøkelser.⁵

2.1.3 Ekspandert vermikulitt / hydrofobisert vermikulitt

Vermikulitt er et leiremineral, som i likhet med perlitt ekspanderer svært mye ved varmebehandling og derfor er en god sorbent relativt til andre mineralprodukter.

Ekspandert vermikulitt er kommersielt tilgjengelig og produseres hovedsakelig i Russland, Kina, Sør-Afrika og Brasil. Kommersielle produkter (multisorb vermiculite, Sinclair Pro, LabelMaster Vermiculite etc.) kommer som finkornet pulver og markedsføres gjerne til bruk ved søl av oljer eller andre kjemikalier på gulv. Denne litteraturgjennomgangen viser at ekspandert vermikulitt har dårlig flyteevne, hvor det i én studie er rapportert at ca. 50 % av påført vermikulitt på vann vil synke i løpet av 6 timer.³

Noen studier antyder likevel at hydrofobisert, ekspandert vermikulitt, i likhet med perlitt, kan fungere bra på en vannoverflate.¹⁰ Man kan hydrofobisere ekspandert vermikulitt ved å for eksempel behandle det med voks.¹⁰ Mysore med flere (2005) viste imidlertid at ekspandert vermikulitt hadde bedre kapasitet enn hydrofobisert vermikulitt, som kan tilskrives den høye porøsiteten til ekspandert vermikulitt.¹⁰

Litteraturgjennomgangen viser at ekspandert vermikulitt kan absorbere oppmot 6 ganger sin egen vekt i olje, avhengig av oljens egenskaper og type vermikulitt som er brukt. Mysore med flere (2005) viste at hydrofobisert vermikulitt hadde en sorpsjonskapasitet på ca. 2,5 g/g.¹⁰

Det kan bemerkes at leire generelt har høy ladningstetthet på overflaten. Dette betyr at pH kan være en avgjørende faktor for kapasiteten, hvor en pH nærmere materialets isoelektriske punkt kan forventes å gi den beste sorpsjonskapasiteten (isoelektrisk punkt er pH-verdien hvor ladningen er lik 0). For leirer er det isoelektriske punktet som regel ved lav pH. En leire som sorberer bra ved pH 8 (normal pH i sjøvann) sorberer derfor ikke nødvendigvis like bra ved pH 7. I studien til Mysore med flere (2005) ble det imidlertid ikke funnet noen tydelig sammenheng mellom pH og sorpsjonseffektivitet til vermikulitt, muligens fordi de områdene av overflaten med høy ladningstetthet ikke er avgjørende for sorpsjon av olje.

I likhet med de øvrige ekspanderte mineralsorbentene, kan olje som er sorbert med vermikulitt gjenvinnes ved mekanisk trykk.



Figur 3 Kommersiell ekspandert vermikulitt til bruk ved oljesøl.
<https://www.globalspill.com.au/product/multisorb-vermiculite/>

2.1.4 Sepiolitt

Sepiolitt er et hvitt og mykt leiremineral bestående hovedsakelig av magnesium og silikater. Sepiolitt har det største overflatearealet av alle leiremineralene,¹¹⁻¹² noe som er grunnen til at det presterer bra som oljesorbent relativt til andre ikke-ekspanderte/eksfolierte, mineralbaserte sorbenter. Sorbenten oppgis å sorbere opp mot 8 ganger sin egen vekt i olje, ifølge produsenter. I litteraturen er det imidlertid rapportert om sorpsjonskapasitet på 0,03 – 0,22 g/g,¹¹⁻¹² altså langt lavere enn 8 ganger egen vekt.

Sammenlignet med de ekspanderte/eksfolierte mineralene, vil sepiolitt ha noe høyere tetthet. Dette fører til dårligere flyteevne, og kommersielle sepiolitt-sorbenter selges derfor til bruk på faste overflater.



Figur 4 Naturlig sepiolitt. CC BY 2.0 (foto fra <https://en.wikipedia.org/wiki/Sepiolite>)

2.1.5 Zeolitter

Zeolitter er i utgangspunktet hydrofile aluminumsilikatmaterialer, som både forekommer naturlig og syntetiseres med ulike egenskaper. Ved å inkludere bare en liten andel aluminium i krystallstrukturen til syntetiske zeolitter, skiftes affiniteten (tiltrekkingen) fra vann til upolare forbindelser, som olje. Zeolitter har et høyt overflateareal, men også svært små porer på 0,2-0,9 nm. Dette kan medføre at den adsorberer mindre olje enn arealet skulle tilsi, da størrelsen til oljekomponenter kan overgå porestørrelsen.

Zeolitter vil uansett adsorbere noe vann, noe som gjør dem lite egnet til bruk i sjø. På land kan zeolitter adsorbere opp mot sin egen vekt i olje.^{11, 13-14}

Et godt argument for zeolitter er at disse kan produseres fra flygeaske, som er et biprodukt av for eksempel kullfyrte kraftverk og avfallsforbrenning. Både hydrofile og hydrofobe zeolitter av høy kvalitet kan produseres fra flygeaske, og bruk av slike zeolitter kan dermed være en løsning på to miljøproblemer.

2.1.6 Organoleirer

Leire har generelt høy affinitet for vann. Ubehandlet kan leire likevel sorbere noe olje, opp mot 15 % av sin egen vekt.¹¹ En metode for å øke hydrofobisiteten er å behandle med overflateaktive molekyler (surfaktanter).^{11, 13} Dette kan gjøres for leiremineraler av typen 2:1 silikater, og kalles da gjerne for 'organoleire'.

Ved å inkludere surfaktanter i leirestrukturen vil man også separere leirelagene, noe som bidrar til større sorpsjonskapasitet. Oppgitt kapasitet varierer fra 1,3 til 7,7 g/g, noe som er sammenlignbart med ekspanderte mineraler.

Organoleire markedsføres til bruk mot oljesøl, og produsenter oppgir for eksempel at dette sorberer 7 ganger mer olje enn aktivert karbon (Ecologix), eller minst 50 % sin egen vekt i olje (Biomim Inc.) Med tanke på den store variasjonen i oppgitt kapasitet i litteraturen for både organoleire og aktivt kull (kap. 2.2.7), er det vanskelig å vurdere egnetheten til organoleire til denne bruken.

Litteraturgjennomgangen viser at organoleire har dårlig flyteevne.

2.2 Naturlige organiske sorbenter

Det finnes et utall organiske materialer som kan tenkes å fungere som sorbenter for olje som er sølt. For eksempel beskriver Khan med flere hvordan småskala oljesøl ved for eksempel bensinstasjoner kan håndteres med lokale, naturlige organiske sorbenter.¹⁵ Denne studien sammenligner en rekke fibre fra blant annet silkebomullstreet, et lokalt gress, en lokal plante, risskall, kokosnøttskall og sukkerrørrester, og sammenligner de mot absorpsjonskapasiteten til polypropylen, som er den mest brukte syntetiske organiske oljesorbenten. Studien viser at kapasiteten er god for enkelte naturlige sorbenter,

mens den er svært dårlig for andre. Dette tilsier at en klassifisering av slike sorbenter med hensyn på effektivitet er nyttig.

Ved småskala oljesøl kan det være hensiktsmessig å bruke lokalt tilgjengelige sorbenter. I denne rapporten er det for øvrig ikke lagt vekt på bærekraft i forhold til produksjon eller bruk av sorbenter. I avsnittene nedenfor er litteratur som tar for seg de materialene som har potensiale for å brukes i større skala beskrevet.

2.2.1 Bomull

Bomull har vist å ha god kapasitet for sorpsjon av olje.¹⁶⁻¹⁸ Tester med bomull har vist at bomullsfiber kan absorbere opp mot 50 gram olje per gram fiber,¹⁹ og at kapasiteten er lik for både lette og tunge oljer.¹⁷ Dette viser at sorpsjonskapasiteten til bomull for olje er betydelig høyere enn for konvensjonelle polypropylensorbenter.¹⁸ Studier viser også at det er mulig å presse ut absorbert olje fra bomullen slik at materialet kan gjenbrukes, men kapasiteten for sorpsjon av olje ser ut til å reduseres ved gjentatte runder med gjenbruk.¹⁷ Bomullen absorberer generelt lite vann og flyteegenskapene gode.

Singh med flere (2014) testet absorpsjonsegenskapene til to typer bomull.¹⁹ Resultatene fra deres studie viste en absorpsjonskapasitet på 50 g olje per g bomullsvatt for én type bomull, og 47 g/g for en annen type bomull. Det ble også målt vannopptak for de to typene bomullsvatt og det var henholdsvis 5,4 g/g og 7,1 g/g.¹⁹ Dette vannopptaket ble målt etter at bomullsvatten ble plassert i et testsystem hvor vannet var i bevegelse. Forfatterne antar et lavere vannopptak om bomullsvatten plasseres på stille vann og at opptaket da kan være under 0,5 mg/g. Begge bomullstypene forble flytende i over 24 timer.¹⁹ Videre diskuterer forfatterne at det sannsynligvis er strukturen og voksinnholdet til bomullsfibrene som er avgjørende for opptaket av olje. Den bomullstypen som har høyest opptak av olje har også lavest opptak av vann, og denne har størst andel tomrom i materialet og høyest innhold av voks.¹⁹ Denne typen var produsert fra modne bomullsplanter, mens den typen som absorberte mest olje var produsert fra umodne bomullsplanter.¹⁹

Sorpsjonskapasiteten målt av Singh med flere (2014) for bomull er som nevnt noe høyere enn det som er målt i andre studier. Choi med flere (1993) målte for eksempel en kapasitet på 40 g/g. Singh med flere (2014) mener at denne forskjellen kan skyldes at Choi med flere (1993) brukte nålefilt produsert fra bomull, mens Singh med flere (2014) brukte bomullsvatt (se Figur 5) og at nålefilt har mindre tomrom som kan absorbere olje enn det vann har.¹⁹ Det kan med andre ord forventes en viss variasjon i kapasitet for ulike bomullssorbenter.



Figur 5 Bilde av bomullsvatt brukt til vurdering av sorpsjonskapasitet. Bilde fra Singh med flere (2014), gjengitt med tillatelse fra American Chemical Society.¹⁹

Fra resultatene ansees bomull som en absorbent med potensial til å samle opp olje på sjø. Det må vurderes hvilken type bomull som brukes, og hvordan materialet produseres, slik at absorpsjonskapasiteten blir optimal.

2.2.1.1 Kapok

Silkebomullstreet produserer frøkapsler med fiber rundt, og disse fibrene er lette, har god flyteevne og absorberer lite vann. Fibrene kan se ut som bomull eller ull (se Figur 6). Treet og fibrene fra frøkapslene kalles *kapok* og flere studier har vurdert sorpsjonskapasiteten for olje til kapok. Lim med flere (2007) undersøkte sorpsjonskapasiteten til kapok under ulike betingelser og størst sorpsjonskapasitet ble observert når fibrene var pakket til en tetthet på $0,02 \text{ g/cm}^3$, sorpsjonskapasiteten var da 43 g/g .²⁰ Ved tettere pakking, $0,09 \text{ g/cm}^3$, ble sorpsjonskapasiteten redusert til $8,6 \text{ g/g}$. Sorpsjonskapasiteten var lik selv om kapoken ble presset og gjenbrukt.



Figur 6 Frøkapsel på silkebomullstreet. Bildet er hentet fra https://en.wikipedia.org/wiki/Ceiba_pentandra, CC BY-SA 3.0

2.2.2 Bark og fiber fra planter og trær

Fiber fra lokale planter og trær er foreslått som oljeabsorbent i flere studier. En oversiktsartikkel skrevet av Al-Majed med flere (2012) beskriver litteratur hvor sorpsjonskapasiteten til ulike typer fibre fra trær er undersøkt.²¹ Artikkelen diskuterer også fordelene og ulempene med naturfiber og syntetfiber. For de naturfibre som er inkludert i undersøkelsen til Al-Majed med flere²¹ varierer sorpsjonskapasiteten mellom 5 og 43 g olje per g sorbent. Den høyeste kapasiteten er rapportert for kapok (se forrige avsnitt). Fonesca med flere har sammenlignet sorpsjonskapasiteten til lenser med kork, lenser med polypropylen og bomull i et innlegg presentert på en konferanse i 2012.²² Kork produseres fra barken på korkeik. Resultatene viser at kork har en sorpsjonskapasitet på rundt 5 gram olje per gram sorbent, mens resultatene for polypropylen og bomull ligger på henholdsvis 6 og 9 g/g i denne studien.²² Kork flyter godt, og etter 40 dager er lensen som er fylt med kork den som har lavest andel av lensen under vann.

