



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Anvendelse af membraner til sikring af indeluft

Erfaringsopsamling og 'god praksis'

N. Hoffmark, Bjarke; V. Bote, Tage; Mejer Frederiksen, Jens; Bundgaard Mortensen, Klaus ; Risom Thygesen, Kim; Rokkjær, Arne; Rasmussen, Torben Valdbjørn

Creative Commons License
Andet

Publication date:
2020

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

N. Hoffmark, B., V. Bote, T., Mejer Frederiksen, J., Bundgaard Mortensen, K., Risom Thygesen, K., Rokkjær, A., & Rasmussen, T. V. (2020). *Anvendelse af membraner til sikring af indeluft: Erfaringsopsamling og 'god praksis'*. Miljø- og Fødevareministeriet. Miljøstyrelsen.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Anvendelse af membraner til sikring af indeluft

Erfaringsopsamling og 'god praksis'

Miljøprojekt nr. 2144

Juni 2020

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Bjarke N. Hoffmark, COWI A/S

Tage V. Bote, COWI A/S

Jens Mejer Frederiksen, COWI A/S

Klaus Bundgaard Mortensen, Region Syddanmark

Kim Risom Thygesen, Region Syddanmark

Arne Rokkjær, Region Hovedstaden / Lyngby Taa-
bæk Forsyning pr. 1/5 2019

Torben Valdbjørn Rasmusen, SBI, AAU

ISBN: 978-87-7038-206-9

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Ordliste, definitioner og akronymer	4
Forord	6
Sammenfatning	7
Summary	8
1. Indledning	9
1.1 Baggrund	9
1.2 Formål	9
2. Afgrænsning og strategi for projektets gennemførelse	11
2.1 Afgrænsning	11
2.2 Strategi	11
3. Erfaringsopsamling	13
3.1 Strategien for anvendelsen af membraner	13
3.2 Hvilke membrantyper har været anvendt i afværge sammenhæng	16
3.3 Gennemføring i vægkonstruktioner – ydervægge	17
3.4 Hel- eller delvist dækkende membran?	20
3.5 Levetid	21
3.6 Tætning under vandspejl	24
3.7 Udenlandske erfaringer	25
4. Membraner og diffusion	27
4.1 Tæthed og transport af forureningskomponenter over membranen	27
4.2 Beregning af diffusion gennem membraner	28
4.3 Hvornår udgør membranen en forskel i diffusionssammenhæng?	33
4.4 Overordnet forslag til diffusionstest	34
5. God praksis	35
5.1 Membran funktion	35
5.2 Placering af membran – horisontalt tæthedsplan	35
5.3 Udlægning af foliemembraner	36
5.3.1 Svejsning	36
5.3.2 Fastgørelse	38
5.3.2.1 Fugemasse	40
5.3.3 Rørgennemføringer	41
5.4 Udlægning af smørbare membraner og sprøjtemembraner	44
5.5 Den gode og den dårlige membranløsning	45
5.6 Kontrol af tæthed i felten	47
6. Referencer	50
Bilag 1. Diffusions-koefficienter for beton og geotekstil	52

Ordliste, definitioner og akronymer

Definitioner	Forklaring
Banevarer	Plastfolier/membraner der leveres i oprullet tilstand.
Diffusionstæt	Diffusionstæt betyder, at materialet (membranen) hindrer at der kan foregå diffusion gennem materialet. Se kapitel 4.1 for beskrivelse af diffusion som transportmekanisme. At et materiale er diffusions-tæt, betyder tilsvarende at materialet er lufttæt og vandtæt.
EVHO	En copolymer af ethylen og vinylalkohol. Plastik resinen anvendes bl.a. i madfolier som oxygenbarriere.
Gastæt	Se lufttæt.
HDPE	Høj Densitetspolyethylen er en meget formstabil og modstandsdygtig plasttype. Bliver bl.a. brugt til at fremstille dunke, benzintanke og affaldsspande.
Indeklima	Indeklima er en term der involverer det af mennesker oplevede (varme, fugt, lyd, lys, tryk) ved ophold i et rum. I sager om jord- og grundvandsforurening, refereres der til luftens forureningsgrad indendørs i bygninger. Derfor benyttes i stedet termen indeluft – se denne.
Indeluft	Benyttes i nærværende rapport som udtryk for den almindeligt forekommende luftkvalitet indendørs i bygninger.
LDPE	Lav Densitetspolyethylen, er en sej og fleksibel plasttype i forhold til andre polyethylener. Bliver bl.a. brugt til at fremstille bæreposer og emballage til six-packs.
Liquid Boot	Vandbaseret 2-komponent membran som etableres ved påsprøjtning.
Lufttæt	Et lufttæt materiale hindrer, at der kan ske luftgennemstrømning igennem materialet (i jord- og grundvandssammenhæng benyttes ofte termerne advektion eller konvektion for denne transportmekanisme). Lufttæt betyder dog ikke at materialet er diffusionstæt.
PE	Polyethylen er den mest almindelige plasttype. Polyethylen kommer i forskellige varianter med meget forskellige anvendelser.
PVC	Polyvinylchlorid, er den tredje mest anvendte plasttype, der kan bruges i alt fra tagrender til medicinsk udstyr. PVC er i ren form en hård plasttype, men kan blødgøres med f.eks. phthalater. På grund af indholdet af klor er platen sværere at genanvende, ligesom den er problematisk at afbrænde.
RAC-membran	Flerlags plastmembran hvor metalfolie er indbygget mellem øvrige beskyttende lag.

Tæthed	<p>Et stofs/materials tæthed defineres i forhold til et medie. En membran kan f.eks. være vandtæt, lufttæt/lufttæt eller diffusionstæt.</p> <p>Tæt betyder i denne sammenhæng, at materialet hindrer mediet i at bevæge sig gennem materialet.</p> <p>Når der i denne rapport anvendes begrebet tæt eller tæthed, menes tæt i forhold til luft/gasser. Ved tæthed i forhold til andre medier, nævnes disse specifikt, f.eks. vandtæt eller diffusionstæt. For transportmekanismer gennem en membran, se kapitel 4.1</p>
Utætheder	Huller, sprækker, revner mv., der bevirker, at materialet ikke er lufttæt.
VLDPE	Meget Lav Densitetspolyethylen er en plasttype som LDPE med tilsvarende egenskaber i forhold til VOC gennemtrængning.
VOC'er	Volatile Organic Compounds. Flygtige miljøfarlige, forurenende stoffer.

Forord

Denne projektrapport omhandler anvendelsen af membraner i forbindelse med afværgetiltag til at sikre indeluften i bygninger, der er eksponeret for flygtige miljøfarlige stoffer (VOC'er), der stammer fra poreluftindtrængning med flygtig jord- og grundvandsforurening.

Der kan drages analogier til bygningers sikring mod indtrængning af radon og vand, men foranstaltningerne, der anvendes til sikring mod radon eller vand er ikke nødvendigvis tilstrækkelige til at sikre mod indtrængning af VOC'er.

Det gennemførte arbejde tager udgangspunkt i en række indledende, afklarende undersøgelser af mulighederne for at gennemføre laboratorieprøvning til bestemmelse af diffusionskoefficienter for typisk anvendte membrantyper.

Til arbejdet har været knyttet en følge- og faggruppe til at samle input og erfaringer fra væsentlige aktører, med det formål at opnå bedre forståelse for arbejdet med etablering og efterfølgende udførelse af tæthedsprøvning af membraner anvendt i afværgerégi. Denne projektrapport er således et resultat heraf i form en erfaringsopsamling og en 'god praksis'.

Den primære målgruppe for denne rapport er rådgivere, entreprenører og medarbejdere hos regioner og kommuner, der arbejder med etablering af byggetekniske afværgeforanstaltninger på forurenede grunde.

Det skal pointeres, at det er faggruppens opfattelse, at membraner under normale omstændigheder ikke bør være den primære barriere til sikring af indeluften i bygninger, der er eksponeret for flygtig jord- og grundvandsforurening.

Membranen kan indgå som et supplement til de i øvrigt udførte foranstaltninger. Dvs. den primære barriere skal kunne stå alene og yde en tilstrækkelig sikring af indeluften i bygningen uden hjælp fra membranen. Membranen indbygges som en supplerende foranstaltning for at øge robustheden af den samlede foranstaltning, idet membranens reduktion af forureningens påvirkning kan kompensere for eventuelle svækkelser, som over tid kan opstå for den primære foranstaltning.

Projektet er gennemført af Region Syddanmark og COWI A/S med faglig sparring og input fra Region Hovedstaden, Region Sjælland, Region Midtjylland, Region Nordjylland, Teknologisk Institut, Statens Byggeforskningsinstitut, AAU og Monarflex Icopal ApS.

Projektet er udført under Miljøstyrelsens Teknologiuudviklingsprogram for jord- og grundvandsforurening i samarbejde med Region Syddanmark. Projektet er finansieret af Miljøstyrelsen.

Sammenfatning

Dette projekts formål er at få indsamlet den tilgængelige viden om anvendelse af membraner til sikring mod afdampning fra flygtig jord- og grundvandsforurening til indeluften i bygninger. Der ses både på anvendelse af membraner i forhold til eksisterende bygninger (afværge udført af regionerne, frivillige afværgetiltag ved ombygninger eller afværge i forbindelse med påbudssager) og i form af nybyggeri (§ 8 sager).

Arbejdet er gennemført dels som et litteraturstudie og dels som en erfaringsopsamling via en følge- og faggruppe. Projektet inddrager erfaringer fra sikring af bygninger mod radon samt sikring af vandtæthed af bygnings- og anlægskonstruktioner.

Anvendelsen af membraner har et omdiskuteret ry, bl.a. grundet de tidligste erfaringer hermed, hvor membranen som afværgeforanstaltning udgjorde en del af den primære foranstaltning. Membranens lufttæthed¹ indgik da i den samlede reduktion af forureningspåvirkningen af indeluften. Erfaringerne er dog, at membraner ofte ikke ydede den ønskede beskyttelse, idet det var, og fortsat er, meget vanskeligt at opnå en tilstrækkelig lufttæthed som funktion af tid og ældning af det samlede membransystem, herunder tætning af samlinger og tætning mod øvrige bygningsdele.

Projektet har til hensigt at bidrage til en bedre forståelse af formålet med anvendelsen af membraner, herunder arbejdet med og etableringen af membraner og den efterfølgende kontrol og kvalitetssikring.

For at membranen kan bidrage til en samlet mere robust afværgeforanstaltning, eller fremstå som en "ekstra barriere", kræver dette dels fokus på at få membranløsningerne til at lykkes (at det er teknisk muligt at opnå de ønskede tætheder af specielt samlinger), dels fokus på at udanne de håndværkere, der arbejder med membraner, så arbejdet bliver udført rigtigt. Samtidig er det af afgørende betydning, at der ikke senere i byggeprocessen sker beskadigelse af den monterede membran. Endelig er indførelse af forskellige kontrolmuligheder af den etablerede membrans tæthed et vigtigt element.

Rapportens afsnit om 'God praksis' skal opfattes som en let læselig tilgang til den praktiske anvendelse af membraner i afværgesammenhæng for flygtige jord- og grundvandsforureninger. I afsnittet peges på forhold, som adskiller 'den gode membranløsning' fra 'den dårlige / ubrugelige løsning'.

Da membraner oftest indbygges i selve konstruktionen, hvor de ikke umiddelbart kan udskiftes, er membranernes levetid et væsentligt parameter i vurderingen af deres egnethed. Nærværende rapport omtaler derfor vigtigheden af levetidsbetragtninger for membraner.

¹ Når der i nærværende rapport nævnes tæt, er det underforstået, at der menes gastæt/lufttæt. Såfremt der er tale om andre typer af tæthed, vil dette blive specificeret som f.eks. diffusionstæt eller vandtæt.

Summary

This project aims to collect available knowledge about the use of membranes for protecting against vapor intrusion from volatile soil and groundwater contamination to the indoor air inside buildings. The project reviews the use of membranes in existing buildings (mitigating measures carried out by the Danish regions, voluntary mitigating measures implemented during refurbishment projects, or mitigating measures implemented as a result of improvement notices) and in new buildings (so-called § 8-cases).

The work was carried out both as a literature study and as a collection of experience data via an expert monitoring group. The project draws on experience from protection of buildings against radon and water tightness of buildings and structures.

The use of membranes is a matter of controversy, among other things due to the earliest experience with membranes when membranes as a mitigating measure were part of the primary measures. Back then, the membrane air tightness² was part of the total reduction of the contamination of the indoor air. However, experience shows that the membranes often did not provide the desired protection since it was, and still is, immensely difficult to achieve sufficient air tightness as a function of time and ageing of the entire membrane system, including sealing of joints and sealing towards other building components.

The project aims to contribute to a better understanding of the purpose of using membranes, including the work with and the establishment of membranes as well as subsequent control and quality assurance.

For the membrane to contribute to an overall more robust mitigating measure, or act as an 'additional barrier', focus must be on producing successful membrane solutions (i.e. that it is technically feasible to achieve the desired tightness, in particular of joints) and on training the builders that work with membranes to ensure work is done correctly. At the same time, it is vital that, once mounted, the membrane is not damaged later on in the building process. Finally, the introduction of different possible control options of the established membrane's tightness is an important element.

The report section on 'Good practice' should be seen as an accessible approach to the practical use of membranes as a mitigating measure to prevent volatile soil and groundwater contamination. The section points to aspects that distinguish 'the good membrane solution' from 'the poor/useless solution'.

Since membranes are often integrated in the actual structure – rendering it difficult to replace them – the service life of the membranes is a key parameter in assessing their suitability. With that in mind, present report treats the importance of evaluating membrane service life.

² When present report mentions the term 'tight', it means gas tight/air tight. Any other types of tightness will be specified, e.g., diffusion tight or watertight.

1. Indledning

1.1 Baggrund

Når der etableres ventilationssystemer til passiv ventilation under gulve i forbindelse med sikring af indeluften over for VOC'er, er der i flere tilfælde etableret en supplerende barriere i form af en diffusionshæmmende membran i tilknytning til gulvkonstruktionen. Den primære barriere udgøres af den ventilerede gulvkonstruktion, mens membranen principielt indbygges som et supplerende tiltag for at opnå en samlet robust afværgeløsning.

Tankegangen går således på, at arbejde med flere barrierer i forhold til risikoens omfang og konsekvensen af en evt. skade, både i forhold til sikkerhed, sundhed og økonomiske betragtninger. Ved 'lille risiko' og 'lille mulig skade' anvendes få barrierer og ved 'stor risiko' og 'store mulige skader' anvendes flere barrierer. Membranløsninger kan ikke betragtes som en primær barriere, hvorfor denne ikke beregningsteknisk kan indgå i en risikovurdering.

Membranerne udlægges af certificerede membranfirmaer og processen med at sikre og kontrollere, at membraner er tætte i forbindelse med tilslutninger til andre bygningsdele, svejsninger og rørgennemføringer kan være en tidskrævende og udfordrende proces.

Erfaringerne viser typisk, at membranmaterialet i sig selv er lufttæt. Det er montering omkring samlinger, rørgennemføringer, svejsninger og tilslutninger til andre bygningsdele, der udgør en risiko i forhold til lufttætheden af den indbyggede løsning.

Utæthederne er ofte et resultat af fejl i montagen, f.eks. en ikke tilstrækkelig anvendelig eller klargjort bygningskonstruktion som membranen hæftes til, rørgennemføringer og pladsforhold, der komplicerer tætningsarbejdet, fejl i svejsninger og skader på membranen i forbindelse med byggeprocessen.

Erfaringer med kontrollerede forsøg udført af SBI, AAU viser, at for foliemembraner, der samles med tape, bevirker spændingsrelaksationer mellem tape og membran, at der opstår luftutætheder i samlingen. Tapede samlinger kan forbedres ved at klemme disse. Klemte samlinger med mellemlæg af tætningsmateriale har vist sig at forblive lufttætte.

Egenskaberne for gængse membrantyper er ikke belyst i særlig høj grad med hensyn til brug til den hér omhandlede type af afværgeforanstaltninger. Der foreligger således meget begrænsede data om diffusionskoefficienter for f.eks. klorerede opløsningsmidler og oliestoffer, som er de forureningsstoffer, der typisk giver anledning til problemer med indeluft i jordforureningsager.

1.2 Formål

Formålet med dette projekt er at få indsamlet den eksisterende viden om etableringen af membraner til sikring af indeluften i bygninger – dvs. nybyggeri (§ 8) såvel som eksisterende byggeri. Projektet har til hensigt at bidrage til en bedre forståelse for formålet med anvendelsen af membraner, arbejdet med og etableringen af disse, herunder udførelse af tæthedsprøvning.

Membranen har til hensigt at øge robustheden af de samlede etablerede foranstaltninger, så indtrængning af forurenede poreluft til indeluften reduceres. I projektet fokuseres hovedsageligt

på membranernes evne til at virke som en lufttæt barriere. I projektet ønskes det desuden belyst, hvilken relevans diffusion har for sikring af indeluften, når hhv. betydningen af diffusion og luftindstrømning sammenlignes.

Med andre ord, hvornår giver det i risikomæssig betragtning værdi at etablere en diffusionshæmmende membran?

Da membraner oftest indbygges i selve konstruktionen, vil det vil være meget omkostnings tungt at udskifte den, hvorfor membranens levetid er et væsentligt parameter i vurderingen af dens egnethed.

Arbejdet er gennemført dels som et litteraturstudie og dels som en erfaringsopsamling via en følge- og faggruppe.

2. Afgrænsning og strategi for projektets gennemførelse

Nærværende projekt omfatter anvendelsen af primært foliemembraner/banevarer i forbindelse med sikring af bygninger mod indsvingning af flygtige forureningskomponenter (VOC'er) fra forureninger i jord og grundvand.

2.1 Afgrænsning

Oprindeligt var det tiltænkt, at der i forbindelse med projektet skulle udføres feltforsøg i testceller med forskellige typer af fastgørelse af en membran. Men hvordan kan man teste og genskabe fejl og skader under montage af membranen og under den øvrige byggeproces? Der blev i stedet arbejdet videre med muligheden for at udføre laboratorieforsøg hos Teknologisk Institut, Center for Plastteknologi, med diffusionsforsøg i testceller med forskellige typer af plastmembraner, hvormed membrantyperne bl.a. kunne rang ordnes efter deres diffusionsmodstand/diffusionskoefficienter. Projektressourcerne tillod dog ikke muligheden for at gennemføre disse laboratorieforsøg. Projektet er desuden afgrænset til ikke at omfatte en konkret undersøgelse af membraners holdbarhed, f.eks. undersøgt ved stresstest eller langtidforsøg (år).