Fiber fra sukkerrør er en annen type naturlig fiber som også har potensiale for å absorbere olje. Det er vist at sukkerrørfiber vil kunne absorbere inntil 20 g olje per gram

fiber.²³ Opptaket av vann er i midlertid betydelig, 8 g/g, og det vil føre til dårlig flyteegenskaper for materialet.



Figur 7 Oljebark med kapasitet på 37,5 L olje per sekk. Bilde er hentet fra <http://kcl.no/kcl-produkter/kjemi/oljebark/>

Bark er brukt i ustrakt omfang i Norge grunnet høy tilgjengelighet, men det er likevel ikke funnet noen vitenskapelige publikasjoner som har undersøkt sorpsjonskapasiteten til for eksempel furubark som forhandles i Norge. De ulike forhandlerne av bark produsert for sorpsjon av olje oppgir på sine hjemmesider verdier for sorpsjonskapasitet til sine produkter:

- Green concept agency oppgir at deres oljebark kan absorbere 37,5 liter olje per 50 L bark (<http://oljeberedskap.no/produkter/stro-absorbenter/>).
- Miljøbark fra Würth kan absorbere 5 ganger sin egen vekt (<http://oljeberedskap.no/produkter/stro-absorbenter/>).
- Zugol miljøbark kan absorbere 4 liter olje per kg sorbent (<https://www.teknisk-salg.no/produkt/miljoprodukter/zugol-miljobark-40l>).

Verdiene som presenteres av forhandlerne vurderes som høyere enn det som forventes og sorpsjonskapasiteten til bark bør vurderes i et standardisert testoppsett før den kan sammenlignes med kapasiteten til andre sorbenter.

Det er kjent at bark absorberer vann og dette er derfor ikke like godt egnet som tiltak for olje på sjø. Imidlertid har bruk av bark i strandsonen vist gode resultater. Det er også utviklet en støvsuger-lignende mekanisme som kan blåse bark på olje i strandsonen og deretter samle dette opp (<https://forskning.no/olje-og-gass-miljoteknologi/2010/10/suger-oljesol-med-bark>).

2.2.3 Torv

Torv dannes når organisk materiale som mose, gress og lov blir liggende i vandige miljø, der det ikke er tilgang på oksygen, slik at materialet ikke brytes ned. Torv er hovedbestanddelen i myr. Novoselova og Sirotkina gjennomgikk i 2008 publisert vitenskapelig litteratur som beskriver sorpsjonskapasiteten for torv for organiske væsker.²⁴ Litteraturen som er oppsummert viser at sorpsjonskapasiteten for torv for kerosen og diesel ligger fra 8 g væske per g sorbent og nedover²⁴. Dette er i samsvar med resultater som rapporteres i annen litteratur.²⁵⁻²⁶ Resultater som oppsummeres i studien publisert av Novoselova og Sirotkina viser også at flyteegenskapene til torv er akseptable.

Torv forhandles som oljeabsorbent i Norge. Spill Sorb strø-absorbent fra Green Concept Agency rapporteres på deres hjemmesider å kunne absorbere 10 liter olje per 1 kg torv (<http://oljeberedskap.no/produkter/stro-absorbenter/>), mens Kallak torv absorbent rapporteres å absorbere fra 5 til 9 g olje per g sorbent (<http://www.kallakabsorbent.com/49.html>). Dette tilsvarer omtrent 9 g olje per g sorbent og er høyere enn det som er rapportert i litteraturen.²⁴⁻²⁶ Det antas derfor at verdien som rapporteres for kommersielt tilgjengelig torv i Norge er høyere enn det som er realistisk og det anbefales at sorpsjonskapasiteten til torv undersøkes i standardiserte tester.



Figur 8 Bildet viser torv fra Kallak Absorbent. Foto: Sverre Jarild, hentet fra forskningsrådet.no.

2.2.4 Ull

For sorpsjon av olje med ulike typer ull er kapasiteten til naturlige ullfibre og gjenvunnet ullfibre testet.¹¹ Studien viste at sorpsjon var avhengig av masse til sorbent, samt sorpsjonstid, temperatur og pH. Kapasiteten til ullfibre er god, 0,1 g ullfiber absorberer 3,3 g motorolje i løpet av 10 minutter,¹¹ som tilsvarer 33 g olje per gram sorbent. Ullfibre som er gjenvunnet hadde en sorpsjonskapasitet på 18,5 g/g under optimale forhold.¹¹ Siden sorpsjonen ble vist å være avhengig av mengden ullfiber til olje, så vil sorpsjonskapasiteten sannsynligvis variere om ull brukes ved oljesøl. I tillegg hadde pH stor

betydning for sorpsjonen, og optimalt pH-intervall for sorpsjon av olje til naturlige ullfibre var mellom 8 og 10. For fibre som var gjenvunnet var optimal pH 3.¹¹ Også temperatur hadde stor effekt på sorpsjonskapasiteten til begge typer fibre, men innenfor det intervallet som det vil være aktuelt å bruke ull som sorbent ved oljesøl er ikke dette relevant. Testene ble utført med motorolje. Det ble observert desorpsjon av oljen når fibre ble mettet med olje.

Høy absorpsjon av olje til ullfiber ble også vist av Choi med flere (1993),¹⁸ som kvantifiserte sorpsjonen av olje til ullfiber til å være 32 g/g ullfiber. Den høye sorpsjonen av olje ble tilskrevet at fibre har en stor andel overflatevoks og struktur på overflaten.

Resultatene viser at ull kan være en effektiv absorbent av olje. Det antas at ull med olje vil ha god flyteevne og ullmaterialer har dermed potensial for å samle opp olje på sjø. Det må vurderes hvilke type ullmaterialer som benyttes siden det ble observert forskjeller mellom de ulike typene som ble testet. Siden pH ble vist å ha stor betydning, må dette undersøkes nærmere, da pH til sjøvann ligger lavere, eller i den nederste delen av området hvor ull fungerte optimalt som absorbent.



Figur 9 Absorberende tau produsert i ull (<http://tlh.arflyfeltbaq.com/>).

2.2.5 Risskall

Det produseres rundt 700 millioner tonn ris på verdensbasis hvert år, og av dette utgjør risskall omtrent 20 % av den totale vekten. Risskall er dermed et bioavfall som er lett tilgjengelig i stort volum, i tillegg til at det er billig og bærekraftig siden bruk av risskall innebærer gjennbruk av et avfall.

Sorpsjonskapasiteten til risskall er vist å være inntil 18 g olje per g sorbent i en studie,²⁷ mens for aske fra risskall som ble brukt i en annen studie var kapasiteten 6 g/g.²⁸ Risskallene som hadde sorpsjonskapasitet på 18 g/g var behandlet i et varmt, alkalint vannbad. Risskallene ble behandlet med NaOH i økende konsentrasjon fra 0,1 M (molar)

til 6 M løsning, og ved 2 M konsentrasjon var allerede maksimal sorpsjonskapasitet nådd.²⁸ Reaksjonstid hadde ingen effekt på sorpsjonskapasiteten til risskallene. I studien publisert av Ali med flere (2012) er sorpsjonskapasiteten for risskall for dieselolje så lav som 2,6 g/g.²³

Risskall er et bioavfall som er tilgjengelig i store mengder og det er dermed bærekraftig å utnytte denne resursen lokalt. Transporteffektivitet fra Asia til Norge vil imidlertid være lav, og dette er et mindre bærekraftig alternativ i Norge. Sorpsjonskapasiteten som rapporteres i enkelte studier er god og muligheten for utnyttelse av risskall som oljeabsorbent bør undersøkes nærmere.



Figur 10 Foto som viser ubehandlet risskall. Kilde: CC BY-SA 3.0, https://en.wikipedia.org/wiki/Rice_hulls

2.2.6 Cellulose

Cellulose er i seg selv en hydrofil polymer, men er i ulike former likevel brukt som sorbentmateriale, gjerne sammen med andre oljesorberende materialer. Hovedbestanddelen i flere av de overnevnte naturlige sorbentene vil være cellulose. I for eksempel bomull eller kapok er cellulose naturlig hydrofob grunnet naturlig tilstedeværelse av voks og oljer.²⁹

Det er i litteraturen testet cellulose sammen med perlitt, bleket cellulose, cellulose fra trefibre og kjemisk modifisert cellulose.^{3, 29-30} I en omfattende rapport fra 1971 er cellulose fra trefibre funnet å kunne absorberer ca. sin egen vekt i olje.³ Bleket cellulose og cellulose-perlitt blandinger hadde en sorpsjonskapasitet på henholdsvis ca. 5 g/g og 10 g/g. Alle celluloseproduktene som ble testet virket best for tunge oljer.

Det er ikke gitt noen forklaring på hvordan for eksempel cellulose fra trefibre kan absorberer relativt store mengder olje, men prosessen kan sannsynligvis sammenlignes med den som skjer i andre hydrofobe cellulosefibre, hvor det er en viss naturlig tilstedeværelse av for eksempel voks i cellulosen (kap. 2.2.2).

I en nylig studie ble cellulose impregnert med en oleogelator (bindemiddel for oljer). Dette gjør at materialet kan sorbere oppmot 150 g olje per gram sorbent, hvor på oleogelatoren blander seg med oljen og dermed holder den på plass.³⁰ Dette materialet er fortsatt i et utviklingsstadium.

Sistnevnte materiale flyter svært godt. De andre nevnte cellulosematerialene omtalt i dette delkappitlet flyter kun dersom materialet allerede har sorbert olje.

2.2.7 Aktivert karbon

Aktivert karbon fremstilles vanligvis fra trekull. Ved hjelp av en pyrolyseprosess dannes mikroporer i kullet, noe som gir aktivert karbon svært høyt overflateareal. Dette gjør det til en adsorbent for en rekke stoffer, deriblant olje.³¹⁻³⁴ Adsorpsjonskapasiteten varierer avhengig av hvordan karbonet er produsert, og hvilke råmaterialer som er brukt.³³ Sorpsjonseffektiviteten til enkelte kommersielt tilgjengelige prøver ble funnet å være forholdsvis lav sammenlignet med andre sorbenter, på rundt 0,15 g/g.³⁴ I ett tilfelle ble det laget tabletter av aktivert karbon med bentonitt som bindemiddel, noe som medførte en sorpsjonskapasitet for diesel på opp mot 23 g/g.³² Videre ble det i en annen studie rapportert om sorpsjonskapasitet for råolje på 2-5 g/g for karbon laget med ulike råmaterialer.³³

Det er med andre ord svært stor variasjon i rapportert sorpsjonskapasitet, og både pyrolysetemperatur og råmateriale ser ut til å ha stor innvirkning på egenskapene.

Grunnet porøsiteten vil aktivert karbon flyte til porene fylles med vann. Det ble ikke funnet tilstrekkelig dokumentasjon på flyteevnene, men det er grunn til å tro at en betydelig andel aktivert karbon vil synke etter en tid i vann.

Det er også rapportert om lav sorpsjonseffektivitet på rundt 10 – 20 %.³⁴

2.3 Syntetiske organiske sorbenter

Syntetiske organiske sorbenter er et samlebegrep for ulike typer plastforbindelser. Materialeegenskapene til plastpolymerer gjør de godt egnet som absorbenter fordi de er både oleofile og hydrofobe. De absorberer derfor ikke vann og har god flyteeвне.

Følgende plastpolymerer er beskrevet i foreliggende litteraturgjennomgang:

- LDPE/LLDPE – Linear low density polyethylene: Lineær polyetylen med lav tetthet.
- PP – Polypropylene: Polypropylene.
- HDPE – Linear high density polyethylene: Lineær polyetylen med høy tetthet.
- PS – Polystyrene: Polystyren.
- PU – Polyurethane: Polyuretan.
- Andre typer plast, for eksempel nylon.

Materialeegenskapene til polymerene gjør at de kan grupperes i to grupper: termoplast og herdeplast. Termoplast kan formes på ny når den varmes opp, mens herdeplast får endelig form ved første gangs oppvarming. PP, LDPE/LLDPE/HDPE, og PS er termoplast, mens PU er herdeplast.

Dette kapittelet inkluderer også en beskrivelse av litteratur som ser på gjenbruk av plastavfall som oljesorbenter.

2.3.1 Polypropylen

De fleste kommersielle oljeabsorbentene som brukes i dag er laget av PP. Polypropylen syntetiseres ved polymerisering av propylen. Propylen forekommer i olje og produseres i raffinering av olje. Polypropylen har tetthet rundt $0,9 \text{ g/cm}^3$ og lavt vannopptak.

Wei med flere (2003) viser i sin studie at strukturen til PP er viktig for opptak og evne til å holde på oljen (retensjonskapasitet).³⁵ I tillegg har oljetype betydning for opptak og retensjon. Absorpsjon av olje ble testet på ulike kommersielle absorbenter i PP, klassifisert som filt (*stich bonded*, SB), smelteblåst (*meltblown*, MB), eller nålefilt (*needle punched*, NP). Av disse har SB høyest absorpsjon av både råolje og forvitret olje, på rundt 14 g/g .³⁵

Pang med flere (2018) har sett på hvordan cellestrukturen i PP-skum påvirket rate og kapasitet til absorpsjon av olje.³⁶ Resultatene fra studien viste at høyere andel åpne celler økte sorpsjonsraten, mens større andel tomrom i skummet økt kapasiteten for oljeabsorpsjon. Egenskapene til oljen vil også påvirke opptaket og olje med lavere viskositet viste høyere rate og større opptak.³⁶

Produsenter av absorberende lenser oppgir ikke alltid hva som er absorberende materiale i lensene, men det er funnet to eksempler hos norske produsenter av lenser hvor absorbenten er PP. Disse er vist i Figur 11.



Figur 11 Absorberende lenser fylt med polypropylen. Bildet til venstre er hentet fra <http://www.industrinett.no>, mens bilde til høyre er hentet fra <http://www.allmaritim.com/no/produkter/industri/absorbenter/maritimt>.

2.3.2 Polyethylene

Også polyethylene (PE) er mye brukt i kommersielt tilgjengelige lenser. PE produseres fra ethylene som vanligvis produseres fra olje, men kan også generes ved dehydrering av etanol.

Absorbenter av PE alene har vist å kunne absorbere mye olje, og en absorbent laget av PE med lav tetthet (LLDPE) tilsatt en elastomer (1-decene/divinylbenzene; D-DVB) ble vist å kunne absorbere over 43 gram råolje per gram absorbent.³⁷ Effektiviteten til absorbenten er høy, og etter 2 timer har absorbenten absorbert mer enn 20 ganger sin egen vekt. Mellom 0 og 25° C observeres det ingen forskjeller i mengde olje absorbert. Produksjon av PE kan gjøres fra olje og absorbenten kan derfor varmes opp og avhendes sammen med oljen.³⁷

Absorbenten kan legges utover oljesøl som flak eller film. Det er også utført storskala, felttester med absorbenten som er produsert av LLDPE og D-DVB,³⁸ og disse testene viser at når absorbenten legges på oljesøl i vann så vil olje og absorbent oppføre seg som en viskøs væske. Oljen og absorbenten lar seg derfor lett samle opp med en oljeopptaker/skimmer.³⁸ Vannopptaket til absorbenten er lavt, og høyeste vannopptak ble målt til 7 vektprosent etter 2 dager på sjø av totalt 4 for absorbent og olje som ble samlet inn med vakuumpumpe.³⁸

Det er også produsert absorbenter av ulike blandinger av PP med PE og elastomer som er vist å ha god kapasitet for absorpsjon av olje. For eksempel har Wang med flere (2016) vist at PP med 30 vektprosent polyolefin elastomer kan absorbere 19 g/g motorolje.³⁹ Studien publisert av Wang med flere (2016) viste også at oljen kunne presses ut av absorbenten og at egenskapene til absorbenten var tilnærmet like gode etter 10 ganger gjenbruk.³⁹ Absorbenten ble laget som et skum med bruk av CO₂. I en oppfølgende studie ble det vist at både struktur til skummet som er produsert, samt egenskaper til oljen har betydning for absorpsjon og retensjon av olje i absorbenten.³⁶

2.3.3 Polyuretan

Polyuretan produseres fra isocyanat og polyoler og egenskapene til det ferdige produktet påvirkes av hvilke typer isocyanat og polyol som brukes i produksjonsprosessen. Når PU produseres, dannes det kryssbindinger mellom enhetene og den molekylære vekten til PU er dermed høy. På grunn av kryssbindingene vil ikke materialegenskapene til PU bevares når den smeltes om etter første gangs smelting, og PU regnes som en hardplast.

Hvordan PU ser ut etter at det er produsert er avhengig av produksjonsprosessen, men for bruk i oljeabsorbenter er det mest relevant å se på PU som film, skum, svamper eller fibre. I produksjonsprosessen kan det også tilsettes andre forbindelser som endrer egenskapene til PU.

Sorpsjonskapasiteten til PU er høy og blant annet PU-fiber spunnet sammen med PS er vist å ha en sorpsjonskapasitet på 64 g/g.⁴⁰ Skum av PU alene har en absorpsjonskapasitet på mellom 19 og 58 g/g.⁴¹⁻⁴² Bruk av katalysator og tilsetningsstoffer i produksjonsprosessen kan øke absorpsjonen av olje ytterligere og reduserer absorpsjonen av vann.⁴¹⁻⁴² Det er vist at om PU tilsettes grafen modifisert med overflatebehandling, så kan dette føre til økt opptak av olje og redusert opptak av vann.¹⁴ Studier har vist at det er strukturen til PU som er viktigst for mengden olje absorbenten kan ta opp.⁴³ Bruk av PU til oppsamling av olje er også diskutert i Kapittel 2.6.3.

2.3.4 Polyester

Polyester kan lages både som hardplast og som termoplast og produseres av estermonomerer.

I en studie ble sorpsjonskapasiteten til flere naturlige fibere (blant annet bomull, ull og kapok) sammenlignet med sorpsjonskapasiteten til syntetiske polymerer, inkludert polyester, nylon og polypropylene¹⁸. Studien viser en sorpsjonskapasiteten for polyetylentereftalate (PET, en type polyester) rundt 25 g/g.¹⁸ En annen studie har vist sorpsjonskapasitet på 3 g/g.⁴⁴ I studien utført av Choi med flere¹⁸ var sorpsjonskapasiteten til alle de naturlige fibrene høyere enn sorpsjonskapasiteten til samtlige syntetiske polymerere. Av de syntetiske polymerene er sorpsjonskapasiteten til polyester en av de laveste.

2.3.5 Nylon

Nylon fremstilles av polyamider. Sorpsjonskapasiteten til nylon ble undersøkt i samme studie som den beskrevet i avsnittet over for polyester. Kapasiteten til nylon for sorpsjon av olje ble av Choi med flere (1993) rapportert til å være mellom 15 og 25 g/g for to ulike typer nylon. Dette er lavere enn samtlige naturfibre som ble undersøkt i samme studie.¹⁸

2.3.6 Sorbenter basert på plastavfall

Plast som avfall har et stort omfang og bruk av gjenvinnbar plast til absorpsjon av olje har blitt undersøkt av flere. Saleem med flere (2015) brukte flasker av PE med høy tetthet (*High Density Polyethylene*; HDPE) til å produsere en polymerfilm.⁴⁵ Forsøk viste at polymerfilmen kunne absorbere så mye som 100 g/g av marin diesel. Polymerfilmen ble fremstilt av 75 % HDPE og 25 % UHMWPE (*Ultra High Molecular Weight Polyethylene*). I de innledende forsøkene ble det kun brukt HDPE til å produsere gel og dette ga dårligere resultater.⁴⁵ Saleem og McKay (2016) viser i en senere publikasjon at polymerfilmen som ble laget fra HDPE-avfall også har lavt opptak av vann.⁴⁶

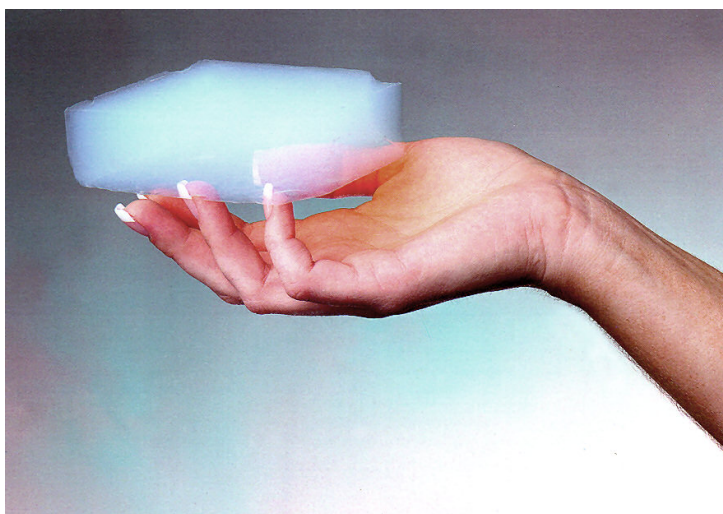
Det er også produsert PU-skum fra brukte drikkeflasker laget av poly(ethylene terephthalate) (PET).⁴⁷ Mengden olje absorbert av PU-skummet ble testet og det ble funnet at PU-skum kunne absorbere 40 g råolje per gram absorbent⁴⁷. Produksjonen av PU-skum ble optimalisert i forhold for absorpsjon av olje.

2.4 Nye fremskritt innen sorbenter

2.4.1 Aerogeler

En aerogel er et materiale med svært lav tetthet og høy porøsitet. Det omtales derfor gjerne som *frozen smoke*, og regnes som det letteste faste materialet som eksisterer. Prinsippet er at man erstatter væsken som er til stede i en gel med gass, uten at materialet krymper.

Aerogel er som regel et porøst silikamateriale. Det lages i likhet med andre syntetiske silikamaterialer via sol-gel prosessen, men hvor en spesiell tørkeprosess gir et svært høyt overflateareal. Dette gjør materialet potensielt til en meget god adsorbent. Det er vanlig å bruke alkoholer i prosessen når silica aerogeler dannes, noe som danner hydrofobe alkoksy substituenten på poreoverflaten. Denne effekten er midlertidig, da materialet får en mer hydrofil karakter ved hydrering av alkoksygruppene. Videre har det vært et problem at porestrukturen kollapser når det adsorberer vann.



Figur 12 En blokk med aerogel (<https://stardust.jpl.nasa.gov/photo/aerogel.html>)

Selv om aerogeler fortsatt ikke er kommersielle oljesorbenter, har det blitt gjort flere fremskritt i forhold til å bedre hydrofobisitet og strukturell stabilitet. I de mest lovende aerogelene er poreveggene modifisert med for eksempel $-\text{CH}_3$ eller $-\text{CF}_3$.⁴⁸⁻⁴⁹ Aerogeler basert på $-\text{CF}_3$ kan absorbere mer enn 200 ganger sin egen vekt i olje.⁴⁸

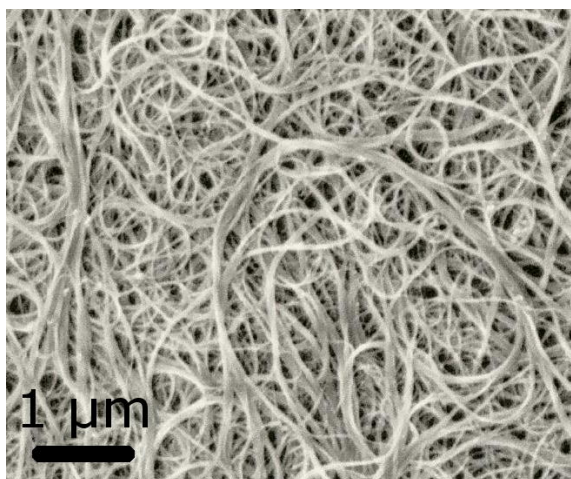
De siste 10 årene er det også foreslått å bruke karbonbaserte aerogeler laget fra for eksempel cellulose,⁵⁰ bambus⁵¹ eller squash.⁵² Slike aerogeler kan videre silaniseres for å øke hydrofobisitet. Prosedyren for å tillage slike aerosoler involverer pyrolyse under en inert gass. Rapportert sorpsjonskapasitet er gjerne 20 – 100 g/g. Slike sorbenter er likevel i et tidlig utviklingsstadium, og det er lite eller ingen informasjon om hvordan slike sorbenter eventuelt vil fungere i ulike miljø og situasjoner i felt. Det er i dag ingen masseproduksjon av karbon-baserte aerogeler.

I en studie fra 2014 ble det laget en aerogel hvor man varmebehandler en sukkerholdig gel for å lage en karbon-holdig aerogel.⁵³ Slike hadde en sorpsjonskapasitet på opp mot 80 g/g for ulike oljer.