Det skal dog understreges, at ovenstående er væsentlige forhold der altid bør overvejes i forbindelse med anvendelse af membraner.

Med baggrund i ovenstående, omfatter nærværende projekt anvendelsen af foliemembraner/banevarer i forbindelse med sikring af bygninger mod indsvingning af flygtig jord- og grundvandsforurening (VOC'er). Projektet behandler primært anvendelsen af geomembraner af PE-typen og kompositmembraner som RAC-membranen (se ordliste). Projektet behandler desuden sprøjtemembraner som Liquid Boot (se ordliste), mens gængse membraner fra andre sammenhænge (vandtætning mm.) som f.eks. vådrumsmembraner, bitumenmembraner og kunststofmembraner (epoxy, polyurethan, akryl) ikke er omfattet af projektet.

2.2 Strategi

Arbejdet med erfaringsopsamlingen er gennemført af aktører fra hhv. de fem danske regioner, Statens Byggeforskningsinstitut, AUU, Monarflex Icopal ApS og COWI A/S.

Der er gennemført et projektforsløb med deltagelse og sparring fra en følge- og faggruppe tilknyttet projektet. Erfaringsopsamlingen er således gennemført som en række møder, med hensigt at samle input og erfaringer fra flere aktører, med det formål at opnå og bidrage til bedre forståelse omkring formålet med anvendelsen af membraner, herunder arbejdet med og etableringen af membraner og den efterfølgende udførelse af tæthedstest heraf. Yderligere er der foretaget rundspørge hos en række større rådgivere der arbejder med sikring af indeluft med henblik på kortlægning af anvendte membrantyper i Danmark.

Resultatet af arbejdet er indarbejdet i nærværende kombinerede erfaringsopsamling og 'god praksis'.

Følgegruppen omfattede:

Arne Rokkjær, Region Hovedstaden / pr. 1/5 2019 Lyngby-Taarbæk Forsyning
Martin Stærmose, Region Sjælland
Klaus Bundgaard Mortensen, Region Syddanmark
Kim Risom Thygesen, Region Syddanmark
Børge Hvidberg, Region Midtjylland
Annette Dohm, Region Nordjylland
Torben Valdbjørn Rasmussen, SBI, AAU
Kim Jensen, Icopal / Brass Monier
Jens Mejer Frederiksen, COWI
Tage V. Bote, COWI
Bjarke Hoffmark, COWI

Faggruppen omfattede:

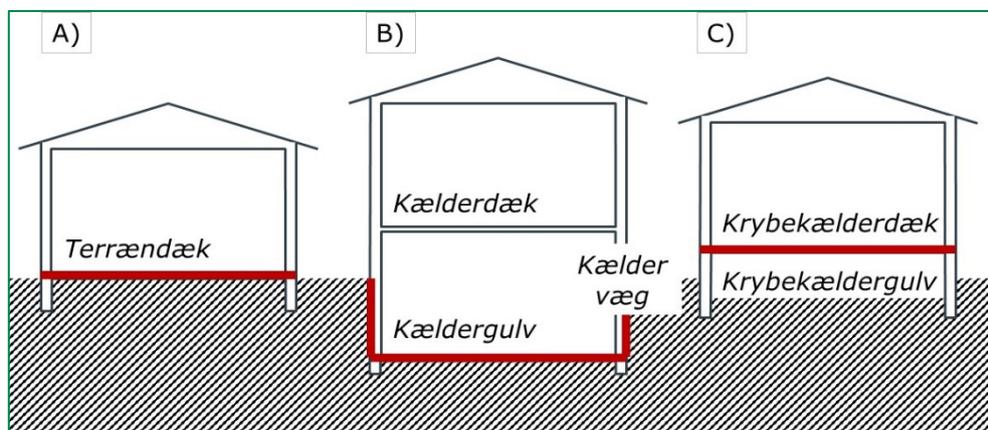
Arne Rokkjær, Region Hovedstaden / pr. 1/5 2019 Lyngby-Taarbæk Forsyning
Klaus Bundgaard Mortensen, Region Syddanmark
Kim Risom Thygesen, Region Syddanmark
Torben Valdbjørn Rasmussen, SBI, AAU
Jens Mejer Frederiksen, COWI
Tage V. Bote, COWI
Bjarke Hoffmark, COWI

3. Erfaringsopsamling

Til sikring af indeluften mod indtrængning af poreluft og afdampning fra jord og grundvandsforureninger, har der i mere end 25 år i Danmark været anvendt membraner. Membraner har tilsvarende været anvendt i almindeligt dansk byggeri i årtier og anvendes flere steder i bygninger, primært som damp- og fugtspærre samt som radonspærre. Der foreligger derfor en bred viden om anvendelsen af membraner og hvilke udfordringer det giver i byggerier. Der er i dag stor opmærksomhed om hvorledes det sikres, at man opnår den ønskede tæthed af membranerne i forhold til luft og i nogle tilfælde vand, herunder samlingerne af membranens enkelte stykker og samlingerne mellem membranen og øvrige bygningselementer.

3.1 Strategien for anvendelsen af membraner

Generelt skal bygninger sikres mod indtrængning af poreluft fra jord herunder f.eks. gassen radon. Det er derfor vigtigt at gøre sig klart, hvilke flader i bygningen, som skal udgøre den tætte barriere/tæthedsplanet. Traditionelt har vi i Danmark arbejdet med, at tæthedsplanet udgøres af konstruktioner mod jord eller krybekældergulvet som vist i Figur 3.1.



FIGUR 3.1 Placering af tæthedsplan markeret med rødt for henholdsvis A) hus med terrændæk, B) hus med kælder og C) hus med krybekælder /1/. Opbygningen af terrændæk og kældergulve har mange lighedspunkter /22/.

Der kan drages mange paralleller mellem radonsikring af bygninger og sikring mod indsvivning af VOC'er fra poreluften. Den afgørende forskel på radon og VOC'er er dog, at radon henfalder. Radon har en halveringstid på ca. 3,8 døgn, hvilket betyder, at hvis radon er 3,8 døgn om at trænge ind i bygningen, så er radonkoncentrationen i den luft, der trænger ind i bygningen, halvdelen af radonkoncentrationen i poreluften. Hvis det tager godt en uge, så er radonkoncentrationen en fjerdedel.

Henfaldet af radon betyder, at der er spredningsveje og spredningsmekanismer som f.eks. diffusion, hvor indtrængningen tager så lang tid, at det ikke har betydning for radon niveauerne i indeluften. Disse spredningsveje indgår derfor naturligt nok ikke i radonsikringen.

Da VOC'erne ikke på samme måde henfalder over tid, vil de nævnte spredningsveje kunne have betydning for indsvivningen af VOC'erne fra jord- og grundvandsforureningen. Erfaringer fra radon kan derfor ikke ukritisk overføres til vurderingen af indsvivningen af VOC'er.

For at sikre bygningen mod indsvivning af lossepladsgas og VOC'er, har anvendelsen af membraner typisk været for at sikre/øge tætheden (såvel luftindtrængning som diffusion) af tæthedetsplanet. I flere af tilfældene, har membranløsningen været kombineret med en underliggende ventileret gulvkonstruktion.

Primære, supplerende og redundante barrierer

Ved de tidligste afværgeforanstaltninger indgik membranen ofte som en del af den primære foranstaltning. Det vil sige, at membranens tæthed indgik i den samlede reduktion af forureningspåvirkningen af indeluften.

I de senere år er membraner i større og større omfang anvendt som et supplement til den egentlige afværgeforanstaltning. Ved denne tilgang indregnes membranens tæthed ikke i foranstaltningens reduktion af forureningspåvirkningen af indeluften, men membranen bidrager til at gøre foranstaltningen mere robust.

I forbindelse med f.eks. bro- og tunnel bygning ønskes ofte en større sikkerhed grundet en stor konsekvens ved svigt, hvorfor der anvendes "redundante barrierer", det vil sige to serielle løsningstiltag, der begge uafhængigt af den anden, skal kunne give den ønskede sikkerhed. Det vil sige, at hvis den ene barriere svigter, så giver den anden barriere fortsat den ønskede sikring.

Den fysiske placering af membranen

Membranerne har typisk været placeret som vist i Figur 3.2. For at reducere risikoen for skader på membranen, er denne typisk placeret under terrændækket, enten i isoleringen eller mellem isoleringen og terrændækket.

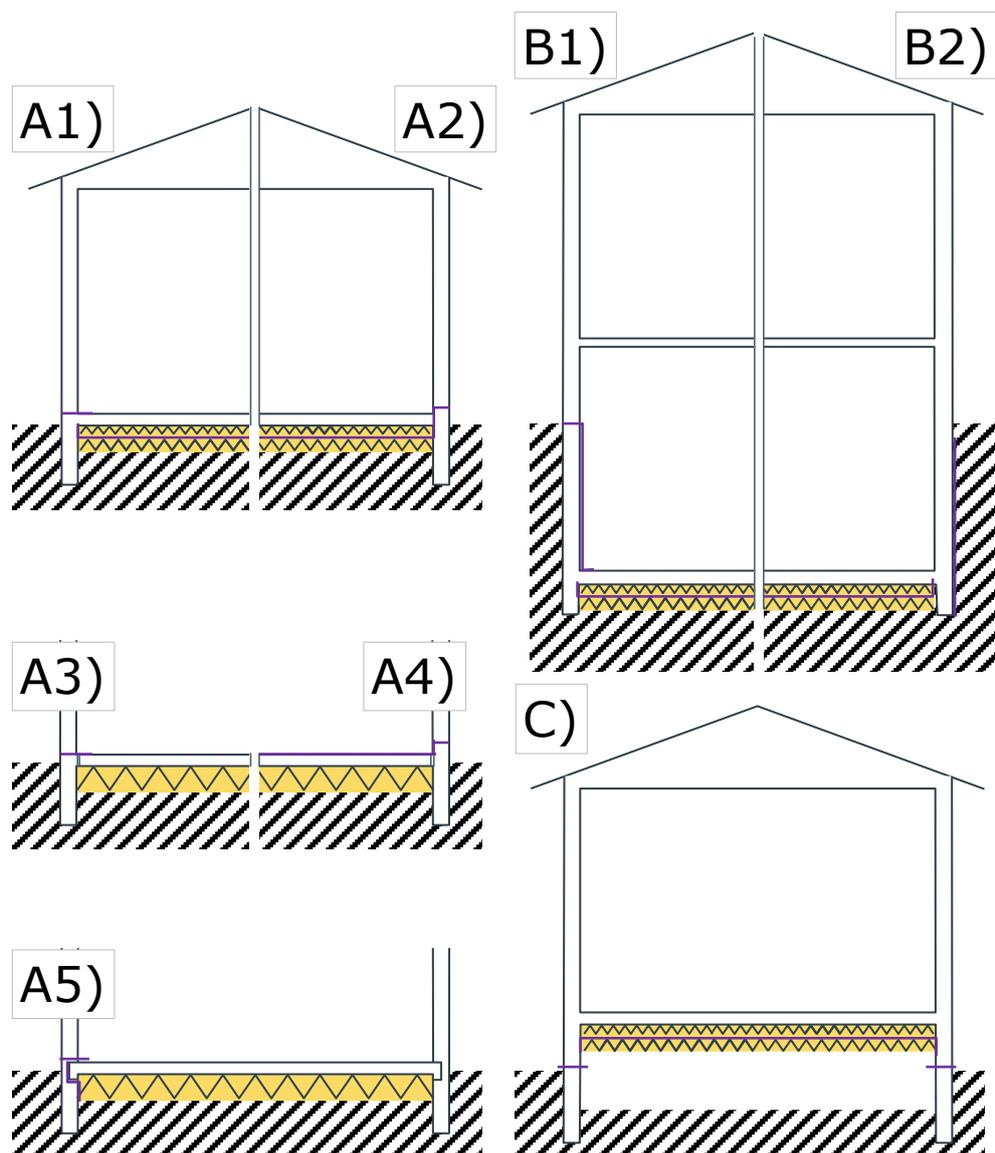
Som illustreret i tegning A1 i Figur 3.2 er membranen enten hæftet til fundamentet med en tætningssskinne, eller ført op over terrændækket og ført ud gennem ydervæggen som illustreret ved A2. Hvor membranen påsættes med tætningssskinne, udføres desuden fugt- og radonspærre illustreret i tegning A1.

I forbindelse med radontætning af bygninger er membranen typisk placeret oven på terrændækket som illustreret i tegning A3. Membranen kan enten udlægges som en kantmembran som illustreret i tegning A3 eller som en heldækkende membran illustreret i tegning A4.

”Ved anvendelsen af membraner er det vigtigt at være opmærksom på mulige fugtproblemer”.

Torben Valdbjørn Rasmussen, SBI, AAU

Fugtteknisk skal membranen placeres på den varme side af isoleringen eller svarende til optil halvt ned i terrændækkets isoleringslag. Hvis membranen placeres længere nede end dette, kan der opstå u hensigtsmæssige forhold med kondensering af luften (dugpunkt). Hvis membranen ikke er klæbet fast til underlaget, kan der ske skimmelvækst mellem membran og underlag.



FIGUR 3.2 Typisk placering af membraner (lilla streg) ved terrændæk og kældergulve som tætningsløsninger af bygninger mod poreluftforurening. I variation B1 og B2 er der skelnet mellem hhv. udvendig og indvendig placering af membranen. Der kan tilsvarende foretages tætning med placering oven på terrændækket som eksemplificeret ved variation A3 og A4. I sager hvor bygninger skal sikres mod indsvivning fra poreluftforurening, kan der f.eks. suppleres med ventilation under gulv. I variation C ses en membranløsning anvendt på en bygning opbygget med krybekælder.

I eksemplerne ovenfor i Figur 3.2, fremgår typiske placeringer af membraner som tætning af bygninger mod poreluftforurening.

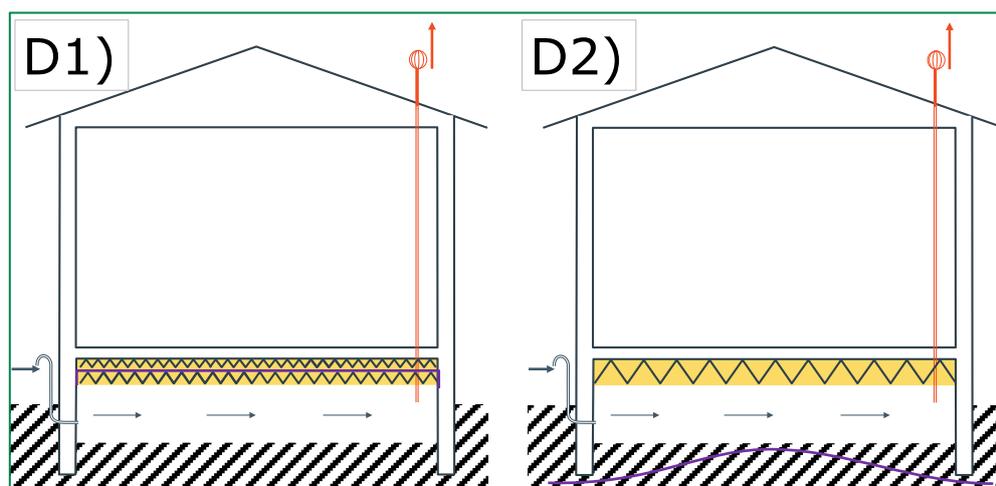
I figur 3.3 er vist to eksempler på, hvordan redundante barrierer kan etableres, hvor membranen virker som diffusionshæmmende barriere. Løsningerne er kun redundante hvis de enkelte løsninger, uafhængig af hinanden og i tilstrækkelig grad kan sikre indeluften. I eksempel D1 til venstre på figuren, er der to af hinanden uafhængige barrierer. Den første barriere består af en ventilationsløsning under betondækket, som er så effektiv, at koncentrationerne i luften i ventilationslaget overholder de samme kriterier som er opstillet for indeluften. Den anden barriere udgøres af membranen og betondækket, som tilsammen vil give en tilstrækkelig reduktion over terrændækket.

I eksempel D2, tegningen til højre i Figur 3.3, består den første barriere af en membran under bygningen. Membranen er så tæt, at der opnås en tilstrækkelig reduktion. Den anden barriere er en kombination af en reduktionsfaktor som følge af ventilationen under betondækket og en reduktion over betondækket, der tilsammen giver den tilstrækkelige reduktion.

Membranens placering mod den opvarmede del af bygningen i eksempel D1 i Figur 3.3 sikrer mod:

- at der ikke trækkes varm fugtig indeluft ned i krybekælderen
- at udveksling af luft mellem inde og krybekælderen begrænses.

I tilfældet skal der særligt rettes opmærksomhed på sommerkondens i den ventilerede zone under gulv og mulig afledning heraf.



FIGUR 3.3 Eksempel på mulige redundante løsninger i en bygning med ventileret drænlag. I eksempel D1 vil løsningen være redundant, hvis ventilationen under betondækket er tilstrækkelig til at reducere poreluftkoncentrationen til det ønskede indeluft-kriterie og hvis betondæk og membran tilsammen giver en tilstrækkelig reduktion svarende til forholdet mellem poreluften og indeluft-kriteriet. I eksempel D2 vil løsningen være redundant, hvis membranen under bygningen giver en tilstrækkelig reduktion, og hvis ventilationen under betondækket kombineret med reduktionen over betondækket giver en tilstrækkelig reduktion.

3.2 Hvilke membrantyper har været anvendt i afværgesammenhæng

I Danmark har det primært været PE-membraner, der har været anvendt i forbindelse med sikring mod afdampning til indeluften, jf. Tabel 3.1. I England har man tilsvarende erfaring med andre plasttyper som f.eks. PVC og specielt kompositmembraner (membran opbygget af to til flere lag af forskellige materialer), hvor man kombinerer forskellige plasttypers egenskaber, for at reducere gennemtrængeligheden for forskellige typer af stoffer, eller for at forbedre membranens mekaniske egenskaber. Ifølge CIRIA /5/ har man i England erfaringer med fire forskellige typer af kompositmembraner anvendt til sikring af indeluft. Membranerne er opbygget som [LDPE:EVOH:LDPE], [HDPE:EVOH:HDPE], [[HDPE:VLDPE] og [asphalt latex:HDPE] (forkortelser, se ordliste).