2.4.2 Karbon nanorør (CNT)

Karbon nanorør (CNT) er blant de mer ekstraordinære materialene som er utviklet. Kjemisk sett er CNT likt grafen, men i stedet for en flat, lagvis struktur, består CNT av avlange rør. Dette gir CNT helt spesielle elektroniske egenskaper (avhengig av struktur) og en ekstrem mekanisk styrke samtidig som materialet er veldig lett. Olje vil i liten grad kunne gå inn i selve nanorørene, men vil adsorbere på utsiden av rørene. Når dette blir foreslått brukt som oljesorbent er det som regel modifisert på ulike måter. Forsøk med fenylendiamin funksjonalisert CNT har vist en kapasitet til å sorbere 3 – 12 ganger sin egen vekt i olje.⁵⁴ Det har også blitt laget svamper av CNT som kan absorbere opptil 140 ganger sin egen vekt i olje.⁵⁴ I dette tilfellet er absorpsjon den generelle virkemåten.

Tilordning av nanomaterialer til makroskopiske strukturer, som svamper, kan tillate et materiale å inneha unike nanoegenskaper, samtidig som man lager et anvendbart materiale. Dette prinsippet har blitt benyttet til å lage adsorbenter for en rekke stoffer, deriblant olje.⁵⁴⁻⁵⁷



Figur 13 SEM bilde av karbon nanorør (CC BY-SA 3.0: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube)

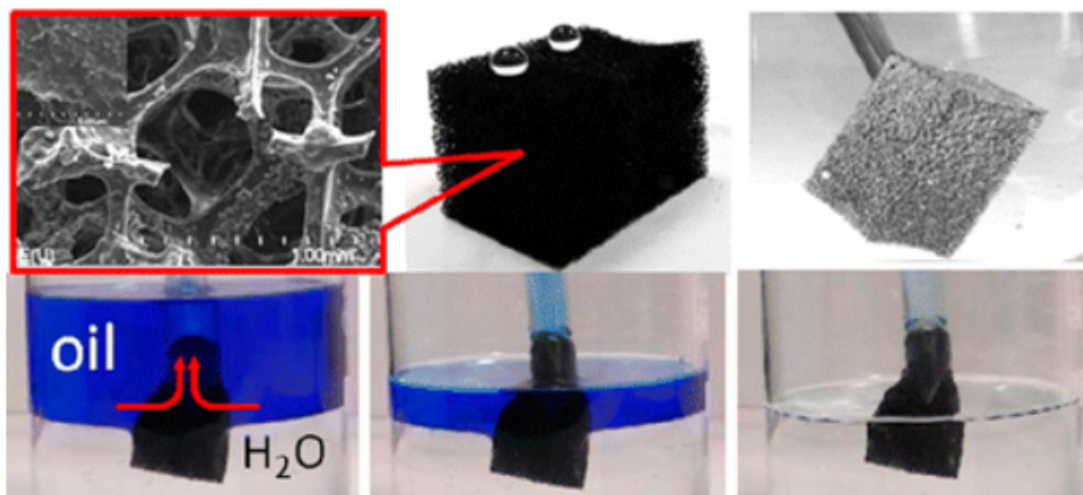
Det finnes imidlertid ingen kommersielle CNT-baserte oljesorbenter. En hovedårsak til dette er at produksjonskostnadene til CNT fortsatt er betraktelig høyere enn andre sorbentmaterialer.

Selv om karbon ikke er toksisk i seg selv, har likevel CNT vist seg å ha visse toksiske egenskaper grunnet sin størrelse og form, som påvirker lungene ved inhalering. Dette er samme mekanisme som for asbestfibre, som i form ligner CNT. Dette er noe som også må vurderes før man eventuelt bruker slike materialer i forbindelse med oljevern, både av hensyn til personell og miljøet. Det er også mistanke om at CNT kan bidra til økt opptak av organiske miljøgifter til organismer, dette skyldes de samme egenskapene som gjør CNT egnet som oljeabsorbent.

2.4.3 CNT-belagte polyuretansvamper

Polyurethansvamper (PU-svamper) er kommersielt tilgjengelige, og er en forholdsvis vanlig oljesorbent (se kap. 2.5.3). De senere år har det blitt gjort flere forsøk på å forbedre både PU-svamper og andre polymerbaserte svampers egenskaper (se også kap. 2.5.3),⁵⁸⁻⁵⁹ hvor svampene overflatebehandles på ulike måte for å oppnå for eksempel bedre sorpsjonskapasitet og mekaniske styrke. Det finnes spesielt mye litteratur på polyurethansvamper behandlet med CNT.^{54, 60-62} Slike prosesser lager såkalte superhydrofobe materialer, som sikrer ingen vannabsorpsjon, god mekanisk styrke, flyteevne og sorpsjonskapasitet på opptil 35 g/g. Det ble i ett forsøk festet en CNT modifier PU svamp i enden av et rør tilkoblet en vakuumpumpe. Oljen som absorberes av svampen

blir dermed fjernet fortløpende, og svampen var dermed i stand til å fjerne 35 000 ganger sin egen vekt i olje.⁶² Dette er illustrert i Figur 14.



Figur 14 CNT-modifisert PU-svamp, brukt til å selektivt fjerne olje fra en vannoverflate ved å påføre vakuum. Bilde fra Wang med flere (2013), gjengitt med tillatelse fra American Chemical Society.

Den beste sorpsjonskapasiteten ble imidlertid oppgitt fra en PU-svamp behandlet med silica og bensin. Denne hadde en kapasitet på over 100 g/g.⁵⁹

3 Effektivitet og egenskaper av ulike sorbentgrupper

Det er mange parametere som er relevante for å beskrive egnetheten og effektiviteten til en sorbent, som:

- Sorpsjonskapasitet av ulike typer olje, det vil si antall gram olje som kan absorberes per gram sorbent.
- Absorpsjonsrate.
- Egnethet i ulike miljøer.
- Gjenvinningsmulighet –og effektivitet.
- Flyteevne.
- HMS i forhold til behandling av sorbenten.
- Giftighet/økotoksisitet.

I foreliggende rapport er sorpsjonskapasitet og flyteevne vurdert. Sorpsjonskapasiteten kan hentes og vurderes fra tidligere studier. Dette introduserer imidlertid usikkerhet i resultatene fordi det er variasjon i de rapporterte verdier som ikke kan kontrolleres. Variasjonen skyldes en kombinasjon av følgende faktorer:

- Det er brukt forskjellige kommersielle sorbenter i studiene, med variasjon i materialeegenskaper. For eksempel finnes det mange måter å lage sorbenter fra de ulike syntetiske og organiske materialene.
- Det er variasjon i hvilke typer oljer som er brukt i de forskjellige testene.
- Det er variasjon i testprosedyrene som er brukt i studiene.

Spesielt det siste punktet gjør at verdiene som hentes fra ulike studier ikke nødvendigvis er direkte sammenlignbare. Denne usikkerheten er sett bort fra i den foreliggende rapporten og resultater er sammenlignet uten å ta hensyn til testprosedyren utover hvilken olje som er brukt i testen.

For sorbenter hvor det er rapportert sorpsjonseffektivitet i flere forskjellige studier, er det i denne rapporten brukt et gjennomsnitt av de rapporterte tallene. Videre blir sorbenten tildelt en poengsum fra 1 til 5 for sorpsjonskapasiteten for tung olje, lett olje, diesel, motorolje og gassolje for å vise hvordan sorbenten ligger i forhold til øvrige sorbenter. Det er også gitt en poengsum på 0 eller 1, avhengig om sorbenten flyter eller ikke.

For å illustrere hvor gode sorbentene er, er gjennomsnittlig sorpsjonskapasitet for alle oljer sorbenten er testet for presentert grafisk i Figur 15. I tillegg er poengsummene til sorbenten for sorpsjonskapasitet og flyteevne brukt i en multivariat analyse for å illustrere hvordan sorbentene grupperer seg, resultatene fra denne er vist i Figur 17.

Kriteriene for poengsummene er beskrevet i Tabell 1.

Tabell 1 Gradering av sorpsjonskapasitet, -rate og flyteevne for oljesorbenter

Sorpsjonskapasitet		Flyteevne	
Kriterie	Poeng	Kriterie*	Poeng
0 – 1 g/g	1	Flyter ikke	0
1 – 5 g/g	2		
5 – 20 g/g	3	Flyter	1
20 – 70 g/g	4		
> 70 g/g	5		

*Med 'flyter' menes i praksis at ingen sorbent synker.

3.1 Sorpsjonskapasitet og flyteevne for sorbentgruppene

Kapittel 2 beskriver egenskapene til hver av sorbentene i detalj. I de følgende tabellene er sorbentene presentert med poengsummene som beskriver sorpsjonskapasiteten og flyteevnen de har for de ulike oljene det er funnet resultater for, samt at den gjennomsnittlige rapporterte sorpsjonskapasiteten er oppgitt i gram olje per gram sorbent.

Tabell 6 viser poengsummene for alle sorbentene, Tabell 2 viser sorpsjonskapasiteten for de uorganiske sorbentene, Tabell 3 viser sorpsjonskapasiteten for de naturlige organiske sorbentene, Tabell 4 viser sorpsjonskapasiteten for de syntetiske organiske sorbentene, mens Tabell 5 viser sorpsjonskapasiteten for de eksperimentelle sorbentene.

Tabell 2 Gjennomsnittlig sorpsjonskapasitet for sorbenter – uorganiske sorbenter

Sorbent	Sorpsjonskapasitet g/g				
	Tunge oljer	Lette oljer	Diesel	Motorolje	Gassolje
Ekspandert perlitt ¹⁻³	3,9	3	3		1
Eksfoliert grafitt ^{5-8, 63}	74	70			82
Ekspandert vermikulitt ^{3, 10}	4	3,3	3,6	2,6	
Sepiolitt ¹¹⁻¹²				0,13	
Zeolitt ^{11, 13}			0,8	0,5	
Bentonitt ^{11, 13}				0,17	
Organoleire ^{**11, 13}			4,1	2,1	

*Blanke celler indikerer at det ikke er funnet litteraturdata på denne egenskapen.

**Organoleire av bentonitt, montmorillonitt

Tabell 3 Gjennomsnittlig sorpsjonskapasitet for sorbenter – naturlige organiske

Sorbent	Sorpsjonskapasitet g/g				
	Tunge oljer	Lette oljer	Diesel	Motorolje	Gassolje
Bomull ^{16-17, 19}	20	31,5		48,5	
Kapok ²⁰			36	45	
Bark		5			
Torv ²⁴			8		
Ull ^{11, 18}		32		33	
Risskall ^{23, 27-28}			8,9		
Aktivert karbon ³²⁻³⁴	1,6		23**		

*Blanke celler indikerer at det ikke er funnet litteraturdata på denne egenskapen.

**Blandet med bentonitt

Tabell 4 Gjennomsnittlig sorpsjonskapasitet for sorbenter – syntetisk organiske

Sorbent	Sorpsjonskapasitet g/g				
	Tunge oljer	Lette oljer	Diesel	Motorolje	Gassolje
Polypropylene ^{1, 35-36}	9,25	4,5	21	17	4,3
Polyethylene ³⁷⁻³⁸	43			19	
Polyuretan ³⁹	50	50	47	71	50
Polyester ^{18, 44}	14				
Nylon ¹⁸	20				
Gjenbrukte materialer ⁴⁵⁻⁴⁷	40		100		

*Blanke celler indikerer at det ikke er funnet litteraturdata på denne egenskapen.

Tabell 5 Gjennomsnittlig sorpsjonskapasitet for sorbenter – eksperimentelle

Sorbent	Sorpsjonskapasitet g/g				
	Tunge oljer	Lette oljer	Diesel	Motorolje	Gassolje
CNT svamper ^{54, 56}		90	140	78	
Aerogel ^{**48-49}	120		80		
Modifiserte PU svamper ^{**59, 62}		18	55	62	

*Blanke celler indikerer at det ikke er funnet litteraturdata på denne egenskapen.

**kategorien omfatter et vidt spekter av aerogeler med ulike modifikasjoner.

Tabell 6 Poengsummer for sorpsjonskapasitet og flyteevne for alle sorbenter. Poengsummene er tildelt etter kriteriene presentert i Tabell 1. Poengsummene er benyttet som grunnlag for multivariat analyse ved PCA (prinsipalkomponentanalyse).

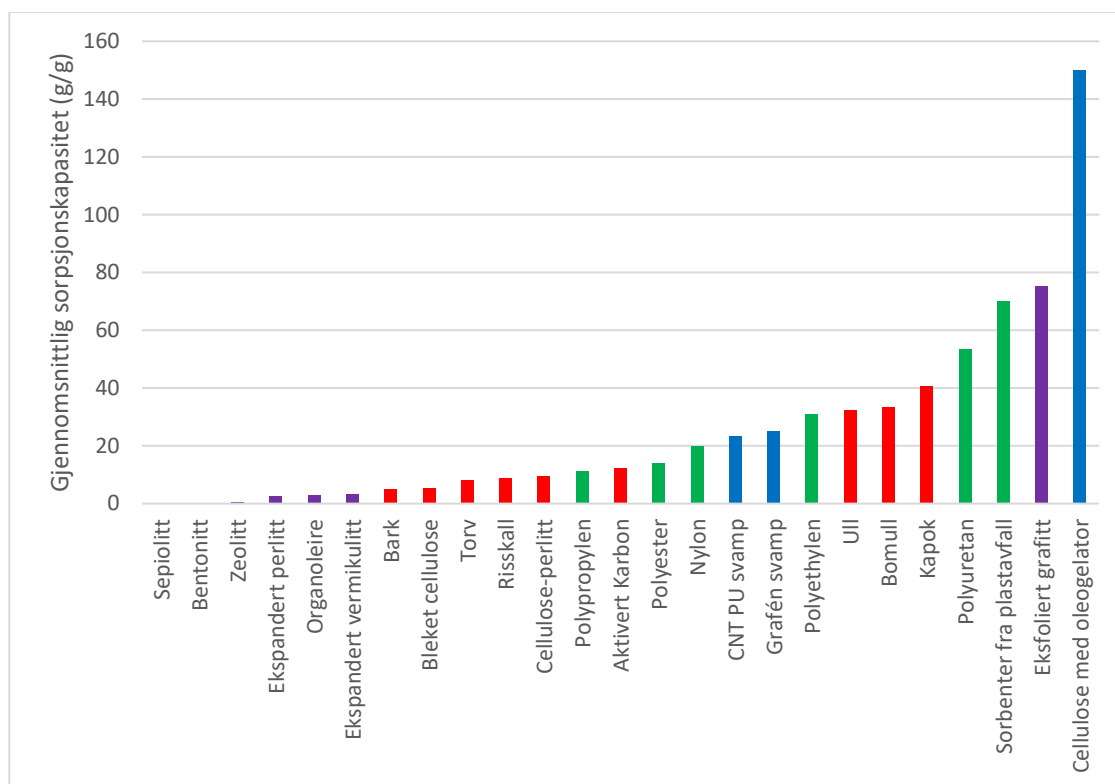
Sorbent	Kapasitet Tunge oljer	Kapasitet Lette oljer	Kapasitet Diesel	Kapasitet motorolje	Kapasitet gassolje	Flyteevne
Ekspandert perlitt ¹⁻³	2	2	2		1	1
Eksfoliert grafitt ^{5-8, 63}	4	4			5	1
Ekspandert vermikulitt ^{3, 10}	2	2	2	2		0
Sepiolitt ¹¹⁻¹²				1		0
Zeolitt ^{11, 13}			1	1		0
Bentonitt ¹¹				1		
Organoleire ^{**11 , 13}			2	2		0
CNT PU svamp	4	4	4	3		1
Aktivert Karbon ³²⁻³⁴	2		4			0
CNT svamp		5	5	4		1
Cellulose med oleogelator	5					1
Cellulose-perlitt	3	3	3			0
Bleket cellulose	3	2	3			0
Bomull ^{16-17, 19}	3	4		4		1
Kapok ²⁰			4	4		1
Bark		2				0
Torv ²⁴			3			0
Ull ^{11, 18}		4		4		1
Risskall ^{23, 27-28}			3			1
Polypropylen ^{1, 35-36}	3	2	4	3	2	1
Polyetylen ³⁷⁻³⁸	4			3		1
Polyuretan ³⁹	4	4	4	4	4	1
Polyester ^{18, 44}	3					1
Nylon ¹⁸	3					1
Gjenbrukte materialer ⁴⁵⁻⁴⁷	4		5			1

*Blanke celler indikerer at det ikke er funnet litteraturdata på denne egenskapen

3.2 Sorpsjonskapasitet

Gjennomsnittlig sorpsjonskapasitet for de ulike sorbentmaterialene er presentert grafisk i Figur 15. Til resultatene presentert i Figur 15 er det regnet et gjennomsnitt for sorpsjonskapasitet presentert for de ulike oljene vist for hvert sorbentmateriale i Tabell 2 til og med Tabell 5. I Figur 15 er det altså ikke lenger differensiert for oljetype. Søylen er skravert etter hvilken sorbentgruppe de grupperes til: Uorganiske – lilla, naturlig organiske – røde, syntetisk organiske – grønne, eksperimentelle – blå.

Figuren viser at det er Cellulose med oleogelator som har høyest sorpsjonskapasitet, med 150 gram olje per gram sorbent. Cellulose med oleogelator er en eksperimentell sorbent og er enda ikke kommersielt tilgjengelig. Eksfoliert grafitt har nest høyest sorpsjonskapasitet, opp mot 85 g/g. Eksfoliert grafitt er en uorganisk sorbent, og dette er den eneste av de uorganiske sorbentene som har sorpsjonskapasitet over 5 g/g (Figur 15/Tabell 2). Øvrige uorganiske sorbentmaterialer, sepiolitt, bentonitt, zeolitt, ekspandert perlitt, organoleire og ekspandert vermikulitt, har svært lav sorpsjonskapasitet (Figur 15).



Figur 15 Gjennomsnittlig sorpsjonskapasitet i gram olje per gram sorbent for ulike sorbentmaterialer. Barene er skravert etter hvilken sorbentgruppe materialet hører til: Lilla skravur = uorganiske, blå = eksperimentelle, rød = naturlige organiske, og grønn = syntetiske organiske sorbenter.

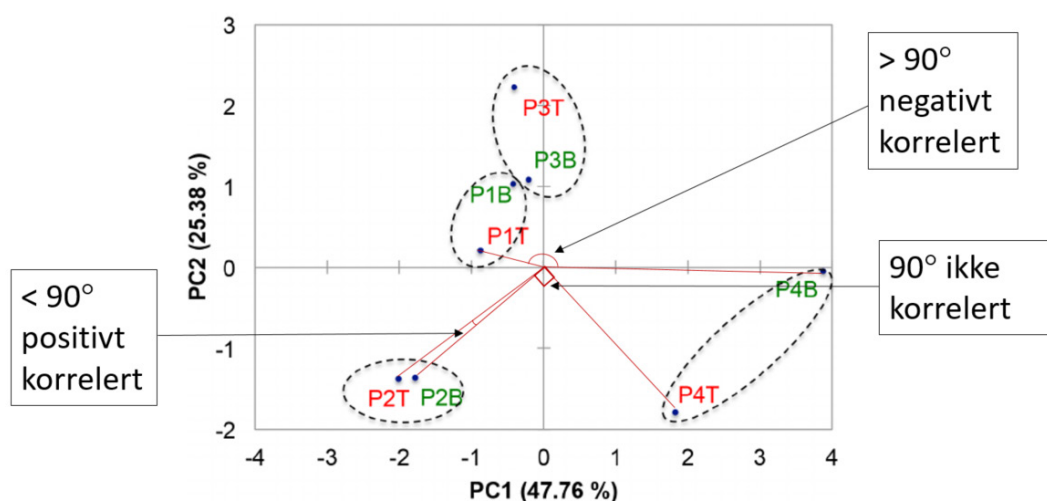
Etter eksfoliert grafitt rangeres sorpsjonskapasiteten til to materialer i gruppen syntetiske organiske sorbenter som nummer 3 og 4. Dette er henholdsvis sorbenter fra plastavfall og PU. Sorbenter fra plastavfall er en divers gruppe fordi den inkluderer alle de syntetiske organiske polymerene. I tillegg er sorbentene som er produsert fra plastavfall ofte kraftig modifisert i produksjonsprosessen, blant annet med overflatebehandling. Den gjennomsnittlige sorpsjonskapasiteten for denne gruppen er 70 g/g. Det at denne gruppen har høyere sorpsjonskapasitet enn øvrige polymerer viser imidlertid at plastavfall kan være et interessant sorbentmateriale å se nærmere på.

Organiske syntetiske sorbenter for øvrig har sorpsjonskapasitet fra 31 g/g for polyetylen og lavere. Nylon, polyester og polypropylen har alle sorpsjonskapasitet under 20 g/g.

For de naturlige organiske sorbentene er det sorpsjonskapasiteten til kapok, bomull og ull som ligger høyest, sorpsjonskapasiteten er henholdsvis 40, 33 og 32 g/g for disse sorbentmaterialene. Det er interessant at disse tre naturlige organiske sorbentmaterialene har like bra eller bedre sorpsjonskapasitet enn de syntetiske organiske sorbentmaterialene som tidligere har blitt brukt i absorberende oljelenser. Øvrige naturlige sorbentmaterialer som aktivert karbon, cellulose-perlitt, risskall, torv, bleket cellulose og bark har alle sorpsjonskapasitet under 20 g/g.

3.3 Multivariat analyse

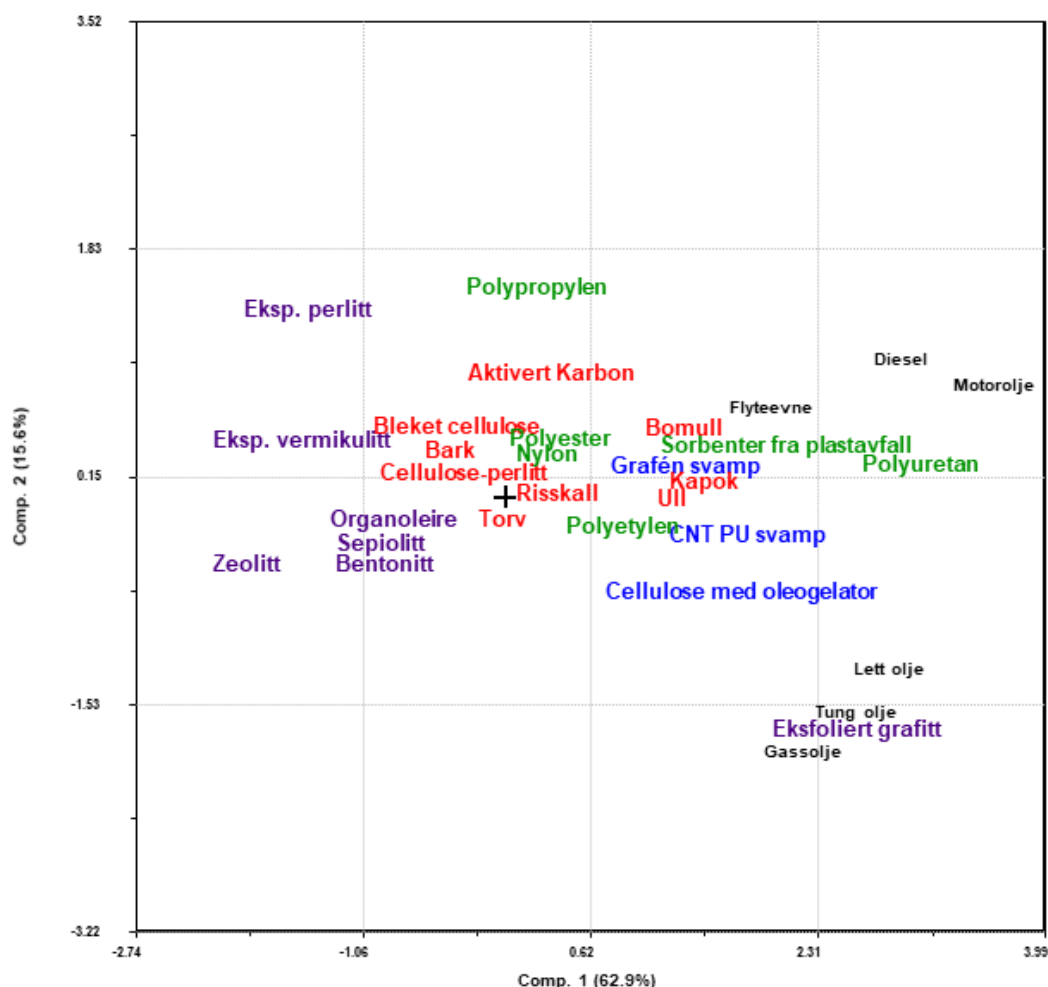
For å visualisere hvordan sorbentmaterialene grupperer seg er det gjort en multivariat analyse for dataene som er presentert i kapitlene ovenfor. Prinsipalkomponentanalyse (PCA) er en multivariat statistisk analysemetode der ortogonal transformering av et datasett gjøres for å finne korrelasjoner mellom objekter og forklaringsvariabler. I foreliggende rapport er sorpsjonskapasitet, flyteevne og oljetype forklaringsvariabler, og sorbentmateriale objektene. Metoden brukes for å trekke data ut fra datasett med mange parametere og mange målepunkt, slik at datamaterialet blir lettere å tolke.⁶⁴ Figur 16 viser et eksempel på et PCA-skårplott, og hvordan plasseringen av objekter viser korrelasjon.