I juli-oktober 2015 er der foretaget rundspørge hos de danske regioner og større rådgivere med henblik på at kortlægge anvendelse af membraner i afværgeprojekter. Der er udsendt et spørgeskema pr. mail, hvori der er efterspurgt lokaliteter hvor der i afværgeregioner er anvendt membraner.

Tilbagemeldingerne fra de danske regioner og rådgivere er opsummeret i Tabel 3.1. Membranerne er samlet i grupper af anvendte membrantyper. Der er returneret i alt 53 indmeldinger med lokaliteter, som repræsenterer perioden ca. år 2000-2015, hvor forskellige former for membraner har været anvendt. Membranerne har enten været anvendt som tætningstiltag eller i kombination med anden afværgeforanstaltning (supplerende barriere), f.eks. en ventileret gulvkonstruktion.

Projekterne er alene relateret til regionernes offentlige indsats i forbindelse med sikring af indeluft, hvormed § 8-sager ikke indgår i dataindsamlingen. Antallet af de tilbagemeldte lokaliteter vurderes at udgøre et lavt svarantal ud af et samlet antal af lokaliteter på landsplan, hvorfor datagrundlaget ikke kan betragtes som repræsentativt med statistisk signifikans. Dog vurderes det, at de gængse membrantyper er repræsenteret i tilbagemeldingerne. Flere af tilbagemeldingerne var sammenfattet i omtrentlige fordelinger af sager på regionsniveau.

TABEL 3.1 Fordeling af anvendte membrantyper på lokaliteter (regionernes offentlige indsats ifm. sikring af indeluft).

Membrantype	Epoxy, smørbar	Sprøjte-membran*	PE	HDPE	RAC (flerlags plast med metalfolie indlæg)
Procentvis anvendelse	3,8 %	24,5 %	1,9 %	1,9 %	67,9 %

* *Liquid Boot, 2-komponent sprøjtemembran herunder anvendelse af traditionelle vådrumsmembraner.*

Den alt overvejende anvendte membran er af RAC-typen (flerlags plastmembran med ilagt metalfolie) og udgør ca. 68 % af lokaliteterne. Anvendelsen af sprøjtemembran (primært Liquid Boot) udgør ca. 24 % af lokaliteterne. Herudover er der gjort få forsøg med epoxy-membraner og forskellige versioner af plastmembraner (PE og HDPE). Denne restgruppe udgør ca. 8 % af lokaliteterne. Fordelingen af de anvendte membraner i miljøprojekter giver ikke anledning til at kunne konkludere på de forskellige membraners effektivitet.

Der findes ikke opgørelser over anvendelsen af membraner i forbindelse med nybyggeri (§ 8-sager). Det er COWIs erfaring, at der ved nybyggeri skelnes mellem ejendomme med moderat og kraftig forurening og ejendomme med lettere forurening.

For ejendomme med moderate eller kraftige forureninger installeres ofte en "miljømembran" som et led i sikringen af indtrængning af VOC'er. Som miljømembran anvendes oftest RAC-membranen. På ejendomme med lettere forureninger, anvendes typisk de membraner som standardmæssigt anvendes til tætning af bygningen mod radon og fugt, f.eks. smørbare membraner, plastfolier, tagpap og fugebånd.

3.3 Gennemføring i vægkonstruktioner – ydervægge

Ved offentlige indsatser rettet mod at sikre indeluften i eksisterende bygninger mod flygtig jord- og grundvandsforurening, har det i en række tilfælde vist sig, at hulmure optræder som spredningsvej. For at minimere spredningen, har det været etableret en foliemembran som afskæring mellem fundament og hulmur.

I praksis er det en møjsommelig og tidskrævende indsats, hvor vægkonstruktionen nedtages sektionvist i ca. 1 meter bredde sektioner i niveauet for overkant af fundamentet. Herefter indlægges en oprullet membranstrimmel, hvorpå vægkonstruktionen genopbygges/opmures.

Efterfølgende fortsættes til næste sektion, hvor fremgangsmåden gentages. Overlappene mellem de respektive membranstrimler i hulmuren sammensvejses. I tilfældet hvor der tilsvarende er udlagt en membran i gulvkonstruktionen, kan denne og membranstrimlen i hulmuren svejses sammen, hvorved den samlede bygningskonstruktion derved er gennembrudt af membranen.

Etableringen kan tilsvarende etableres sektionvist nedefra, f.eks. i forbindelse med understøbning af fundament. Af Figur 3.4 og Figur 3.5 fremgår en konkret situation hvor metoden er anvendt ved en opmuret inder- og ydervæg.



FIGUR 3.4 Gennemføring af membran i hulmur. Udvendigt er gennemføringen afsluttet med en drypkant.
Foto: COWI



FIGUR 3.5 Indvendig side. Membranstrimmel er klargjort til sammensvejsning. Ventilert drænsystem er under opbygning.
Foto: COWI

Løsningen kan være problematisk for bygningens stabilitetsforhold, da det forenklet beskrevet fortsat skal sikres, at gulv og væg/tagkonstruktionen hænger sammen og kan modstå horisontale kraftpåvirkninger – f.eks. vindtryk ved kraftigt blæsevejr.

Ved opmurede vægge i f.eks. teglsten/mursten, er der opnået gode erfaringer med overgange mellem mursten og membran ved en lim-pap-lim-løsning, hvor der opnås en øget friktion mellem opmuringen og den "glatte" folie-membran.

Princippet herfor er skitseret i Figur 3.7. Det skal understreges at de statiske forudsætninger i det konkrete tilfælde skal være belyst og tilstrækkeligt acceptable førend løsningen tages i anvendelse. De statiske forhold behandles ikke i nærværende rapport. Et alternativ til at føre en "glat" folie-membran i samme plan er, at gennemføringen foretages "fortandet", se illustrationen i Figur 3.6.

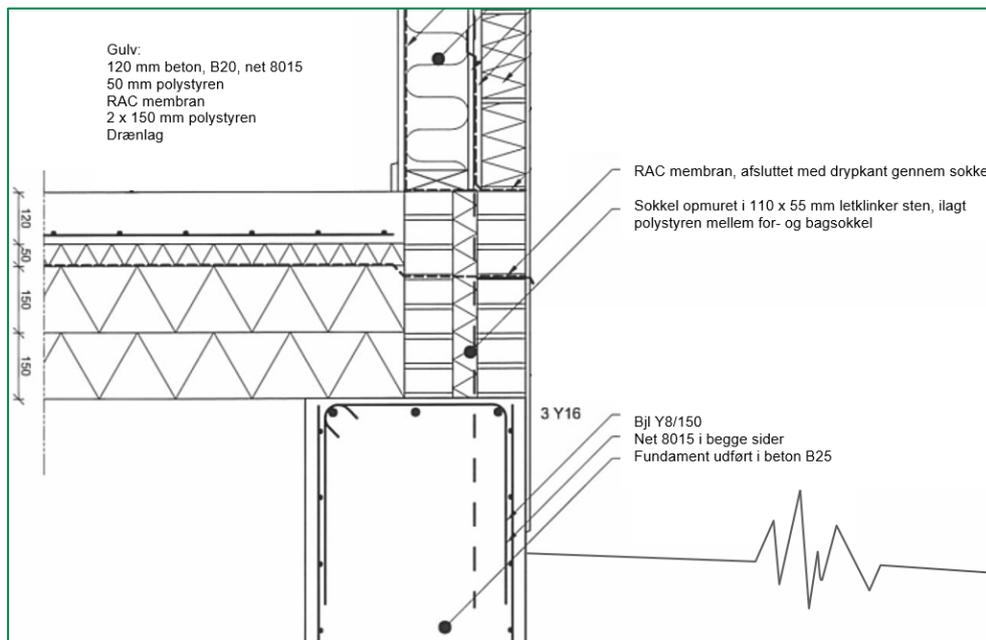


FIGUR 3.6 Horisontal membran gennemføring til venstre og tandet gennemføring skitseret til højre.

Ved niveauspring i fundamentet, kan membranen tilsvarende indbygges ved op- eller nedtrapping. Udfordringen kan da blive, at membranen skal "foldes" i tre retninger. Dette forhold bør

løses ved brugen af "passtykker" (særskilte membranstykker, der er passet til f.eks. en overgang i et indvendigt hjørne eller anden form og som derpå kan hæftes sammen med tilstødende membranmateriale, se ligeledes kapitel 5.5), hvilket kræver omhu at udføre i praksis.

Ved gennemføring af membraner i vægkonstruktioner, med efterfølgende risiko for at konstruktionen "sætter sig" i forbindelse med udstøbning af et betondæk, er det anbefalelsesværdigt at etablere membranen med en "fold" af overskydende membran, evt. indlæg med membrankiler, som giver mulighed for, at membranen kan bevæge sig uden, at den sprækkes eller rives itu. Anvendelse af membrankiler er særligt anvendelige ved indvendige hjørnesamlinger.

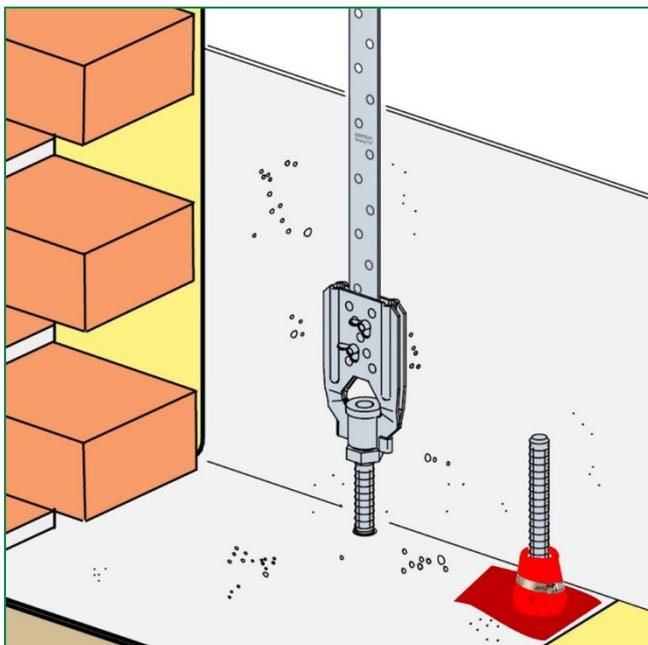


FIGUR 3.7 Gennemføring af membran i vægkonstruktion for ydervæg. Udvendigt er gennemføringen afsluttet med en drypkant. På begge sider af membranen, er der mod tilstødende letklinker udlagt murpap.

En anden metode til at afskære spredning via vægkonstruktioner kunne være at anvende en fugtspærreplade. Det skal overvejes om pladen skal være udført i metal/jern i stedet for plast, for at sikre mod evt. diffusion gennem pladen. Løsningen anvendes f.eks. ved betonkonstruktioner, hvor en plade indbygges horisontalt gennem konstruktionen.

Af hensyn til bygningskader på eksisterende byggeri, kan det ikke anbefales at pladen etableres ved bankning. Som alternativ hertil kan der foretages sektionvis gennemskæring af vægkonstruktionen. Overlap mellem pladerne bør tætnes ved f.eks. svejsning eller flash-band-løsning (se kapitel 5.3.2), eller ved anvendelse af korrugerede plader med overlap. Det skal særligt bemærkes, at der i jordforureningsregi ikke er fundet forhold og erfaringer vedr. tæring og korrosion over tid ved anvendelse af plader udført i metal/jern.

Ved gennemføring af vindtrækbånd fra tagkonstruktion og fastgørelse med f.eks. gevindstænger ned i fundamenter, er det en udfordring at få etableret en tæt gennemføring i membranen ved gennemføringen af gevindstangen. Gennemføringen bør etableres med et tilpasningsstykke/gennemføringshætte, hvorpå gennemføringshætten fæstnes til den øvrige membran. Løsningen er skitseret i Figur 3.8. I praksis er der set løsningsmodeller, hvor gennemføringshætten yderligere fæstnes til gevindstangen via klemning fra et spændbånd.



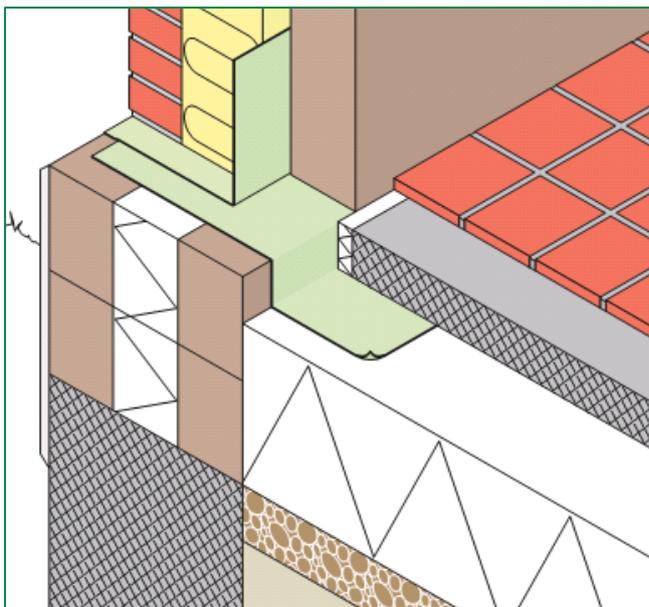
FIGUR 3.8 Fastgørelse af vindtrækbånd i fundament via gevindstang. Tætning omkring gevindstang, som illustreret ved den højre gennemføring, foretages med tilpasningsstykke/gennemføringshætte omkring gevindstangen, som der på fæstnes til den øvrige membran, her illustreret med lys grå.
Figur kilde: Simpson Strong-Tie.

3.4 Hel- eller delvist dækkende membran?

Det har i følgegruppen være diskuteret brugen af hel- eller delvist dækkende membraner, hvor der særligt ved radonløsninger anvendes flere løsningsmodeller med delvist dækkende membraner, f.eks. som illustreret i Figur 3.9.

Den delvist dækkende membran har i det illustrerede tilfælde til formål at hindre indtrængning/spredningsvej ved "svage" overgange som f.eks. ved isoleringen i fundamentsblokken og kantisoleringen op mod betondækket. Hvorvidt løsningen med en delvist dækkende membran er tilstrækkelig, skal vurderes i forhold til kravet til lufttæthed.

Følgegruppen har ikke erfaringer med anvendelsen af delvist dækkende membraner i jord- og grundvandsforureningsager. Effekten af en delvist dækkende membran, uanset dens diffusivsegenskaber, vil således blive neutraliseret ved at forureningen spredes uden om membranen, f.eks. via øvrige bygningskonstruktioner. Det vurderes på denne baggrund, at dette er årsagen til, at der ikke er et erfaringsgrundlag for anvendelsen af delvist dækkende membraner ved flygtige jord- og grundvandsforureninger.



FIGUR 3.9 Tætning med membran ført under betonpladen. Membranen føres hen over og klæbes evt. til fundamentets overside. Betonen udstøbes mod membranen. Figuren er fra SBI-anvisning 233 og er gengivet med tilladelse fra SBI.

3.5 Levetid

Når der tales om levetid af membraner, så bør det afklares under hvilke præmisser membranen evalueres. Hvis der alene sammenlignes med f.eks. Bygningsreglementet, hvor kravet er "hele bygningens levetid" (80-100 år), så vil membraner som udgangspunkt ikke kunne tages i anvendelse.

Når der tales om levetid for bygningsdele, opdeles disse ofte i:

Teknisk levetid

Bygningsdele udskiftes, fordi modstandsevnen overfor aktuelle påvirkninger ikke længere er tilstrækkelig til at opfylde den oprindelige funktion.

Funktionel levetid

Bygningsdele udskiftes, fordi funktionen ikke længere er tidssvarende.

Økonomisk levetid

Bygningsdele udskiftes, fordi vedligehold eller reparation bliver for dyrt.

Æstetisk levetid

Bygningsdele udskiftes på grund af forhold vedrørende mode og livsstil.

I det følgende ses udelukkende på den tekniske levetid. De levetider, der kan findes i litteraturen, er typisk erfaringsbaseret, hvilket i sagens natur fokuserer på de involverede personers eller organisationers erfaringer fra skadessager, renovering, pludselige hændelser etc. Man vil være mest opmærksom på situationer, hvor levetiden bringes til ophør, og i mindre grad være opmærksom på de mange tilsvarende bygningsdele, som i al ubemærkethed fortsat fungerer tilfredsstillende.

Erfaring med bygningsdeles levetid vil være konservative og i den lave ende /12/, /13/. Litteraturen estimerer membraners levetid som et spænd mellem 35 og 120 år. Membranernes levetid afhænger dels af det materiale membranerne er udført i og dels af det miljø membranerne anvendes i.

Membraner estimeres at holde mellem 35 og 120 år. Deres levetid er betinget af

Ælde afledt af:

Oxidering, biologisk nedbrydning, kemisk påvirkning, UV-lys, temperatur og fugt/udtørring

Fysisk påvirkning:

Mekanisk stress, bygningsbevægelser, gennembrydning

For en monomer baseret membran /16/ er den forventede levetid ifølge BBA (British Board of Agreement) over 35 år. Til sammenligning angives levetiden for en type asfaltpapmembran at have en forventet levetid på 40-50 år, hvor ældning giver anledning til, at pappen bliver sprød. Dette er problematisk ved bygningsbevægelser, hvor membranen ødelægges pga. manglende fleksibilitet /17/.

For membraner af PE (HDPE og LDPE) vurderer engelsk litteratur, at levetiden er mere end 60 år /5/ (de 60 år fastsat med udgangspunkt i, at den typiske levetid for enfamiliehuse i den pågældende publikation /5/ vurderes at være 60 år).

Studier af PE-materialet (membraner og rør) viser, at temperaturudsving og trækkræfter, der virker på membranen også har betydning for membranens levetid. Jo større temperaturudsving og jo større trækkræfter der virker på membranen, jo kortere levetid /15/.