Figur 16 Eksempel på PCA-skårplott. Modifisert figur fra Ammons med fler⁶⁵, der vinkler mellom objekter er tegnet inn for å illustrere (mulige) korrelasjoner mellom objektene. Stiplede linjer viser gruppering av ulike objekter.

Resultatene fra en PCA kan fremstilles i figurer som kalles skår- og ladningsplott. Skårplott viser sammenhengen mellom ulike objekter (her oljesorbenter), objekter som ligger nære hverandre vil ha samme egenskaper.⁶⁶ Tilsvarende vil et ladningsplott vise sammenhenger mellom ulike forklaringsvariabler (her sorbsjonskapasitet og flyteevne).⁶⁶ Et PCA-biplot er en kombinasjon av skår- og ladningsplott, og viser sammenhengen mellom objekter og forklaringsvariabler.

Et biplot for datasettet i foreliggende rapport vil vise hvilke oljesorbenter som ligner på hverandre og hvilke(n) forklaringsvariable som er viktig for denne korrelasjonen. Plottet er presentert i Figur 17.



Figur 17 PCA-biplot for samtlige variabler (sorbentkapasitet for tung og lett olje, gassolje, motorolje og diesel, samt flyteevne) og objekter (sorbentmateriale). Navnet på sorbentene er farget etter sorbentgruppen: Lilla markering = uorganiske, blå = eksperimentelle, rød = naturlige organiske, og grønn = syntetiske organiske sorbenter. Ca. 78 % av variansen i datasettet er uttrykt ved prinsipalkomponent 1 og 2.

Figur 17 illustrerer resultatene som er presentert i Figur 15. De sorbentene som har høy sorpsjonskapasitet er korrelert med oljene. Dette gjelder bomull, sorbenter fra plastavfall, polyuretan, grafén svamp, kapok, ull, polyetylen, CNT PU svamp, cellulose med oleogelator og eksfoliert grafitt. Alle disse korrelerer også med flyteevne. Noen av sorbentmaterialene korrelerer med de ulike oljene; for eksempel korrelerer eksfoliert grafitt med tung olje og gassolje, mens polyuretan, bomull og sorbenter fra plastavfall korrelerer med diesel og motorolje. Årsaken til dette er at sorbentene er testet kun med disse oljene, og at det dermed ikke foreligger data for andre oljer. Som Tabell 6 viser er datagrunnlaget mangelfullt, og for de fleste sorbentene foreligger det sorpsjonskapasitet kun for en type olje.

Det er derfor nødvendig å teste sorbentmaterialene i et standardisert testoppsett med alle typer oljer for samtlige sorbenter før et slik ladningsplott fra en multivariat analyse kan vise et riktig korrelasjonsforhold mellom sorbentmaterialet og oljetype.

4 Tidligere rapporter og oversiktsartikler om oljesorbenter

I tabell 8 og 9 er tidligere oversiktsartikler og rapporter listet. Årstall, utgiver/forfatter, kilde og en kort beskrivelse av innhold er gitt i tabellene.

Tabell 7 Tidligere tilgjengelige rapporter om oljesorbenter

Tittel	Årstall	Utgiver	Kilde / URL	Innhold
Recovery of oil in icy waters	2008	NGI	NGI arkiv	Eksfoliert grafitt som oljesorbent i arktiske miljø
Integrated Biotechnological Solutions for Combating Marine Oil Spills	2013 - dd	TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE	http://www.killspill.eu	EU prosjekt med flere rapporter og publikasjoner om bioteknologiske metoder for å håndtere oljeutslipp i sjø.
Application of sorbents and solidifiers for oil spills	2007	U.S. Environmental protection agency	https://www.epa.gov/emergency-response/application-sorbents-and-solidifiers-oil-spills	Fordeler og ulemper ved bruk av sorbenter versus fortykningsmiddel ved utslipp av ulike oljer i ulike miljø
Report on the testing of various sorbent materials	2010	accessUTS Pty Ltd	http://multimedia.3m.com/mws/media/8515080/	7 sorbenter fra 7 produsenter er testet vha. en standard testprosedyre for effektivitet mot parafinolje
Investigation of sorbents for removing oil spills from waters	1971	U.S. Coast Guard	http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/742950.pdf	Utvikling av laboratoriemetoder for testing av flytende sorbenter. 49 sorbentmaterialer ble testet innen kategoriene uorganisk, naturlig organisk, polymerskum, polymer hydrokarbon, og annet.
Evaluation of New Approaches to the Containment and	2002	U.S. Coast Guard Research and	http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a413552.pdf	Fokus på oljeutslipp i vann med strøm over 1 knopp. Flere ulike

Tittel	Årstall	Utgiver	Kilde / URL	Innhold
Recovery of Oil in Fast Water		Development Center		sorbenter i form av enten lenser eller flak er testet.
Effekt av metoder for strandrensing	2010	Norconsult	https://www.kystverket.no/contentassets/a51bb544035143599469341d908d9250/rapport.-norconsult.-juli-2010.pdf	Fokus på strandrensing, med erfaringer fra blant annet Full City
Sorbenter för olje- och kemikaliespill. Utveckling av en bedömningsmetodik för miljöanpassad produktion, användning och omhändertagande	2003	IVL Svenska Miljöinstitutet AB	https://rib.msb.se/file/r/pdf/20938.pdf	En omfattende rapport med et bredere fokus ift. sorbenter, inkl. miljøpåvirkning, kostnader, effektivitet og saneringsmetoder
Kartlegging av absorberende midler	1993	Statens forurensningstil syn	http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Publikasjoner/1993/Januar/Kartlegging_av_absorberende_midler/	Ulike sorbenter (ikke spesifiserte materialer) testet for ulike oljer og kjemikalier
A review of sorbent use in oil spill response	2009	Sintef		En bred oversikt over sorbentmaterialer, også med fokus på brukervennlighet

Tabell 8 Tidligere publiserte oversiktsartikler om oljesorbenter

Tittel	Innhold	Ref. (URL/DOI)
Porous Materials for Oil Spill Cleanup: A Review of Synthesis and Absorbing Properties	Oversikt over syntese og absorpsjons-egenskaper til et utvalg porøse sorbentmaterialer i forbindelse med oljesøl. Spesielt fokus på hydrofobisk silika aerogel, zeolitter, organoleire og naturlige sorbenter.	Adebajo et al., 2003 (https://doi.org/10.1023/A:1027484117065)
Review on the effectiveness of adsorbent materials in oil spills clean up	Belyser viktigheten av oljefjerning fra kontaminerte steder via adsorpsjons-metoder, samt presentasjon av ulike adsorbenter, spesielt naturlige organiske, uorganiske og syntetiske.	Al-Jammal og Juzsakova, 2016 (https://www.researchgate.net/publication/319254182_Review_on_the_Effectiveness_of_Adsorbent_Materials_in_Oil_Spills_Clean_Up)
A sustainable approach to controlling oil spills	Oversikt over begrensninger og miljø-messige konsekvenser av eksisterende oljefjernings-metoder, beskrivelser av ulike oljesorbenter, og forslag om å benytte palmeblader som oljesorbenter i tropiske områder hvor det finnes store mengder palmetrær.	Al-Majed et al., 2012 (https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.034)
Application of Mineral Sorbents for Removal of Petroleum Substances: A Review	Beskrivelse av nyere arbeid som fokuserer på bruken av naturlige, syntetiske og modifiserte mineral-adsorbenter for fjerning av petroleumsubstanser og deres derivater fra veg, vann og luft.	Bandura et al., 2017 (https://doi.org/10.3390/min7030037)
Oil Spill Cleanup from Sea Water by Sorbent Materials	Sammenlikning av sorpsjonspotensialet til tre sorbenter i forbindelse med oljefjerning fra havoverflaten: polypropylen, bagasse og risskall. Resultatene viste at viskositeten til oljen er en viktig faktor for sorpsjonspotensialet til sorbentene.	Bayat et al., 2005 (https://doi.org/10.1002/ceat.200407083)
Graphene Sponge as an Efficient and Recyclable Oil Sorbent	Testing av sorpsjonskapasiteten til fabrikkert grafénoksid svamp for ulike organiske løsemidler og olje – resultatene indikerte relativt høy absorpsjonskapasitet.	Chen et al., 2017 (https://doi.org/10.1063/1.4999861)
A review of exfoliated graphite	Fysiske og kjemiske egenskaper til eksfoliert grafitt, samt bruken av eksfoliert grafitt for adsorpsjon av olje.	Chung, 2016 (https://doi.org/10.1007/s10853-015-9284-6)
A review of bio-based materials for oil spill treatment	Beskrivelse av materialer for fjerning av oljesøl fra vann (fokus på ulike biomasser og polymerer), i form av sorbenter eller separatorer.	Doshi et al., 2018 (https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.034)

Tittel	Innhold	Ref. (URL/DOI)
Carbon materials as oil sorbents: a review on the synthesis and performance	Syntese, applikasjoner, gjenbruksgrad og sammenlikning av karbon-baserte absorbenter for å fjerne oljesøl.	Gupta og Tai., 2016 (https://doi.org/10.1039/C5TA08321D)
Cellulosic Substrates for Removal of Pollutants from Aqueous Systems: A Review. 3. Spilled Oil and Emulsified Organic Liquids	Bruken av cellulose-baserte materialer som oljesorbenter.	Hubbe et al., 2013 (https://doi.org/10.15376/biores.8.2.3038-3097)
Nonconventional low-cost cellulose- and keratin-based biopolymeric sorbents for oil/water separation and spill cleanup: A review	Presentasjon av kostnadseffektive og ikke- konvensjonelle cellulose- og keratin-baserte biopolymersorbenter for sorpsjon av olje, med beskrivelser av deres sorpsjonskapasiteter, egenskaper og mekanismer.	Ifelebuegu og Johnson, 2017 (https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1318620)
Application of solidifiers for oil spill containment: A review	Utfordringer og forskningsbehov innenfor temaet oljesøl og opprydning, eksempler på viktig forskning innen dette temaet, samt oppsummering av nøkkelprestasjonsparametere for kjemiske oljespill behandlingsmidler ("solidifiers"), som i kontakt med olje kan danne en kohesiv og størknet (eller delvis størknet) masse som ideelt flyter på vann og muliggjør oljeutvinning fra et oljeutslipp.	Motta et al., 2018 (https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.103)
Review: Silica Aerogel as a Viable Absorbent for Oil Spill Remediation	Potensialet for bruk av silica aerogel som sorpsjonsmateriale ved utslipp av råolje.	Olalekan et al., 2014 (http://dx.doi.org/10.4236/jeas.2014.44013)
Oil and grease removal from wastewaters: Sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies. A critical review.	Metoder for å fjerne olje og fett fra avløpsvann, med fokus på naturlige organiske sorpsjonsmaterialer.	Pintor et al., 2016 (http://dx.doi.org/10.1016/j.ccej.2016.03.121)
Oil sorbents from plastic wastes and polymers: A review	Bruk av plastavfall som oljesorbenter, samt beskrivelse av sorpsjonskapasitet for plastikk-baserte sorbenter.	Saleem et al., 2018 (http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.072)
A review of polymer nanofibres by electro-spinning and their application in oil-water separation for cleaning up marine oil spills	Applikasjon av nanofiber som sorbent for fjerning av olje fra vann.	Sabatly et al., 2016 (http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.037)

Tittel	Innhold	Ref. (URL/DOI)
Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview	Diskusjon angående bruken av naturlige fibrose sorbenter for fjerning av olje fra avløpsvann.	Wahi et al., 2013 (http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2013.04.015)

5 Vurdering

Det er i rapporten presentert litteratur og sorpsjonskapasitet for tre klasser sorbenter som kan være relevante å bruke for å samle opp oljesøl: Uorganiske sorbenter, naturlige organiske sorbenter og syntetiske organiske sorbenter. I tillegg er det diskutert nye fremskritt innenfor sorbsjonsteknologi. Litteraturen som er gjennomgått viser at flere materialer har stort potensial som sorbenter ved oljesøl.