Forsøg fra Teknologisk Institut viser, at PE-membraner har en levetid, der er længere end 120 år, hvor temperaturen er lavere end 40 °C og membranen ikke er udsat for trækkræfter /14/. Tilsvarende kan de kemiske forhold have betydning for membranens levetid, hvis membranerne er i kontakt med meget kraftig forurening. F.eks. vil fri fase forurening kunne reducere både membranens levetid og membranens tæthed.

Plast membraner kan svulle op og dermed ændre egenskaber når de er i kontakt med høje koncentrationer af olieprodukter og opløsningsmidler. Solens UV-stråling har ligeledes stor betydning for nedbrydningen af membranen og dermed dens levetid. Membraner der anvendes i f.eks. tagkonstruktioner, hvor de kan blive udsat for sollys har derfor en væsentlig kortere levetid end membraner som placeres under eller i bygningens konstruktion beskyttet imod sollys. I etableringsfasen kan membranen dog være udsat for sollys. Flere producenter angiver i deres produktblade, at membranerne ikke bør være eksponeret over for sollys i mere end 2 uger, førend at der bør foretages permanent eller midlertidig afdækning heraf.

Når membranen anvendes i afværgereggi, er denne oftest svært tilgængelig, da den er indbygget i de øvrige bygningskonstruktioner, sædvanligvis gulv- eller vægkonstruktioner. Dette betyder, at der er behov for at differentiere formålet med at anvende membranen, da denne i "bygningens levetid", vil være vanskelig at vedligeholde og kontrollere standen af. Anvendelsen af membranen bør derfor bygges på, hvilke forudsætninger der kan accepteres:

- Skal membranen kunne repareres og dokumenteres i "hele bygningens levetid"?
- Skal membranen medvirke til at nedbringe påvirkningen fra en poreluftforurening (f.eks. i svært tryk/flow-påvirkelige konstruktioner som hulmur)?
- Skal membranen fungere som en supplerende barriere?
- Skal membranen fungere som en redundant løsning (se kapitel 5.1)?

Når den tekniske levetid omtales for en membran, så vil der være to overordnede forhold som levetiden afhænger af. Det er 'ældning' og 'fysisk påvirkning' /5/:

Ved anvendelse af foliemembraner i tykkere kvalitet (>1 mm /5/) og med indlagt armerings-trådnæt, kan der opnås større robusthed over for slag-, overrivning og gennemhulning. Dog vil ældningsprocessen fortsat være relevant.

Samtidig kan membranen i indbygnings- og brugsfasen beskyttes i mere eller mindre grad. F.eks. kan der gøres brug af indstøbning i et renselag i beton, eller som mange gange anvendt afværgesammenhæng, ved indbygning i den øverste del af isoleringslaget.

Dette betyder i praksis, at membranen oftest til en vis grad er "beskyttet" pga. indbygningen i konstruktionen, hvormed det hovedsageligt vil være de fysiske påvirkninger af membranen, der vil være styrende for levetiden af membranen. I litteraturen /5/ er der bl.a. givet erfaringer med inspektioner af 15-20 år gamle HDPE membraner, der er blevet blotlagt i forbindelse med om- og udbygninger af en række erhvervsbygninger anvendt til supermarkeder. Her blev der ikke konstateret betydende ældning fra UV-lys, oxidering eller andre forhold, der kunne have påvirket barrierens egenskaber til at sikre mod lossepladsgas eller anden afdampning.

Som det fremgår af ovenstående, er der en række membrantyper herunder asfaltpapmembraner, som vurderes at have en levetid svarende til mellem halvdelen og en tredjedel af en bygningens forventede levetid.

PE-membraner af tykkere kvalitet der indbygges under betondækket (terrændæk eller kælder-gulv) og som derfor ikke udsættes for UV-lys, og kun beskedne temperatur- og fugtpåvirkninger, vurderes at have en levetid svarende til bygningens forventede levetid, såfremt membranen ikke udsættes for direkte kontakt med kraftig forurening f.eks. fri fase og ikke udsættes for skader som følge af fysiske påvirkninger. Vurderingen gælder både for foliemembraner og for sprøjtemembraner.

En væsentlig årsag til lufttæthed i membranen, og dermed en forkortelse af membranens levetid, skyldes skader, som sker i forbindelse med fysisk påvirkning af membranen. De fysiske påvirkninger kan opstå allerede i forbindelse med opførelsen af bygningen, f.eks. ved skarpe genstande der kommer i kontakt med membranen eller ting som tabes på membranen, hvorefter en ofte dyr reparation er påkrævet.

Det er derfor vigtigt at beskytte membranen, når denne er udlagt. Membranen er specielt sårbar på steder, hvor den f.eks. foldes omkring skarpe kanter som f.eks. fundamenter /4/. Her kan membranen med fordel beskyttes ved at udlægge/påklæbe f.eks. asfaltpapmembran såvel over som under membranen. Huller i membranen der opstår grundet skarpe kanter er ofte vanskelige at udbedre.

Skader kan også ske som trækskader, når terrændækket udstøbes, vindpåvirkning af membranen eller sammentrækninger som følge af temperaturændringer, specielt hvis membranen etableres på en varm sommerdag. Skader kan også forekomme senere i forbindelse med bygnings opgradering, hvor der ikke tages særlige hensyn til membranens placering. Dette kunne være ved omlægning af afløbssystem og rørgennemføringer eller ved anden gennem-brydning af dækkonstruktionen og membranen.

3.6 Tætning under vandspejl

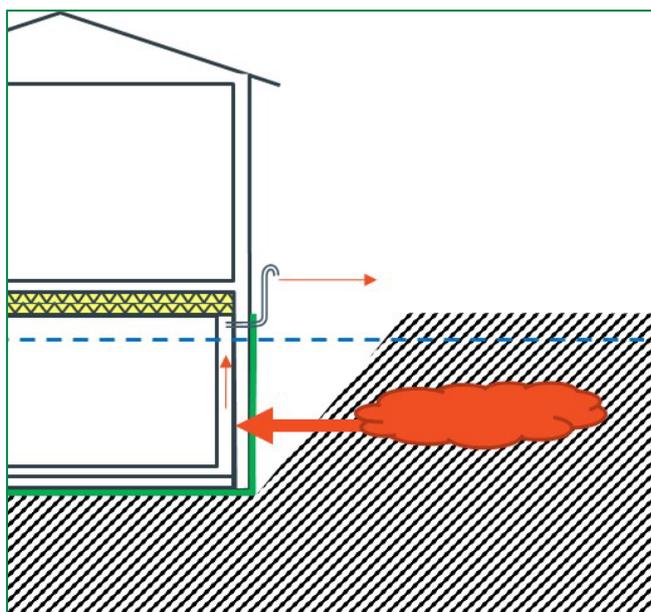
Ved bygningskonstruktioner under vand og med grundvandsbåren flygtig forurening, kan det være svært at etablere en tilstrækkelig tæt diffusionsløsning. I konstruktionsregi gøres der brug af flere metoder til tætning i forhold til vand. Ved etablering af vægkonstruktion ved f.eks. borede pæle (sekant pæle) eller egentlige støbte betonkonstruktioner, kan der foretages tæt-tende tiltag efter "tanking"-princippet eller ved "gardin-injektion".

Tanking betyder, at der etableres en vandtæt barriere, oftest på ydersiden af konstruktionen, f.eks. ved en smørbar-membran eller en foliemembran, hvorved der etableres en "tæt tank". Dette betyder, at ydersiden af konstruktionen skal fritlægges og at grundvandsspejlet skal sænkes. Et alternativ til fritlægningen er at foretage "gardin-injektion" med produkter som akrylharpiks eller bentonit, hvorved der etableres en "tæt" zone op mod konstruktionen.

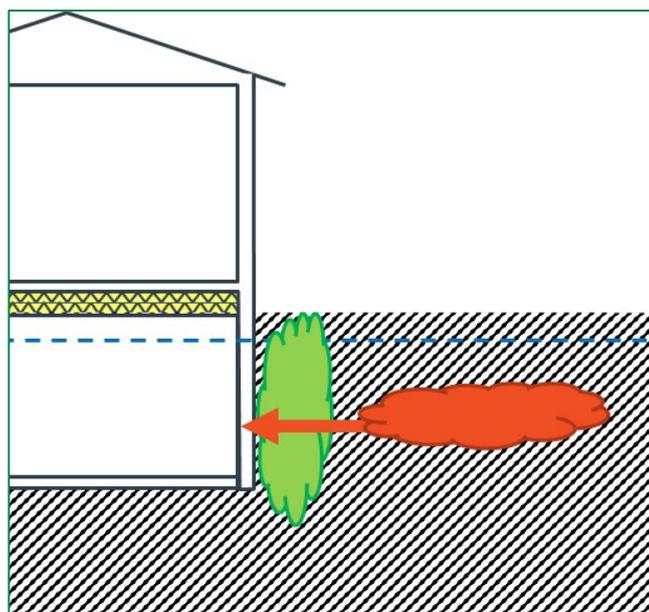
Ud over vægkonstruktioner, kan tætning under vandspejl tilsvarende være relevant for f.eks. elevatorskakte eller ved etablering af jordankre. Udfordringen ved disse løsningstilgange er, at særligt flygtige forureningsforbindelser som klorerede opløsningsmidler, oftest vil kunne spredes gennem konstruktionen, til trods for, at den er vandtæt.

For at løse et evt. spredningsbidrag af forurening til indeluften, kan der suppleres med ventilerende tiltag på indersiden af en løsning med en indvendig "forsatsvæg", hvor der ventileres i hulrummet mellem de to vægge.

Princippet for hhv. "tanking" og "gardin-injektion" er skitseret i Figur 3.10 og Figur 3.11.



FIGUR 3.10 Princip for tætning efter "tanking"-metoden af kældervæg i kombination med ventilationsløsning af indvendig forsatsvæg og/eller sandwich-kældergulv.



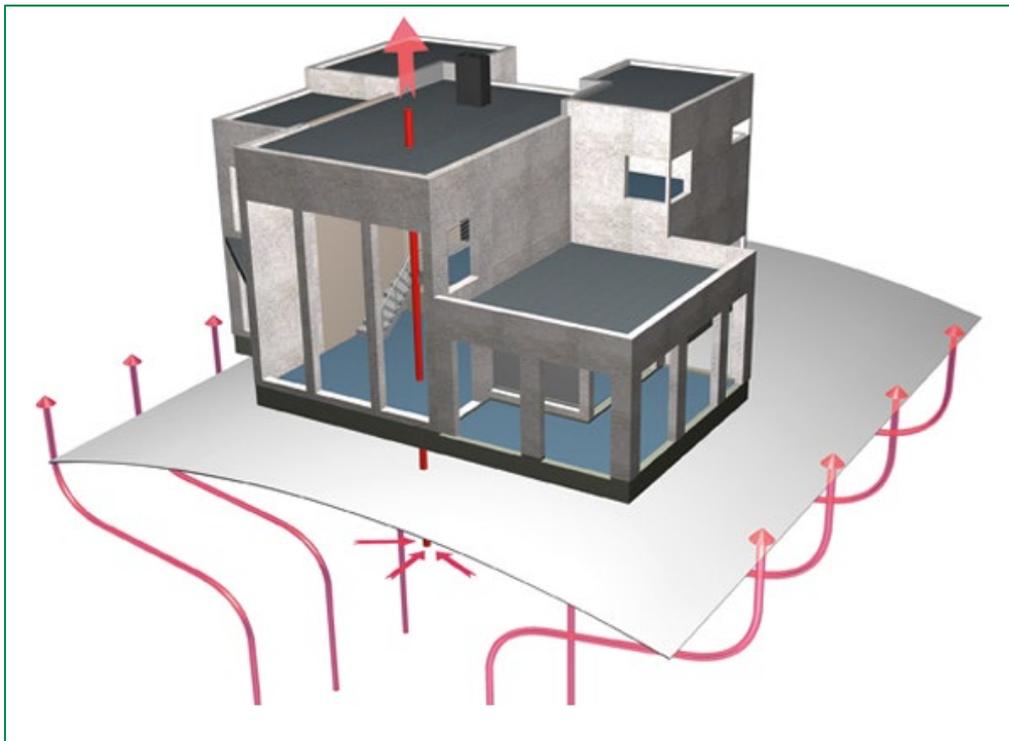
FIGUR 3.11 Princip for tætning af kældervæg ved "gardin-injektion".

3.7 Udenlandske erfaringer

I radonregi er der ved nybyggeri, bl.a. i Sverige, tradition for at udlægge radonmembraner i forbindelse med etablering af et byggefelt til bygningens fodaftryk. Princippet går på, at der udlægges en, som oftest, foliemembran som en "paddehat" under byggefeltet. Membranen etableres med et 2-sidet fald, hvorved overfladevand i de helt terrænnære jordlag fortsat kan afledes. I forbindelse med membranen etableres et centralt placeret radonsug, som derpå føres tæt gennem membranen og op igennem den overliggende bygning.

Princippet er illustreret i Figur 3.12. I figuren er der angivet en placering af radonsuget under membranen. Det anbefales, at suget placeres på oversiden af membranen, for derved at lede mindst muligt radon/forurening gennem bygningen samtidig med, at sugeløsningen tilsvarende vil skulle håndtere mindre radon/forurenings-koncentrationer end ved en placering under membranen. Der er ikke fundet erfaringer med anvendelse af princippet i jord- og grundvands-regi med flygtige forureningsforbindelser.

I Tabel 4.2 i kapitel 4.2 er foretaget en teoretisk beregning ved hjælp af JAGG for forskellige placeringer af forureningen og membranen. Beregningerne er udført for henholdsvis en membran placeret under bygningen og en membran etableret under tæthedsplanet. Det fremgår af Tabel 4.2, at en membran placeret under bygningen beregningsmæssigt er en god løsning som ofte vil være bedre end en løsning, hvor membranen placeres umiddelbart under terrændækket.



FIGUR 3.12 Etablering af radon-membran og tilhørende radon-sug under byggefelt til nybyggeri. I stedet for som illustreret, anbefales det at placere suget over membranen.
Figur kilde: www.protan.dk

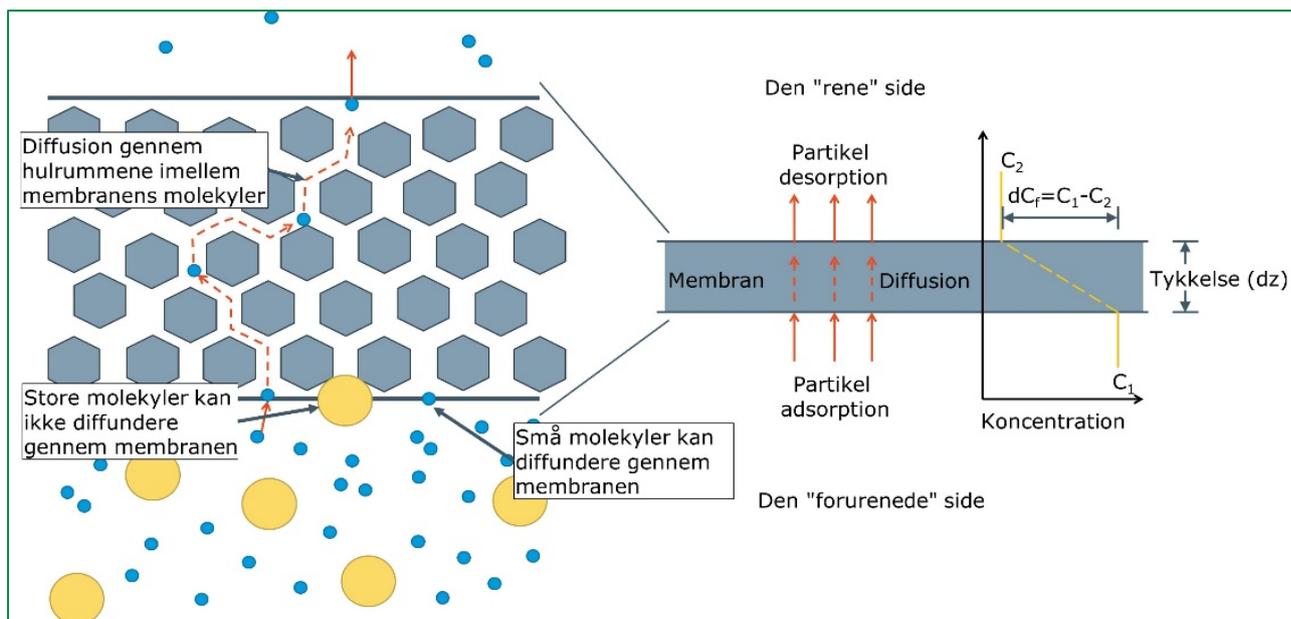
Den engelske pendant til SBI, CIRIA, har udgivet en række udredningsprojekter om anvendelse af membraner i forbindelse med nybyggeri med fokus på gasmigration og en række flygtige forureningskomponenter. Overordnet vurderes anvendelsesprincipper og tilgang at være meget lig med danske erfaringer, både med hensyn til membranernes indpasning i bygningerne og kombinationen med ventilations- og undertrykkløsninger. I modsætning til i Danmark, hvor vi hovedsageligt anvender RAC-membranen, så har man i England erfaring med en række forskellige membrantyper, herunder kompositmembraner /5/ (se også kapitel 3.2).

4. Membraner og diffusion

4.1 Tæthed og transport af forureningskomponenter over membranen

Når der tales om tæthed af en membran, så er der flere forskellige typer af tæthed, f.eks. lufttæt, vandtæt og diffusionstæt. Begreberne for tæthed knytter sig til de to forskellige typer af transportmekanismer for stoftransport gennem en membran; advektion og diffusion. Når der i nærværende rapport nævnes tæt, er det underforstået, at der menes gastæt/lufttæt. Såfremt der er tale om andre typer af tæthed, vil dette blive specificeret som f.eks. diffusionstæt eller vandtæt.