For de uorganiske sorbentene er det eksfoliert grafitt som anses å være best egnet som sorpsjonsmiddel ved oljesøl. Eksfoliert grafitt er vist å ha høy sorpsjonskapasitet, opp mot 82 gram olje per gram sorbent, samt en svært høy sorpsjonsrate på bare 1 – 2 minutter. I litteraturgjennomgangen er dette den nest høyeste gjennomsnittlige sorpsjonskapasiteten som ble funnet for kommersielt tilgjengelige materialer (se Figur 15). I PCA-plottet vist i Figur 17 er også eksfoliert grafitt sterkt korrelert med de oljene som sorpsjonen er testet for: tung olje, lett olje og gassolje. Sorpsjonskapasiteten til eksfoliert grafitt for diesel og motorolje er ikke testet, og det er derfor disse to oljetyperne ikke korrelerer med eksfoliert grafitt. Som tidligere nevnt er datagrunnlaget mangelfullt og PCA-plottet blir dermed ikke helt korrekt i fremstillingen av korrelasjon. Sannsynligvis vil sorpsjonskapasiteten være like god for motorolje og diesel som for de oljene som er testet, siden sorpsjonskapasiteten er omtrent like god for de tre oljene som den er testet for (fra 70-82 g/g). En fordel med bruk av eksfoliert grafitt er at oljen som er absorbert kan gjenvinnes. Ulempen med bruk av eksfoliert grafitt er at det produseres ved varmebehandling av ekspandert grafitt og produksjonsprosessen er dermed svært energikrevende. Bruk av eksfoliert grafitt er dermed lite bærekraftig om produktet vurderes etter flere kriterier enn kun sorpsjonskapasitet/effektivitet.

For de naturlige organiske sorbentene er det ull, bomull, kapok og risskall som utpeker seg som de sorbentene som har høy sorpsjonskapasitet. Sorpsjonskapasiteten til ull ligger rundt 30 g/g, mens kapok og bomull kan absorbere 40 og 50 g/g, henholdsvis. Disse tre sorbentene er blant de 10 sorbentmaterialene som har høyest gjennomsnittlig sorbsjonskapasitet, se Figur 15. Sorpsjonskapasiteten til risskall er noe lavere enn de øvrige naturlige sorbentene som utpeker seg i litteraturgjennomgangen. Men sorpsjonskapasiteten til risskall varierer mye, fra 18 til 2 g/g, og dette skyldes blant annet hvordan risskallet behandles før det brukes som sorbent. Behandling av risskall med en alkalisk løsning resulterte i en sorpsjonskapasitet på 18 g/g. I PCA-plottet, Figur 18, er kapok, bomull og ull sterkt korrelert med oljene på grunn av deres gode sorpsjonsevne. Risskall ligger nærmere senter av plottet siden den gjennomsnittlige sorpsjonskapasiteten til risskall er lavere. For at egenskapene til de naturlige organiske sorbentene skal kunne fremstilles riktig i et PCA-plott, må sorbentene testes i et standardisert testoppsett og

med flere typer oljer. Det må også standardiseres hvilket type materiale man tester sorpsjon for.

I tillegg til sorpsjonskapasiteten, bør også andre aspekter ved materialvalg vurderes. Risskall er et avfall som er tilgjengelig i store volum og det er stadig større fokus på å utnytte avfall fra én produksjonsprosess som ressurs i en annen produksjonsprosess. Bruk av risskall vil oppfylle kriteriene til FNs bærekraftsmål nummer 12 "Ansvarlig forbruk og produksjon". Imidlertid dyrkes risskall i områder som ligger langt fra Norge og miljøpåvirkningen fra transporten kan veie opp for fordelene av gjenbruk. Effektene av disse to parameterne bør vurderes nærmere i en bærekraftsvurdering. Også bomull og kapok, som begge er materialer som viser lovende sorpsjonskapasitet, bør det gjøres en bærekraftsvurdering av. Bomullsproduksjon krever mye vann, mens kapok produseres i land som ligger langt unna Norge.

For de syntetiske organiske sorbentene er PU og PE de som har høyest sorpsjonskapasitet, henholdsvis fra 50 – 70 g/g og 20 – 40 g/g. Den gjennomsnittlig sorpsjonskapasitet rangerer disse to til fjerde og åttende beste sorpsjonsmateriale, se Figur 16. Dette er de klassiske materialene som brukes til sorpsjon av olje, og det er mange som allerede forhandler absorpsjonsprodukter hvor disse brukes. Imidlertid har sorpsjonsmaterialer produsert på gjenvunnet, syntetiske organisk sorbenter like stor eller større sorpsjonskapasitet enn de materialene som er produsert på nye polymerer. Den gjennomsnittlige sorpsjonskapasiteten for de gjenbrukte materialene gjør at dette er det tredje beste sorbentmaterialet, se Figur 16. Både PU, PE og gjenbrukte materialer har god sorpsjonskapasitet og korrelerer godt med oljene, se Figur 18. Plastpolymerer kan modifiseres mye i produksjonsprosessen slik at sorpsjonskapasiteten økes. Dette kan for eksempel gjøres ved å tilsette kopolymerer og katalysatorer. På denne måten vil for eksempel PU-skum som er modifisert ha andre sorpsjonsegenskaper enn PU-skum som ikke er modifisert. Det er i litteraturstudien funnet at både materialene som er testet og testprosedyrene som er brukt varierer mye. Både de vanlige syntetiske organiske polymerene og gjenbrukte materialer bør derfor testes i et standardoppsett, og med flere typer olje for å se hvilke oljer de er best egnet for.

Siden plastavfall er et avfallsproblem på verdensbasis, bør bruk av resirkulert plast i absorpsjonsmaterialer for olje undersøkes videre. Det er da viktig å ta hensyn til hvordan de ulike materialene produseres og hvor energikrevende og forurensende prosessene er. Disse prosessene vil kunne vurderes i en bærekraftsanalyse, som både vil kunne belyse de ulike delene av prosessen og den totale effekten av prosessen. Utnyttelse av materialer som klassifiserer avfall som ressurs i produksjon av andre varer kan være hensiktsmessig i et helhetlig miljøperspektiv, men bør vurderes med hensyn til flere parametere.

6 Konklusjon

Rapportert sorpsjonskapasitet varierer mye for materialene, både mellom sorbentgruppene, innenfor sorbentgruppene og for samme sorbentmateriale. Det anbefales derfor at det utvikles et standardisert oppsett for å teste sorpsjonskapasiteten til materialer som skal vurderes for bruk som oljesorbenter. I dette oppsettet bør sorpsjon til materialene testes for ulike oljer.

I videre arbeid bør også andre relevante forhold vurderes. Slike forhold er nevnt i innledningen til kapittel 3 i denne rapporten.

Resultatene som er presentert i foreliggende rapport viser at sorpsjonskapasiteten er størst for gjenbrukte syntetiske organiske materialer og eksfoliert grafitt, og noe lavere for organiske naturlige materialer. Av de organiske naturlige materialene er bomull, kapok, ull og risskall relevante materialer som bør vurderes nærmere.

Generelt har syntetisk organiske sorbenter best flyteevne og sorpsjonskapasitet, mens uorganiske materialer sorberer og flyter dårligst. Naturlig organiske sorbenter inkluderer et bredt utvalg av ulike materialer, og det er derfor stor variasjon i egenskaper for denne materialkategorien. Det er imidlertid flere unntak; enkelte ekspanderte/eksfolierte uorganiske materialer har god flyteevne, og enkelte uorganiske og naturlig organiske materialer har sorpsjonskapasitet som overgår syntetisk uorganiske sorbenter. Enkelte eksperimentelle materialer har ekstrem sorpsjonskapasitet, men er begrenset grunnet høye kostnader og begrenset eller ingen tilgjengelighet.

7 Referanser

1. Teas, C.; Kalligeros, S.; Zankos, F.; Stournas, S.; Lois, E.; Anastopoulos, G., Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spills clean up. *Desalination* **2001**, *140* (3), 259-264.
2. Bastani, D.; Safekordi, A. A.; Alihosseini, A.; Taghikhani, V., Study of oil sorption by expanded perlite at 298.15K. *Separation and Purification Technology* **2006**, *52* (2), 295-300.
3. Schatzberg, P. *Investigation of sorbents for removing oil spills from waters*; Naval Ship Research and Development Center: 1971.
4. Chung, D. D. L., A review of exfoliated graphite. *Journal of Materials Science* **2016**, *51* (1), 554-568.
5. Børresen, M. *Recovery of oil in icy waters. Desk top study and laboratory experiments.* ; NGI: NGI rapport, 2008.
6. Toyoda, M.; Inagaki, M., Heavy oil sorption using exfoliated graphite: New application of exfoliated graphite to protect heavy oil pollution. *Carbon* **2000**, *38* (2), 199-210.
7. Nishi, Y.; Iwashita, N.; Sawada, Y.; Inagaki, M., Sorption kinetics of heavy oil into porous carbons. *Water Research* **2002**, *36* (20), 5029-5036.
8. Toyoda, M.; Aizawa, J.; Inagaki, M., Sorption and recovery of heavy oil by using exfoliated graphite. *Desalination* **1998**, *115* (2), 199-201.
9. Zheng, Y.-P.; Wang, H.-N.; Kang, F.-Y.; Wang, L.-N.; Inagaki, M., Sorption capacity of exfoliated graphite for oils-sorption in and among worm-like particles. *Carbon* **2004**, *42* (12), 2603-2607.
10. Mysore, D.; Viraraghavan, T.; Jin, Y.-C., Treatment of oily waters using vermiculite. *Water Research* **2005**, *39* (12), 2643-2653.
11. Rajaković-Ognjanović, V.; Aleksić, G.; Rajaković, L., Governing factors for motor oil removal from water with different sorption materials. *Journal of Hazardous Materials* **2008**, *154* (1), 558-563.
12. Rajakovic, V.; Aleksic, G.; Radetic, M.; Rajakovic, L., Efficiency of oil removal from real wastewater with different sorbent materials. *Journal of Hazardous Materials* **2007**, *143* (1), 494-499.
13. Carmody, O.; Frost, R.; Xi, Y.; Kokot, S., Adsorption of hydrocarbons on organo-clays—Implications for oil spill remediation. *Journal of Colloid and Interface Science* **2007**, *305* (1), 17-24.
14. Bandura, L.; Franus, M.; Józefaciuk, G.; Franus, W., Synthetic zeolites from fly ash as effective mineral sorbents for land-based petroleum spills cleanup. *Fuel* **2015**, *147*, 100-107.
15. Khan, E.; Virojnagud, W.; Ratpukdi, T., Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff. *Chemosphere* **2004**, *57* (7), 681-689.
16. Choi, H.-M.; Kwon, H.-J.; Moreau, J. P., Cotton Nonwovens as Oil Spill Cleanup Sorbents. *Textile Research Journal* **1993**, *63* (4), 211-218.
17. Choi, H. M.; Cloud, R. M., Natural sorbents in oil spill cleanup. *Environmental Science & Technology* **1992**, *26* (4), 772-776.

18. Choi, H.-M.; Moreau, J. P., Oil sorption behavior of various sorbents studied by sorption capacity measurement and environmental scanning electron microscopy. *Microscopy Research and Technique* **1993**, 25 (5-6), 447-455.
19. Singh, V.; Jinka, S.; Hake, K.; Parameswaran, S.; Kendall, R. J.; Ramkumar, S., Novel Natural Sorbent for Oil Spill Cleanup. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2014**, 53 (30), 11954-11961.
20. Lim, T.-T.; Huang, X., Evaluation of kapok (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.) as a natural hollow hydrophobic–oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup. *Chemosphere* **2007**, 66 (5), 955-963.
21. Al-Majed, A. A.; Adebayo, A. R.; Hossain, M. E., A sustainable approach to controlling oil spills. *Journal of Environmental Management* **2012**, 113, 213-227.
22. Abreu, I.; Simas Guerreiro, M.; Fonseca, A., *Cork Sorbents for Aquatic Oil Spills Clean Up*. 2012.
23. Ali, N.; El-Harbawi, M.; Jabal, A. A.; Yin, C.-Y., Characteristics and oil sorption effectiveness of kapok fibre, sugarcane bagasse and rice husks: oil removal suitability matrix. *Environmental Technology* **2012**, 33 (4), 481-486.
24. Novoselova, L. Y.; Sirotkina, E. E., Peat-based sorbents for the purification of contaminated environments: A review. *Solid Fuel Chemistry* **2008**, 42 (4), 251-262.
25. Ribeiro, T. H.; Smith, R. W.; Rubio, J., Sorption of Oils by the Nonliving Biomass of a *Salvinia* sp. *Environmental Science & Technology* **2000**, 34 (24), 5201-5205.
26. Paulauskienė, T.; Jucikė, I.; Juščenko, N.; Baziukė, D., The Use of Natural Sorbents for Spilled Crude Oil and Diesel Cleanup from the Water Surface. *Water, Air, & Soil Pollution* **2014**, 225 (6), 1959.
27. Bazargan, A.; Tan, J.; Hui, C. W.; McKay, G., Utilization of rice husks for the production of oil sorbent materials. *Cellulose* **2014**, 21 (3), 1679-1688.
28. Vlaev, L.; Petkov, P.; Dimitrov, A.; Genieva, S., Cleanup of water polluted with crude oil or diesel fuel using rice husks ash. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* **2011**, 42 (6), 957-964.
29. Hubbe, M. A.; Rojas, O. J.; Fingas, M.; Gupta, B. S., *Cellulosic Substrates for Removal of Pollutants from Aqueous Systems: A Review. 3. Spilled Oil and Emulsified Organic Liquids*. 2013; Vol. 8.
30. Prathap, A.; Sureshan, K. M., Organogelator–Cellulose Composite for Practical and Eco-Friendly Marine Oil-Spill Recovery. *Angewandte Chemie International Edition* **2017**, 56 (32), 9405-9409.
31. Silvani, L.; Vrchotova, B.; Kastanek, P.; Demnerova, K.; Pettiti, I.; Papini, M. P., Characterizing Biochar as Alternative Sorbent for Oil Spill Remediation. *Scientific Reports* **2017**, 7, 43912.
32. Rhonalyn V. Maulion, S. A. A., Gerald Garces Allorde, Ma. Cherrielyn Silda Umali, Oil Spill Adsorption Capacity of Activated Carbon Tablets from Corncobs in Simulated Oil-Water Mixture. *Asia Pacific Journal of Multidisciplinary Research* **2015**, 3 (5), 5.
33. Hadeel Tabbakh, R. B., Cleanup Oil Spills by Activated Carbons Prepared from Agricultural Wastes. *Material Science: An Indian Journal* **2018**, 16 (1), 9.

34. B. H. Diya'uddeen, I. A. M., A.S. Ahmed, B.Y. Jibril, Production of Activated Carbon from Corncobs and its Utilization in Crude Oil Spillage Clean Up. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal* **2008**, EE 08 004.
35. Wei, Q. F.; Mather, R. R.; Fotheringham, A. F.; Yang, R. D., Evaluation of nonwoven polypropylene oil sorbents in marine oil-spill recovery. *Marine Pollution Bulletin* **2003**, 46 (6), 780-783.
36. Pang, Y.; Wang, S.; Wu, M.; Liu, W.; Wu, F.; Lee, P. C.; Zheng, W., Kinetics study of oil sorption with open-cell polypropylene/polyolefin elastomer blend foams prepared via continuous extrusion foaming. *Polymers for Advanced Technologies* **2018**, 29 (4), 1313-1321.
37. Nam, C.; Zhang, G.; Chung, T. C. M., Polyolefin-based interpenetrating polymer network absorbent for crude oil entrapment and recovery in aqueous system. *Journal of Hazardous Materials* **2018**, 351, 285-292.
38. Nam, C.; Li, H.; Zhang, G.; Lutz, L. R.; Nazari, B.; Colby, R. H.; Chung, T. C. M., Practical Oil Spill Recovery by a Combination of Polyolefin Absorbent and Mechanical Skimmer. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2018**, 6 (9), 12036-12045.
39. Wang, S.; Wang, K.; Pang, Y.; Li, Y.; Wu, F.; Wang, S.; Zheng, W., Open-cell polypropylene/polyolefin elastomer blend foams fabricated for reusable oil-sorption materials. *Journal of Applied Polymer Science* **2016**, 133 (33).
40. Lin, J.; Tian, F.; Shang, Y.; Wang, F.; Ding, B.; Yu, J.; Guo, Z., Co-axial electrospun polystyrene/polyurethane fibres for oil collection from water surface. *Nanoscale* **2013**, 5 (7), 2745-2755.
41. Li, H.; Liu, L.; Yang, F., Oleophilic Polyurethane Foams for Oil Spill Cleanup. *Procedia Environmental Sciences* **2013**, 18, 528-533.
42. A. Tanobe, V. O.; Sydenstricker, T. H. D.; Amico, S. C.; Vargas, J. V. C.; Zawadzki, S. F., Evaluation of flexible postconsumed polyurethane foams modified by polystyrene grafting as sorbent material for oil spills. *Journal of Applied Polymer Science* **2009**, 111 (4), 1842-1849.
43. Javier, P.; Athanassia, A.; Despina, F., Effect of the porous structure of polymer foams on the remediation of oil spills. *Journal of Physics D: Applied Physics* **2016**, 49 (14), 145601.
44. Zhang, J.; Seeger, S., Polyester Materials with Superwetting Silicone Nanofilaments for Oil/Water Separation and Selective Oil Absorption. *Advanced Functional Materials* **2011**, 21 (24), 4699-4704.
45. Saleem, J.; Ning, C.; Barford, J.; McKay, G., Combating oil spill problem using plastic waste. *Waste Management* **2015**, 44, 34-38.
46. Saleem, J.; McKay, G., Waste HDPE bottles for selective oil sorption. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* **2016**, 11 (4), 642-645.
47. Atta, A. M.; Brostow, W.; Datashvili, T.; El-Ghazawy, R. A.; Lobland, H. E. H.; Hasan, A.-R. M.; Perez, J. M., Porous polyurethane foams based on recycled poly(ethylene terephthalate) for oil sorption. *Polymer International* **2013**, 62 (1), 116-126.
48. Reynolds, J. G.; Coronado, P. R.; Hrubesh, L. W., Hydrophobic aerogels for oil-spill clean up – synthesis and characterization. *Journal of Non-Crystalline Solids* **2001**, 292 (1), 127-137.

49. Adebajo, M. O.; Frost, R. L.; Klopogge, J. T.; Carmody, O.; Kokot, S., Porous Materials for Oil Spill Cleanup: A Review of Synthesis and Absorbing Properties. *Journal of Porous Materials* **2003**, *10* (3), 159-170.
50. Liu, H.; Geng, B.; Chen, Y.; Wang, H., Review on the Aerogel-Type Oil Sorbents Derived from Nanocellulose. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2017**, *5* (1), 49-66.
51. Yuan, W.; Zhang, X.; Zhao, J.; Li, Q.; Ao, C.; Xia, T.; Zhang, W.; Lu, C., Ultra-lightweight and highly porous carbon aerogels from bamboo pulp fibers as an effective sorbent for water treatment. *Results in Physics* **2017**, *7*, 2919-2924.
52. Li, Y.-Q.; Samad, Y. A.; Polychronopoulou, K.; Alhassan, S. M.; Liao, K., Carbon Aerogel from Winter Melon for Highly Efficient and Recyclable Oils and Organic Solvents Absorption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2014**, *2* (6), 1492-1497.
53. Wu, Z.-Y.; Li, C.; Liang, H.-W.; Zhang, Y.-N.; Wang, X.; Chen, J.-F.; Yu, S.-H., Carbon nanofiber aerogels for emergent cleanup of oil spillage and chemical leakage under harsh conditions. *Scientific Reports* **2014**, *4*, 4079.
54. Gupta, S.; Tai, N.-H., Carbon materials as oil sorbents: a review on the synthesis and performance. *Journal of Materials Chemistry A* **2016**, *4* (5), 1550-1565.
55. Chen, P.-H.; Sie, M.-C.; Jeng, P.-D.; Wu, R.-C.; Wang, C.-B., Graphene sponge as an efficient and recyclable oil sorbent. *AIP Conference Proceedings* **2017**, *1877* (1), 030005.
56. Gui, X.; Wei, J.; Wang, K.; Cao, A.; Zhu, H.; Jia, Y.; Shu, Q.; Wu, D., Carbon Nanotube Sponges. *Advanced Materials* **2010**, *22* (5), 617-621.
57. Gui, X.; Zeng, Z.; Lin, Z.; Gan, Q.; Xiang, R.; Zhu, Y.; Cao, A.; Tang, Z., Magnetic and Highly Recyclable Macroporous Carbon Nanotubes for Spilled Oil Sorption and Separation. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2013**, *5* (12), 5845-5850.
58. Zhu, X.; Zhang, Z.; Ge, B.; Men, X.; Zhou, X.; Xue, Q., A versatile approach to produce superhydrophobic materials used for oil-water separation. *Journal of Colloid and Interface Science* **2014**, *432*, 105-108.
59. Wu, D.; Fang, L.; Qin, Y.; Wu, W.; Mao, C.; Zhu, H., Oil sorbents with high sorption capacity, oil/water selectivity and reusability for oil spill cleanup. *Marine Pollution Bulletin* **2014**, *84* (1), 263-267.
60. Wang, H.; Wang, E.; Liu, Z.; Gao, D.; Yuan, R.; Sun, L.; Zhu, Y., A novel carbon nanotubes reinforced superhydrophobic and superoleophilic polyurethane sponge for selective oil-water separation through a chemical fabrication. *Journal of Materials Chemistry A* **2015**, *3* (1), 266-273.
61. Ge, B.; Zhang, Z.; Zhu, X.; Men, X.; Zhou, X., A superhydrophobic/superoleophilic sponge for the selective absorption oil pollutants from water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2014**, *457*, 397-401.
62. Wang, C.-F.; Lin, S.-J., Robust Superhydrophobic/Superoleophilic Sponge for Effective Continuous Absorption and Expulsion of Oil Pollutants from Water. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2013**, *5* (18), 8861-8864.
63. Bayat, A.; Aghamiri, S., *Oil Sorption by Synthesized Exfoliated Graphite (EG)*. 2008; Vol. 5.

64. Nortvedt, R., Anvendelse av kjemometri innen forskning og industri. *Tidsskriftforlaget kjemi* **1996**.
65. Ammons, M. C.; Morrissey, K.; Tripet, B. P.; Van Leuven, J. T.; Han, A.; Lazarus, G. S.; Zenilman, J. M.; Stewart, P. S.; James, G. A.; Copie, V., Biochemical association of metabolic profile and microbiome in chronic pressure ulcer wounds. *PloS one* **2015**, *10* (5), e0126735.
66. Martens, H.; Martens, M., *Multivariate analysis of quality: An introduction*. Wiley: Chichester, 2001.

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Litteraturstudie om sorbenter		Dokumentnr./Document no. 20180838-01-R
Dokumenttype/Type of document Rapport / Report	Oppdragsgiver/Client Kystverket	Dato/Date 2019-01-18
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract Oppdragsgiver / Client		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date 2 / 2019-08-19
Distribusjon/Distribution FRI: Kan distribueres av Dokumentsenteret ved henvendelser / FREE: Can be distributed by the Document Centre on request		
Emneord/Keywords Sorbenter, olje, oljesøl, litteraturstudie		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country Norge	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality Oslo	Feltnavn/Field name
Sted/Location Oslo	Sted/Location
Kartblad/Map	Felt, blokknr./Field, Block No.
UTM-koordinater/UTM-coordinates Sone: Øst: Nord:	Koordinater/Coordinates Projeksjon, datum: Øst: Nord:

Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns-kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter-disciplinary review by:
0	Originaldokument	2019-01-18 Christian Totland	2019-01-18 Paul Cappelen		
1	Sammendrag på norsk / ny tittel / mindre korrigeringer	2019-04-29 Christian Totland	2019-01-18 Paul Cappelen		
2	Korrigering angående lense fra All Maritim	2019-08-19 Christian Totland	2019-08-19 Ingvild F. Størdal		

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date 19. august 2019	Prosjektleder/Project Manager Christian Totland
--	-------------------------------------	---

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