- Advektiv stoftransport er en transport hvor VOC'erne transporteres med en strøm af f.eks. luft eller vand, hvor luft- eller vandmolekylerne transporteres som følge af temperatur eller trykforskelle. Som udgangspunkt er de membraner der anvendes til tætning af gulvkonstruktioner og kældervægge tætte i forhold til advektiv transport. Hvis membranen ikke er monteret korrekt eller hvis der er et hul i membranen, så er membranen ikke lufttæt. Luftstrømningen vil foregå gennem defekter (huller eller utætheder i membranen og/eller hvor membranen er fæstnet til andre bygningsselementer). Ved luftstrømning og små trykforskelle kan der transporteres store mængder luft, selv gennem små defekter.
- Diffusion, hvor stoffet passerer igennem membranen pga. koncentrationsforskelle, idet stoffet transporteres i membranmaterialet. Molekylær diffusion drives af koncentrationsforskellene over membranen – fra højere koncentrationer mod lavere koncentrationer. Hastigheden hvormed dette sker afhænger af følgende: Koncentrationsgradienten, membranmaterialets tæthed (materialets bindemiddelttype), tykkelsen af membranen, opløseligheden af stoffet i polymeren/membranen, membranens og stofets molekylestruktur og polaritet samt stoffets molekyleform (størrelse og om det er afgrenet eller lineært), se Figur 4.1. Langt de fleste plasttyper vil i større eller mindre omfang være diffusionsåbne over for VOC'er. Membraner der er diffusionstætte vil derfor oftest være kompositmembraner, hvor et af lagene består af en aluminiumsfolie som f.eks. RAC-membranen.



FIGUR 4.1 Illustration af diffusion gennem membran (frit efter /4/).

Såfremt membranen ikke er lufttæt og der forekommer luftstrømning forbi/igennem membranen, så vil denne stoftransport typisk være en eller flere størrelsesordener større end den diffusive transport. Erfaringer viser, at selv små defekter i membranen kan betyde, at membranens effekt på indsvivningen af jordluft til bygningen er negligibel /20/ og /3/.

Defekter i membranen og fæstning af membranen (f.eks. huller og utætheder) forekommer oftest som følge af fejl i forbindelse med montering af membranen og etableringen af tilstødende/gennemførte bygningsdele, rørforinger mv. En god kvalitet og planlægning i byggefasesen, og en efterfølgende kontrol af membranens tæthed er derfor vigtig for membranens effekt /2/, /4/, /5/ og /24/.

Utætheder og huller i membranen kan tilsvarende forekomme i forbindelse med sætninger eller ved reparationer og vedligeholdelsesarbejde samt ved til- og ombygninger. Over tid vil der erfaringsmæssigt ved tapede membransamlinger opstå spændingsrelaksationer (vedhæftningssvigt, hvormed utætheder opstår).

Man skal være opmærksom på, at membraner der udsættes for høje koncentrationer af olie og kemikalier, f.eks. i forbindelse med forureninger med fri fase forurening, der kan membranen ændre karakter. Membranmaterialet vil typisk "svulme" op og blive væsentlig mere permeabelt /4/.

4.2 Beregning af diffusion gennem membraner

Der er flere modeller for beregning af diffusionen gennem membraner /4/. En metode er at anvende modellen fra J&E (Johnson & Ettinger) for gasmigration i jorden og ind i bygninger.

JAGG /9/ anvender J&E-modellen for udeluft- og indeluftmodulet. Siden version 2.0 af JAGG er der åbnet op for muligheden for, at membraner kan medtages i beregningerne, såfremt der haves anvendelige diffusionskoefficienter.

Diffusionskoefficienten er stof og membranspecifik dvs. primært afhængig af hvilket stof, der transporteres og hvilket materiale, der er anvendt til membranen (f.eks. HDPE). Det er derfor

ikke muligt, at overføre diffusionskoefficienten fra et stof fra én membratype til en anden membratype eller et andet specifikt stof.

At bestemme diffusionskoefficienten kræver langvarige og forholdsvis bekostelige laboratorieforsøg, hvorfor der i litteraturen kun foreligger forholdsvis få værdier og dette kun for stofferne benzen og toluen.

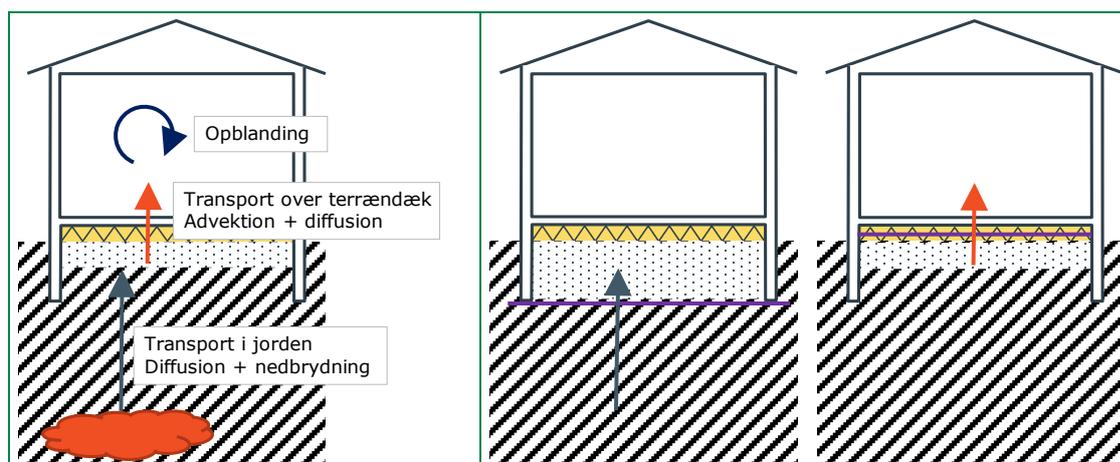
De i litteraturen fundne værdier er sammenfattet i Tabel 4.1. Der er ikke i litteraturen fundet en værdi for diffusionskoefficienten for klorerede kulbrinter i relation til foliemembraner. For Liquid Boot er angivet diffusionskoefficienter for PCE og TCE /7/. Det fremgår dog ikke, om der er tale om vandopløste stofkoncentrationer eller om tallene gælder for stofferne på gasform.

Som nævnt er JAGG forberedt til at kunne medtage membranen i beregningsgrundlaget, men som ved alle JAGG-beregninger, er det vigtigt at have den rette konceptuelle model. I forhold til JAGG's beregningsmodel, kan membranen indgå på to måder, og det er kun den ene, der som standard kan indgå i beregningerne, mens den anden kræver tilretning af beregningsformlerne. Forholdene er beskrevet i det følgende.

Som vist i Figur 4.2, så er JAGG's indeluftberegning opdelt i tre dele, en beregning af gastransport i jorden, en gastransport over bygningens terrændæk (indsivning til bygningen) og en opblanding og udluftning af bygningen. JAGG-beregningen er en ligevægt mellem disse tre dele.

Gastransporten i jorden beregnes som en diffusionstransport, hvor størrelsen af transporten udgøres af koncentrationsforskellen i poreluften og jordens "modstand". Den samlede modstand i jorden er en sum af modstanden i forskellige jordlag. I den nuværende version af JAGG indgår membranen som et jordlag, og dermed i den samlede modstand i jorden. Dette giver mening, hvis membranen er placeret under bygningen som vist i den venstre del af Figur 4.3.

Transport af VOC'er over bygningens tæthedsplan beregnes som summen af diffusiv transport og advektiv transport (hvor stofferne transporteres med luftstrømningen). Tilsvarende i jorden er den diffusive transport afhængig af koncentrationsforskellen mellem poreluftkoncentrationen i jorden umiddelbart under bygningen og koncentrationen i indeluften samt den "modstand" tæthedsplanet yder.



FIGUR 4.2 Konceptuel model for JAGG 2.0 **FIGUR 4.3** Placering af membran (lilla), til venstre under bygningen og til højre under terrændækket som del af tæthedsplanet

TABEL 4.1. Diffusionskoefficienten for benzen og toluen for forskellige membrantyper.

Materialer	Kemikalie	D_{eff} (m ² /s) · 10 ⁻¹³	D_L (m ² /s) · 10 ⁻⁶	$\tau = D_{eff}/D_L$ · 10 ⁻⁸	Membran tykkelse (mm)	Reference
HDPE	Benzen	23	9,3	24,6	2,0	/10/
	Toluen	77	8,56	90,4		
HDPE	Benzen	45	9,3	48,4	1,5	/10/
	Toluen	61	8,56	70,8		
LLDPE	Benzen	100	9,3	108	0,53	/8/
	Toluen	200	8,56	234		
LLDPE	Benzen	200	9,3	215	0,76	/8/
	Toluen	400	8,56	467		
PE rør	BTEX	2,4				/11/
PVC	Benzen	200	9,3	215	0,76	/8/
	Toluen	800	8,56	935		
Kompositmembran Nylon VBP15 LLDPE:polyamid:LLDPE	Benzen	20	9,3	21,5	0,38	/8/
	Toluen	25	8,56	85,6		
Kompositmembran LLDPE:EVOH:LLDPE	Benzen	0,09	9,3	0,097	0,53	/8/
	Toluen	0,11	8,56	0,129		
7 lags Kompositmem- bran LLDPE:EVOH	Benzen	0,045	9,3	0,048	0,53	/5/
	Toluen	0,042	8,56	0,491		
	Ethylbenzen	0,04	9,3	0,050		
	o-xylen	0,037	8,56	0,464		
Liquid Boot (sprøjtemembran)	PCE: 120 mg/l	1,32	6,38	2,07	1,57-1,68 *	/6/
	6.000 mg/m ³	0,274		0,429		
	TCE: 524 mg/l	9,07	10,4	8,72		
	20.000 mg/m ³	0,804		0,773		

Deff: Stofspecifik diffusionskoefficient for membranen (m²/s)

DL: Stofspecifik diffusionskoefficient i luft (m²/s)

τ : materialekonstant (stofspecifik) for membranen (dimensionsløs)

HDPE: High Density PolyEthylene,

LLDPE: Linear Low Density PolyEthylene,

EVHO: Ethylene Vinyl alcohol

PVC: Poly Vinyl Chloride

* Membranareal på ca. 0,0145 m².

Den advective transport er afhængig af koncentrationen i poreluften umiddelbart under bygningen, samt størrelsen af luftstrømmen ind i bygningen. Luftstrømmen er styret af trykforskellen over tæthedplanet samt antallet og størrelser af sprækker i tæthedplanet. Som beskrevet i kapitel 3.1, så er tæthedplanet den del af bygningen, hvor der er kontakt med jorden, f.eks. terrændæk, kældergulv og kældervægge, eller krybekælderdek.

JAGG i sin nuværende form, kan ikke medregne en membran, der placeres som en del af terrændækket/tæthedplanet, som vist til højre i Figur 4.3. Membranen indregnes i den diffusive transport ved at ændre i beregningen af "modstanden" i terrændækket, i lighed med den metode, der anvendes for at beregne modstanden ved den diffusive transport i jordlagene. Hvis membranen kun medtages i diffusionsberegningen svarer det til, at membranen ikke er monteret tæt, og at der er lufttæthed i membranen, hvilket bevirker, at den advective transport kun bliver begrænset af terrændækkets lufttæthed.

Hvis beregningen skal foretages for en lufttæt membran, så skal membranen tilsvarende indgå i den advektive beregning. Hvis membranen er lufttæt, så bliver den advektive transport tilnærmelsesvis nul. Dette imiteres enklest i JAGG ved at sætte trykdifferensen over terrændækket til et meget lille tal, f.eks. $1 \cdot 10^{-9}$ Pa.

I Tabel 4.2 er vist resultaterne af en teoretisk beregning foretaget ved hjælp af JAGG for forskellige placeringer af forureningen og membranen. Beregningerne er udført for henholdsvis en membran placeret under bygningen og en membran etableret under tæthedsplanet, idet der for førstnævnte både beregnes for en lufttæt membran og en "utæt membran", der kun er *diffusionshæmmende*.

Beregningerne udføres for en forurening placeret tæt under bygningen og for en dybereliggende forurening, i en jord med enten en stor modstand (lerjord) og en jord med lille modstand (sandjord).

I beregningerne er anvendt data for en 2,0 mm tyk HDPE membran, jf. Tabel 4.1.

Forureningens koncentration i hotspot er forskellig i de tre situationer, idet der tages udgangspunkt i, at alle tre forureninger skal give samme bidrag til indeluften for situationen uden membran.

Ved beregningerne er dels beregnet det totale bidrag til indeluften (TB), dels hvor stort det diffusive bidrag gennem terrændækket (DB) er. For alle øvrige parametre er anvendt JAGGs standardværdier.

Tabel 4.2 viser, at placeringen af en membran under bygningen kan have en stor betydning for den beregnede påvirkning af indeluften. Membranens effekt afhænger af den "modstand", der er i jorden. Jo større modstanden i jorden er, jo mindre betydning har membranen. Beregningerne viser tilsvarende, at hvis membranen indgår som en del af terrændækket/tæthedsplanet, så har membranen kun effekt, hvis membranen etableres lufttæt, hvilket er i god overensstemmelse med observerede praktiske forhold. I beregningerne er de diffusive bidrag typisk væsentlig mindre end total bidraget, hvilket viser at membranens diffusive egenskaber er af mindre vigtighed.

TABEL 4.2 Beregning af indeluftbidraget fra fiktive forureninger. Beregningerne angiver dels det totale bidrag til indeluften (TB), dels det diffusive bidrag gennem tæthedsplanet (DB), som i dette tilfælde udgøres af et terrændæk. Membranen er i beregningseksemplerne placeret mellem forureningen og bygningens terrændæk. Beregningsteknisk er der i nedenstående eksempler taget udgangspunkt i, at der opnås samme effekt/påvirkning af indeluften (illustreret med samme nuance af lyserød) ved at der justeres på kildestyrken i forhold til placering og geologi (mere eller mindre rød).

		Forurening umiddelbart under bygning	Dybereliggende forurening i lerjord	Dybereliggende forurening i sandjord
UDGANGSPUNKT FOR BEREGNINGERNE				
	Uden membran	Benzen: TB: 6,094 µg/m ³ DB: 1,007 µg/m ³ Toluen: TB: 5,943 µg/m ³ DB: 0,917 µg/m ³	Benzen: TB: 6,094 µg/m ³ DB: 1,007 µg/m ³ Toluen: TB: 5,943 µg/m ³ DB: 0,917 µg/m ³	Benzen: TB: 6,094 µg/m ³ DB: 1,007 µg/m ³ Toluen: TB: 5,943 µg/m ³ DB: 0,917 µg/m ³
RESULTAT AF BEREGNINGERNE				
	Membran under bygning	Benzen: TB: 0,024 µg/m ³ DB: 0,004 µg/m ³ Toluen: TB: 0,022 µg/m ³ DB: 0,003 µg/m ³	Benzen: TB: 0,962 µg/m ³ DB: 0,016 µg/m ³ Toluen: TB: 0,937 µg/m ³ DB: 0,145 µg/m ³	Benzen: TB: 0,103 µg/m ³ DB: 0,017 µg/m ³ Toluen: TB: 0,098 µg/m ³ DB: 0,015 µg/m ³
	Membran (ikke tæt) under terrændæk	Benzen: TB: 5,248 µg/m ³ DB: 0,020 µg/m ³ Toluen: TB: 5,183 µg/m ³ DB: 0,018 µg/m ³	Benzen: TB: 6,076 µg/m ³ DB: 0,023 µg/m ³ Toluen: TB: 5,928 µg/m ³ DB: 0,020 µg/m ³	Benzen: TB: 5,881 µg/m ³ DB: 0,022 µg/m ³ Toluen: TB: 5,762 µg/m ³ DB: 0,020 µg/m ³
	Membran (lufttæt) under terrændæk	Benzen: TB: 0,023 µg/m ³ DB: 0,023 µg/m ³ Toluen: TB: 0,021 µg/m ³ DB: 0,021 µg/m ³	Benzen: TB: 0,950 µg/m ³ DB: 0,950 µg/m ³ Toluen: TB: 0,925 µg/m ³ DB: 0,925 µg/m ³	Benzen: TB: 0,101 µg/m ³ DB: 0,101 µg/m ³ Toluen: TB: 0,097 µg/m ³ DB: 0,097 µg/m ³

4.3 Hvornår udgør membranen en forskel i diffusionssammenhæng?

Beregningerne udført i forrige afsnit viser, at en 2,0 mm PE membran, der etableres lufttæt, vil kunne reducere afdampningen til indeluften med mellem en faktor 6 og en faktor 300 afhængigt af forureningens beløbsgrad. Beregningerne viser, at jo mindre modstand der er i jorden mellem forureningen og undersiden af bygningen, jo større betydning har diffusionstæthed af membranen, i det påvirkningen er styret af den samlede modstand mellem forureningskilden og indeluften.

Beregningerne viser således, at ved afdampning fra en dybereliggende forurening, f.eks. en grundvandsforurening, vil membranen primært have effekt hvis membranen både er udført lufttæt og hvis membranen er diffusionstæt som f.eks. en RAC-membran. Ved afdampning fra en terrænnær forurening, eller hvis jordlagene har en høj permeabilitet, så vil en lavpermeabel membran som f.eks. en 2,0 mm HDPE membran, der udføres lufttæt, udgøre en væsentlig barriere.

I /10/ er der foretaget en sammenligning af diffusionskoefficienterne for en række stoffer i relation til beton og en geomembran, se bilag 1. For cis-1,2 DCE anføres en diffusionskoefficient på mellem $18,5 \cdot 10^{-7}$ og $4,57 \cdot 10^{-7}$ m²/s for beton og mellem $807 \cdot 10^{-13}$ og $351 \cdot 10^{-13}$ m²/s for geomembranen. Diffusionskoefficienten er således i størrelsesordenen 20.000 gange lavere for geomembranen end for beton. Dette betyder, at for at opnå samme reduktion i betonen som for en 0,5 mm tyk geomembran, så skal betonen være mellem ca. 10 m tyk. I den konkrete sag er den anvendte geomembran en 1,8 mm tyk ExtruBit fra Schedetal Film GmbH i Tyskland. Membranen er en ethylene copolymer bitumen membran (ECB) der bl.a. anvendes ved bygningsfunderinger og til isolation, reparation og tætning af tage.

I relation til luftstrømning er det kendt, at selv små lufttætheder kan have stor betydning for den samlede påvirkning af indeluften. Dette skyldes at luftstrømning er en hurtig transportform, hvor der kan overføres store stofmængder igennem selv gennem små lufttætheder/huller /20/.

Eksperimentelle undersøgelser og modelberegninger har vist /19/, at hvis man betragter mindre revner eller huller i betondækket, da vil indtrængningen til et hus uden kapillarbrydende lag stort set være proportional med det samlede lækageareal af revner, specielt for bygninger beliggende på lavpermeable jordtyper. Dette skyldes, at det er jordens permeabilitet der er begrænsende for hvor meget poreluft der kan trænge igennem det enkelte hul/revne i betondækket. Jo større det samlede lækage areal er, jo større jordoverflade er der kontakt til, og dermed større luftindtrængning.

Et kapillarbrydende lag har en meget høj permeabilitet, og bevirker at et enkelt hul/revne i betondækket får kontakt med en meget stor jordoverflade. Antallet af huller i betondækket eller deres størrelse, vil derfor ikke have betydning for hvor stor en jordoverflade der er kontakt til. Den begrænsende faktor er derfor hvor meget luft der kan løbe igennem de enkelte huller. For at revnen/hullet skal være begrænsende for luftindtrængningen til bygningen, skal det have en størrelse på brøkdele af en millimeter /20/. For huse med et kapillarbrydende lag vil lækagearealet derfor være af mindre betydning. Ofte vil blot ét enkelt hul eller revne give anledning til omfattende luftindtrængning.

Diffusionen sker gennem hele materialet, hvilket betyder, at størrelsen på det areal diffusionen sker igennem, har betydning for den samlede indsivning. Med andre ord, jo større areal jo større bidrag fra diffusionen. Dette er en væsentlig pointe, når man skal vurdere betydningen af, at en RAC-membran ikke er diffusionstæt ved svejsninger eller ved anvendelse af rørmuf-

fer o.l. Da det samlede areal, der ikke udgøres af RAC-membranen normalt er forholdsvis begrænset, vurderes diffusionen gennem disse områder (svejsninger og tophatte) ikke at udgøre en signifikant forøgelse af den samlede indsvivning.

4.4 Overordnet forslag til diffusionstest

Laboratorieteknik har det vist sig at være omstændigt at eftervise diffusionskoefficienter med relevans til typisk anvendte membraner og flygtige forureningstyper.

Udfordringen ved et laboratoriestudie går på, at der ved tykke membraner (over 0,3 mm) og med ilagte diffusionstræge lag, vil gå meget lang tid (læs: flere år), førend permeabiliteten kan bestemmes. For at undgå at opnå en række resultater angivet som "mindre end xx", vil det være muligt at accelerere processen under kontrollerede forhold, f.eks. ved at hæve betingelserne for tryk og temperatur.

Resultaterne af de accelererede forsøg vil herefter skulle omsættes til værdier til brug ved normale tryk- og temperaturforhold. Det skal dog bemærkes, at denne forsøgstilgang ved nærværende projekt ikke åbnede op for muligheden for samtidig at evaluere evt. ændringer som funktion af tiden, f.eks. ældning.

Dernæst skal der anvendes forholdsvis høje koncentrationer for de relevante forureningsstoffer, førend måleudstyret kan reproducere måledata inden for en acceptabel og målbar detektionsgrænse. Dette betyder, at det vil kunne opstå ændringer af polymermembranernes fysiske og kemiske egenskaber, hvorved testresultaterne ikke vil være direkte sammenlignelige med egenskaberne for en intakt membran.

For at imødekomme forholdene med lavere forsøgs-koncentration og dermed undgå ændringer af membranens fysiske og kemiske egenskaber, kan der tilføjes et massespektrometer i forbindelse med gaskromatografi analyserne. Projektressourcerne tillod dog ikke muligheden for at gennemføre disse laboratorieforsøg.

Det vurderes dog fortsat relevant, at få gennemført forsøg til eftervisning af diffusionskoefficienter og dermed opnå erfaringer fra standardiserede metoder med gængse anvendte membraner som:

- RAC-membran (0,8 mm tyk med ilagt alu-folie)
- LDPE-membran (0,3 mm) - svarende til plastdelen i ovenstående RAC-membran
- RAC-membran med svejsning

hvor der bestemmes diffusionskoefficienter for nedenstående stoffer i koncentrationer fra 0,1-600 mg/m³:

- PCE, tetraklorethen, CAS nr. 127-18-4
- TCE, trikloretylen, CAS nr. 79-01-6
- VC, vinylklorid, CAS nr. 75-01-4
- Benzen, CAS nr. 71-43-2

5. God praksis

Nærværende afsnit indeholder anbefalinger til god praksis for anvendelse af membraner i afværge sammenhæng for flygtige jord- og grundvandsforureninger.

5.1 Membran funktion

Som beskrevet i afsnit 3.1 indgik membranen ofte i de tidligste afværgeforanstaltninger som del af den primære foranstaltning. Det vil sige at membranens tæthed indgik i den samlede reduktion af forureningspåvirkningen af indeluften. Erfaringerne var dog, at membraner ofte *ikke* ydede den ønskede beskyttelse, idet det var og er meget vanskeligt at opnå den ønskede tæthed af det samlede membransystem, herunder tætningen mod andre bygningsdele.

I afværgesammenhæng tillader myndighederne i dag sjældent, at membranen indgår som en del af den primære barriere. Der er dog fortsat en holdning om, at membraner kan være med til at øge robustheden af et afværgetiltag, hvorfor membraner i de senere år, i større og større omfang har indgået som et supplement til den egentlige afværgeforanstaltning. Membraners tæthed indregnes ikke i foranstaltningernes reduktion af forureningspåvirkningen i indeluften, men membranen bidrager til at afhjælpe eller reducere eventuelle svigt i den primære foranstaltning. Membranen formodes ikke at kunne stå alene, såfremt den primære foranstaltning fejler/svifter helt.

I forbindelse med f.eks. bro- og tunnelbygning ønskes ofte en større sikkerhed, ofte begrundet med en stor samfundsøkonomisk konsekvens ved svigt. Derfor anvendes der "redundante barrierer", det vil sige to serielle løsningstiltag, der begge uafhængigt af hinanden, skal kunne give den ønskede sikkerhed. Det vil sige, at hvis den ene barriere svigter, så giver den anden barriere fortsat den ønskede sikring.

For at membranen kan bidrage til en samlet og mere robust afværgeforanstaltning eller fremstå som en redundant barriere, kræver dette dels fokus på at få membranløsningerne til at lykkes (at det er teknisk muligt at opnå de ønskede tætheder af specielt samlinger) og dels på at uddanne de håndværkere, der arbejder med membraner, så arbejdet bliver udført rigtigt. Samtidigt er det også et væsentligt aspekt, at de håndværkere, der færdes på/ved og arbejder omkring membraner har fokus på ikke at skade membranen og at det sikres, at evt. skader udbedres. Endelig er indførelse af forskellige kontrolmuligheder af de etablerede membraners tæthed også et vigtigt element.

5.2 Placering af membran – horisontalt tæthedsplan

Overordnet er der to tilgange til membranens placering i forbindelse med at etablere et horisontalt tæthedsplan under en bygning:

1. Øvre del af terrændækket
2. Under bygningens fodaftryk

Ved etablering af membranen i forbindelse med terrændækket, er det af hensyn til fugtproblematik og dugpunkt for membranens placering afgørende, at membranen placeres på den varme side i forhold til dugpunktet. For gulvopbygninger med en undertryksløsning i det kapillarbrydende lag, eller uden ventilation, anbefales membranen placeret midt i isoleringslaget,

og for balancerede løsninger, hvor der ventileres med udeluft, bør membranen placeres med op til en maksimal dybde på 1/3-del nede i isoleringslaget under betondækket regnet fra den varme side. Til at imødekomme fugtproblematikken, kan membranen tilsvarende monteres fuldklæbende. I praksis vurderes dette dog at være vanskeligt at udføre. Membranens placering i den øvre del af den samlede gulvkonstruktion betyder, at rørgennemføringer for afløbsinstallationer mm. vil skulle gennembryde membranen. Derfor bør membranen flyttes længere ned i konstruktionen, svarende til punkt 2 ovenfor.

Etablering af membraner under bygningens fodaftryk vurderes alene at være en reel mulighed i forbindelse med nybyggeri og ikke som egnet afværgetiltag ved eksisterende byggeri. Ved nybyggeri ses der dog en fordel i, at tæthedsplanet kan etableres under hele bygningens fodaftryk uden behov for f.eks. rørgennemføringer og med begrænset risiko for gennembrydning af andre årsager. Samtidig vil den dybereliggende membran, afhængig af forureningens terrænnære placering, teoretisk give anledning til et lavere bidrag til indeluften, herunder diffusivt bidrag gennem tæthedsplanet (se kapitel 4.3).

Ulempen med den dybereliggende placering af membranen er, at det ikke er tilrådeligt af hensyn til levetid af membranen, at denne placeres i kontakt med kraftig forurening / fri fase, hvorfor løsningen kan vise sig ikke at være velegnet. Samtidig vil der ved højtstående grundvandspejl forventeligt kunne opstå trykforhold under membranen, som evt. vil kunne påvirke effekten af membranen. Dette forhold bør adresseres i et konkret projektforslag.

Membranen vil tilsvarende kunne indstøbes i et "renselag" til sikring af direkte kontakt med forurening og som beskyttelse i forbindelse med opførelse af det resterende byggeri. Løsningen vil give anledning til forhold omkring randeffekter. Hvor langt ud fra bygningens fodaftryk skal membranen føres førend membranen ikke giver anledning til ukontrolleret spredning uden om membranen? Dette forhold har litteraturstudiet og erfaringsopsamlingen ikke kunne bidrage til afklaring af. Membranens tæthed vil være vanskelig at dokumentere, før byggeriet står færdigt, særligt ved underliggende lavpermeable aflejringer, hvorfor sikre indbygningsprincipper skal anvendes.

5.3 Udlægning af foliemembraner

Det er af afgørende betydning for udlægning af en foliemembran, at membranen kan optage mindre bygningsbevægelser i udførelsen og i den stipulerede levetid. Dette kan f.eks. imødekommes ved at indlægge kiler i membranen med "overskydende" materiale som giver mulighed for, at membranen kan strækkes uden, at den bliver revet i stykker. Langs gennemføringer i forbindelse med vægge, kan dette f.eks. imødekommes ved at danne en fold i membranen under udlægningen. Til at beskytte membranen under indbygningen og senere hen, kan der udlægges en geotekstil under og over membranen, hvorved evt. skarpe kanter eller spidse punkter kan optages af geotekstilen. Tilsvarende vil membranen, hvis den er omhyggeligt indbygget mellem lag af trykfast isolering, være godt beskyttet.

Forhold vedr. svejsning, fastgørelse og rørgennemføringer uddybet i de følgende underkapitler.

5.3.1 Svejsning

Afhængig af tykkelse og type af membran, kan der være forskellige tilgange til at samle to membranbaner. Membranen kan f.eks. samles med tape med butylbånd eller ved butylmellemlæg, der klemmes sammen. I jord- og grundvandsforureningsregi, er der typisk foretaget samling ved svejsning. Det skal bemærkes, at det er følgegruppens erfaring, at det er meget sjældent at svejsninger udført på RAC-membranen konstateres utætte i forhold til lufttæthed. Det er dog afgørende, at svejsningen er udført i overgange af membranstykkerne, hvor der

ses plane overlæg på membranen. Lufttæthederne forekommer oftest i hjørner og på svært tilgængelige steder som f.eks. bagsiden af en tophat. I forbindelse med svejsning af bundmembraner til lossepladser viser norske erfaringer, at der typisk er én fejl pr. 100 m svejsning /15/.

Overordnet foretages der sammensvejsning af foliemembraner på to måder:

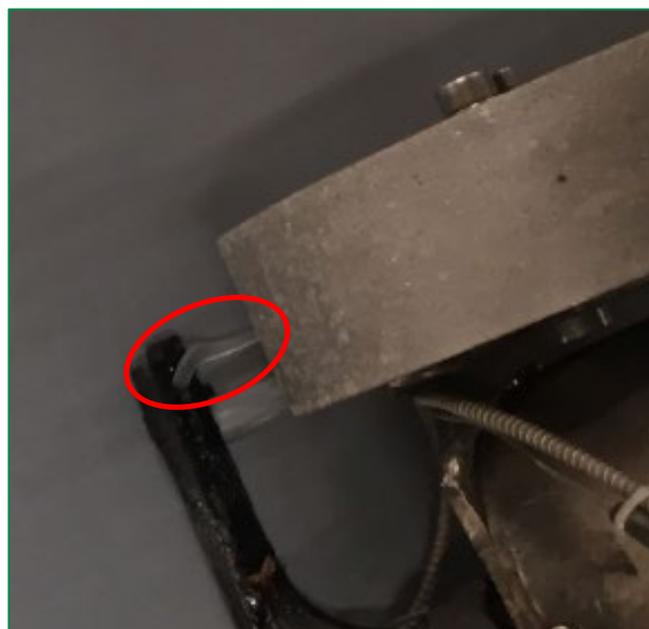
1. Leistersvejsning
2. Extrudersvejsning

Leistersvejsningen er en destruktiv metode, forstået på den måde, at materialerne der skal sammensvejses opvarmes, hvorefter de smeltes sammen. Extrudersvejsningen foretages ved, at der tilføres materiale som "svejsetråd" eller "pasta", f.eks. eksemplificeret ved den karakteristiske lysere samling i vinylbadeværelsesgulv. Svejsetråden lægges således mellem et overlæg på membran som gengivet i Figur 5.1 og Figur 5.2.

Fælles for begge metoder er, at det alene er plastdelen i RAC-membranen der samles. Kerne af alu-folien i midten vil fortsat være brudt til trods for sammensvejsningen af to membranstykker.

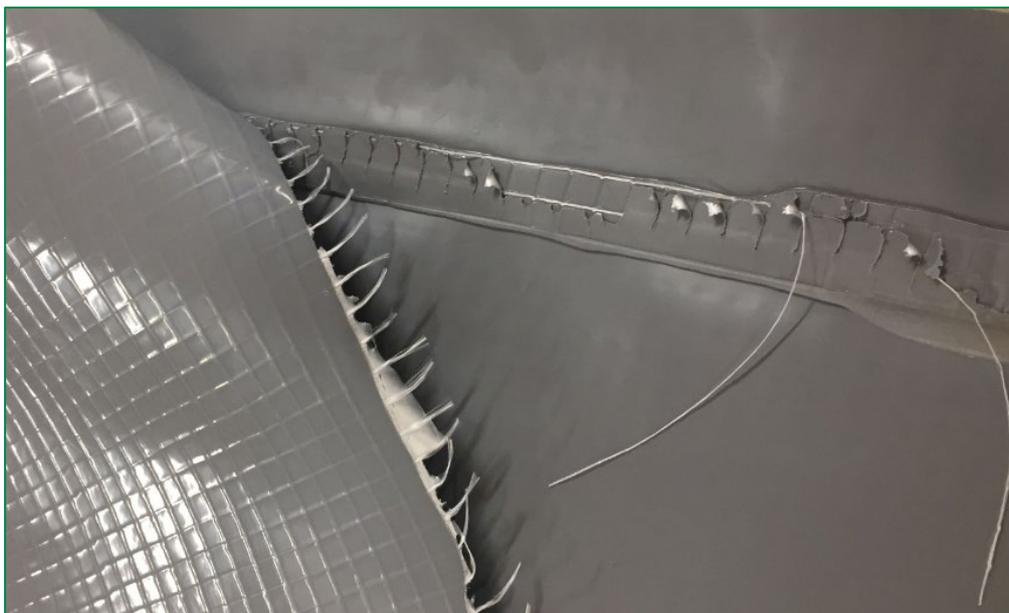


FIGUR 5.1 Extruder-svejsning med overlæg på membran.
Foto: August Olsens Efff. A/S



FIGUR 5.2 Svejsetråd/pasta i forbindelse med extruder-svejsning.
Foto: August Olsens Efff. A/S

Af Figur 5.3 fremgår et eksempel på trækforsøg på en extrudersvejsning af en RAC-membran. Det er ikke styrken i svejsningen, der sætter begrænsningen for rivestyrke. Som det fremgår af eksemplet, så er det membranens armeringstråde der trækkes ud af svejsningen hvorved plastdelen giver efter. Eksemplet illustrerer yderligere, at fibrene i membrankanten skal forankres for at undgå at kanten bliver det svage led. Løsningen herpå er at forøge svejsesømmens bredde eller at udføre en dobbeltbanesvejsning. En dobbeltbanet svejsning har samtidig den fordel, at den forholdsvis simpelt kan tryktestes fra oversiden af membranen, hvormed svejsningernes tæthed kan sikres. Tryktesten kan udføres strækningsvis.



FIGUR 5.3 Resultatet af et træk-forsøg udført på en extrudersvejsning af en RAC-membran.
Foto: August Olsens Eff. A/S

Større sektioner af membraner kan med fordel svejses sammen indendørs på et værksted, for at opnå optimale betingelser for svejsearbejdet og kvalitetssikringen heraf, førend de leveres, monteres og sammensvejses på den specifikke lokalitet.

For plastmembraner tyndere end ca. 0,5 mm foretages der sjældent svejsninger, i stedet limes plaststykkerne sammen under anvendelse af dobbeltklæbende tape. I forbindelse med et forskningsprojekt om levetid af PE-membraner i klimaskærmen har SBI bl.a. set på tapede samlinger og deres holdbarhed. Projektet viser, at der kan opstå luftutætheder i samlingen som følge af spændingsrelaksationer mellem tape og membran /24/. Samtidig må det forventes, at der over tid sker en ændring af klæbematerialets egenskaber /18/.

5.3.2 Fastgørelse

Ved indvendig fæstning af membraner, kan dette foretages med fiberklemskinner. Monteringen kan suppleres med et butyltætningsbånd for montering af skinnen ved iskruning. Monteringen vil alene kunne ske i det omfang, at underlaget er tilstrækkelig forberedt (dvs. er stærkt, jævnt og ikke porøst). Pudsning af en murstensvæg eller en anden porøs overflade, vil dog ikke sikre mod spredning igennem og bagom pudsen og klemskinnen, f.eks. gennem en porøs murstensvæg. Ved særligt hjørnesamlinger, bør der anvendes specialfremstillede tilpasningsstykker af membranen. Disse skal sikre at samlingerne i membranen bliver simple at udføre korrekt på byggepladsen. Det vurderes ikke at være en sikker løsning at tilpasse membranen alene ved foldning eller tilskæring på byggepladsen.



FIGUR 5.4 Montering af membran på indvendig væg med klemskinne. Montering er sket på oppudset bælte på eksisterende murværk. Opmærksomheden henledes på, at hverken puds eller murværk er at opfatte som tæt materiale i forhold til membranen.
Foto: August Olsens Eff. A/S

Overgangen til klemskinne, eller toppen af membranen ved vægmontering, kan yderligere tætnes ved en løsning med "flash-band" som illustreret i Figur 5.5 til Figur 5.7. Løsningen er anvendt i forbindelse med tætning af vægge delvist beliggende under grundvandsspejl.



FIGUR 5.5 Flash-band løsning: Klemliste anvendt til fastgørelse af membran på væg. Løsningen skal ses i sammenhæng med de to efterfølgende figurer som dermed udgør løsningen som helhed. Hvis klemlisten anvendes alene, vil der være en perforering af membranen grundet skruerne samtidig med at der vil være en risiko for flænsning af membranen forårsaget af (de skarpe) hjørner på klemlisten.
Foto: Monarflex c/o Icopal Aps



FIGUR 5.6 Flash-band løsning: Smørbar bitumen membran påføres over membranen.
Foto: Monarflex c/o Icopal Aps



FIGUR 5.7 Flash-band løsning: Membranstrimmel fæstnet i overgang mellem smørbar membran og folie-membran.
Foto: Monarflex c/o Icopal Aps

5.3.2.1 Fugemasse

Det er ikke ønskeligt at anvende fugemasser som del af en samlet tætningssløsning. Grunden hertil er, at fugemassen dels har en meget begrænset levetid /23/ dels, at hvis fugen etableres forkert, så reduceres fugens elasticitet, hvorved defekter hurtigere opstår, hvilket yderligere reducerer den funktionelle levetid. Fugemassens begrænsede levetid vil betyde, at tætningssløsningen samlet set vil have en begrænset levetid. Ved tætning af overgange, er der som alternativ hertil i praksis set flere eksempler, hvor butyltætningsbånd er taget i anvendelse.

I praksis har det erfaringsmæssigt været vanskeligt at udgå anvendelse af fugemasser ved etablering af membranløsninger anvendt ved afværgeløsninger rettet mod jord- og grundvandsforurening. I flere tilfælde har fastgørelsen af membranen kun kunne udføres med klem-lister og fugemasse. Fremadrettet vil en mulig kombineret anvendelse af fugemasser/tætningstyper, hvor nogle hærder op mens andre forbliver uhærdede, muligvis kunne forbedre den samlede fuger-/fæstningssløsning. Nærværende projekt har ikke givet mulighed for at give et konkret løsningsforslag hertil.

Til sammenligning anvendes der på broer alene fuger som en sekundær del af tætningssløsningen.

5.3.3 Rørgennemføringer

Rørgennemføringer i en membranløsning er et svagt punkt i den samlede tætningsløsning. Dels er der selve tætningsarbejdet ved opførelsen og dels det fremtidige perspektiv i f.eks. ændrede placeringer af afløbsplaceringer, forsyningsledninger mm. Dette åbner op for prioriteringen i forhold til tæthed og/eller placeringer. Prioriteringen kan dog til en vis grad imødekommes ved at gentænke eller flytte placeringer af gennemføringer, så membranen gennembrydes mindst muligt, og at de gennemføringer der etableres, har bedst mulige vilkår for at blive tætnet. Erfaringsmæssigt kan det bringe stor værdi til et tætnings tiltag, at tætliggende placeringer af gennemføringer flyttes længere fra hinanden og at gennemføringerne så vidt muligt flyttes væk fra hjørneplaceringer, så der fortsat er "plads" til at etablere gennemføringen korrekt og på en sikker måde.

Tilsvarende kan der til forberedelse af evt. fremtidige konstruktionsændringer i gulvkonstruktionen, etableres rør-i-rør-løsninger, som muliggør at der ikke nødvendigvis skal foretages arbejder med den tidligere monterede membran, såfremt der skal skiftes et gulv afløb eller lignende.

Den gængse løsning til rørgennemføringer etableres ved hjælp af gummi-flanger/tophatte, hvor hensynet til tæthed igen skal prioriteres.

Et eksempel på anvendelse af gummiflanger fremgår af Figur 5.8. Det er værd at bemærke, at gummimaterialet som den fleksible flange er fremstillet af, i diffusionssammenhæng har en ringere evne til at modvirke gennemtrængning af VOC'er end RAC-membranen, hvori gennemføringen er etableret. Dette giver derved anledning til en samlet set svag gennemføringsløsning. Flangen er monteret ved varmpåvirkning og klemning af et bitumentætningsbånd. Yderligere er gummiflangeren fæstnet mekanisk omkring røret med et metal spændebånd.

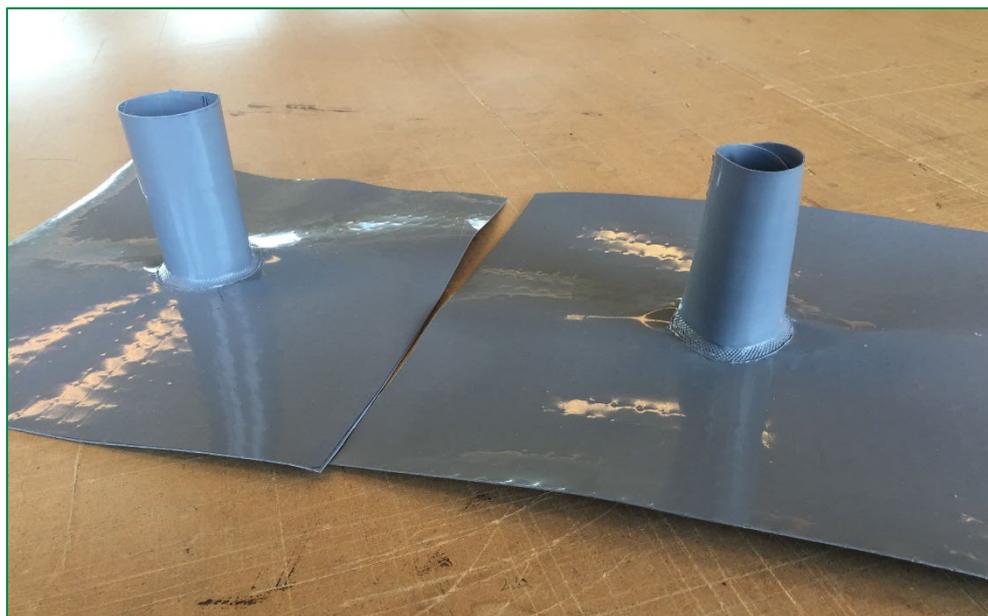


FIGUR 5.8 Ved montage i RAC-membraner er løsningsmodellen i diffusionssammenhæng ikke anbefalesværdig. Rørgennemføring i RAC-membranen er etableret med gummiflange, bitumen tætningsbånd og et metalspændebånd omkring rørføringen.

Foto: COWI

En anbefalelsesværdig løsning til etablering af en rørgennemføring i en RAC-membran, kan i stedet etableres ved anvendelse af tildannede "top-hatte" udført i samme materiale som membranen. Top-hattene kan under kontrollerede værkstedsforhold udføres i et væld af dimensioner og tilsvarende i tilpassede versioner til f.eks. gennembrydning og tætning omkring

et kantet stål profil eller tilsvarende. Af Figur 5.9 fremgår et eksempel på en tophatgennemføring. Af Figur 5.10 ses et eksempel på montering af tophatte omkring rørgennemføringer.

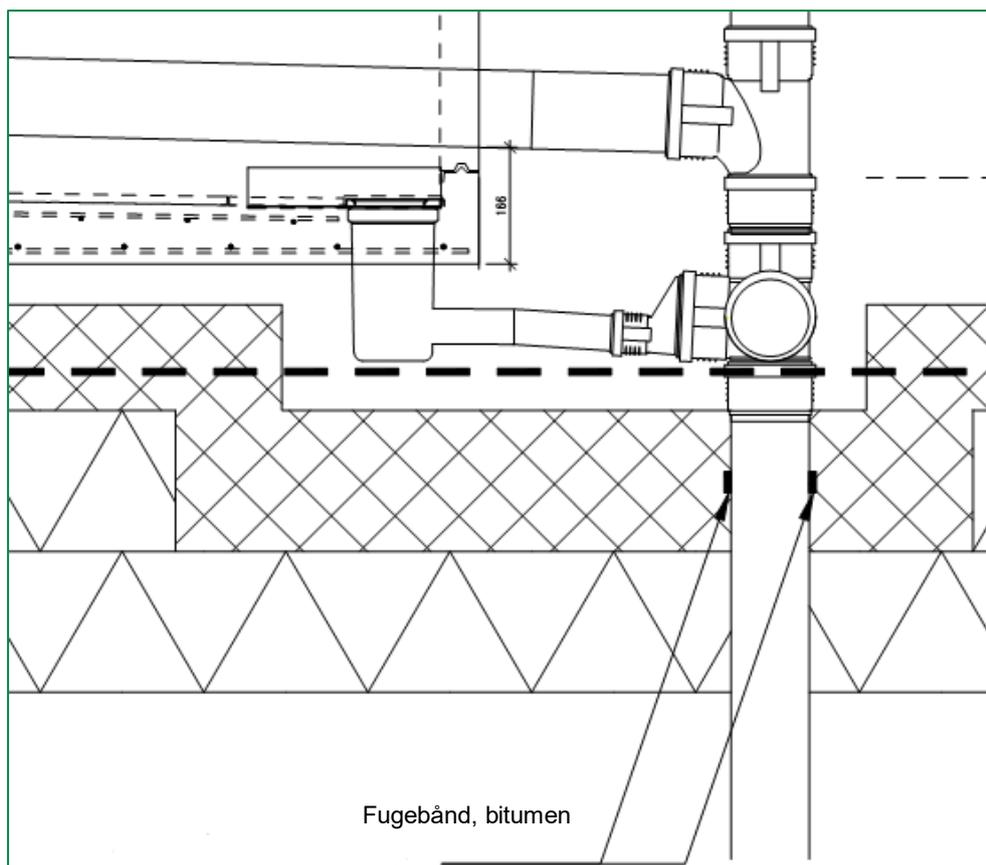


FIGUR 5.9 Værkstedets fabrikeret tophatte i RAC-membran.
Foto: August Olsens Eff. A/S



FIGUR 5.10 Monterede tophatte omkring rørgennemføringer. Der kan tilføjes mekanisk fastgørelse omkring røret med et metal spændebånd.
Foto: August Olsens Eff. A/S

Som supplement til at modvirke VOC spredning langs ydersiden af en rørgennemføring, kan der i forbindelse med indstøbningsarbejdet i gulvkonstruktionen monteres fugebånd omkring rørføringen, hvormed spredningsvejen mellem beton og røret vil kunne reduceres. Løsningen er skitseret i Figur 5.11.



FIGUR 5.11 Skitsering af løsning med indstøbning af fugebånd omkring rørgennemføring i betonkonstruktion. Membranens placering er gengivet som fed stiplede linje. Det skal samtidig sikres, at overskåret armering erstattes af tilsvarende armeringsareal lige ved siden af udsparringen og ca. 50 gange diameteren på hver side af denne. Herved sikres der mod at der opstår unødige revnedannelse radiært ud fra udsparringen.

Erfaringerne med gennemføringer af installationer i terrændæk i en radonspærre, som vist i Figur 5.12, hvor der etableres en udsparring som efterfølgende fyldes med flydende tætningsmasse kan ikke anbefales som løsning i relation til VOC'er. Særligt vurderes brugen af tætningsmasse at være problematisk holdbarhedsmæssigt. Det anbefales i stedet at principperne med brug af "tophatte" anvendes.



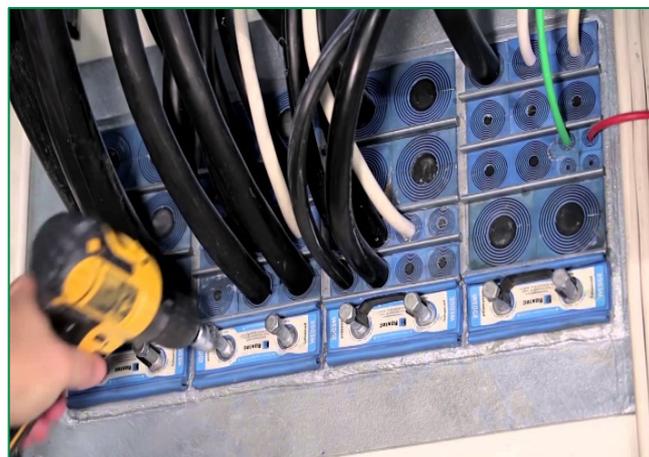
FIGUR 5.12 Billedet viser en løsning med tætningsmasse og forskalling anvendt omkring rørgennemføringer i en radonmembran. Løsningen vurderes ikke at være anvendelig i relation til VOC'er.

Illustration: Monarflex c/o Icopal Aps

Der findes mekaniske løsningsmodeller til tætte rør-/kabelgennemføringer, hvor princippet går ud på, at der indbygges en form for ramme i konstruktionen hvori rør/kabelgennemføringen skal etableres. Rammen kan da på forskellig måde spænde mekanisk omkring rørføringen og dermed gøre gennemføringen vandtæt. Der er ikke fundet dokumentation herfor i relation til sikring mod spredning af VOC'er, men i forhold til lufttæthed, vurderes løsningerne at være særdeles anvendelige. Eksempler på mekaniske løsninger fremgår af hhv. Figur 5.13 og Figur 5.14.



FIGUR 5.13 Rørgennemføring ved hjælp af "kæde-samling" der kan spændes fast og udvides mellem rør og gennemføring.
Figur: Cobalch Pipeline Accessories



FIGUR 5.14 Modulbaseret rammeløsning, hvor et eller flere indlæg kan fastspændes omkring hvert enkelt rør/kabel.
Figur: Roxtec Denmark ApS

5.4 Udlægning af smørbare membraner og sprøjtemembraner

Sprøjtemembraner af typen Liquid Boot (vandopløst polymer i blandet fyldstoffer der sprøjtes direkte på et underlag) eller lignende, har kun været brugt i få sager i Danmark og følgegruppen har ikke kendskab til, at produkttypen været brugt i forbindelse med nybyggeri. Fra litteraturen vides det, at sprøjtemembraner i kombination med et udluftningssystem etableret i et drænlag under sprøjtemembranen bl.a. er anvendt til sikring af nybyggeri mod afdampning af VOC'er på flere sager i England og USA.

Sprøjtemembran kan med den rette klargøring af underlaget hæfte direkte på andre bygningsdele. For at sikre en passende rivestyrke i overgangen mellem bygningsdele og det vandrette underlag (isolering eller ventilationslag m.v.) anvendes dog en membranstrimmel svarende til de principper, der kendes fra hjørner, kanter og gennemføringer i vådrumsmembraner mm.

5.5 Den gode og den dårlige membranløsning

Ved valg af membransystem er det vigtigt at vurdere om membranen er egnet i forhold til den pågældende forurening, og i hvilket omfang membranens diffusive egenskaber skal indgå i afværgeforanstaltningen. I det omfang det er muligt i forhold til membranens diffusive egenskaber, bør der vælges membransystemer som er testet og opfylder definerede krav til lufttæthed /24/.

For at membranen skal få den ønskede effekt, er det vigtigt, at membranarbejdet planlægges, udføres og kontrolleres omhyggeligt. Der er mange forhold, der skal tages højde for og selv små fejl kan have fatale konsekvenser og bevirke, at effekten af membranen helt udebliver.

I det følgende vil der blive listet nogle af de forhold, som adskiller den gode løsning fra den dårlige / ubrugelige løsning.

- En detaljeret arbejds- og kontrolplan.
 - Det er vigtigt allerede tidligt i projektet at fastlægge anvendelsen og placeringen af membranen og at gøre sig klart hvilke begrænsninger membranen giver i forhold til bygningsdesign og selve entreprenørarbejdet.
 - Det er essentielt at alle parter har forståelse for vigtigheden af membranarbejdets korrekte udførelse og for membranens sårbarhed.
 - Det er følgegruppens erfaring at det udover planlægnings- og udførelsesfasen, er vigtigt at dokumentere en tilfredsstillende tæthed af membranen i en kontrolfase. Det er vigtigt at kontrollerne udføres løbende i takt med at byggeriet skrider frem. I projektet bør der derfor være indtænkt plan for hvornår kontrollen skal udføres og hvilke test der skal gennemføres.
- Etablering af kontrolpunkter
 - Allerede i projekteringsfasen skal det fastlægges hvilke kontroller der skal gennemføres, og om hvorvidt kontrollerne stiller krav til etablering af permanente målepunkter.
- Membranens vedhæftning til den øvrige bygningskonstruktion

Membranens vedhæftning til den øvrige bygningskonstruktion er meget vigtig for membranens effekt og et af de vigtigste punkter, der adskiller den gode fra den dårlige membranløsning. Ofte vil en løsning hvor membranen føres gennem et fundament/en væg være en bedre løsning end blot at påføre membranen på overfladen af fundament/væggen.
- Ved anvendelse af klemskinner er det vigtigt at underlaget som klemskinnen hæfter til har:
 - så jævn en overflade som muligt, så samlingen mellem membran og overflade bliver tæt
 - en fast struktur, som bevirker at alle de skruer der anvendes til montering af klemlisten får et godt og fast greb, så klemskinnen kan trækkes tæt ind mod underlaget,
 - har så lille gaspermeabilitet som muligt, og er fri for revner og sprækker således at gassen ikke kan passere fra undersiden af membranen til oversiden af membranen via det underlag som klemskinne fastgøres til.
- At membranen hæftes på så lige og jævne strækninger som muligt. Jo flere hjørner og gennembrydninger der er af membranen, jo større er risikoen for lufttætheder.

Almindelig og særligt komplicerede detaljer bør udføres på værksted, så der på byggepladsen alene skal udføres enkle membransamlinger.

- Hvis membranen skal føres gennem fundament/væg vælges ofte en løsning hvor dette gøres ved overgangen mellem fundamentet og væggen. Dette betyder at membranen ofte føres fra undersiden af betondækket og op til overgangen mellem fundament og væg. Dette introducerer dels et niveauspring (se mere herom nedenfor) dels at membranen bliver blottet / tilgængelig. Ved teknologiudviklingsprojekt udført for bl.a. Kuben /21/ blev det påvist, at eksponeringen af membranen giver en lang række af muligheder for, at de entreprenører og håndværkere, der efterfølgende arbejder med opførelsen af bygningen, beskadiger membranen. Specielt områder med dør- og vinduesfag gav anledning til skader på membranen. Af denne grund, bør membraner så vidt muligt beskyttes mod mekanisk skade umiddelbart i forbindelse med montagen på stedet.
- Niveauspring og hjørner
De foliemembraner der anvendes er meget stive. Niveauspring og hjørner er derfor ofte vanskelige at udføre. Det anbefales derfor i videst muligt omfang at undgå niveauspring for membranen. For niveauspring og vanskelige hjørner anbefales det:
 - At sikre membranen mod kontakt med skarpe betonkanter, f.eks. ved at fuldklæbe asfaltpap over betonkanten, for at give en kant uden skarpe sten o.l. samt f.eks. at indlægge asfaltpap oven på membranen for også at beskytte oversiden af membranen.
 - At supplere med præfabrikerede hjørnesamlinger o.l. der svejses sammen med membranen.
 - I visse situationer kan det være en fordel, at formgivningen ved niveauspring, hjørner o.l. udføres i et selvstændigt mindre stykke membran (tilpasningsstykker), som efterfølgende svejses til den øvrige membran.



FIGUR 5.15 Eksempel på hjørnesamlinger fra CIRIA /5/. Til højre ses en samling hvor der er suppleret med et præfabrikeret hjørneelement/tilpasningsstykke, hvilket giver en væsentlig bedre løsning end eksemplet til venstre.

- Gennembrydninger af membranen
Ved gennembrydninger af membranen f.eks. på grund af rør- og ledningsføringer, forankringer eller pæle og søjler anbefales det, at der anvendes præfabrikerede tophatte, se kapitel 5.3.3.
 - For at sikre ordentlige løsninger, der kan tætnes af entreprenøren, er det vigtigt at der holdes afstand til andre gennemføringer, til vægge og til niveauspring i membranen. Dette er vigtigt at have på sinde allerede i projekteringsfasen.

- Membranarbejde og -samlinger
Samlingen af membraner er absolut kritisk for membranens effekt både på kort og på lang sigt.
 - Det er derfor vigtigt, at membranen *ikke* planlægges etableret på tidspunkter, hvor de vejrmæssige forhold er ugunstige f.eks. frost, sne eller regn.
 - Membranen bør dækkes til så hurtigt som muligt efter etableringen:
 - for at undgå, at der samler sig vand på membranen, som giver problemer i forhold til det efterfølgende arbejde
 - for at minimere risikoen for, at membranen bliver beskadiget under det øvrige byggearbejde
 - for at minimere UV-påvirkningen af membranen.

5.6 Kontrol af tæthed i felten

Allerede i projekteringsfasen skal det fastlægges hvilken kontrol, der skal gennemføres i forbindelse med etablering og drift af foranstaltningen, herunder hvad formålet med kontrollen er. Det skal desuden besluttes, hvornår i byggeprocessen, at kontrollen skal gennemføres.

For at få overblik over hvilken kontrol der skal udføres, bør der indledningsvist udarbejdes en konceptuel model, der illustrerer de enkelte elementer i afværgeforanstaltningen og hvordan de interagerer med hinanden. Den konceptuelle model anvendes herefter til at beslutte, hvilke kontrolelementer der skal indgå i såvel etablering som ved drift og efter hvilke principper de skal udføres.

I detailprojekteringen fastsættes, hvilke krav de enkelte prøvningsmetoder stiller, f.eks. om der skal etableres faste eller midlertidige kontrolpunkter til flowmålinger, trykmålinger eller koncentrationsmålinger, herunder placeringen af disse. Skal det f.eks. være muligt at udføre ventilationen i bestemte lag, at kunne etablere et bestemt undertryk, at isolere et eller flere område fra andre etc.

I forbindelse med anvendelse af membraner kan der foretages følgende typer af prøvning:

- Visuel inspektion af membranen, dens samlinger og fæstning til andre bygningselementer, herunder lednings- og rørgennemføringer, gennemføring af søjler, trækbånd og lignende.
Formålet er at identificere eventuelle skader/defekter på membranen, samt eventuelle mangler ved udførelsen. Inspektionen bør foretages umiddelbart efter, at membranen er etableret, men bør også løbende følges op indtil membranen er beskyttet mod mekanisk/fysisk skade.
- Simpel kontrol af membranens samlinger, hvor et stumt instrument som f.eks. bagen den af en svensknøgle, føres langs alle samlinger for at undersøge, om der er steder hvor limning/svejsning ikke er udført. Instrumentet der anvendes må naturligvis ikke kunne skade membranen.
- Tæthedsprøvning af membransamlinger med trykluft. En anden metode er at anvende trykluft til kontrol af membransamlinger. Trykluft med et minimumstryk på ca. 350 kPa blæses mod samlingen fra en kort afstand (maks. 50 mm), for at se om der er defekter på samlingen.
- Test med sporgasser
En i Danmark hyppigt anvendt sporgas er formiergas. Formiergas er en blanding af hydrogen (brint) og nitrogen, der anvendes til lækagesøgning. Det er gassens indhold

af brint, der er den aktive del af gassen, idet lækagen detekteres med en brintdetektor. Prøvningen udføres ved at fordele gassen i et højpermeabelt lag under membranen. Når det er sikret, at gassen er fordelt under membranen, anvendes brintdetektoren til at lokalisere eventuelle defekter i membranen og i membransamlinger. Metoden kræver således, at der er mulighed for at fordele gassen under membranen, at der er etableret målepunkter, som kan vise, at gassen er tilstrækkeligt fordelt og at det er muligt at foretage lækagesøgningen på membranens overside.

- Såfremt der skal støbes terrændæk eller kældergulv oven på membranen, bør testen foretages inden udstøbningen således, at eventuelle defekter i membran og samlinger kan udbedres. Samtidig bør testen gentages efter, at betondækket er udstøbt således, at det kan kontrolleres, at etableringen af betondækket ikke har skadet membranen. Det bør ligeledes overvejes, om der skal etableres kontrolpunkter mellem membranen og betondækket således, at utæthederne i de to barrierer kan adskilles.
- Processen kan eventuelt fremskyndes ved at kombinere testen med anvendelse af "blower door". Tilgangen er dog forudsat, at bygningen hvori testen udføres er aflukket, således der kan etableres et undertryk i tilknytning til oversiden af membranen.
- Ulempen ved anvendelse af formiergas kan være, at de billige detektorer der ofte anvendes, er følsomme over for andre stoffer, f.eks. spindelvæv og metan, samt visse typer af frisk/ikke hærdet fugemasse.
- Andre sporgasser, som undertiden anvendes, er svovlhexaflurid (SF_6), helium, kuldioxid og acetylen. De to første sporgasser er under udfasning, idet svovlhexafluriden mistænkes for at være en drivhusgas og da helium kun findes i begrænsede mængder.
- En anden sporgas er røg. Tæthedsprøvning med røg udføres efter samme principper som andre sporgasser, men adskiller sig ved, at man anvender de menneskelige sanser og ikke detektoren til at identificere defekter i membranen. Ulempen ved denne metode er, at der skal større mængder af gas gennem lækagen, for at denne kan detekteres. Det er ligeledes svært, med sikkerhed at fastslå, om gassen er fordelt under membranen.
- Dielektrisk porøsitet. Prøvning af den dielektriske porøsitet anvendes bl.a. i forbindelse med tagdækning på flade tage for at kontrollere for huller i tagmembraner. Metoden er tilsvarende anvendelig til at prøve membraner, der anvendes til sikring af indeluft. Faggruppen har dog ikke kendskab til, at metoden har været anvendt på denne type sager i Danmark.

Ved metoden indføres en elektrisk strøm til jorden eller den underliggende plade svarende til spændingen for den dielektriske styrke af materialet, der skal afprøves. En elektrisk ladet børste, der føres over overfladen af membranen, vil virke som en isolator. Hvis der er defekter/huller, dannes der et elektrisk kredsløb og en akustisk alarm udsendes og en synlig gnist kan ses. Dielektrisk porøsitetstest kan under egnede forhold identificere huller så små som 0,01 mm.

- Termografi. I perioder hvor der er forskel på temperaturen under membranen (i poreluften) og over membranen (i rumluften), kan man anvende termografi til at identificere eventuelle lækager. Processen kan fremskyndes ved hjælp af en "blower door". Det er følgegruppens erfaring, at metoden kun er begrænset egnet. Dette skyldes at der er for høj "detektionsgrænse" på temperaturforskellene til, at evt. luftutætheder

kan registreres termografisk. Oftest kan "luftpåvirkningen" registreres på huden, inden den kan registreres termografisk.

6. Referencer

- /1/ Vejledning fra Bygge og Boligstyrelsen 1993.
Undersøgelse af lufttæthed i bygningskonstruktioner.
- /2/ SBI-Anvisning 233, 2. udgave 2015. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København.
Radonsikring af nye bygninger.
- /3/ SBI-Anvisning 247, 2. udgave 2015. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København.
Radonsikring af eksisterende bygninger.
- /4/ CIRIA C735, 2014.
Good practice on the testing and verification of protection systems for buildings against hazardous ground gases.
- /5/ CIRIA C748, 2014.
Guidance on the use of plastic membranes as VOC vapour barriers.
- /6/ Liquid Boot® Spray-Applied Gas Vapor Barrier. Fra CETCO hjemmeside (juli 2019):
<http://cetco.com.au/Left-Side-Navigation/Remediation-Technologies/Products/LI-QUID-BOOT>
- /7/ Gas Vapor Mitigation Systems for Protection Against Vapor Intrusion.
Fra CETCO hjemmeside (juli 2019):
<https://img.pr.com/release-file/1005/236045/GasVaporMitigationSystemsBroc.pdf>
- /8/ McWatters R. S. og Rowe R. K., 2010.
Diffusive Transport of VOCs through LLDPE and two Co-Extruded Geomembranes.
Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering © ASCE / September 2010 / 1177
https://www.researchgate.net/publication/245295011_Diffusive_Transport_of_VOCs_through_LLDPE_and_Two_Coextruded_Geomembranes
- /9/ Miljøstyrelsens risikovurderingsværktøj til risikovurdering af jord, afdampning, gas og grundvand, JAGG 2.0/2.1.
- /10/ De Biase C., Loechel S., Putzmann T., Bittens M., Weiss H., Daus B. 2014.
Volatile organic compounds effective diffusion coefficients and fluxes estimation through two types of construction material. Indoor Air 2014; 24: side 272–282.
- /11/ Mao F. 2008. Permeation of hydrocarbons through polyvinyl chloride (PVC) and polyethylene (PE) pipes and pipe gaskets. Iowa State University, 2008
- /12/ SBI rapport 2012: 05. Levetider for bygningsdele omfattet af ejerskifteforsikring og huseftersynsordningen.
- /13/ Levetider.dk. Grundejernes investeringsfond. København. www.levetider.dk

- /14/ Pedersen S. 2004.
Fastlæggelse af levetider for 2 HDPE plastlinere til sæsonvarmelagre.
UVE-projekt "Aktiviteter vedrørende udvikling af plastlinere til sæsonvarmelagre"
ENS. J. nr. 51181/01-0065. Teknologisk Institut, januar 2004.
- /15/ Christensen F. B. 2011.
Membraner i Miljøkonstruksjoner
Foredrag af Siv.ing. MSc. Finn B. Christensen 16. marts 2011. Hjellnes Consult as
- /16/ Rentolit's hjemmeside. Egenskaber af Alkorplan membran baseret på monomer-
PVC-P. <http://www.renolit.com/waterproofing-roofing/dk/produkter/renolit-alkorplan/>
- /17/ Brandl M. 2018.
Notat om Vurdering af tæthed af membran og sætninger i Vikingeskibshallen. Ram-
bøll, 12-01-2018.
- /18/ Forskningsprojekt: Levetid af PE-membraner anvendt i klimaskærmen. Projektpart-
nere: SBI, DTU, TI og Nationalmuseet mf. Referencegruppe: leverandører og pro-
ducenter, endnu ikke publiceret.
- /19/ Robinson A. L., Sextro R. G. 1995.
The Influence of a Subslab Gravel Layer and Open Area on Soilgas and Radon En-
try Into Two Experimental Basements.
Health Physics 1995;69(3);367-377.
- /20/ Nilausen L., Bote T. V., Bloch K. S., Kjeldsen P., Andersen C. E. og Andersen L.
2001.
Metode til risikovurdering af gasproducerende lossepladser.
Miljøprojekt Nr. 648, 2001 Teknologiuudviklingsprogrammet for jord- og grundvands-
forurening.
- /21/ Overgaard L. B., Petersen J. B. og Jeppesen M. N. 2012.
Radonsikring i nybyggeri, dokumentation og teknologiuudvikling. Hovedrapport.
Boligfonden Kuben, 2012.
- /22/ Hansen M., Lindegaard D. og Kjerumgaard C. 2018.
Bolius hjemmeside om terrændæk 2018. <https://www.bolius.dk/terraendaek-18853/>
- /23/ Bote T. V., Hoffmark B. N. et al., 2016.
Indeklimasikring i nybyggeri. Vejledning i forbindelse med sagsbehandling af § 8-
sager, Region Hovedstaden.
- /24/ Rasmussen T. V. og Cornelius T. 2018.
Egnede membransystemer til radonsikring. Vurdering af ti membransystemer. SBI
2018:06

Bilag 1. Diffusions- koefficienter for beton og geotekstil

Uddrag fra /10/. Geotekstilen er en 1,8 mm tyk ExtruBit fra Schedetal Film GmbH i Tyskland af typen ethylene-copolymer-bitumen membran (ECB).

Table 2 Effective diffusion coefficients through concrete and geo-membrane and mass fluxes estimated for the different experimental setups

Compounds	CAS N°	Diffusion in air (cm ² /s) Source: (USEPA, 2013)	Effective diffusion coefficient (cm ² /s)		Mass flux (mg/cm ² /s)	
			Concrete	Geo-membrane	Concrete	Geo-membrane
Chloroform	67-66-3	1.04 × 10 ⁻¹	1.37 × 10 ⁻² ± 2.72 × 10 ⁻³	n.d.	1.92 × 10 ¹ ± 3.10 × 10 ⁰	n.d.
1,1-DCE	75-35-4	9.00 × 10 ⁻²	1.39 × 10 ⁻² ± 3.25 × 10 ⁻³	2.33 × 10 ⁻⁶ ± 8.95 × 10 ⁻⁷	1.15 × 10 ² ± 2.21 × 10 ¹	1.49 × 10 ⁻² ± 4.31 × 10 ⁻³
trans-1,2-DCE	156-60-5	7.07 × 10 ⁻²	1.17 × 10 ⁻² ± 2.24 × 10 ⁻³	5.47 × 10 ⁻⁶ ± 1.18 × 10 ⁻⁶	4.93 × 10 ¹ ± 7.72 × 10 ⁰	1.18 × 10 ⁻¹ ± 3.34 × 10 ⁻²
cis-1,2-DCE	156-59-2	7.36 × 10 ⁻²	1.84 × 10 ⁻² ± 4.57 × 10 ⁻³	8.06 × 10 ⁻⁷ ± 3.51 × 10 ⁻⁷	2.31 × 10 ¹ ± 4.69 × 10 ⁰	5.01 × 10 ⁻² ± 2.19 × 10 ⁻²
TCE	79-01-6	7.90 × 10 ⁻²	3.17 × 10 ⁻² ± 6.89 × 10 ⁻³	n.d.	1.55 × 10 ¹ ± 2.76 × 10 ⁰	n.d.
PCE	127-18-4	7.20 × 10 ⁻²	8.17 × 10 ⁻⁴ ± 1.83 × 10 ⁻⁴	n.d.	6.49 × 10 ⁰ ± 1.19 × 10 ⁰	n.d.
Chlorobenzene	108-90-7	7.30 × 10 ⁻²	1.75 × 10 ⁻⁴ ± 4.69 × 10 ⁻⁵	n.d.	4.93 × 10 ⁻¹ ± 2.72 × 10 ⁻³	n.d.
Benzene	71-43-2	8.80 × 10 ⁻²	2.28 × 10 ⁻² ± 2.96 × 10 ⁻³	8.04 × 10 ⁻⁸ ± 3.66 × 10 ⁻⁹	7.63 × 10 ⁰ ± 6.71 × 10 ⁻¹	6.03 × 10 ⁻³ ± 2.74 × 10 ⁻⁴
Toluene	108-88-3	8.70 × 10 ⁻²	2.16 × 10 ⁻⁴ ± 7.25 × 10 ⁻⁵	5.50 × 10 ⁻⁸ ± 1.02 × 10 ⁻⁸	1.16 × 10 ⁰ ± 3.16 × 10 ⁻¹	4.19 × 10 ⁻³ ± 7.79 × 10 ⁻⁴
Ethylbenzene	100-41-4	7.50 × 10 ⁻²	9.86 × 10 ⁻⁵ ± 2.76 × 10 ⁻⁵	n.d.	1.73 × 10 ⁻¹ ± 3.96 × 10 ⁻²	n.d.
m-p-Xylene	108-38-3	7.35 × 10 ⁻²	6.24 × 10 ⁻⁵ ± 1.43 × 10 ⁻⁵	n.d.	1.00 × 10 ⁻¹ ± 1.85 × 10 ⁻²	n.d.
o-Xylene	95-47-6	8.70 × 10 ⁻²	5.90 × 10 ⁻⁵ ± 8.76 × 10 ⁻⁶	n.d.	7.00 × 10 ⁻² ± 8.32 × 10 ⁻³	n.d.

n.d. Not determined.

Anvendelse af membraner til sikring af indeluft - Erfaringsopsamling og 'god praksis'

Projektet består af en erfaringsopsamling og et litteraturstudie, der har til hensigt at bidrage til en bedre forståelse af formålet med anvendelsen af membraner i afværgetiltag i forbindelse med jordforureninger, herunder arbejdet med og etableringen af membraner og den efterfølgende udførelse af tæthedsprøvning.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk