



CHALMERS



Metodutveckling för Riskbedömning och Grundvattenskydd

En fallstudie av Fjärås Bräcka

Kandidatarbete inom samhällsbyggnadsteknik

Mirja Backlund, Emelie Holmén, Kim Lennartsson, Johanna Löf, Sandra Nastovska, Tomas Överström

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och Geoteknik

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Gothenburg, Sweden 2024

www.chalmers.se

BACHLOR'S THESIS 2024

Metodutveckling för Riskbedömning och Grundvattenskydd

En fallstudie av Fjärås Bräcka

MIRJA BACKLUND, EMELIE HOLMÉN, KIM LENNARTSSON,
JOHANNA LÖF, SANDRA NASTOVSKA, TOMAS ÖVERSTRÖM



CHALMERS

Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Geologi och Geoteknik

ACEX11-VT24-32

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Gothenburg, Sweden 2024

Metodutveckling för Riskbedömning och Grundvattenskydd
En fallstudie av Fjärås Bräcka
ACEX11-VT24-32

© MIRJA BACKLUND, EMELIE HOLMÉN, KIM LENNARTSSON, JOHANNA
LÖF, SANDRA NASTOVSKA, TOMAS ÖVERSTRÖM 2024.

Handledare: Andreas Lindhe, Avdelningen för Geologi och Geoteknik
Examinator: Lars Rosén, Avdelningen för Geologi och Geoteknik

Kandidatarbete 2024
Institutionen för Arkitektur och Samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Geologi och Geoteknik
ACEX11-VT24-32
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Gothenburg
Telephone +46 31 772 1000

Omslag: Randmoränen i Fjärås Bräcka 240227

Gothenburg, Sweden 2024

Sammanfattning

För att skydda ytvatten- och grundvattenresurser används vattenskyddsområden. Traditionellt har vattenskyddsområden utformats med avseende på rinntid. Idag gäller istället att en riskbedömning ska utgöra en del av underlaget för utformningen.

Studiens syfte var att utveckla en riskbedömningsmetod avsedd att bedöma risken som en grundvattentäkt är utsatt för med avseende på dricksvattenförsörjning och andra tjänster som en vattentäkt kan tillhandahålla samhället (vattensystemtjänster). Metoden utvecklades och utvärderades med hjälp av en fallstudie vid vattentäkten Fjärås Bräcka, belägen i Kungsbacka kommun. Det huvudsakliga syftet med fallstudien var att testa den framtagna metodens validitet och applicerbarhet genom att värdera resultatet ur fallstudien.

Metoden innefattar en uppskattning av sannolikhet och konsekvens, som kombineras till ett riskindex och presenteras i en riskmatris. I arbetet bedömdes sårbarheten baserat på rinntid i grundvattenmagasinet och metoden DRASTIC, som med hjälp av programvaran ArcGIS gav en sårbarhetskarta över området. Sårbarheten integrerades även i sannolikhetsbedömningen som utfördes med ett framtaget händelse-träd. Konsekvensen baserades på tre kvalitativa konsekvenskategorier: beständighet, mängd och farlighet.

Resultatet från arbetet visade att hela tillrinningsområdet för Fjärås Bräckas grundvattenmagasin är sårbart och därför föreslås att hela området är ett vattenskyddsområde. De riskkällor som utgör störst risk är olycka på intilliggande vägar. Studien visade slutligen att den framtagna riskbedömningsmetoden var praktisk genomförbar och resulterade i ett användbart underlag för att avgöra vilka områden som är i behov av skydd.

Nyckelord: Grundvatten, Grundvattenskydd, Vattenskyddsområde, Vattensystemtjänster, DRASTIC, Riskbedömning, Sårbarhet

Metodutveckling för Riskbedömning och Grundvattenskydd
En fallstudie av Fjärås Bräcka
ACEX11-VT24-32
Department of Geology and Geotechnics
Chalmers University of Technology

Abstract

Water protection areas are used in order to protect water and groundwater resources. Water protection areas have traditionally been designed based on flowtime. In accordance with new guidelines, the design should instead be partially based on a risk assessment.

The aim of this study was to develop a risk assessment methodology suitable to assess the risk for groundwater contamination with respect to drinking water supply and other services that a water source can provide to a community. The method was developed and evaluated through a case study in the area of Fjärås Bräcka, situated in Kungsbacka, Sweden. The main objective of the case study was to test the validity and applicability of the developed method, through an evaluation of the results of the case study.

The method includes an estimate of probability and consequence, which is combined into a risk index and presented in a risk matrix. In this thesis, vulnerability was based on runoff time in the groundwater reservoir and the DRASTIC method, using the ArcGIS software, which produced a vulnerability map of the area. Vulnerability was also integrated into the probability, which was assessed with a probability tree diagram. The impact was assessed with three qualitative impact categories: persistence, quantity and hazard.

The result of this study suggested that the entirety of the Fjärås Bräcka catchment area is vulnerable and therefore, it was proposed that the entire area should be a water protection area. Traffic collisions on adjacent roads were found to pose the biggest risk out of all potential hazards. Lastly, the developed risk assessment method was found to be practically feasible and resulted in a useful foundation for determining which areas are in need of protection,

Keywords: Groundwater protection, Water protection area, Water system services, DRASTIC, Risk assessment, Vulnerability

Förkortningslista

Nedan följer lista över förkortningar som har använts genomgående i detta arbete, listade i alfabetisk ordning:

ALARP	As low as reasonably practicable
DNAPL	Dense non-aqueous phase liquid
GIS	Geographic Information System
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Point
LNAPL	Light non-aqueous phase liquid
PFAS	Per- och polyflourerade alkylsubstanser

Begreppsregister

Nedan följer beskrivningar av de begrepp som används i rapporten:

Akvifer	Geologisk bildning bestående av material med tillräcklig porositet och permeabilitet för uttag av grundvatten i användbar omfattning.
Brusdata	Data som inte är exakt. Uppstår om utdata exporteras i högre upplösning än indata. Samma princip som värdesiffror.
Grundvatten	Vatten som är tillgänglig i marken, exempelvis i grundvattenmagasin.
Grundvattenmagasin	Avgränsad del i marken där grundvatten ansamlas och möjlighet för utvinning av grundvatten finns.
Grundvattentäkt	Plats där grundvatten tas upp för användning som till exempel dricksvatten.
Hydrogeologi	Kunskap om grundvattnets egenskaper samt hur det rör sig och magasineras i jord och berg.
Inducerad infiltration	Påfyllning av grundvatten genom att ytvatten tränger in i marken.
Riskälla	Föremål eller verksamhet som på ett eller flera sätt kan orsaka en negativ inverkan på grundvattnet.
Råvatten	Obehandlat vatten som finns naturligt i miljön.
Råvattenuttag	Där grundvatten tas ut ur grundvattenmagasinet.
Tillrinningsområde	Det geografiska område, inkluderat sjöar och vattendrag, där områdets avrinning rinner till en specifik punkt eller område. Topografin är vanligtvis det som avgränsar området.
Vattensystemtjänst	Tjänster som vattenresurser bidrar med för människans välbefinnande.
Ytvatten	Vatten som är tillgänglig på ytan av jorden, exempelvis i sjöar, hav och vattendrag.

Innehåll

Förkortningslista	viii
Begreppsregister	x
Figurer	xv
Tabeller	xvii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och problemformulering	3
1.3 Avgränsningar	3
2 Förutsättningar för vattenförsörjning	5
2.1 Geologisk beskrivning	5
2.2 Hydrogeologisk beskrivning	7
2.2.1 Konstjord infiltration	8
2.2.2 Föroreningar i grundvatten	9
3 Risk och vattenskydd	10
3.1 Riskbedömning och metoder	10
3.2 Sårbarhet	11
3.3 Oförutsägbara händelser	12
3.4 Klimatförändringar	13
3.5 DRASTIC	13
3.5.1 D - Djup till Grundvattenyta	14
3.5.2 R - Grundvattenbildning	15
3.5.3 A - Akviferens Material	15
3.5.4 S - Jordmån	15
3.5.5 T - Topografi	15
3.5.6 I - Omättade zonen material under jordmånen	16
3.5.7 C - Hydraulisk Konduktivitet i Akvifermaterial	16
3.6 Vattensystemtjänster	16
3.7 Vattenskyddsområde	17
3.7.1 Upprättandet av vattenskyddsområden	17
3.7.2 Föreskrifter och bestämmelser	17

4	Metod	19
4.1	Områdesundersökning	20
4.2	Identifiering av spridningssätt	21
4.3	Sårbarhetskartläggning	21
4.4	Sannolikhetsbedömning	21
4.5	Konsekvensbedömning	22
4.6	Riskbedömning	22
4.7	Resultat	22
5	Fallstudie Fjärås Bräcka	24
5.1	Områdesbeskrivning	25
5.1.1	Geologiska och hydrogeologiska förhållanden	25
5.1.2	Vattensystemtjänster i Fjärås Bräcka	27
5.1.2.1	Fordonstrafik	30
5.1.2.2	Jordbruk och odling	30
5.1.2.3	Hästverksamhet	31
5.1.2.4	Kyrkogård och gravfält	31
5.1.2.5	Industri	32
5.1.2.6	Bebyggelse	32
5.1.2.7	Deponi	33
5.1.2.8	Samlingsplatser	33
5.2	Spridningssätt i Fjärås Bräcka	34
5.3	Kartlagd vertikal sårbarhet med DRASTIC	34
5.3.1	Arbetsgång: DRASTIC med ArcMap	34
5.3.1.1	D - Djup till grundvattenytan	34
5.3.1.2	R - Grundvattenbildning	35
5.3.1.3	A - Material i akviferen	36
5.3.1.4	S - Material i jordmån	37
5.3.1.5	T - Topografi	39
5.3.1.6	I - Material i den omättade zonen under jordmånen	40
5.3.1.7	C - Hydraulisk konduktivitet i akvifermaterial	41
5.3.2	DRASTIC-Index	42
5.3.3	Kartlagd horisontell sårbarhet med Calculated Fixed Radius Method	43
5.4	Sårbarhet för transport till och i sjön	44
5.5	Sannolikhetsbedömning	45
5.6	Konsekvensbedömning	48
5.7	Riskbedömning	50
5.8	Resultat	52
6	Diskussion	54
6.1	Utvärdering av riskkällor	54
6.2	Förslag på vattenskyddsområde	56
6.3	Metodens applicerbarhet i andra områden	57
6.4	Oförutsägbara händelser	58
7	Slutsats	59

Litteratur	60
A Appendix	I
A.1 Tabell för sannolikhetsbedömning	I
A.2 Tabell för konsekvensbedömning	II

Figurer

2.1	Jordlagerföljd under och över högsta kustlinjen.	6
2.2	Jordprofil för podsolfjord och brunjord.	7
2.3	Zonindelningen vid bassänginfiltration (Hanson, 2000). Omarbetad med tillstånd.	9
3.1	Flödesschema över huvudstegen i riskbedömning som del i en riskhanteringsprocess, (Eriksson m. fl., 2011). Återgiven med tillstånd. . .	10
4.1	Översiktlig bild över arbetsgångens sju steg	19
5.1	Karta som visar det studerade området, Fjärås Bräcka, markerat med en röd ring. (Google, 2024). Omarbetad.	24
5.2	Infiltrationsbassängerna vid Fjärås Bräcka.	25
5.3	Sektion genom grundvattenmagasinet i Fjärås Bräcka. (Påsse, 1986). Där den nedersta delen är berg, den streckade linjen visar grundvattenytan och den översta heldragna linjen representerar markytan. . .	26
5.4	Grundvattenmagasin och tillrinningsområde för magasinet i Fjärås Bräcka (Sveriges Geologiska Undersökning, u. å). CC-BY.	27
5.5	Karta över var riskkällorna A-R ligger i förhållande till Lygnern. . . .	29
5.6	Åkermark väster om grundvattenmagasinet.	31
5.7	Fjärås kyrkogård.	32
5.8	Badplats vid Fjärås Bräcka.	33
5.9	GIS-karta över djup till grundvattenytan.	35
5.10	GIS-karta över grundvattenbildning.	36
5.11	GIS-karta över akviferens material.	37
5.12	GIS-karta över jordmånens material.	39
5.13	GIS-karta över topografin.	40
5.14	GIS-karta över den omättade zonens material.	41
5.15	GIS-karta över hydraulisk konduktivitet i akvifermaterial.	42
5.16	GIS-karta över sårbara områden med avseende på DRASTIC-Index. .	43
5.17	GIS-karta över sårbara områden med avseende på horisontell transport beräknad med <i>Calculated Fixed Radius Method</i>	44
5.18	Befintligt vattenskyddsområde för yt- och grundvatten för Fjärås Bräcka vattentäkt. (Strandberg, 2020). Återgiven med tillstånd. . . .	45
5.19	Träddiagram över händelseförlopp för spridning av förorening från riskkälla till ytvattenuttaget i grundvattenmagasinet i Fjärås Bräcka.	46

5.20	Den slutgiltiga sårbarhetskartan som visar DRASTIC, horisontell transport och riskkällor.	52
5.21	Grundvattenmagasin och föreslaget vattenskyddsområde.	53
6.1	Framtagen riskmatris med förtydligade toleransnivåer och ALARP. . .	55

Tabeller

3.1	DRASTIC-parameterna för svenska förhållanden (Aller m. fl., 1987). Omarbetad med tillstånd.	14
4.2	Konsekvensbedömning för en vattensystemtjänst.	22
4.3	Beräkning av risk för en vattensystemtjänst.	22
5.1	Tillgängliga vattensystemtjänster i Fjärås Bräcka baserat på metodik från Gärtner m. fl. (2022).	28
5.2	Riskkällor A-U med motivering till varför de beaktas i riskbedömningen.	30
5.3	Intervall och poäng för DRASTIC-parameter D (Aller m. fl., 1987). . .	35
5.4	Intervall och poäng för DRASTIC-parameter R (L. Rosén, 1991). . .	36
5.5	Materialtyper och poäng för DRASTIC-parameter A (L. Rosén, 1994).	37
5.6	Materialtyper och poäng för DRASTIC-parameter S (L. Rosén, 1991).	39
5.7	Lutningsintervall och poäng för DRASTIC-parameter T (L. Rosén, 1991).	40
5.8	Materialtyper och poäng för DRASTIC-parameter I (L. Rosén, 1991).	41
5.9	Färgkod för sårbarhetskarta enligt DRASTIC (Aller m. fl., 1987) . . .	42
5.10	Sannolikhetskriterier och motsvarande sannolikhetsnivå.	47
5.11	Sannolikhetsindex och motsvarande sannolikhetsklasser.	48
5.12	Konsekvenskriterier och motsvarande konsekvensnivå.	48
5.13	Konsekvensindex och motsvarande konsekvensklasser.	49
5.14	Sannolikhetsindex, konsekvensindex och total risk för respektive risk- källa.	50
5.15	Framtagen riskmatris för riskbedömningen.	51
5.16	Framtagen riskmatris med riskkällor utplacerade utifrån riskbedöm- ningen.	52

1

Inledning

1.1 Bakgrund

En av våra viktigaste resurser är vatten, en naturresurs som ger förutsättningar för mänskligt liv, djur och natur såväl som ekonomisk tillväxt (Water resources group, 2009). År 2020 låg den totala vattenanvändningen från alla vattendistrikt i Sverige på över tre miljarder kubikmeter, varav 82,25 % av den totala vattenanvändningen avsåg sötvatten. Det största användningsområdet är jordbruk, följt av industri och hushållsanvändning (Statistikmyndigheten SCB, 2022). Ungefär hälften av det råvatten som används för dricksvattenproduktion kommer från grundvatten i Sverige. I många områden räcker vattentäkternas kapacitet, men när kapaciteten är otillräcklig kan konstgjord grundvattenbildning användas, vilket innebär att ytvatten pumpas till bassänger där vattnet sedan naturligt infiltreras (Sveriges Geologiska Undersökning, 2020f).

Utöver dricksvatten, tillhandahåller grundvattnet ett flertal vattensystemtjänster. En sådan tjänst har i tidigare studier definierats som de aspekter av dricksvattentäkter som bidrar till mänskligt välbefinnande (Gärtner m. fl., 2022). Denna definition används även i denna studien. Att säkra tillgången till rent vatten är en utmaning som behövs handskas med på alla beslutsfattande nivåer, både internationellt (Europaparlamentet, 2023) och nationellt. Tillgången till rent vatten i Sverige bedöms vara god, men för att bibehålla detta krävs en väl samordnad och ansvarsfull förvaltning av vattenresurserna (Sjöstrand m. fl., 2019).

För att stödja arbetet med att säkra världens vattenresurser togs *Water Safety Plan Manual* fram av Världshälsoorganisationen (WHO). Manualen som först kom ut 2011, reviderades senast år 2023. I båda versionerna läggs stor vikt vid riskbedömning i arbetet med att säkerställa hälsosamt dricksvatten. I flera delar av vattensektorn i Sverige ställs krav på att egenkontroll utförs med hjälp av HACCP-principerna som bygger på faroanalys och identifiering av kritiska styrpunkter (Olausson, 2007). Detta kravet är ställt med syfte att säkerställa säkra livsmedel (Svenskt vatten, 2023).

Det huvudsakliga ansvaret för dricksvattenproduktion samt förvaltning av mark och vatten ligger idag främst på kommunal planeringsnivå, med stöd ur plan- och bygglagen (Svensk författningssamling, 2010). Förvaltningen verkställs i praktiken via översiktsplaner, detaljplaner samt ur bygglov, rivningslov och marklov. Vattens-

resurser skyddas juridiskt med stöd av ett flertal lagar ur miljöbalken och EU:s ramdirektiv för vatten. I Sverige är ett sätt att implementera lagstiftningen som berör dricksvatten att införa vattenskyddsområden. Ett vattenskyddsområde är ett geografiskt område som inrättats av en kommun eller en länsstyrelse där speciella restriktioner med avseende att skydda vattnets kvalitet gäller (Svensk författningssamling, 1998:808).

I Sverige tillhandahåller Havs- och vattenmyndigheten (HaV) vägledning i *Vägledning om inrättande och förvaltning av vattenskyddsområden* (2021) som reviderades senast år 2011. Jämfört med Naturvårdsverkets tidigare gällande handbok *Handbok om vattenskyddsområde* (2011) läggs ett större fokus på riskbedömning som en del av arbetet med att inrätta ett vattenskyddsområde. Resultatet av riskbedömningen utgör sedan underlag för avgränsningen utav olika skyddszoner och som motivering för förslag på skyddsföreskrifter. Eftersom riskbedömningar kan göras på flera olika sätt lämnar myndigheten utrymme för val av metod. Detta motiveras med att underlätta genomförandet för varje enskilt fall eftersom vattentäkternas karaktär kan ha stor variation i olika delar av landet.

Generellt är syftet med riskbedömningar att ta fram information som kan användas som beslutsstöd för att avgöra om risken är stor nog att åtgärder behöver införas (Lindhe, 2010). Det är viktigt att poängtera att riskbedömningen i sig inte utgör hela underlaget, utan är ett steg i en riskhanteringsprocess (Eriksson m. fl., 2011). För själva utförandet av riskbedömningen kan flera olika metoder användas, kvantitativa, kvalitativa eller så kallade semi-kvantitativa. Trots att valet av metod är öppet, så bör det göras på ett systematiskt sätt och besvara följande frågor: (Eriksson m. fl., 2011).

1. Vad kan hända?
2. Varför och hur ofta kan det inträffa?
3. Vad blir konsekvensen?

Gemensamt för handböckerna som berör vattenskyddsområden är att de med stöd ur miljölagstiftningen främst syftar till att skydda vattentäkter som kan användas för dricksvattenförsörjning. Restriktionerna som ett vattenskyddsområde medför kan komma att påverka flera sakägare och ekosystem inom det geografiska området. Detta gör att riskbedömningen bör göras utifrån de tjänster som vattnet tillhandahåller. Riskbedömningen bör som tidigare nämnt göras på ett systematiskt sätt. Den vanligt förekommande HACCP-metoden som används i Sverige har visat sig mest tillämplig vid att bedöma risk vid dricksvattenproduktion i vattenreningsverken (Lindhe, 2010). För att bedöma risken som finns i ett geografiskt område kring en vattentäkt behövs mer anpassade metoder för ändamålet att skydda kvaliteten på vattnet med avseende på flera vattensystemtjänster (Gärtner m. fl., 2022). Slutligen behöver metoderna vara tillräckligt detaljerade och tekniska för att utgöra ett tillförlitligt underlag för inrättande av vattenskydd, samtidigt som metoden ska kunna användas med de resurser som finns tillgängliga hos kommuner och länsstyrelser.

1.2 Syfte och problemformulering

Syftet med arbetet är att ta fram en riskbedömningsmetod med avseende på grundvattenkvalitet, där kvaliteten bedöms utifrån en vald vattensystemtjänst. Resultatet från riskbedömningen är avsett att kunna utgöra en del av det underlag som behövs för utformningen av ett nytt vattenskyddsområde. Riskbedömningen utgörs av en semi-kvantitativ metod med riskrankning. Denna innefattar en utvärdering av sannolikhet, konsekvens och sårbarhet för området med avseende på hydrogeologiska och geologiska förutsättningar samt potentiella riskkällor.

Metoden utvecklas och utvärderas med hjälp av en fallstudie vid vattentäkten Fjärås Bräcka. Ett delmål med arbetet är därmed att kartlägga området och identifiera och utvärdera riskkällor i området. Ett annat delmål är att undersöka hur risk kan uttryckas med avseende på förorening av ett grundvattenmagasin med konstgjord infiltration. Slutligen så är ett delmål att ge förslag på ett vattenskyddsområde baserat på riskbedömningen. Detta för att uppfylla det huvudsakliga syftet med fallstudien, vilket är att testa den framtagna metodens validitet och användbarhet.

Arbetet syftar även till att diskutera den framtagna metodens applicerbarhet i andra områden och att jämföra det föreslagna vattenskyddsområdet med det befintliga vattenskyddsområdet som inrättades år 2013 (Länsstyrelsen Hallands Län, 2012).

1.3 Avgränsningar

I detta arbete har ett antal avgränsningar av olika slag gjorts med hänsyn till arbetets omfattning. En geografisk avgränsning är att riskbedömningen endast utförs för de riskkällor som ligger inom de angivna tillrinningsområdena för grundvattenmagasinet och ytvattnet. Nämnvärt är att endast befintliga lokala riskkällor har bedömts med den framtagna riskbedömningsmetoden. Oförutsägbara händelser som kan påverka grundvattenmagasinet diskuteras endast i det avslutande diskussionskapitlet.

En avgränsning som gjordes i fallstudiens riskbedömning är att endast vattensystemtjänsten dricksvatten beaktades. Detta har påverkat hur kvaliteten på vattnet i grundvattenmagasinet bedömts. Utvärderingen av kvaliteten görs endast vid magasinets råvattenuttag och inte i samtliga delar av grundvattenmagasinet. Vidare togs ingen hänsyn till att råvattnet passerar ett reningsverk innan det distribueras till konsumenterna.

I arbetet är spridningssätten för föroreningarna en väsentlig del. Avgränsningar som gjorts kring detta är att föroreningar antas färdas på samma sätt som vatten. I fallstudien har eventuell inducerad infiltration bortsetts från.

En annan viktig del i arbetet är att undersöka hur riskbedömning kan utgöra underlag vid inrättande av vattenskyddsområden. En avgränsning som gjorts i fallstudien

kring detta är att förslag på skyddsområde endast utformas för grundvattenmagasinet och inte för ytvattnet. Inga detaljerade åtgärdsförslag eller skyddszoner etableras heller då arbetets fokus är på riskbedömningen.

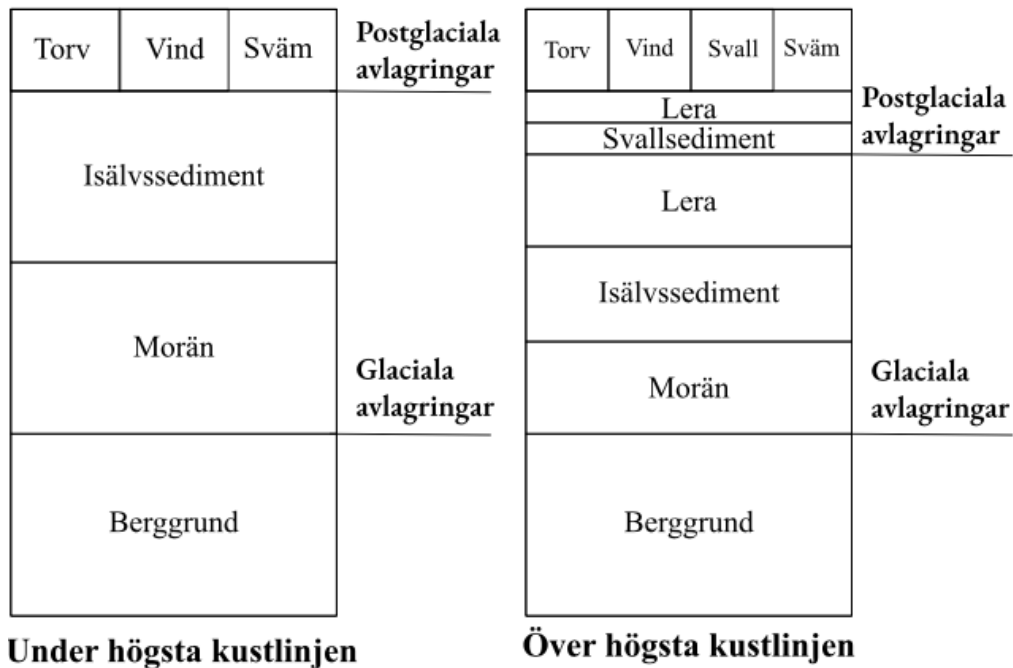
2

Förutsättningar för vattenförsörjning

2.1 Geologisk beskrivning

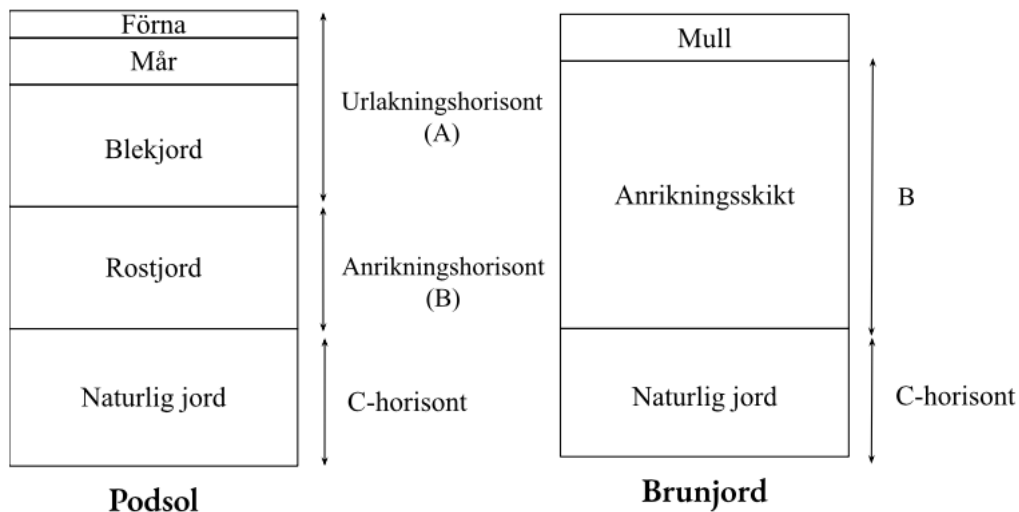
Många av jordarterna i Sverige bildades under istiden (Sveriges Geologiska Undersökning, 2020e). När isen smälte bildades isälvar som transporterade material och när strömhastigheten avtog efterlämnades isälvssediment. Isälvssedimenten består mestadels av sand och grus (Sveriges Geologiska Undersökning, 2020d). Finare material, såsom lera och silt, sedimenteras under ännu lägre hastigheter, oftast på havs- och sjöbottnar. När isens front periodvis avstannade kunde randbilningar bildas genom att morän och isälvssediment avsattes vid en nära nog stillastående isfront (Ljung, 2000). I de fall där randbildningen utgörs av isälvsmaterial kan stora akviferer finnas. Många av dessa är idag viktiga för dricksvattenförsörjning. I Sverige hittas grundvattenmagasin huvudsakligen i grus- och sandavlagringar (Sveriges Geologiska Undersökning, 2020c).

Under istiden utsattes jordskorpan för ett högt tryck, vilket resulterade i en nedpressad jordskorpa som hamnade under havsnivån (Sveriges Geologiska Undersökning, 2022). Nivån som havet uppgick till under istiden kallas för den högsta kustlinjen och jordlagerföljden varierar beroende på om området befann sig under eller över högsta kustlinjen, vilket illustreras i figur 2.1.



Figur 2.1: Jordlagerföljd under och över högsta kustlinjen.

När jordarterna påverkas av processer, såsom vittring eller podsolering, kan en jordmån bildas (Andréasson, 2015). Ungefär 70 % av Sveriges mark består av jordmånen podsol (Naturskyddsföreningen, 2021) och den kan delas in i olika lager. Övre delen av podsolen består av förna och humus som bryter ned organiskt material (Hanson, 2000). I blekjorden, som befinner sig under humuslagret, ökar alkaliniteten, pH samt hårdheten på det infiltrerande vattnet, detta på grund av olika vittringsprocesser. Organiskt material avskiljs ytterligare i rostjorden och i C-horisonten. Brunjord täcker ungefär 12% av jordens yta (Britannica, 2011) och denna jordmån finns huvudsakligen i södra delar av Sverige (Andréasson, 2015). Brunjorden består av förna, mull, en urlakningshorisont och en anrikningshorisont. Jordmånen kännetecknas av att vara näringsrik med mycket mikroorganismer och ett högt pH (Naturskyddsföreningen, 2021). I figur 2.2 visas en podsol- och en brunjordsprofil, som illustrerats med hjälp av boken Geobiosfären (Andréasson, 2015).



Figur 2.2: Jordprofil för podsoljord och brunjord.

Hur jordmånen och den underliggande opåverkade mineraljorden ser ut har stor betydelse för spridningen av föroreningar i marken (Nilsson m. fl., 2005). Exempelvis kan ett spricksystem i torrskorpan tillåta föroreningar att infiltrera. Även jorden under torrskorpan har en stor betydelse för föroreningsspridning. Genomsläppligheten, den hydrauliska konduktiviteten, den effektiva porositeten samt den hydrauliska gradienten (grundvattenytans lutning) är faktorer som påverkar flödes hastigheten. Sannolikheten för en snabb och omfattande påverkan på ett skyddsobjekt (exempelvis en vattentäkt) vid utsläpp av en förorening är generellt högre om flödes hastigheten är hög.

2.2 Hydrogeologisk beskrivning

Dricksvatten är en livsnödvändig tillgång för människan och i Sverige tas nästan hälften av allt kommunalt producerat dricksvatten från grundvatten (Hanson, 2000). Grundvatten bildas huvudsakligen genom att vatten från nederbörd infiltrerar marken (Eveborn m.fl, 2017). Vid nederbörd avdunstar en del av vattnet genom transpiration och evaporation, en del rinner även vidare som ytavrinning. Om inget impermeabelt jordlager hindrar kommer en del nederbörd perkolera ned efter att jorden har blivit mättad. Grundvattenbildningen varierar under året och är oftast högst under hösten. Detta på grund av ökad nederbörd samt lägre temperatur och minskad avdunstning. Den kan även vara hög under tidig vår på grund av snö- och ismältning (Sveriges Geologiska Undersökning, 2024a). Till följd av de höga respektive låga temperaturerna under sommaren och vintern är grundvattenbildningen lägre, vilket ökar sannolikheten att en grundvattentorka uppstår.

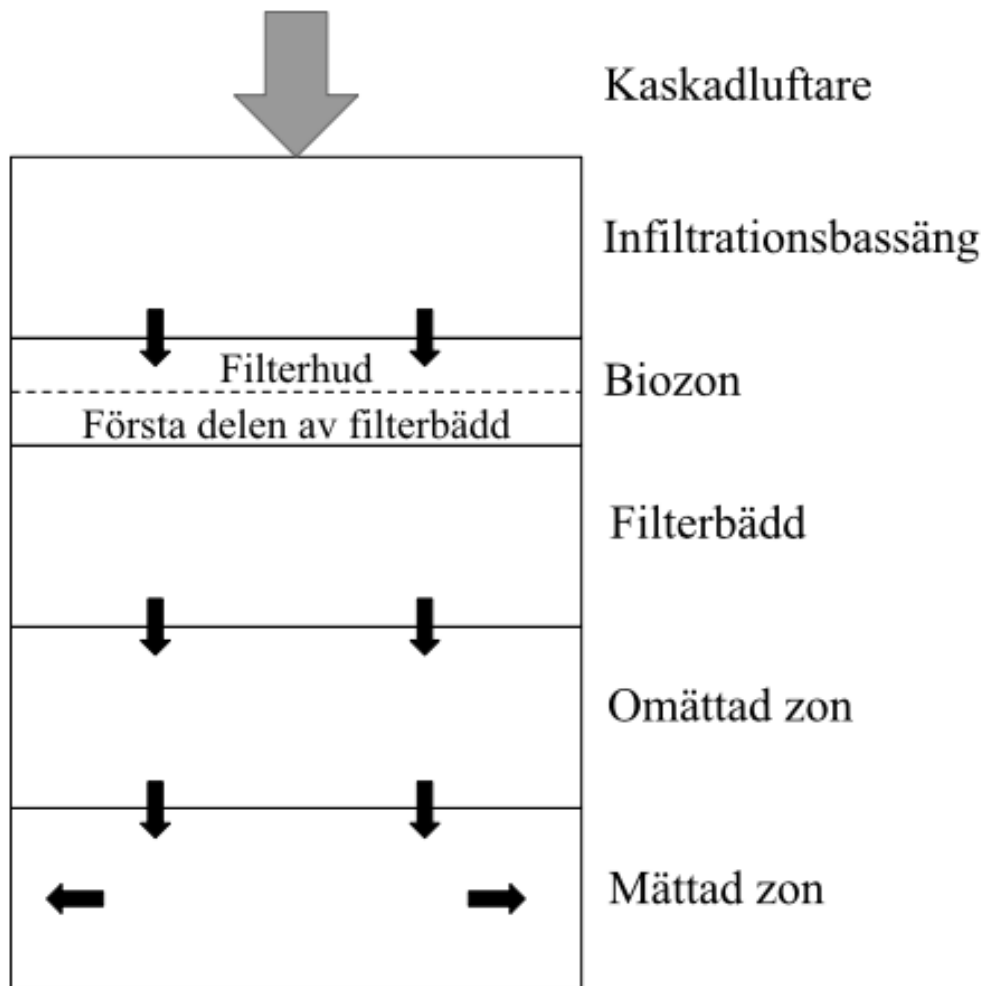
Det finns huvudsakligen två hydrauliska typer av grundvattenmagasin, öppna och slutna (Sveriges Geologiska Undersökning, 2019). Det öppna grundvattenmagasinet är i direkt kontakt med markytan och har en fri grundvattenyta, dvs grundvattenytans trycknivå är lika med atmosfärstrycket. I ett slutet magasin skiljs markytan

åt genom ett tätt lager vilket kan göra att magasinet saknar en fri grundvattenyta. Grundvattnets rörelser påverkas huvudsakligen av tryck-, gravitation- och friktionskrafter (Grip & Rodhe, 2016). Hastigheten på grundvattnet varierar men är liten vid stora djup (Nationalencyklopedin, u. å). Den låga hastigheten kan medföra att föroreningar uppehåller sig i grundvattnet under en lång period.

2.2.1 Konstgjord infiltration

Den naturliga grundvattenbildningen kan förstärkas för att öka ett magasins uttagskapacitet. Ungefär en millimeter vatten per dag infiltrerar naturligt och den konstgjorda infiltrationen kan infiltrera runt 2000 millimeter vatten per dag (Hanson, 2000). Den vanligaste metoden för konstgjord infiltration är bassänginfiltration men i Sverige används även andra metoder, exempelvis sprinkler-, djup- och inducerad infiltration.

Infiltrationsbassänger anläggs oftast på ytor med permeabla jordarter, exempelvis sand, där vattnet lätt kan tränga igenom (Hägg m. fl., 2018). Ytvattnet som används i bassängerna tas från en närliggande och lämplig vattentäkt. Transporten kan ske genom en så kallad kaskadluftare som syresätter vattnet, vilket främjar nedbrytningen av organiskt material och även andra föroreningar (Hanson, 2000). Infiltrationsbassängen brukar bestå av ett sandfilter som fångar upp olika partiklar och föroreningar. Efter en viss tid, då flera partiklar fastnat i filtret, bildas en filterhud. Filter huden tillsammans med den första delen av filterbädden kallas för biozon och renar vattnet ytterligare genom att bland annat avskilja organiskt material och fälla ut metaller. Även i resterande del av filterbädden, som oftast består av sand, renas organiskt material och andra föroreningar bort. Vattnet infiltrerar därefter ned i den omättade zonen som består av naturliga jordlager. I denna zon sker processer såsom jonbyte och buffring. Från den omättade zonen perkolerar vattnet ned till den mättade zonen, vilket är zonen som grundvattnet befinner sig i. Det infiltrerade vattnet blandas med grundvattnet vilket kan resultera i ökade mängder av ämnen såsom järn och mangan. Även i denna zon avskiljs organiskt material. Figur 2.3 illustrerar hur bassänginfiltration kan se ut.



Figur 2.3: Zonindelningen vid bassänginfiltration (Hanson, 2000). Omarbetad med tillstånd.

2.2.2 Föroreningar i grundvatten

Vatten har historiskt sett används i många industrier i flertalet olika processer (Nilsson m. fl., 2005). Detta har medfört att industrier därför placerats i anslutning till vattendrag, vilket ökar risken att en förorening sprids ned till en eventuell grundvattentäkt. Densiteten på föroreningen påverkar hur den transporteras genom marken. Transporten sker huvudsakligen genom jordprofilen om densiteten är hög och lösligheten är tillräckligt. För föroreningar som är lösliga sker transporten istället med vattnet. Föroreningarna kan överlag delas in i fyra olika grupper;

1. Light non-aqueous phase liquids (LNAPL)
2. Dense non-aqueous phase liquids (DNAPL)
3. Tungmetaller
4. Vattentrogna ämnen

LNAPL och DNAPL är petroleumkolväten som är lättare respektive tyngre än vatten. Vattentrogna ämnen är ämnen som varken bryts ner eller fastläggs (B. Rosén, 2006).

3

Risk och vattenskydd

3.1 Riskbedömning och metoder

Riskbedömningar utgör en del i riskhanteringsprocessen och syftar generellt till att möjliggöra bedömning av huruvida risken är på en acceptabel nivå eller om åtgärder behöver införas längre fram i processen (Lindhe, 2010). Riskbedömningen består i sin tur av flera delsteg. I en modell över riskhantering av Eriksson m. fl. (2011) utgörs de tre huvudsakliga momenten av identifiering, analys och utvärdering av risker, vilket illustreras i figur 3.1.



Figur 3.1: Flödesschema över huvudstegen i riskbedömning som del i en riskhanteringsprocess, (Eriksson m. fl., 2011). Återgiven med tillstånd.

Riskbedömningsmetoder delas vanligen in i kvalitativa, kvantitativa eller semi-kvalitativa (Burgman, 2005). De olika typerna av metoder syftar till antingen i ord eller siffror beskriva risken som utgörs. En kvalitativ metod kan vara baserad på att sakkunniga deltar i workshops eller seminarier. En kvantitativ metod är baserad på numerisk data och en matematisk definition av begreppen sannolikhet, konsekvens och risk. De kvantitativa metoderna hanterar statistiska begrepp som osäkerhet, konfidensintervall och fördelning bättre än de kvalitativa metoderna men ställer väsentligt mycket högre krav på kunskap och resurser hos användaren. En semi-kvalitativ metod innebär ofta att någon form av riskrankning utförs, där ett index för exempelvis sannolikhet och konsekvens sätts utifrån kvalitativa antaganden gjorda av experter.

I Sverige används HACCP-metoden (The Hazard Analysis Critical Control Points system) för att säkerställa god kvalitet av livsmedel (Olausson, 2007). Metoden togs ursprungligen fram på 1960-talet för att säkerställa god kvalitet av livsmedel vid rymdfärder (Hamilton m. fl., 2006). Arbetssättet implementerades sedan i livsmedelsindustrin (Codex Alimentarius Commission, 2003) och år 1994 tillämpades den

för första gången inom dricksvattensektorn (Havelaar, 1994; Lindhe, 2010). År 2023 publicerade Världshälsoorganisationen den senaste versionen av handboken *Water Safety Plan Manual*, vars föregångare från år 2004 har influerat Livsmedelsverkets handbok *Risk- och sårbarhetsanalys för dricksvattenförsörjning* (2007). Livsmedelsverkets handbok presenterar ett systematiskt sätt att arbeta med riskhantering, där risk- och sårbarhetsanalyser är steg i processen.

Handboken *Risk- och sårbarhetsanalys för dricksvattenförsörjning* (Olausson, 2007) presenterar ett systematiskt sätt att semi-kvalitativt klassa sannolikheten att ett utsläpp sker samt utsläppets konsekvensnivå. Klassificeringen görs ofta utifrån kvalitativa antaganden gjorda av experter. Antaganden är baserade på kännedom om förekomst i branschen samt kvaliteten på vattnet utifrån det aktuella användningsområdet. Den översätts sedan till ett index på en skala från ett till fyra. Konsekvensindexet och sannolikhetsindexet multipliceras ihop till ett riskindex som redovisas i en matris. När riskkällorna har placerats in i riskmatrisen kan en bedömning göras av huruvida risknivån är acceptabel eller inte, och beslut om åtgärder kan tas i det fortsatta arbetet med riskhantering (Eriksson m. fl., 2011).

Vid utformning av toleransnivåer och färgsättning av en riskmatris är det viktigt att begrunda om en hög sannolikhet och en hög konsekvens väger lika tungt (Burgman, 2005). Det är vanligt att konsekvensen bedöms tyngre än sannolikheten eftersom en osannolik händelse kan ha konsekvenser som är så pass allvarliga att de kräver noggrann beaktning. Däremot kräver inte en händelse som har hög sannolikhet men minimala konsekvenser lika noggrant hänsynstagande. Det kan exempelvis handla om en händelse vars konsekvens leder till att ett hel art dör ut. Även fast sannolikheten är låg att händelsen sker krävs åtgärder eftersom konsekvensen är allvarlig.

Fortsättningsvis är principen *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP) ett tillämpligt sätt att beskriva olika toleransnivåer i en riskmatris (Melchers, 2001). Syftet med ALARP är att minimera de potentiella riskerna till en nivå där fördelarna med ytterligare minskning av risken är i balans med besväret, tiden, kostanden och de fysiska utmaningarna som åtgärderna medför. En viktig del i ALARP är att identifiera toleransnivåer, med en övre och en undre gräns. Området mellan dessa extremer motsvarar en utgångspunkt där fördelarna med vidare riskminskning är proportionerliga mot de ansträngningar och kostnader som åtgärderna kräver. Detta område kallas för ALARP.

3.2 Sårbarhet

Sårbarhet är ett begrepp inom näringslivet och de verksamheter där riskhanteringsarbete förekommer (Aven, 2007). Trots den vida användningen tycks ordets flera definitioner vara tvetydiga (Haimes, 2006; Johansson och Hassel, 2010). En vanlig definition är att sårbarheten uttrycker graden av påverkan från en negativ konsekvens, en definition som kommer väldigt nära vissa definitioner av risk (Johansson & Hassel, 2010). Vid en annan definition av begreppet kan ordet användas för att

beskriva en sårbar del i ett system, där ett haveri av denna del skulle leda till stora negativa konsekvenser. Denna komponent av systemet sägs då vara systemets sårbarhet (Johansson & Hassel, 2010). För en vattentäkt skulle denna definition exempelvis kunna innebära att det geografiska området utgör systemet och markens hydrogeologiska egenskaper utgör systemets sårbarhet med avseende på grundvattenkvaliteten. Detta eftersom det är dessa egenskaper som möjliggör spridningen av ett föroreningsämne.

För bedömning av vattentäkters sårbarhet har flera metoder tagits fram, både kvalitativa och kvantitativa (L. Rosén, 1991). En vedertagen metodik att tillämpa är DRASTIC vars resultat presenteras i form av ett sårbarhetsindex (L. Rosén, 1994). Metodiken för bedömning av sårbarhet bör väljas med omsorg. En frågeställning som bör tas upp vid val av metodik är i vilken aspekt sårbarheten ska bedömas (Dilley & Boudreau, 2001). Exempelvis uttrycker DRASTIC-metoden sårbarhet med avseende på hur enkelt en förorening transporteras vertikalt ned till grundvattenytan. Om syftet istället är att betrakta sårbarheten för att mängden vatten i vattentäkten minskar bör en annan metod tillämpas. Slutligen behövs även definitionen av begreppet sårbarhet specificeras när man ålägger sig att göra en sårbarhetsanalys.

3.3 Oförutsägbara händelser

Vid identifiering av föroreningskällor finns det ett antal oförutsägbara händelser som oavsett plats alltid behöver tas i beaktning. Dessa källor är inga punktkällor utan kan ske i alla delar av ett område och kan på grund av detta vara svåra att riskbedöma. Oförutsägbara händelser kan exempelvis vara:

- Brand
- Kris
- Krig
- Sabotage

Brand kan både inträffa i byggnader och i utomhusmiljö, och kan ha en stor inverkan på den närliggande miljön. Vid brand kan förorenade partiklar bildas som sedan tränger ner i marken vid släckning med stora mängder vatten (Iverfelt, 2014). Ett av de största problemen med brand är dock användningen av brandskum som innehåller höga halter med *Per- och polyflourerade alkylsubstanser* (PFAS) (Andersson, 2022). Forskning visar att PFAS kan ha en negativ påverkan på immunförsvaret och det kan även försämra effekten hos leverceller, blodfetter och vacciner.

Definitionen av kris är en händelse som inträffar plötsligt och som kan medföra stora konsekvenser (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2024). Vid kris är det ofta väsentligt att invånarna samarbetar för att försöka hantera och lösa krisen. Några exempel på krissituationer som kan inträffa i Sverige är; kärnkraftsolyckor, naturkatastrofer (Sara Morge, 1999), pandemier (Mittermaier m. fl., 2020) och ekonomiska kriser (Haglund, 2010).

En annan händelse som kan ha stor påverkan på kvaliteten på grundvattnet är krig. Under en krigssituation kan intresset för att förstöra dricksvattenproduktionen i landet vara stort från motstridande parter (Kristianstads kommun, 2023). Det kan exempelvis handla om förstörelse på fasta installation som infiltrationsbassänger eller pumpar för upptag av råvatten.

Grundvattenkvaliteten kan även utsättas för sabotage utanför krissituationer. Det kan handla om sabotage i form av terrorism, aktivism eller enskilda aktörer (Kristianstads kommun, 2023). För att skydda grundvattenmagasin från olika typer av sabotage och skadegörelse finns föreskrifter framtagna av Livsmedelsverket som har till uppdrag att skydda dricksvattenanläggningar (Livsmedelsverket, 2022). Föreskrifterna ska följas av vattenverk som försörjer mer än 2000 personer med dricksvatten. De innefattar bland annat att anläggningar kopplade till dricksvattenproduktion ska skyddas från obehöriga personer. Föreskrifterna kräver även att vattenverken har en plan över hur skadegörelse kan upptäckas och potentiella åtgärdesplaner ska finnas.

3.4 Klimatförändringar

Klimatförändringarna har under de senaste åren haft stor påverkan på jordens klimat (Sveriges Geologiska Undersökning, 2024a). Den globala uppvärmningen kan resultera i en minskad och förändrad grundvattenbildning. Utöver detta kan även andra faktorer, såsom nederbörd, påverkas av klimatförändringarna. En ökad nederbörd kan bland annat medföra mer ytavrinning, erosion och översvämningar som i sin tur kan öka sannolikheten för föroreningsspredning. Ytterligare en konsekvens av klimatförändringarna med avseende på grundvattnet är högre temperaturer och torrare mark (Nilsson m. fl., 2005). Torkan kan orsaka spricknät i marken som fungerar som transportväg för föroreningar.

Enligt Sveriges Geologiska Undersökning (2024a) kommer klimatförändringarna även att orsaka en höjning av årsmedelnivåerna i grundvattenmagasin i större delen av Sverige. En ändring av grundvattennivån kan innebära förändrad vattenkvalitet, vilket kan ske som en följd av förändrade redoxförhållanden. En annan konsekvens som högre grundvattennivåer kan resultera i är att föroreningar med större sannolikhet transportas ned med vattnets flöde till grundvattenmagasin (Sveriges Geologiska Undersökning, 2021).

3.5 DRASTIC

DRASTIC är en vedertagen klassificeringsmetod som bedömer markens sårbarhet (Aller m. fl., 1987). Metoden skapades i USA under slutet av 1980-talet för att underlätta arbetet med att utvärdera risken för att mark och grundvatten blir förorenat. Metoden bygger på följande sju parametrar:

- D – Djup till grundvattenytan

- R – Grundvattenbildning
- A – Material i akviferen
- S – Material i jordmånen
- T – Topografi
- I – Material i den omättade zonen, under jordmånen
- C – Hydraulisk konduktivitet i akvifermaterialet

Med hjälp av tabell 3.1 viktas därefter dessa parametrar från ett till fem, där en högre siffra innebär en större risk för grundvattentäkten.

Tabell 3.1: DRASTIC-parameterna för svenska förhållanden (Aller m. fl., 1987). Omarbetad med tillstånd.

Index	Parameter	Vikt
D	Djup till grundvattenytan	5
R	Grundvattenbildning	4
A	Material i akviferen	3
S	Material i jordmån	2
T	Topografi	1
I	Material i den omättade zonen, under jordmånen	5
C	Hydraulisk konduktivitet i akvifermaterialet	3

För att kunna applicera DRASTIC behöver fyra villkor uppfyllas (Aller m. fl., 1987). De är hämtade från L. Rosén (1991, sidan 17) och är följande;

- Föroreningen appliceras på markytan
- Föroreningen infiltrerar tillsammans med nederbörden
- Föroreningen har ungefär samma rörlighet som vatten i mark
- De utvärderade områdena är ca 40 ha, dvs ca 600 x 600 meter, eller större.

3.5.1 D - Djup till Grundvattenyta

Parameter D beskriver djupet till grundvattenytan, det vill säga avståndet mellan markytan och grundvattenytan (Aller m. fl., 1987). Det är den sträcka som en potentiell förorening transporteras innan den når grundvattnet. Denna sträcka kan även bestämma den potentiella kontakttiden med omkringliggande material. Djupet till grundvattnet kombinerat med materialets egenskaper och grundvattenbildningen avgör vattnets uppehållstid i den omättade zonen. Grundvattnets djup är även viktigt eftersom ett större djup ökar sannolikheten för oxidation med atmosfärens syre. Metodiken för att bestämma parameter D är simpel i utförandet men är beroende av att data för grundvattennivå och marknivå finns tillgängligt från bland annat brunnslögar och kartor.

3.5.2 R - Grundvattenbildning

Grundvattenbildningen avser den mängd vatten per areaenhet som når grundvattenmagasinet (Aller m. fl., 1987). Den huvudsakliga resursen för grundvattenbildning är nederbörd som infiltrerar markytan och jorden ner till grundvattnet. Vatten kan även infiltrera från exempelvis närliggande vattendrag. Enligt Aller m. fl., 1987 ökar sårbarheten vid högre grundvattenbildning, fram tills att grundvattenbildningen är tillräckligt hög för att de potentiella föroreningarna istället utspäds. Metodiken för att bestämma parameter R skiljer sig från andra DRASTIC-parametrar eftersom information om en akvifers grundvattenbildning inte är enkel att fastställa. Värden för grundvattenbildning kan kräva komplexa vattenbalansuträkningar som tar hänsyn till bevattning, inducerad infiltration, permeabilitet, växtlighet och ett flertal andra faktorer. Om data för ett specifikt område inte är tillgängligt kan ungefärliga värden från ett angränsande område extrapoleras till det önskade området.

3.5.3 A - Akviferens Material

Akviferens material beskriver materialet som akviferen befinner sig i. De parametrar som är betydande för förhindrande av föroreningars spridning är porositet, kornstorlek, form och fördelning av kornen, kemisk sammansättning samt sprickbildning (Aller m. fl., 1987). Data för akviferens material finns i hydrologiska och geologiska rapporter eller undersökningar. Om ingen data hittas på den önskade platsen behövs en fältstudie utföras med hjälp av borrhål.

3.5.4 S - Jordmån

Materialet i jordmån syftar till den översta delen av den omättade zonen som har signifikant biologisk aktivitet (Aller m. fl., 1987). Jordmånen har en stor påverkan på hur mycket vatten som kan infiltrera och därmed nå grundvattnet. Stora mängder silt och lera minskar jordens permeabilitet och ökar den specifika ytan och möjligheten för fastläggning av föroreningar (Foster, 1987). Precis som akviferens material kan man finna jordmånens material i hydrologiska och geologiska rapporter eller undersökningar eller sammanställda i jordmånskartor (Sveriges Geologiska Undersökning, 2024b).

3.5.5 T - Topografi

Med topografi menas sluttningen på marken och hur den varierar i området. Topografin är viktig eftersom den kontrollerar om föroreningen infiltrerar i marken eller rinner bort (Aller m. fl., 1987). Sårbarheten minskar för marken med ökad ytavrinning. För att få fram topografisk data används *Lantmäteriets topografiska karta* som tagits fram med hjälp av automatisk generalisering (Lantmäteriet, 2022). Uppdaterad data kan där laddas ner som en *raster* för att användas i GIS-program

(Lantmäteriet, 2024).

3.5.6 I - Omättade zonen material under jordmånen

Den omättade zonen material under jordmånen avser materialet som ligger ovan grundvattenytan och som antingen är omättad eller temporärt mättad (Aller m. fl., 1987). Den omättade zonen material har stor betydelse för skydd av grundvatten från föroreningar tack vare dess möjlighet att fördröja och bryta ned olika föroreningar genom ett antal processer (L. Rosén, 1991). Jordar med större kornstorlek och sprickor innebär en större risk för att föroreningar ska spridas ned till grundvattenmagasin (Aller m. fl., 1987). Precis som jordmån och akviferens material kan denna parameter bestämmas med hjälp av rapporter och undersökningar.

3.5.7 C - Hydraulisk Konduktivitet i Akvifermaterial

Den hydrauliska konduktiviteten, även kallat permeabilitet, beskriver ett materials förmåga att leda vatten. Permeabiliteten påverkas av ett flertal faktorer exempelvis kornstorlek, porositet och sprickor (Wilson, 1982). Ett material med en hög permeabilitet medför en ökad risk för förorenat grundvatten (Aller m. fl., 1987). Den hydrauliska konduktiviteten kan bestämmas med hjälp av olika fältförsök. Några exempel är triaxialtest och odometer (Larsson, 2008)

3.6 Vattensystemtjänster

Vattensystemtjänster är baserat på konceptet ekosystemtjänster och kan delas in i: försörjande, reglerande och kulturella vattensystemtjänster (Gärtner m. fl., 2022). De försörjande vattensystemtjänsterna utgör grunden för mänsklighetens överlevnad (Gärtner m. fl., 2022). Det mest självklara exemplet på en försörjande vattensystemtjänst är dricksvatten. Andra exempel på försörjande tjänster är dricksvatten till djur och bevattning till trädgårdar.

Reglerande vattensystemtjänster är tjänster som finns till för att bibehålla en balans i ekosystemen (Gärtner m. fl., 2022). Exempel på reglerande vattensystemtjänster är förebyggande av sättningar samt reglering av lokal temperatur och fuktighet.

Kulturella vattensystemtjänster bidrar med icke-materiella fördelar för mänskligheten (Gärtner m. fl., 2022). Två exempel på kulturella vattensystemtjänster är rekreation från vistelse i naturen och från att uppleva vacker natur runt vattenkällan.

3.7 Vattenskyddsområde

Vattenskyddsområden är geografiskt avgränsade områden vars syfte är att skydda nuvarande och potentiellt framtida vattentäkter från verksamheter som kan påverka vattnet negativt. Vattenskyddsområden upprättas där det finns signifikant grund- eller ytvattentillgång (Havs- och Vattenmyndigheten, 2020). Upprättande av sådana områden är ett förebyggande medel som kan förbjuda nya verksamheter och begränsa redan existerande verksamheter. Varje vattenskyddsområde kan innefatta så kallade vattenskyddsföreskrifter, som vid behov kompletterar den grundläggande miljölagstiftningen. Ett vattenskyddsområde bör upprättas i god tid innan råvattnets kvalitet riskerar att försämrans. Ett vattenskyddsområde kan upprättas för att skydda potentiellt dricksvatten, men även i syfte att skydda grundvatten som är viktigt för jordbruk, industri, ekosystem och miljö.

Kommunerna ansvarar för att markera ut vattenskyddsområden med skyltar. Dessa skyltar informerar allmänheten om att de nu befinner sig inom ett vattenskyddsområde och att om en olycka sker ska räddningstjänsten larmas via 112.

3.7.1 Upprättandet av vattenskyddsområden

Ett vattenskyddsområde upprättas av antingen länsstyrelsen eller kommunen med stöd från miljöbalken, specifikt med hjälp av 7 kap. 21§. Ett vattenskyddsområde bör upprättas kring en vattentäkt om den antingen levererar dricksvatten till minst 50 personer eller mer än 10 m³ vatten per dygn enligt EU:s ramdirektiv för vatten. Upprättande av vattenskyddsområden ingår även som ett delmål i de svenska miljö kvalitetsmålen (Miva, 2023). Havs- och vattenmyndigheten (2021), används som utgångspunkt för att inrätta vattenskyddsområden. Ett systematiskt arbetssätt för att identifiera risker som sedan analyseras och värderas föreslås. Slutsatserna från riskbedömningen vägleder sedan avgränsning och zonindelning för vattenskyddsområdet samt dess föreskrifter.

När ett vattenskyddsområde är upprättat innebär det att en kontinuerlig övervakning behövs inom området (Havs- och Vattenmyndigheten, 2020). Övervakningen är till för att kontrollera att verksamheter bedrivs enligt föreskrifter, samt att allmänheten som vistas i området agerar inom föreskrifterna och potentiella bestämmelser (Havs- och Vattenmyndigheten, 2020).

3.7.2 Föreskrifter och bestämmelser

När ett beslut om vattenskyddsområde tas ska det innehålla föreskrifter som är utformade för att tillgodose det huvudsakliga syftet området har för människan (Havs- och vattenmyndigheten, 2021). Föreskrifterna varierar för alla vattenskyddsområden eftersom de skraddarsys efter områdets sårbarhet, potentiella risker och anledningen till vattenskyddsområdets upprättande (Havs- och vattenmyndigheten, 2021). Föreskrifterna måste vara utformade på ett sätt så att det inte råder några tveksamheter om innebörden av dessa. Det är viktigt att alla berörda mark- och sakägare samt

myndigheterna förstår regleringarna (Havs- och vattenmyndigheten, 2021). Föreskrifterna kan i vissa fall variera mellan den primära och sekundära skyddszonen, men de kan likaså vara samma i båda. Föreskrifterna kan delas upp i kategorier beroende på vad som begränsas.

Utöver de områdesspecifika föreskrifterna finns det generella föreskrifter som gäller för alla vattenskyddsområden. Dessa föreskrifter behandlar hantering och spridning av växtskyddsmedel samt hantering av spilloljor och brandfarliga vätskor (Havs- och vattenmyndigheten, 2021).

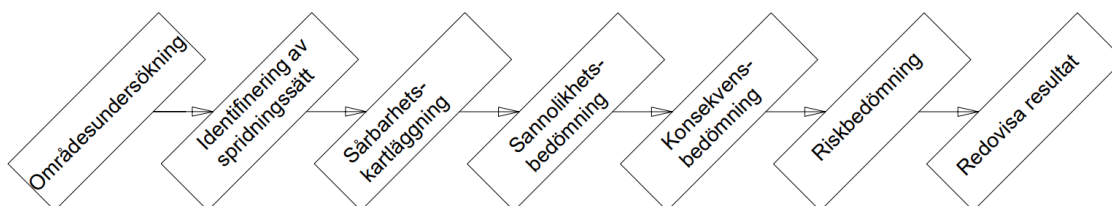
Ungefär 75% av de svenska grundvattentäkterna och 40% av ytvattentäkterna är skyddade av vattenskyddsområden (Havs- och vattenmyndigheten, 2018). Många av de befintliga vattenskyddsområdena är utformade enligt gamla lagstiftningar (Sveriges Geologiska Undersökning, 2020a). På grund av detta behövs en översyn göras för att uppdatera potentiellt ineffektiva skyddsområden.

4

Metod

I detta arbete har följande metod tagits fram och därefter följts, i syfte att på ett systematiskt sätt uttrycka risken som föreligger för Fjärås Bräckas grundvattenmagasin. Metoden som presenteras beaktar sårbarhet, sannolikhet och konsekvens med avseende på grundvattenkvalitet. Den framtagna metodiken innebär i korthet att sårbarheten i området utvärderas och integreras i en riskrankning baserad på kvalitativa antaganden.

Sju steg ingår i arbetsprocessen och resulterar i att riskällor är identifierade och riskklassificerade samt att sårbarheten i området är kartlagd. Resultatet utgörs därmed av ett antal kartor och en riskmatris som syftar till att utgöra underlag vid inrättande och framtida förvaltning av ett vattenskyddsområde. De sju arbetsmomenten är följande:



Figur 4.1: Översiktlig bild över arbetsgångens sju steg

1. **Områdesundersökning:** Undersök områdets hydrogeologiska förhållanden och de lokala riskkällorna. Identifiera även de vattensystemtjänster som är aktuella i området och välj vilken som ska undersökas.
2. **Identifiering av spridningssätt:** Identifiera möjliga spridningssätt för föroreningar att nå grundvattenmagasinet.
3. **Sårbarhetskartläggning:** Välj ut metoder för bedömning av sårbarhet kopplat till spridningssätten. Ta fram GIS-kartor som visar sårbarheten för varje spridningssätt. Kartorna kommer utöver att visa sårbarheten att användas för att beräkna sannolikhetsindexet för vardera riskkälla.
4. **Sannolikhetsbedömning:** Definiera händelseförlopp och spridningsvägar från de riskkällor som finns i området till grundvattenmagasinet. Skapa en bedömningstabell för huruvida ett utsläpp sker, som översätter kvalitativa kategorier till en sannolikhetsnivå. Uppskatta även sannolikheten för spridning och beräkna sannolikhetsindexet för vardera riskkälla.

5. **Konsekvensbedömning:** Skapa en konsekvensbedömningstabell som översätter kvalitativa kategorier till en konsekvensnivå. Beräkna sedan det totala konsekvensindexet för vardera riskkälla.
6. **Riskbedömning:** Beräkna risken som utgörs för de ingående riskällorna i området och redovisa resultaten i en riskmatris.
7. **Redovisning och utvärdering av resultat:** Redovisa resultatet som utgörs av ett antal GIS-kartor samt en riskmatris. De olika GIS-kartorna redovisar sårbarheten kopplad till vardera spridningssätt. Riskmatrisen innehåller information om vilken risknivå som de olika riskällorna utgör.

Definitioner av begrepp i metoden:

Spridningssätt	Alla möjliga sätt på vilka en förorening kan transporteras från en plats i det undersökta området till den plats där föroreningen orsakar en konsekvens som påverkar den valda vattensystemtjänsten.
Sårbarhet	Uttryck för systemets bristande förmåga att motstå att spridning av föroreningar sker genom respektive spridningssätt.
Sannolikhet	Uttryck för hur troligt det bedöms vara att ett föroreningsutsläpp sker från en riskkälla och sprids till den plats där föroreningen orsakar en konsekvens som påverkar den valda vattensystemtjänsten.
Konsekvens	Den negativa följden för den valda vattensystemtjänsten, med avseende på vattenkvalitet, som utsläpp och spridning av en förorening från en riskkälla av en viss storlek orsakar, exempelvis otjänligt dricksvatten.
Risk	Sammanvägning av sannolikhet, konsekvens och sårbarhet, som beskriver hur allvarligt ett utsläpp från en riskkälla är med avseende på den valda vattensystemtjänsten.

4.1 Områdesundersökning

Arbetet inleds med en undersökning av områdets hydrogeologiska förutsättningar, lokala föroreningskällor samt de vattensystemtjänster som grundvattenmagasinet tillhandahåller. Det är viktigt att identifiera vilka vattensystemtjänster som akviferen medför eftersom olika vattensystemtjänster är utsatta för olika typer av risker. Riskbedömningen utförs med avseende på en vattensystemtjänst i taget. Områdesundersökningen kan utgå från offentliga databaser och information från expertmyndigheter, exempelvis Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) och Havs- och Vattenmyndigheten.

Vid behov kan en fältundersökning utföras för en mer noggrann kartering och karaktisering av området. Fältundersökningen möjliggör identifiering och kartering av potentiella riskkällor som inte omnämnts eller som saknar koordinater att till-

gå i offentligt material. Likaså kan geografisk data samlas in för andra relevanta platser såsom redan befintliga VA-anläggningar inklusive infiltrationsbassänger och råvattenuttag. Fältundersökningen kan även innefatta större mät- och provtagningsinsatser för att komplettera bristande eller obefintlig geologisk information och hydrogeologiska parametrar.

Undersökningen ska i sin helhet utgöra ett informationsunderlag innehållande potentiella riskkällor samt hydrogeologisk data för området i fråga. Undersökningen syftar främst till att samla in det material som finns att tillgå med de resurser som är aktuella för arbetet.

4.2 Identifiering av spridningssätt

Utifrån områdesbeskrivningen identifieras de olika spridningssätt som är relevanta för den valda vattensystemtjänsten. Syftet med identifieringen är att underlätta valet av metod för bedömning av sårbarhet. Spridningssätten kommer även i ett senare skede användas för att identifiera möjliga händelseförlopp. Förloppen används för att beräkna sannolikheten att en förorening medför en konsekvens för vattensystemtjänsten i fråga.

4.3 Sårbarhetskartläggning

Bedömning av sårbarheten i området kan utföras med olika metoder. Dessa bestäms med avseende på de spridningssätt som har identifierats för den vattensystemtjänst som ska riskbedömas. Sårbarhetsindexet redovisas i GIS-kartor och kommer att användas när sannolikheten ska bedömas i nästa steg.

4.4 Sannolikhetsbedömning

Med utgångspunkt i spridningssätten definieras ett trädidiagram för den valda vattensystemtjänsten som översiktligt visar de händelseförlopp som väntas kunna ske i området. Sannolikhetsnivån för huruvida ett utsläpp sker eller inte sätts med hjälp av kvalitativa kriterier som översätts till fyra nivåer.

Resterande steg i händelseförloppet baseras på den valda vattensystemtjänsten och de spridningssätt som är relevanta. För varje specifikt spridningssätt definieras sannolikhetsnivån utifrån det framtagna sårbarhetsindexet. Genom att följa trädidiagrammet multipliceras alla nivåer och produkten blir ett sannolikhetsindex. Dessa index hamnar inom ett spann som sedan jämnt delas upp i fem klasser som utgör den ena axeln i en riskmatris.

4.5 Konsekvensbedömning

För den valda vattensystemtjänsten ska även en konsekvensbedömning utföras. Bedömningen utgår från tre kvalitativa kategorier:

1. Farlighet för vattensystemtjänsten.
2. Mängden utsläpp som förväntas kunna ske.
3. Föroreningens beständighet i grundvattenmagasinet.

Varje kategori tilldelas en nivå från ett till fyra. Dessa nivåer multipliceras ihop och produkten blir ett konsekvensindex enligt tabell 4.2. Indexen hamnar då inom ett spann 1-64 som delas upp i fem lika stora klasser. Dessa klasser motsvarar den andra axeln i riskmatrisen.

Tabell 4.2: Konsekvensbedömning för en vattensystemtjänst.

Riskkälla	Farlighet	Mängd	Beständighet	Slutgiltigt konsekvensindex
Källa A	k_{A1}	k_{A2}	k_{A3}	$k_{A1} \cdot k_{A2} \cdot k_{A3} = K_A$
Källa B	k_{B1}	k_{B2}	k_{B3}	$k_{B1} \cdot k_{B2} \cdot k_{B3} = K_B$
Källa C	k_{C1}	k_{C2}	k_{C3}	$k_{C1} \cdot k_{C2} \cdot k_{C3} = K_C$
...

4.6 Riskbedömning

Den totala risken som vardera riskkälla utgör för den beaktade vattensystemtjänsten beräknas som en produkt av sannolikhets- och konsekvensindexen. Samtliga värden redovisas i en tabell, enligt tabell 4.3. Resultatet redovisas även i en riskmatris där axlarna utgörs av sannolikhets- och konsekvensklasserna.

Tabell 4.3: Beräkning av risk för en vattensystemtjänst.

Riskkälla	Sannolikhet	Konsekvens	Risk
Källa A	P_A	K_A	$P_A \cdot K_A = R_A$
Källa B	P_B	K_B	$P_B \cdot K_B = R_B$
Källa C	P_C	K_C	$P_C \cdot K_C = R_C$
...

4.7 Resultat

Slutligen redovisas alla resultat på följande sätt:

- En separat sårbarhetskarta för vardera spridningssätt.
- En karta med alla riskkällor utmärkta.
- En karta med alla riskkällor samt sårbarhetsbedömningarna.

- En tabell med varje sannolikhets- och konsekvensindex samt beräknad risk.
- En riskmatris där varje riskälla är utplacerad.

Resultatet från riskbedömningen visar vilka områden som är mest känsliga för utsläpp av föroreningar med avseende på den valda vattensystemtjänsten. Detta kan sedan ligga till grund för utformning av ett vattenskyddsområde och indikera vilka områden som har störst behov av regleringar.

5

Fallstudie Fjärås Bräcka

I detta kapitel presenteras resultatet av den fallstudie som utförts i detta arbete. Syftet med fallstudien är att tillämpa den framtagna metoden för att tydliggöra hur en riskbedömning med metoden går till. Fallstudien utförs även i syfte att få fram ett resultat. Resultatet kan nämligen användas för att diskutera den framtagna metodens applicerbarhet och validitet.

Fallstudien berör Fjärås Bräckas grundvattentäkt, vilken är belägen i Kungsbacka kommun, se figur 5.1. Detta utgör en lämplig plats som motsvarar de förhållanden som finns i en stor del av Sveriges grundvattentäkter. Vattentäkten består av ett grundvattenmagasin där den naturliga grundvattenbildningen förstärks med hjälp av konstgjord infiltration från närliggande sjön Lygnern. Grundvattenmagasinet nyttjas främst för att försörja närmare 69 000 människor med rent dricksvatten (Lång & Lindh, 2018).



Figur 5.1: Karta som visar det studerade området, Fjärås Bräcka, markerat med en röd ring. (Google, 2024). Omarbetad.

5.1 Områdesbeskrivning

Vattentäkten Fjärås Bräcka finns i en mäktig israndsbildning som sträcker sig upp till ungefär 90 m över havet (Påsse, 1986). Randbildningen är belägen längs sjön Lygnerns västra strand. I området finns en anläggning med sex bassänger där ytvatten från Lygnern konstgjort infiltreras till grundvattenmagasinet, se figur 5.2. Råvattenuttagen från magasinet är placerade längs med Fjärås Bräckas strand (Lång & Lindh, 2018).



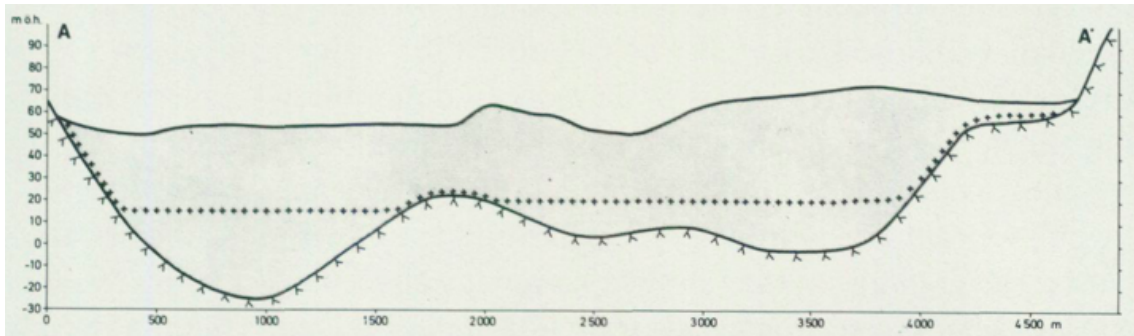
Figur 5.2: Infiltrationsbassängerna vid Fjärås Bräcka.

En mängd riskkällor har identifierats kring Fjärås Bräcka. Vattentäktens bidragande till dricksvattenproduktionen gör området betydelsefullt och medför därmed ett behov av skydd mot potentiella föroreningar. I detta kapitel sammanställs och presenteras resultatet av områdesundersökningen. Det inkluderar de geologiska och hydrogeologiska förhållandena, vattensystemtjänster samt lokala riskkällor som identifierats i området. Områdesbeskrivningen låg sedan till grund för sårbarhetsanalysen.

5.1.1 Geologiska och hydrogeologiska förhållanden

Fjärås Bräckas markyta består huvudsakligen av glacifluvialt material som domineras av fraktionerna sand och grus (Wenner, 1950). Bräckan uppkom från inlandisens stillastående kant. När iskanten var stationär bildades isälvar som avlagrade glacifluviala grusplatåer. På grund av det långvariga avlagrandet bildades randen som nu kallas Fjärås Bräcka.

Bräckan består av jordarter med hög permeabilitet men i den mittersta delen av grundvattenmagasinet buktar berggrunden upp. Detta gör att transporten av grundvatten mellan den norra och södra delen av magasinet hindras. Detta illustreras i figur 5.3.



Figur 5.3: Sektion genom grundvattenmagasinet i Fjärås Bräcka. (Påsse, 1986). Där den nedersta delen är berg, den streckade linjen visar grundvattenytan och den översta heldragna linjen representerar markytan.

Utöver områdets topografi och geologi, har även de hydrogeologiska förhållandena en stor betydelse för grundvattenmagasinet egenskaper. I Fjärås är den naturliga grundvattenbildningen cirka 50 liter/sekund. Tillsammans med den konstgjorda infiltrationen från Lyngern når grundvattenbildningen upp till 140 liter/sekund. Uttagningsmöjligheten från magasinet har utifrån detta bedömts till 25-125 liter/sekund. Uttagsmöjligheten är lägre i de södra samt mellersta delarna av magasinet. Högsta kustlinjen i Fjärås Bräcka är ungefär 77 meter över havet medan bräckan sträcker sig upp till ungefär 90 meter över havet. (Lång & Lindh, 2018). Grundvattenmagasinet och dess tillrinningsområde visas i figur 5.4.



Figur 5.4: Grundvattenmagasin och tillrinningsområde för magasinet i Fjärås Bräcka (Sveriges Geologiska Undersökning, u. å). CC-BY.

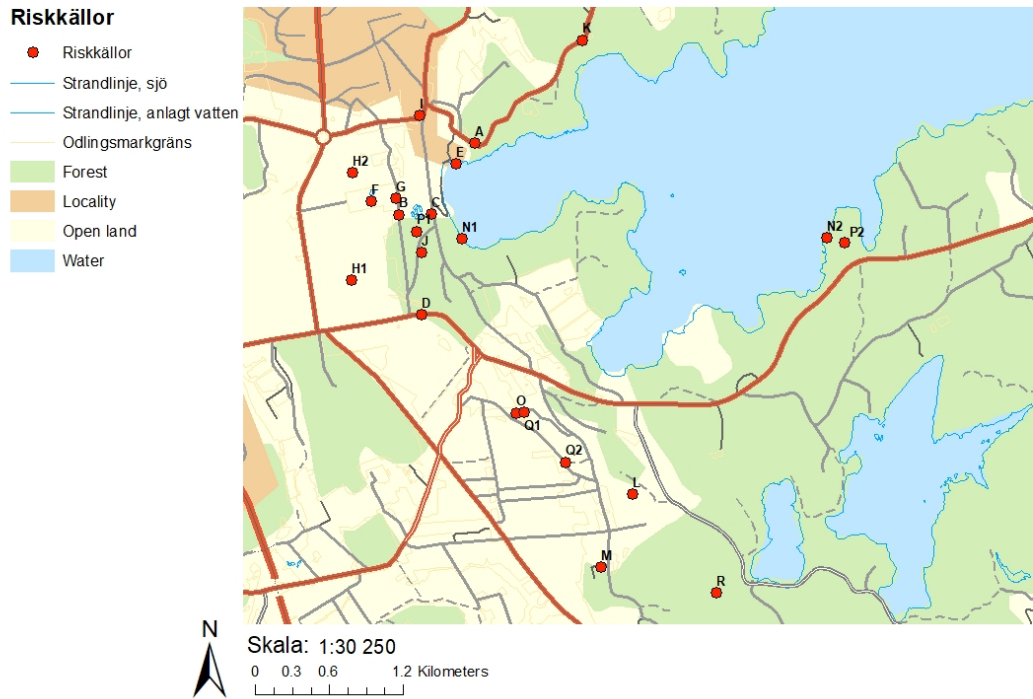
5.1.2 Vattensystemtjänster i Fjärås Bräcka

I Fjärås Bräcka finns ett flertal vattensystemtjänster och som tidigare nämnt är dricksvattenproduktionen den primära. I riskbedömningen har därför denna vattensystemtjänst valts. Det är dock av intresse att bevara och skydda resterande tjänster också. Tabell 5.1 redovisar de identifierade vattensystemtjänsterna i Fjärås Bräcka med tillhörande beskrivning av vad tjänsten fyller för funktion. Inspiration till tabellen är tagen från Gärtner m. fl. (2022). I artikeln presenteras en metod för att identifiera vattensystemtjänster. Utöver detta redovisas en lista över vattensystemtjänster, specifikt anpassad för svenska geologiska förhållanden, vilket har använts som underlag i arbetet.

Tabell 5.1: Tillgängliga vattensystemtjänster i Fjärås Bräcka baserat på metodik från Gärtner m. fl. (2022).

Vattensystemtjänst	Beskrivning
Dricksvatten till människor	Dagligt uttag på 160 l/s (Lång & Lindh, 2018)
Dricksvatten till djur	Uttag från egen brunn
Bevattning	Uttag från egen brunn
Grundvatten som energikälla	Vatten till värmepumpar
Förebyggande av sättningar	Sättningar av byggnader förebyggs av stabila grundvattennivåer
Tillförsel till ytvatten	Grundvatten försörjer närliggande vattendrag
Anpassning av lokal fuktighet och temperatur	Grundvattenmagasin reglerar den lokala fuktigheten och temperaturen
Hälsöfrämjande aktiviteter	Aktiviteter som exempelvis vandring i området som bidrar med återhämtning samt förbättrad hälsa
Estetiska intryck	Välmående från att betrakta vattendrag
Arvsvärde	Värde som naturresurs har för kommande generationer
Alternativvärde	Värde naturresurs har för att i framtiden användas i andra ändamål

I följande avsnitt presenteras de föroreningskällor i området runt Fjärås Bräcka som identifierats och som potentiellt bedöms kunna innebära en risk för grundvattenmagasinet. Samtliga riskkällor är utsatta i figur 5.5 och redovisas i tabell 5.2 med tillhörande motivering till varför respektive föroreningskälla tas i beaktning vid riskbedömningen.



Figur 5.5: Karta över var riskkällorna A-R ligger i förhållande till Lygnern.

Tabell 5.2: Riskkällor A-U med motivering till varför de beaktas i riskbedömningen.

INDEX	Beaktas i riskbedömning	Motivering
A	Sättilavägen	Delvis i tillrinningsområdet
B	Livägen	Delvis i tillrinningsområdet
C	Fjärås Bräckaväg	Delvis i tillrinningsområdet
D	Tostaredsvägen	Delvis i tillrinningsområdet
E	Båttrafik	I sjön
F	Krukväxtodling	Delvis i tillrinningsområde
G	Hästverksamhet	I tillrinningsområde
H1	Åkermark	Delvis i tillrinningsområde
H2	Åkermark	Delvis i tillrinningsområde
I	Fjärås kyrkogård	Ovanpå magasin
J	Bebyggelse på bräckan	Ovanpå magasin
K	Bilverkstad	I tillrinningsområde
L	Grustäkt	I tillrinningsområde
M	Bebyggelse söderut	I tillrinningsområde
N1	Badplats	I tillrinningsområde
N2	Badplats	I tillrinningsområde
O	Återvinningsstation	I tillrinningsområde
P1	Vandringsområde	Ovanpå magasinet och i tillrinningsområde
P2	Vandringsområde	Ovanpå magasinet och i tillrinningsområde
Q1	Betong- och cementindu- stri	I tillrinningsområde
Q2	Betong- och cementindu- stri	I tillrinningsområde
R	Nedlagd deponi	I tillrinningsområde

5.1.2.1 Fordonstrafik

I området runt Fjärås Bräcka finns många olika typer av fordonstrafik. På vägarna färdas bilar, bussar och tyngre trafik. Sjön trafikeras av båtar, både mindre fritidsbåtar och en turistbåt under sommaren. De risker som vägtrafiken utgör för grundvattnet kommer från slitage av vägar, bromsar och däck samt läckage av bromsolja, rostskyddsmedel, smörjoljor och bränsle (Trafikverket, 2020). Det kan även handla om läckage från lastbilar som fraktar farligt gods. De ämnen som vägtrafiken främst släpper ut är kolväten samt tungmetaller som bly, kadmium och zink (Trafikverket, 2020). Likt vägtrafiken släpper även båttrafiken ut liknande ämnen från slitage och läckage.

5.1.2.2 Jordbruk och odling

Det finns flera jordbruksmarker runt Fjärås Bräcka och Lygnern, både i och utanför tillrinningsområdena. En av dem kan ses i figur 5.6. Potentiella föroreningskällor från jordbruk och odlingar är framför allt bekämpningsmedel men även näringsämnen som kan orsaka övergödning (Singh m. fl., 2022). Övergödning leder bland

annat till att grundvattnet får höga halter av nitrat vilket i sin tur kan vara skadligt för dricksvattenkonsumenterna (Vatteninformationssystem Sverige, u. å). Bekämpningsmedel kan transporteras genom jorden till grundvattnet genom regn och bevattning. Läckaget är som högst i klimat med hög nederbörd och låga temperaturer samt i sandiga jordar (Pérez-Lucas m. fl., 2018). Exponering för bekämpningsmedel via dricksvatten kan öka risken för bröstcancer (Yang m. fl., 2020), prostatacancer (Pardo m. fl., 2020) och Parkinsons sjukdom (Pouchieu m. fl., 2017).



Figur 5.6: Åkermark väster om grundvattenmagasinet.

5.1.2.3 Hästverksamhet

Inom tillrinningsområdet för Fjärås Bräcka finns det ett flertal hästverksamheter som kan utgöra en risk för grundvattnet. Enligt beslutet kring det befintliga vattenskyddsområdet för Fjärås Bräcka krävs tillstånd från *Nämnden för Miljö och Hälsoskydd* vid djurhållning av fler än en djurenhet (Länsstyrelsen Hallands Län, 2012). De potentiella risker som djurhållning kan ha på grundvattnet är förhöjda halter av fosfor, kalium och lösligt kväve (Airaksinen m. fl., 2007), samt spridning av mikrobiella föroreningar. Djurhållning kan även innebära överanvändning av betesmarker som leder till erosion. Erosionen ökar mängden sediment och näringsämnen som exempelvis nitrat vilket sedan kan transporteras till grundvattnet.

5.1.2.4 Kyrkogård och gravfält

På marken ovanför grundvattenmagasinet finns tre olika gravplatser, Li gravfält, en kolerakyrkogård samt Fjärås kyrkogård. Li gravfält anlades under stenåldern (Naturum, u. å-b) och kolerakyrkogården användes under koleraepidemin i Sverige under 1830-talet (Naturum, u. å-a). Patogener kan överleva upp till tre år och övriga mikroorganismer upp till fem år i marken (Żychowski & Bryndal, 2014). Detta innebär att de två äldre gravplatserna inte utgör någon risk för grundvattnet i Fjärås Bräcka.

Fjärås kyrkogård, se figur 5.7, är fortfarande i bruk vilket gör den till en potentiell föroreningskälla. Lakvattnet som produceras vid nedbrytning av en människokropp innehåller föroreningar, bland annat i form av patogener (Żychowski & Bryndal, 2014). Dessutom kan det innehålla kemiska ämnen från kemoterapi, balsameringsprocesser eller smink såväl som pacemakers, tandfyllningar och järnspik (Żychowski

& Bryndal, 2014). Klimatet har stor inverkan på de bakteriologiska föroreningarnas påverkan på grundvattnet och när klimatet är varmare och fuktigare är sannolikheten större att föroreningarna sprider sig till grundvattnet. Eftersom Sverige har ett mildt klimat har därför kyrkogårdar relativt låg föroreningspåverkan på grundvattnet.



Figur 5.7: Fjärås kyrkogård.

5.1.2.5 Industri

I den södra delen av magasinets tillrinningsområde finns två grustäkter. Grus- och bergtäkter kan påverka både grundvattnets kvantitet och kvalitet (Lindeberg, 2013). Vid storskalig utgrävning minskar akviferens storlek vilket i sin tur påverkar mängden grundvatten. Grundvattnets sårbarhet ökar också eftersom marktäcknet och det översta jordlagret tas bort och förorenande ämnen kan då nå grundvattnet lättare. Verksamheten vid grustäkter innefattar dessutom användning av maskiner och andra fordon vilket gör att de tidigare nämnda riskerna för fordonstrafik, så som oljespill och läckage av bränsle, även är en riskfaktor vid dessa platser.

En småskalig fordonsverkstad finns i nära anslutning till nordöstra sidan av sjön. Bilverkstäder är generellt en typ av verksamhet som kan utgöra risk för människa och miljö ur flera aspekter (Holmberg & Andersson, 2003). Några exempel på risker denna typ av verksamhet medför för grundvatten är spill av miljöfarliga kemikalier såsom lösningsmedel, läckande oljetankar och förvaring av miljöfarligt avfall.

5.1.2.6 Bebyggelse

Eftersom ett samhälle är beläget på och runtom Fjärås Bräcka, innebär det att en mängd olika typer av bebyggelse finns i området. I kategorin 'bebyggelse' innefattas hus och hårdgjorda ytor såsom parkeringar samt övrig infrastruktur såsom

VA-nät. I bebyggda områden rör sig människor, vars beteenden kan innebära risk för grundvattnet. Exempel på sådana risker är olämplig hantering av hushållsavfall och nedskräpning på allmän plats. Utöver detta finns risk för läckage från avloppsledningar vilket medför att föroreningar såsom koliforma bakterier och medicinrester släpps ut.

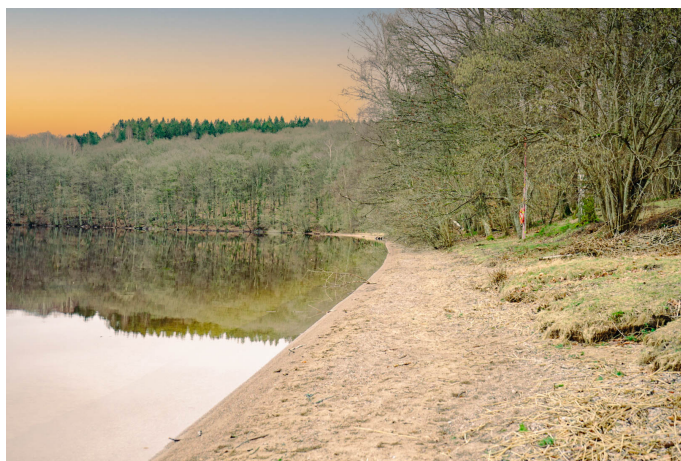
5.1.2.7 Deponi

I Lygnerns tillrinningsområde, väster om Agnsjön ligger den nedlagda Agnsjömosedeponin. Deponier kan orsaka utsläpp av olika föroreningar beroende på vad som deponeras. Deponier kan exempelvis orsaka höga halter bly i grundvatten (Sveriges Geologiska Undersökning, 2023)

Agnsjömosedeponin var i bruk under ungefär 20 år (Ernervik m. fl., 2015). Under den tiden tillfördes mestadels stora mängder schaktmassor som enligt en bedömning har låg farlighet (Ernervik m. fl., 2015). Även hushållsavfall som utsöndrat föroreningar med hög eller mycket hög farlighet kan ha deponerats och skrot finns än idag på platsen. Ernervik m. fl. har i sin riskbedömning klassat deponin i riskklass 2, vilket är den näst högsta riskklassen, och de rekommenderar att åtgärder vidtas.

5.1.2.8 Samlingsplatser

Samlingsplatser i området är vandringsområden och badplatser, exempelvis Fjärås Bräckas badplats som kan ses i figur 5.8. En gemensam faktor för dessa platser är att föroreningsgraden beror på besökarens beteenden. Riskfaktorerna utgörs främst av nedskräpning samt utträttande av behov. Utplacering av soptunnor och dass, vilket finns på flera platser i området, kan minska dessa risker. Det finns även grillplatser som kan orsaka brand vilket kan leda till spridning av föroreningar. Fasta grillplatser medför dock en lägre brandrisk jämfört med engångsgrillar.



Figur 5.8: Badplats vid Fjärås Bräcka.

5.2 Spridningssätt i Fjärås Bräcka

Efter att ett utsläpp av föroreningar har skett avgörs händelseförloppet av de möjliga spridningssätten. Spridningssätten beror på var föroreningskällan är lokaliserad i förhållande till grundvattenmagasinet och uttaget i det.

Eftersom grundvattnet i Fjärås Bräcka även bildas genom konstgjord infiltration från sjön identifierades tre olika områden där föroreningsutsläpp skulle kunna innebära en risk: direkt i sjön, i tillrinningsområdet för sjön samt i tillrinningsområdet för grundvattenmagasinet. Detta innebär att spridningssätten är följande:

- Transport från sjöns tillrinningsområde till sjön
- Transport från någon plats i sjön till ytvattenintag
- Vertikal transport från markytan inom grundvattenmagasinets tillrinningsområde till grundvattnet
- Horisontell transport från en plats i grundvattnet till råvattenuttaget

Det är möjligt för ett utsläpp att spridas genom fler än en spridningsväg. Exempelvis kan en förorening som släpps ut vid en badplats direkt hamna i sjön men det kan också hamna i sjöns tillrinningsområde. I fall som detta har en uppskattning gjorts kring fördelningen av föroreningen som tar respektive spridningsväg. Efter att spridningsvägen är bestämd beror händelseförloppet på sårbarheten i miljön föroreningarna transporteras genom.

5.3 Kartlagd vertikal sårbarhet med DRASTIC

Sårbarheten i marken runt Fjärås Bräcka har utvärderats med hjälp av DRASTIC-metoden kombinerat med *Calculated Fixed Radius Method*. DRASTIC beskriver sårbarheten vertikalt, från markytan till grundvattenytan och har implementerats genom programvaran ArcMap. Nedan följer en beskrivning om hur metoden applicerats.

5.3.1 Arbetsgång: DRASTIC med ArcMap

Programvaran ArcMap är en del av ArcGIS som används för att skapa kartor, utföra olika analyser, hantera data på ett användarvänligt sätt samt dela resultaten i form av kartor, kartlegender och tabeller. Programmet användes för att sammanställa en mängd olika geografisk data för att sedan bearbeta, och visualisera den på ett förståeligt sätt. Alla kartor har tagits fram med en rasterupplösning på 10 kvadratmeter på grund av att en högre upplösning än indatan skapar brusdata. Detta kan få kartan och datan att se mer precis ut men datan som visualiseras blir inte nödvändigtvis korrekt. Därav ansågs en upplösning på 10 kvadratmeter var passande för att undvika brusdata men samtidigt vara noggrann.

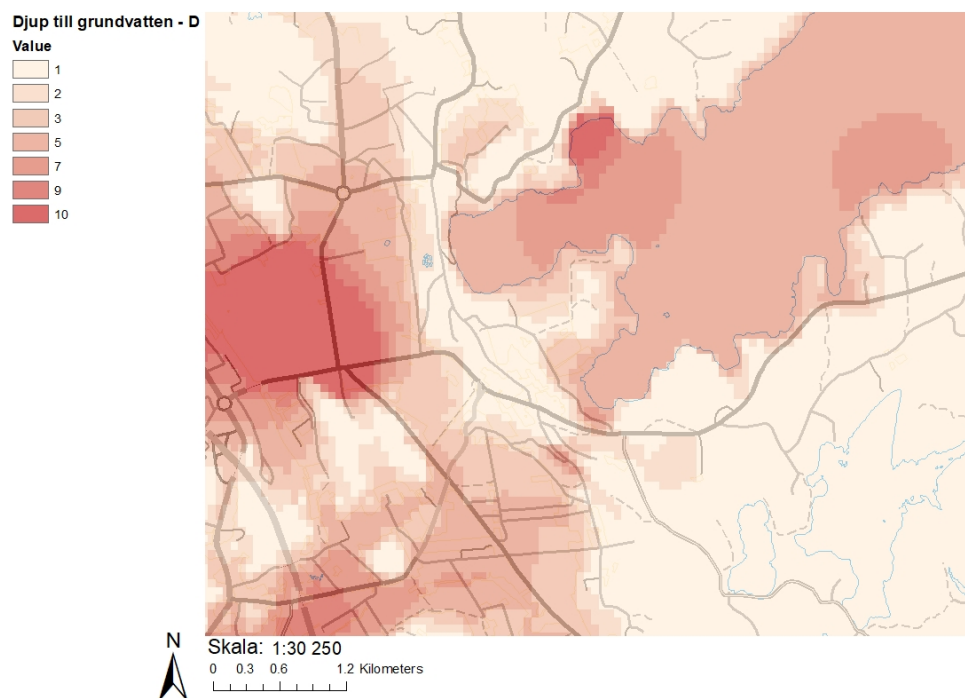
5.3.1.1 D - Djup till grundvattenytan

Grundvattendjupet för Fjärås Bräcka togs fram genom grundvattennivådata från brunnar hämtade från Sveriges Geologiska Undersökning (2020b). Därefter gjordes

en interpolation med hjälp av ArcMaps *Interpolation Analysis* för grundvattendjupet. Rastern för topografin användes sedan för att få fram djupet till grundvattenytan. Verktöget *minus* tog fram en ny raster för markytan minus grundvattennivån, som sedan klassificerades med hjälp av tabell 5.3. Djupet till grundvattenytan för området visas i figur 5.9.

Tabell 5.3: Intervall och poäng för DRASTIC-parameter D (Aller m. fl., 1987).

Intervall	
Meter	Poäng
0-1,5	10
1,5-4,5	9
4,5-9	7
9-15	5
15-23	3
23-30	2
>30	1



Figur 5.9: GIS-karta över djup till grundvattenytan.

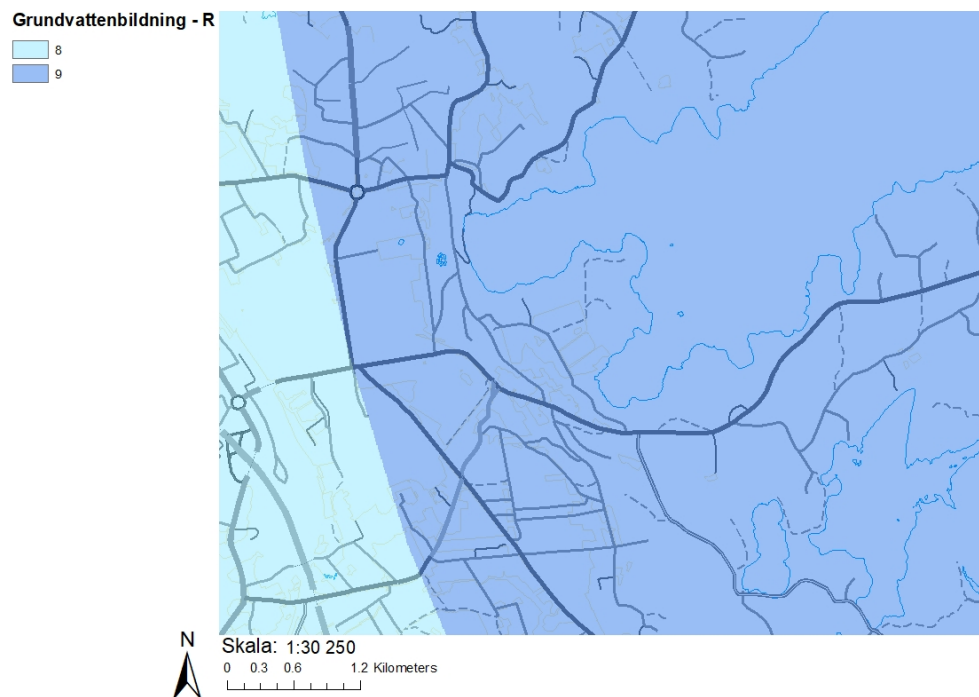
5.3.1.2 R - Grundvattenbildning

Parameter R i DRASTIC representerar det vatten som infiltrerar ned till grundvattenmagasinet. Evapotranspirationen och nederbörden i området kommer därmed att ha en stor inverkan på grundvattenbildningen (Aller m. fl., 1987). Parametern togs

fram genom SMHIs nederbördsdata för området och med hjälp av data för evapotranspirationen som hittades i en rapport av SGU (1985). Datan användes därefter i ArcMap för att skapa raster. Verktöget *minus* användes för att få fram grundvattenbildningen. Rastern klassificerades sedan med hjälp av *reclassify* med värden som kan ses i tabell 5.4. Figur 5.10 visar hur grundvattenbildningen ser ut i Fjärås Bräcka.

Tabell 5.4: Intervall och poäng för DRASTIC-parameter R (L. Rosén, 1991).

Intervall	Poäng
milimeter/år	
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
>250	9



Figur 5.10: GIS-karta över grundvattenbildning.

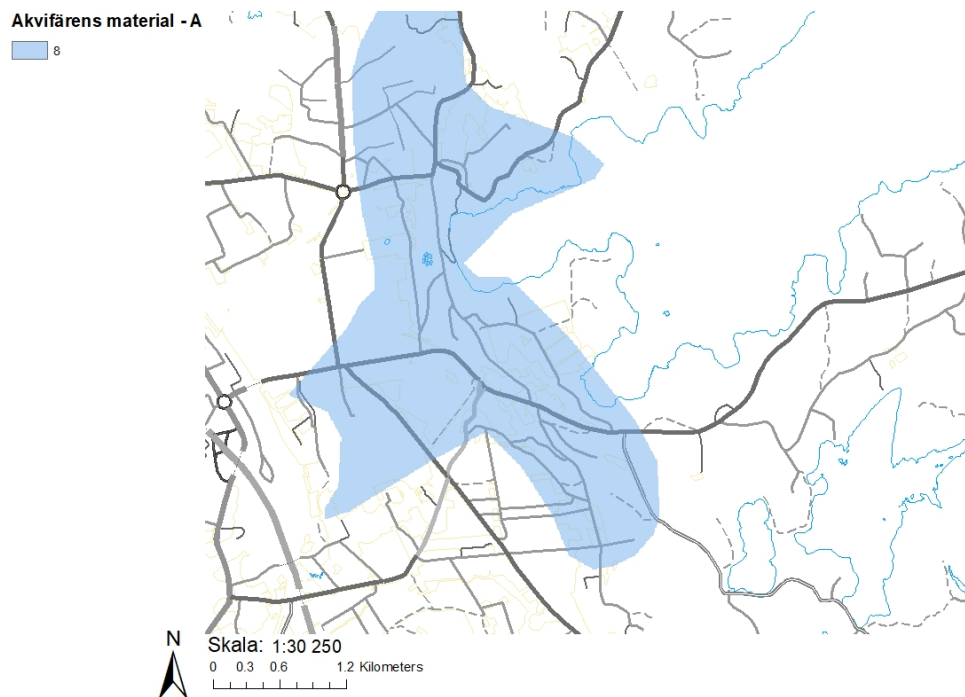
5.3.1.3 A - Material i akviferen

Parameter A beror på materialet för akviferen, där materialets kornstorlek och permeabilitet viktas vilket betyg som ges. Från jordlagerkartan antas att materialet är isälvssediment homogent genom hela akviferen. Isälvssediment anses generellt lik-

värdigt med sand och grus, vilket resulterar i betyg 8, och därmed får hela akviferens område betyget 8, se tabell 5.5 och figur 5.11.

Tabell 5.5: Materialtyper och poäng för DRASTIC-parameter A (L. Rosén, 1994).

Materialtyper	Poäng	Typ-poäng
Massiv skiffer	1-3	2
Kristallint berg	2-5	3
Vittrat kristallint berg	3-5	4
Morän	4-6	5
Sandsten/kalksten/lersten i sekvens	5-9	6
Massiv sandsten	4-9	6
Massiv kalksten	4-9	6
Sand och grus	4-9	8
Basalt	2-10	9
Karst	9-10	10



Figur 5.11: GIS-karta över akviferens material.

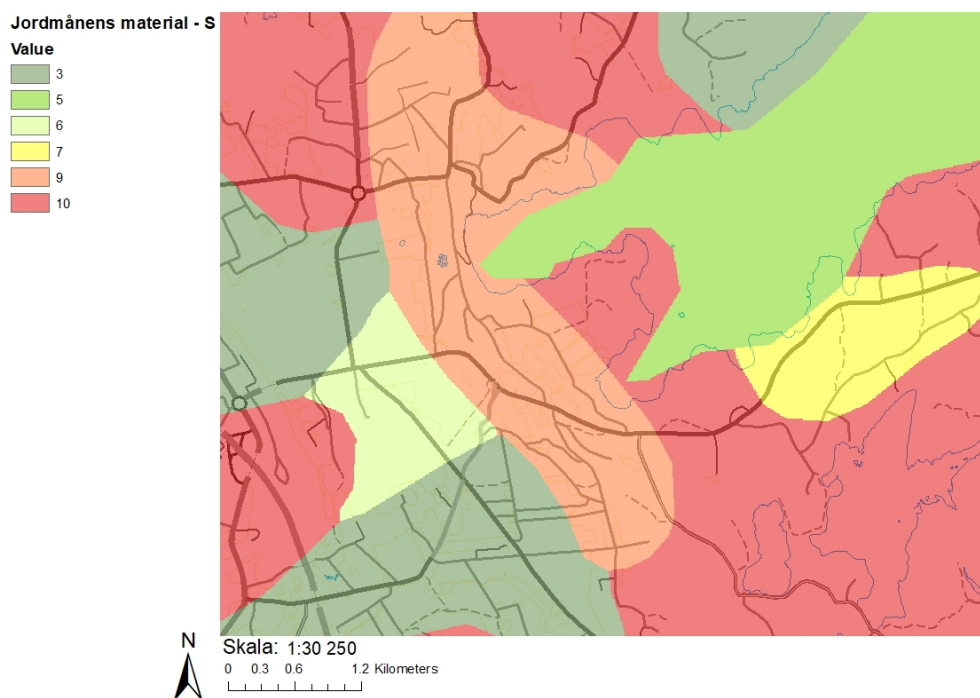
5.3.1.4 S - Material i jordmån

DRASTIC-metoden är utformad och baserat på amerikanska förhållanden (L. Rosén, 1991) alltså behövs betygskalan göras om för de jordmån som finns i Sverige och därmed i området Fjärås Bräcka. Klassificeringen och betygsskalan för de Svenska

jordmånen tog hänsyn till de kornstorlekarna som hittas i den Amerikanska jordmånen. Polygonkartan för jordmån i området gjordes om till en raster med vertyget *polygon to raster - spatial analysis*, och klassificerades med hjälp av tabell 5.6. Loam och Muck är två olika typer av jordmaterial (L. Rosén, 1994). Loam består av 25-50 % silt, 7-27 % ler och 0-50 % sand och Muck är organsikt men innehåller högre halt av finkornigt, minerogent material än torv(L. Rosén, 1994). Resultatet av materialet i jordmånen går att se i figur 5.12.

Tabell 5.6: Materialtyper och poäng för DRASTIC-parameter S (L. Rosén, 1991).

Materialtyper	Poäng
Mycket tunn eller ingen jordmån	10
Grus	10
Sand	9
Torv	8
Svällande och/eller aggregatbildande lera	7
Sandig <i>loam</i>	6
<i>Loam</i>	5
Siltig <i>loam</i>	4
Lerig <i>loam</i>	3
<i>Muck</i>	2
Homogen lera	1

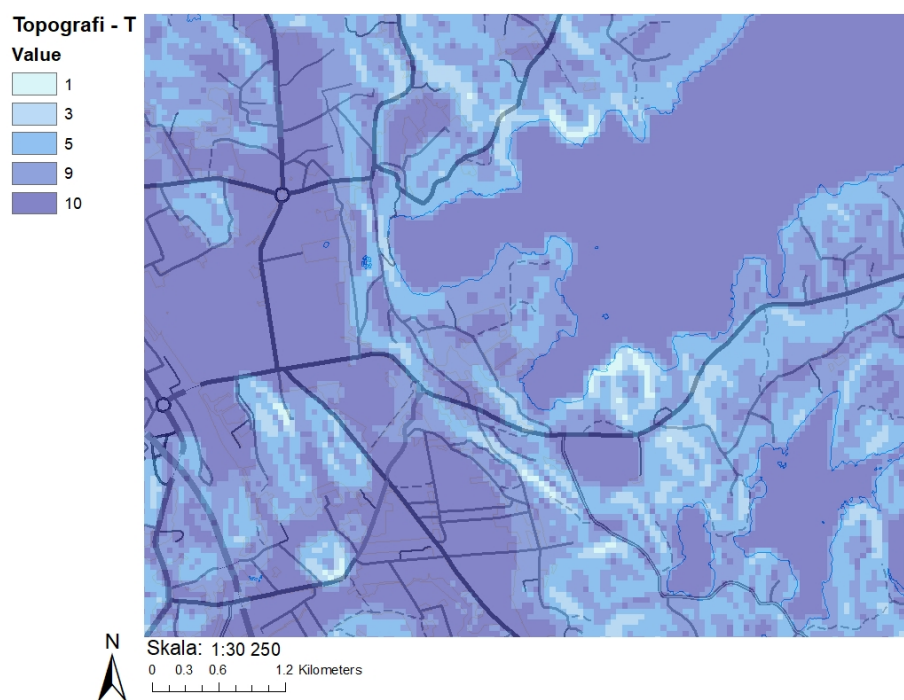
**Figur 5.12:** GIS-karta över jordmånens material.

5.3.1.5 T - Topografi

Parameter T togs fram med hjälp av topografi data från lantmäteriet, höjddata (Lantmäteriet, u.å). Datan för rastern var för nivån i meter, vilket gjordes om med hjälp av verktyget *slope* för att få fram en lutning. Därefter klassificerades rastern med hjälp av tabell 5.7 och rankningen för de olika lutningsintervallen går att se i figur 5.13.

Tabell 5.7: Lutningsintervall och poäng för DRASTIC-parameter T (L. Rosén, 1991).

Intervall (lutning i %)	Poäng
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

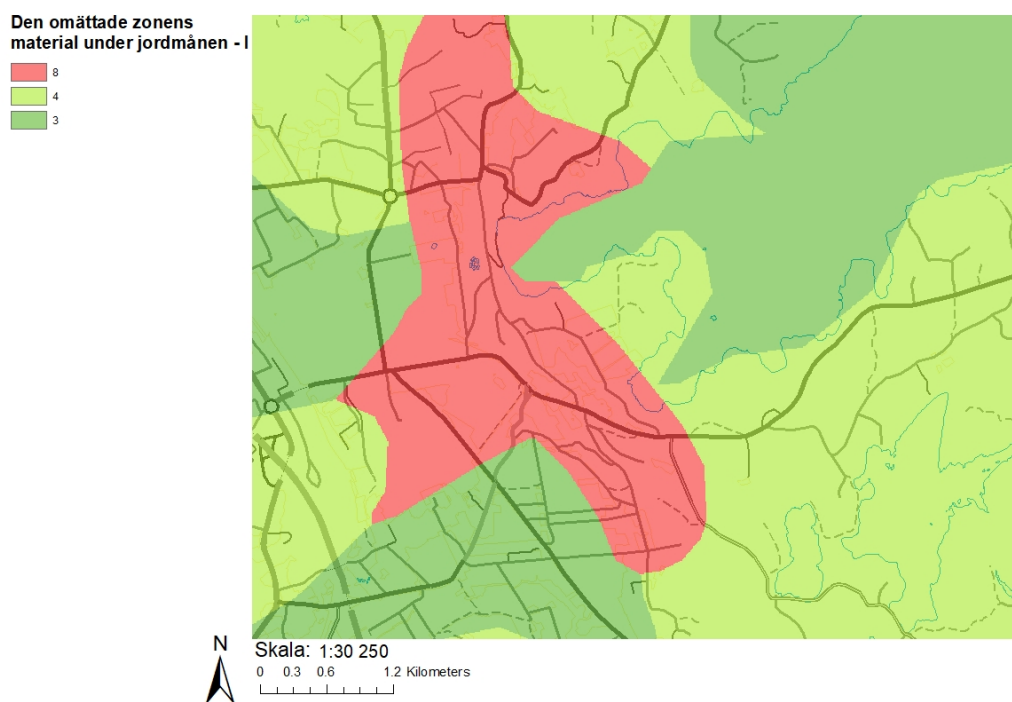
**Figur 5.13:** GIS-karta över topografin.

5.3.1.6 I - Material i den omättade zonen under jordmånen

För parameter I användes jordartskartan i figur 2.1 från avsnitt 2.1 *Geologisk beskrivning* för information om jordlagerföljd under och över högsta kustlinjen. Om översta lagret var torv antogs följande lager vara gyttja. Isälvsmaterial, som anses likvärdigt med sand och grus, antogs för hela djupet. Klassificeringen gjordes med hjälp av tabell 5.8.

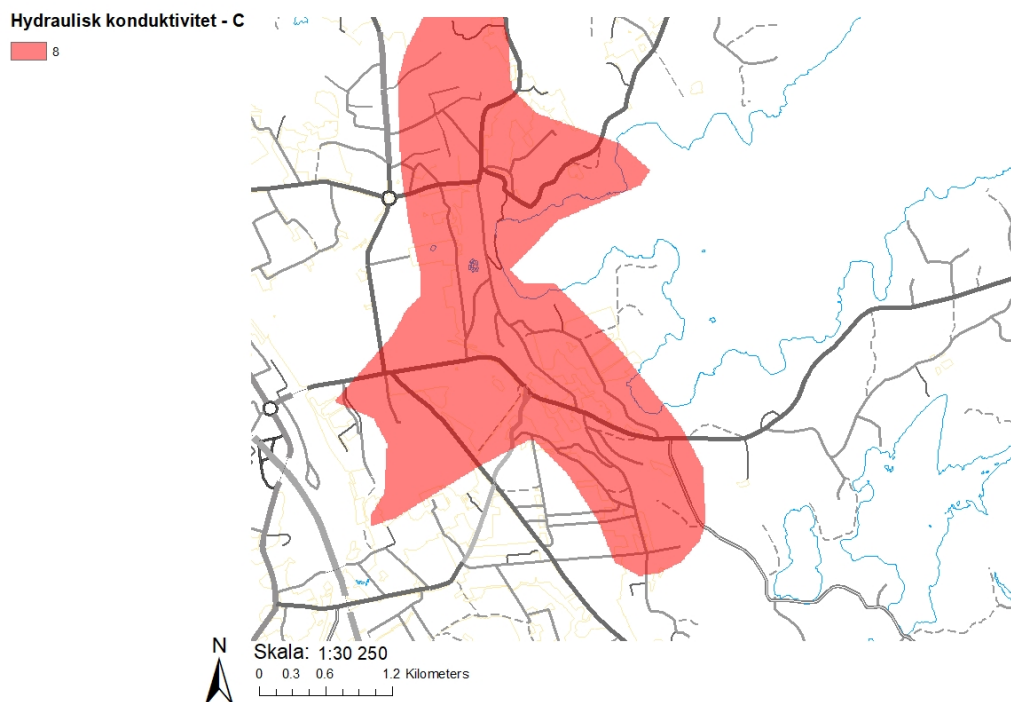
Tabell 5.8: Materialtyper och poäng för DRASTIC-parameter I (L. Rosén, 1991).

Materialtyper	Poäng	Typ-poäng
Tätande lager	1	1
Silt/lera	2-6	3
Skiffer	2-5	3
Kristallint berg	2-8	4
Kalksten	2-7	6
Sandsten	4-8	6
Kalksten/sandsten/lersten i sekvens	4-8	6
Sand och grus med betydande mängd silt och ler	4-8	6
Sand och grus	6-9	8
Basalt	2-10	9
Karst	8-10	10

**Figur 5.14:** GIS-karta över den omättade zonens material.

5.3.1.7 C - Hydraulisk konduktivitet i akvifermaterialet

För parameter C antogs akviferens material genomgående bestå av isälvssediment och baserat på kornstorlek, som antas ha stor inverkan på ett materialets hydrauliska konduktivitet förmåga, har detta material tilldelats betyg 8.



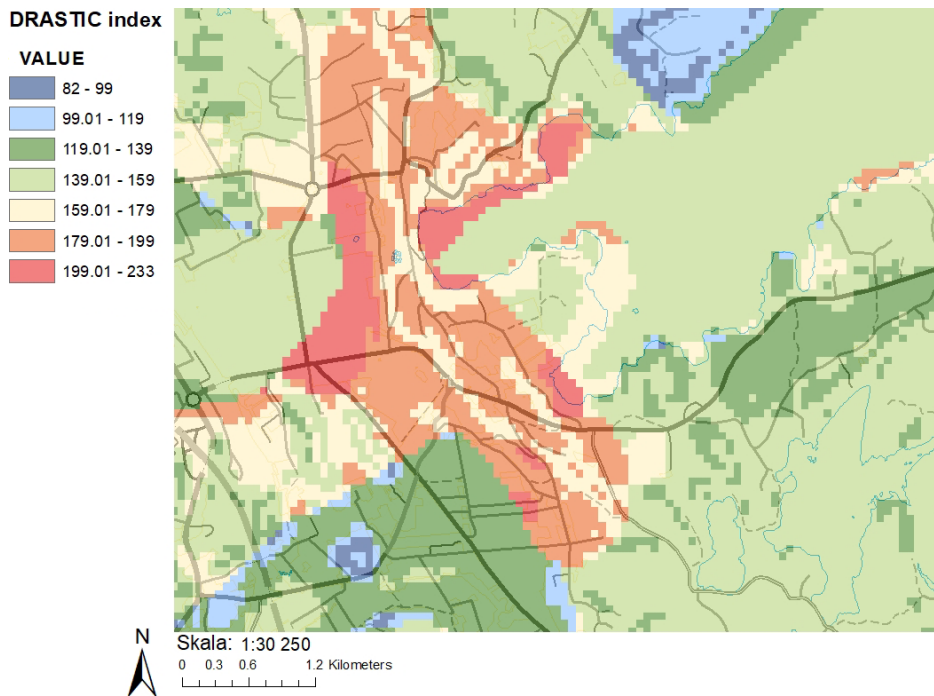
Figur 5.15: GIS-karta över hydraulisk konduktivitet i akvifermaterialiet.

5.3.2 DRASTIC-Index

För att få fram ett slutligt värde på områdets sårbarhet så används verktyget *Raster Overlay*, där de olika rasterkartorna för varje DRASTIC-parameter kan viktas enligt tabell 3.1. Poängskalan delades in i ett DRASTIC-index enligt tabell 5.9, detta gjordes med verktyget *Reclassify*.

Tabell 5.9: Färgkod för sårbarhetskarta enligt DRASTIC (Aller m. fl., 1987)

DRASTIC-Index	Färg
<80	Violett
80-99	Mörkblå
100-119	Ljusblå
120-139	Mörkgrön
140-159	Ljusgrön
160-179	Gul
180-199	Orange
>199	Röd



Figur 5.16: GIS-karta över sårbara områden med avseende på DRASTIC-Index.

5.3.3 Kartlagd horisontell sårbarhet med Calculated Fixed Radius Method

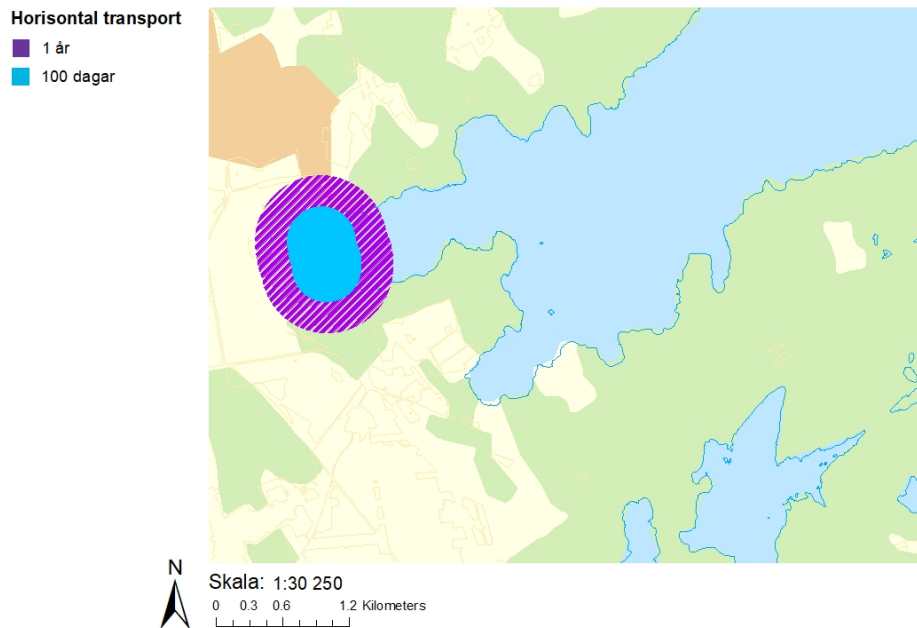
För att kartlägga sårbarheten horisontellt användes *Calculated Fixed Radius Method*. Metoden visualiserar hur snabbt föroreningar sprids med grundvattnet från en plats i grundvattenmagasinet till råvattenuttaget. Med metoden beräknas cirkulära områden med en viss radie som utgör gränsen som korresponderar mot en viss uppehållstid i grundvattnet (U.S. Environmental Protection Agency, 1987). Beräkningen gjordes med en volymetrisk flödesekvation enligt 5.1.

$$r = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot n \cdot H}} \quad (5.1)$$

Två områden beräknades inom vilka transporttiden till råvattenuttaget är mindre än 100 respektive 365 dagar. Dessa är minimikraven gällande uppehållstid för avgränsning av primär och sekundär skyddszon enligt *Handbok om vattenskyddsområde* (Naturvårdsverket, 2011).

Eftersom det finns flera uttagsbrunnar blir det sårbara området ovalt. De slutgiltiga områdena med hög sårbarhet visas i figur 5.17 och är baserad på radierna som beräknades till:

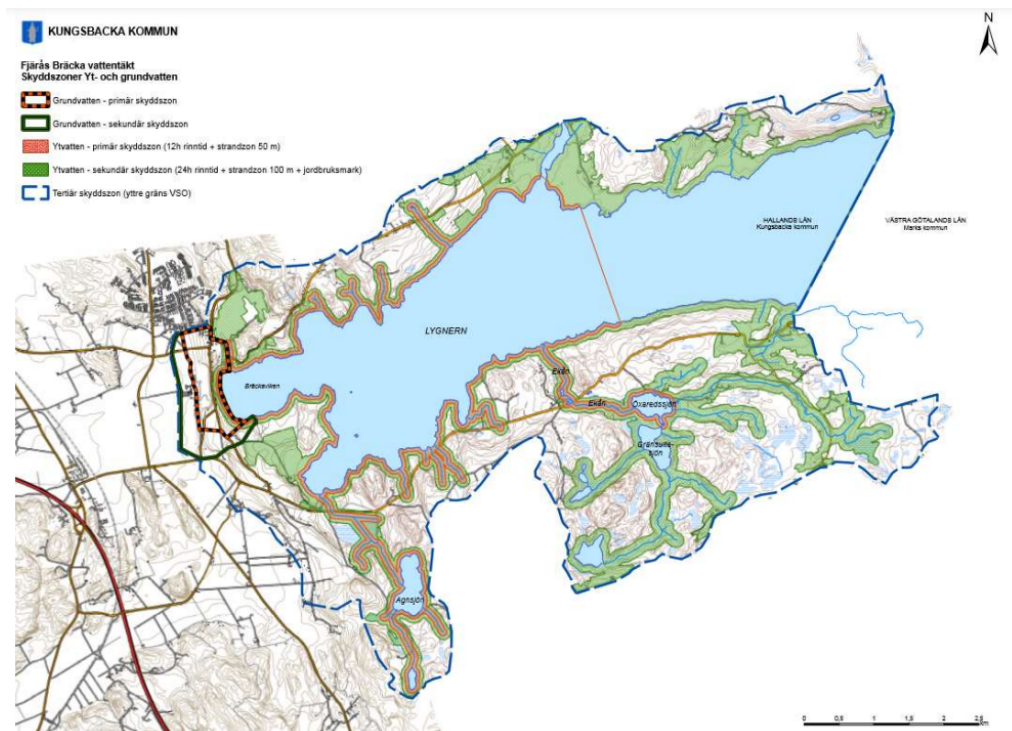
100 dagar: 312.7 m
365 dagar: 597.4 m



Figur 5.17: GIS-karta över sårbara områden med avseende på horisontell transport beräknad med *Calculated Fixed Radius Method*.

5.4 Sårbarhet för transport till och i sjön

För grundvattenmagasinet i Fjärås Bräcka finns redan ett upprättat skyddsområde. Detta skyddsområde innefattar även ytvattnet i sjön Lygnern, eftersom detta vatten infiltreras till grundvattenmagasinet via infiltrationsdammarna. Området sträcker sig runt sjön och avgränsas i öster av kommungränsen mellan Marks kommun och Kungsbacka kommun. Den primära och sekundära skyddszonen för ytvattnet är baserat på vattnets rinntid samt vilken typ av markanvändning som förekommer, se figur 5.18. Sårbarhetsklassificeringen för sjön och sjöns tillrinningsområde bestämdes utifrån det redan framtagna underlaget gällande rinntid och markanvändning, i enlighet med de avgränsningar som gjorts i arbetet. Skyddszonerna runt Lygnern fick alltså motsvara vilka områden som är sårbara. Även dessa kan ses i figur 5.18.

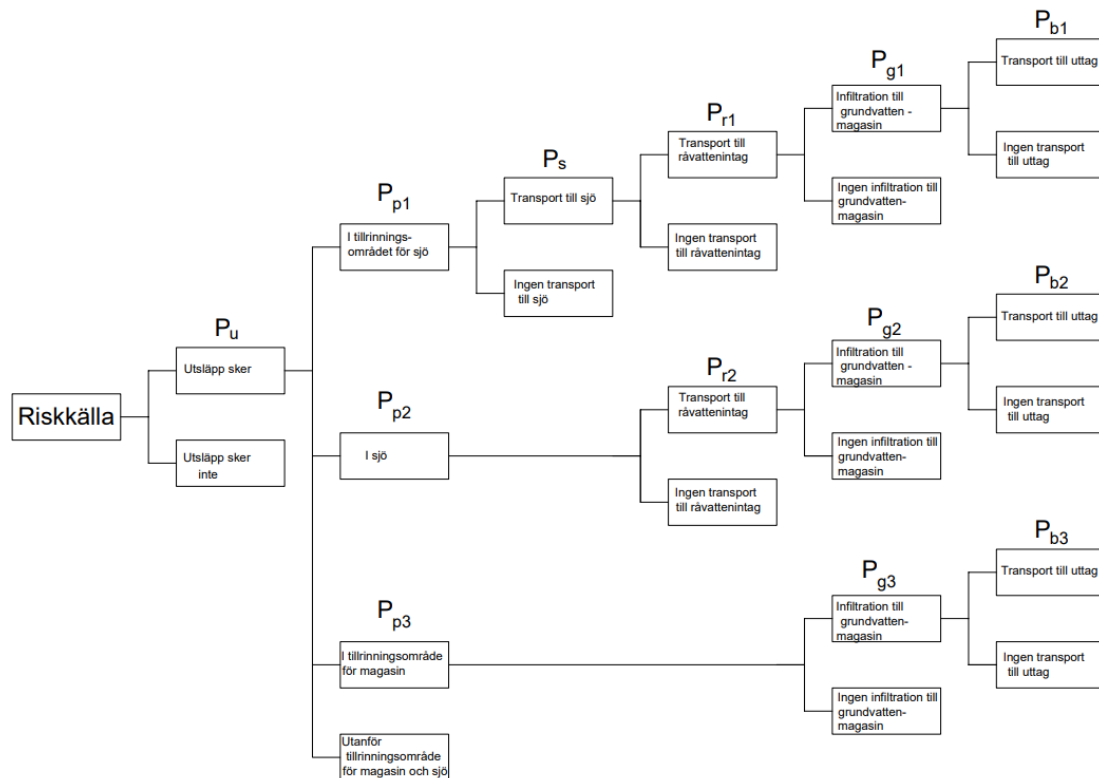


Figur 5.18: Befintligt vattenskyddsområde för yt- och grundvatten för Fjärås Bräcka vattentäkt. (Strandberg, 2020). Återgiven med tillstånd.

5.5 Sannolikhetsbedömning

Vid bedömning av sannolikheten att ett utsläpp från en riskkälla sker tills dess att det når råvattenuttaget i magasinet skapades och användes ett träd-diagram som kan ses i figur 5.19. Varje delsteg i trädet tilldelades en beteckning som motsvarar en sannolikhetsnivå. Sannolikhetsnivån är en siffra mellan 0-1 som bedömdes separat för varje delsteg. Sannolikhetsnivån avser inte den faktiska sannolikheten att något sker, utan är kategorier som används för att möjliggöra beräkning av ett sannolikhetsindex. Hur sannolikhetsnivån bedömdes beskrivs mer noggrant längre fram i kapitlet. Slutligen multiplicerades alla sannolikhetsnivåer ihop för varje spridningsväg för att få fram riskkällans slutgiltiga sannolikhetsindexet.

De bedömda sannolikhetsnivåerna för respektive riskkällans relevanta delsteg i träd-diagrammet redovisas i Appendix A.1 tillsammans med beräkning av sannolikhetsindex. Beteckningarna för träd-diagrammets delsteg motsvarar beräkningsstegen i beräkningsgången i Appendix A.1.



Figur 5.19: Träddiagram över händelseförlopp för spridning av förorening från riskkälla till ytvattenuttaget i grundvattenmagasinet i Fjärås Bräcka.

För att få fram P_u , vilket motsvarar sannolikheten för huruvida ett utsläpp sker eller inte, användes kvalitativa kriterier som översattes till fyra nivåer. Kriterierna för de olika sannolikhetsnivåerna samt den siffra som P_u tilldelas redovisas i tabell 5.10. Tabellen är baserad på den sannolikhetsstabell som Livsmedelsverket (Olausson, 2007) tagit fram i sin handbok, men är anpassad efter fallstudiens specifika avgränsningar. Varje riskkälla tilldelades en nivå utifrån kriterierna i tabellen.

Tabell 5.10: Sannolikhetskriterier och motsvarande sannolikhetsnivå.

Sannolikhet	Kriterier	Nivå
Mycket liten sannolikhet	Händelsen kan uteslutas	Utesluts ut bedömningen
Liten sannolikhet	Händelsen kan inte uteslutas men är okänd i branschen	0.25
Medelstor sannolikhet	Händelsen har inträffat i branschen de senaste 5 åren Händelsen kan inträffa de närmaste 10-50 åren	0.5
Stor sannolikhet	Händelsen inträffar i branschen årligen Händelsen har inträffat eller varit nära att inträffa i den egna anläggningen Händelsen kan inträffa de närmaste 1-10 åren	0.75
Mycket stor sannolikhet	Händelsen förekommer nu och då i den egna anläggningen	1

P_p i trädidiagrammet motsvarar sannolikheten att en riskkälla släpper ut föroreningar i Lygnern, Lygnerns tillrinningsområde eller grundvattenmagasinets tillrinningsområde. Nivån som tilldelas motsvarar en uppskattning av hur stor andel av riskkällan som befinner sig inom dessa geografiska områden.

P_s , P_r , P_g och P_b i trädidiagrammet utgörs av sannolikhetsnivån för att föroreningen sprids vidare med respektive spridningssätt. Sannolikhetsnivån tilldelas därför baserat på sårbarhetskartorna som hör ihop med respektive spridningssätt.

P_s representerar transporten till Lygnern för en förorening som befinner sig inom sjöns tillrinningsområde och P_r representerar transporten i Lygnern till ytvattenintaget. Här har en sannolikhetsnivå på 0,8 givits för utsläpp inom den primära skyddszonen, 0,6 för den sekundära skyddszonen och 0 för den tertiära skyddszonen.

P_g motsvarar sannolikheten att infiltration sker till grundvattenmagasinet. Nivån baseras därmed på kartan över den vertikala sårbarheten. DRASTIC indexet användes både för naturlig infiltration och för sannolikhetsbedömning att vertikal transport av sjövattnet som sker via infiltrationsbassängerna. Indexen översattes till 8 jämnt fördelade sannolikhetsnivåer.

P_b motsvarar sannolikhetsnivån för att transport till uttag sker från den punkt där föroreningen infiltrerat ner i grundvattenmagasinet. Den baseras därmed på kartan över horisontell sårbarhet och föroreningar inom den blå ovalen (100 dagar) tilldelas

en sannolikhetsnivå på 1, föroreningar inom den lila ovalen (365 dagar) en nivå på 0,66 och platser utanför ovalerna fick 0,33.

Varje index som beräknades för respektive riskkälla motsvarar en av de 5 sannolikhetsklasserna i 5.11. Sannolikhetsindex och -klass är redovisade i appendix A.1.

Tabell 5.11: Sannolikhetsindex och motsvarande sannolikhetsklasser.

Index	Klass
>0-0.2	S1
>0.2-0.4	S2
>0.4-0.6	S3
>0.6-0.8	S4
>0.8-1	S5

5.6 Konsekvensbedömning

Konsekvensen av att utsläppet från vardera riskkälla nått råvattenuttaget bedömdes utifrån de tre kategorierna: farlighet, mängd utsläpp och beständighet. Varje riskkälla blev tilldelad en nivå mellan ett och fyra för respektive kategori. Definition av nivåerna kan ses i tabell 5.12.

Tabell 5.12: Konsekvenskriterier och motsvarande konsekvensnivå.

Konsekvens	Farlighet	Mängd utsläpp	Beständighet	Konsekvensnivå
Liten konsekvens	Obetydlig påverkan dricksvattenkvalitet	Obetydlig mängd utsläpp	Föroreningen upplöses fort	1
Medelstor konsekvens	Ofarlig försämring ex. smak, lukt	Liten mängd utsläpp	Föroreningen upplöses långsamt	2
Stor konsekvens	Måttlig försämring eller ohälsosamt	Betydande mängd utsläpp	Föroreningen upplöses till viss del	3
Mycket stor konsekvens	Otjänligt vatten	Stor mängd utsläpp	Föroreningen upplöses inte	4

Nivåerna multiplicerades sedan ihop och produkten blev ett konsekvensindex 1-64. Varje index motsvarar en av de fem konsekvensklasserna i tabell 5.13. I Appendix A.2 finns en tabell där den tilldelade nivån för varje kategori, det totala konsekvensindexet samt konsekvensklassen för varje riskkälla är beräknad.

Tabell 5.13: Konsekvensindex och motsvarande konsekvensklasser.

Index	Klass
>0-12.8	K1
>12.8-25.6	K2
>25.6-38.4	K3
>38.4-51.2	K4
>51.2-64	K5

5.7 Riskbedömning

Den totala risken för varje riskkälla beräknades genom att multiplicera sannolikhetsindexet med konsekvensindexet. Tabell 5.14 redovisar sannolikhetsindex, konsekvensindex och det slutliga riskindexet för respektive riskkälla.

Tabell 5.14: Sannolikhetsindex, konsekvensindex och total risk för respektive riskkälla.

INDEX	Riskkälla	Sannolikhet	Konsekvens	Risk
A1	Sättilavägen, vardagliga utsläpp	0,41	16	6,0
A2	Sättilavägen, olycka	0,31	64	19,9
B1	Livägen, vardagliga utsläpp	0,73	16	11,6
B2	Livägen, olycka	0,36	48	17,4
C1	Fjärås Bräckaväg, vardagliga utsläpp	0,54	16	8,6
C2	Fjärås Bräckaväg, olycka	0,27	48	12,9
D1	Tostaredsvägen, vardagliga utsläpp	0,33	16	5,3
D2	Tostaredsvägen, olycka	0,25	64	15,8
E1	Båttrafik, vardagliga utsläpp	0,19	16	3,0
E2	Båttrafik, olycka	0,14	48	6,7
F	Krukväxtodling	0,33	32	10,6
G	Hästverksamhet	0,58	6	3,5
H1	Åkermark	0,25	16	4,0
H2	Åkermark	0,08	16	1,3
I	Fjärås kyrkogård	0,22	8	1,7
J	Bebyggelse på bräckan	0,66	12	7,9
K	Bilverkstad	0,18	32	5,8
L	Grustäkt	0,07	16	1,2
M	Bebyggelse söderut	0,22	12	2,6
N1	Badplats	0,65	2	1,3
N2	Badplats	0,54	2	1,1
O	Återvinningsstation	0,22	12	2,6
P1	Vandringsområde	0,26	4	1,1
P2	Vandringsområde	0,32	4	1,3
Q1	Betong- och cementindustri	0,14	32	4,6
Q2	Betong- och cementindustri	0,14	32	4,6
R	Nedlagd deponi	0,36	9	3,2

Varje riskkälla tillhör även en sannolikhetsklass och en konsekvensklass. Dessa används vid utplacering av riskkällorna i riskmatrisen, riskmatrisen redovisas i tabell 5.15.

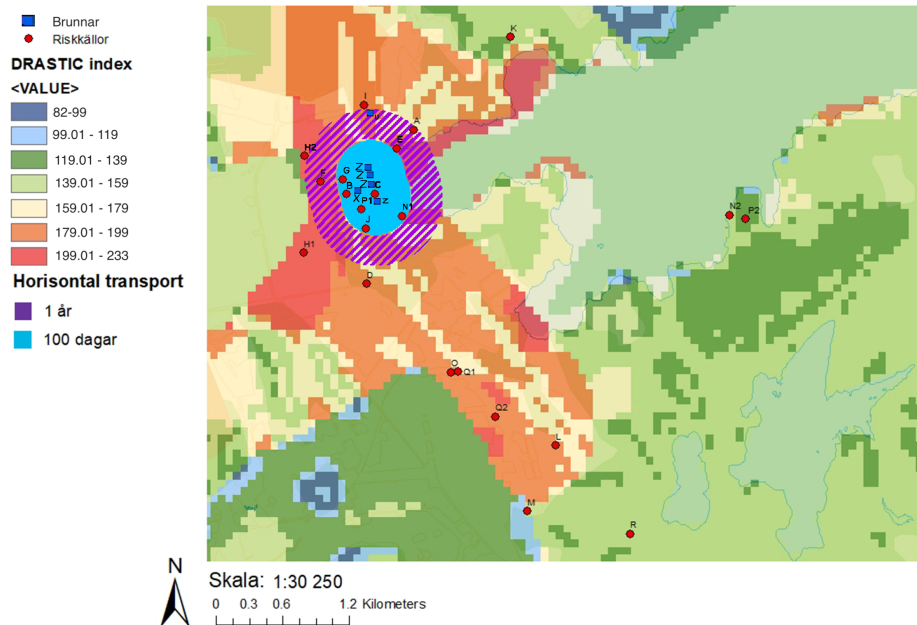
Tabell 5.15: Framtagen riskmatris för riskbedömningen.

Konsekvens- & sannolikhetsklass	K1	K2	K3	K4	K5
S5	Yellow	Red	Red	Red	Red
S4	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
S3	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
S2	Green	Green	Yellow	Yellow	Red
S1	Green	Green	Green	Yellow	Red

Utformningen av riskmatrisen är baserad på Livsmedelsverkets handbok för risk- och sårbarhetsanalys för dricksvattenförsörjning (Olausson, 2007). Hänsyn har även tagits till att en hög konsekvens i vissa fall kan vara allvarligare än en hög sannolikhet (Burgman, 2005). En riskkälla som kan orsaka ett utsläpp som motsvarar konsekvensklass K5 ansågs oacceptabla oavsett sannolikhet att det sker. Alla rutor med konsekvensklass K5 har på grund av detta fått en röd färg, se tabell 5.15.

5.8 Resultat

Den slutliga sårbarhetskartan, figur 5.20, visar DRASTIC-index för området kombinerat med horisontell transport till råvattenuttaget. Brunnarna, samt riskkällornas placering visas på kartan för att underlätta riskkällornas konsekvensbedömning.



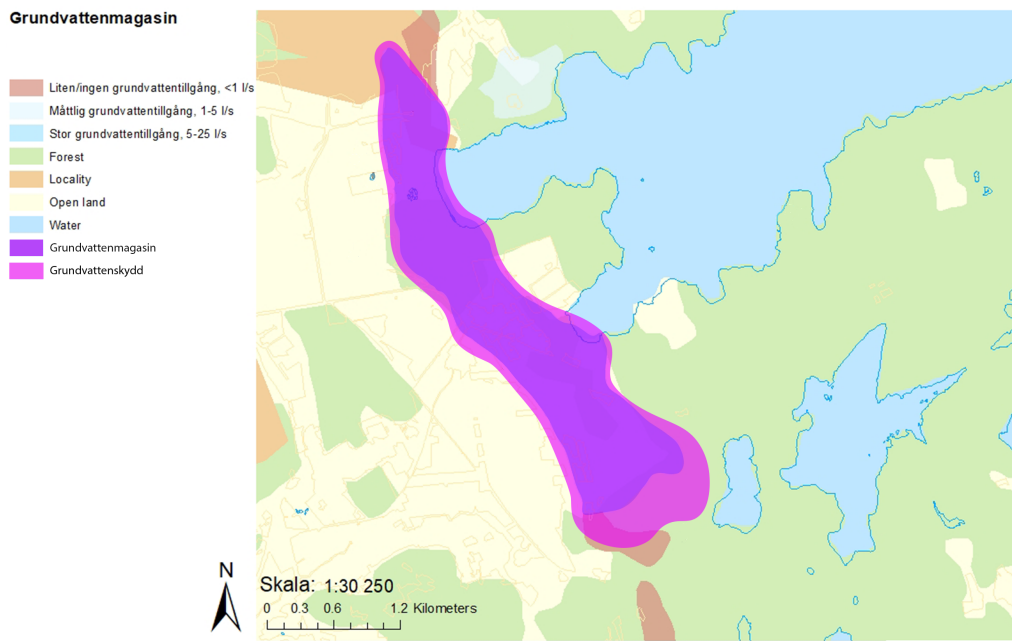
Figur 5.20: Den slutgiltiga sårbarhetskartan som visar DRASTIC, horisontell transport och riskkällor.

Baserat på de konsekvens- och sannolikhetsklasser som vardera riskkälla tilldelats i riskbedömningen så har riskkällorna placerats ut i riskmatrisen. Resultatet av riskbedömningen redovisas i tabell 5.16.

Tabell 5.16: Framtagen riskmatris med riskkällor utplacerade utifrån riskbedömningen.

Konsekvens- & sannolikhetsklass	K1	K2	K3	K4	K5
S5					
S4	J, N1	B1			
S3	G, N2	A1, C1			
S2	I, M, O, P1, P2, R	D1, H1	F	B2, C2	A2, D2
S1		E1, H2, L	K, Q1, Q2	E2	

Sårbarhetskartan visar att hela magasinet och dess tillrinningsområde är sårbart med avseende på vertikal transport. Med detta och riskmatrisen i beaktning dras slutsatsen att hela detta område är i behov av skydd med avseende på vattensystemtjänsten dricksvatten. Vattenskyddsområdet som föreslås illustreras i figur 5.21.



Figur 5.21: Grundvattenmagasin och föreslaget vattenskyddsområde.

Störst behov av skydd har området närmast råvattenuttaget, där både sårbarheten från DRASTIC är hög och uppehållstiden för den horisontella transporten är låg. Dessutom innebär de geologiska förutsättningarna i mitten av magasinet att den norra och södra delen av magasinet är separerade när det kommer till den horisontella transporten. Därmed kan det vara aktuellt att införa ett mer omfattande skydd i den norra delen av skyddsområdet.

Slutligen så behöver ytvattnet skyddas eftersom det infiltreras i den norra delen av magasinet. Det framtagna vattenskyddsområdet är tänkt att gälla ihop med det befintliga skyddet för ytvattnet i Lygnern.

6

Diskussion

6.1 Utvärdering av riskkällor

Riskbedömningen visar att två riskkällor, olycka på Sättilavägen (A2) samt olycka på Tostaredsvägen (D2), har högst riskvärde. Även olycka på Livägen (B2) och olycka på Fjärås Bräcka väg (C2) har en hög risk men befinner sig i den gula zonen i riskmatrisen. En gemensam faktor mellan dessa riskkällor är att alla handlar om olycka på väg. Anledningen till att B2 och C2 hamnade i den gula zonen istället för den röda zonen är att hänsyn har tagits till att hastigheten är lägre och att dessa vägar är mindre trafikerade. Detta resulterar i en lägre konsekvensklass

Riskkällorna med lägst risk är vandringsområdena (P1, P2), badplatserna (N1, N2), grustakten (L) och åkermark (H2). Det som gör att vandringsområdena och badplatserna har fått ett lågt riskvärde är främst att konsekvensklassen är låg. Detta beror framförallt på att föroreningstypen till stor del är obeständig och förväntas släppas ut i små mängder.

Badplatsen hamnar trots det låga riskindexet i det gula området i riskmatrisen. Detta kan förklaras av att sannolikheten är hög medan konsekvensen är låg. I fall där riskmatrisen och riskindexet indikerar olika stor risk krävs det att riskbedömaren tar hänsyn till båda sätten att uttrycka risk och analyserar orsakerna till skillnaden. Utifrån detta kan sedan ett välgrundat avgörande göras.

För grustakten är mängden utsläpp samt sannolikheten för föroreningsspridning liten. Dessutom är grustakten belägen utanför området för ett års transporttid. Detta resulterar i att grustakten fick ett litet riskvärde. Åkermarken ligger på ett sårbart område med avseende på DRASTIC men även den utanför området för ett års rinn-tid. Detta tillsammans med att dess yta är relativt liten, gör att den inte innebär en stor risk för magasinet.

Vid upprättande av ett vattenskyddsområde bör den acceptabla risknivån bedömas genom att balansera det tekniska underlaget, acceptansen hos sakägaren samt den ekonomiska kapaciteten hos förvaltaren. Det gula området i riskmatrisen kan ses som *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP) och redovisas i figur 6.1. Fördelarna med att minska utsläppen från riskkällorna inom det gula väger inte nödvändigtvis tillräckligt tungt mot de utmaningar och kostnader som åtgärderna kan medföra.

Konsekvens- & sannolikhetsklass	K1	K2	K3	K4	K5
S5					
S4	J, N1	B1			
S3	N2	A1, C1			
S2	I, M, O, P1, R	D1, H1	F	B2, C2	A2, D2
S1		F1, H2, L	K, Q1, Q2	E2	

Figur 6.1: Framtagen riskmatris med förtydligade toleransnivåer och ALARP.

I ALARP är en väsentlig del att identifiera toleransnivåer för risken. I detta arbete kan den undre gränsen för toleransnivån identifieras som det gröna området i riskmatrisen. Inom det gröna området utgör riskkällorna ingen eller minimal risk och riskkällorna anses vara acceptabla. Det gula området som ligger i mitten, alltså området för ALARP, utgör i detta arbete något som kräver vidare efterforskningar. Åtgärder för varje riskkälla kan variera i tillämpbarhet och risken kan behöva tolereras om åtgärderna inte anses rimliga att upprätta.

Den övre gränsen för toleransnivån för ALARP sätts vid det röda området i riskmatrisen. De riskkällor som hamnar inom det röda området har en så pass hög risk att åtgärder behöver vidtas, de är oacceptabla. I arbetet har som tidigare nämnt, två riskkällor hamnat inom det röda området, A2 och D2. Båda handlar om olycka på väg med en hastighetsbegränsning på 70 km/h. Eftersom dessa vägar är viktiga för framkomlighet och tillgänglighet är det inte rimligt att förbjuda biltrafiken helt. Däremot kan enklare åtgärder införas. En rimlig åtgärd att vidta på dessa vägar är att sänka eller kontrollera hastigheten längs de sträckor av vägen som ligger inom tillrinningsområdena. Detta kan göras genom att sänka hastighetsgränsen eller sätta upp hastighetskameror. Vägsträckorna inom tillrinningsområdena skyddas även av det föreslagna vattenskyddsområdet. Vid vattenskyddsområden ska det finnas skyltar med information och nummer till räddningstjänsten om en olycka skulle ske i området. Även detta är ett sätt för att minska risken av att föroreningar från en bilolycka sprids till magasinet.

Vid bedömning av sannolikhetsnivån för att ett utsläpp sker utgick kriterierna från händelser i branschen. Detta kan innebära en felkälla i bedömningen eftersom sannolikheten då överskattas. Det sker årligen bilolyckor i Sverige men detta behöver inte nödvändigtvis innebära att det årligen sker i Fjärås Bräcka. Att bedöma sannolikhetsnivån utifrån nationellt perspektiv och inte enbart utifrån ett specifikt område kan då bli missvisande.

Som nämnt tidigare har varje riskkälla tilldelats ett index mellan ett och fyra i konsekvensbedömningen. Indexet representerar tre olika parametrar: farlighet, mängd

utsläpp och beständighet. Bedömningen av dessa parametrarna kan vara utmanande, exempelvis kan det vara svårt att uppskatta hur stor mängd föroreningar som släpps ut från en bilolycka eftersom olyckan kan ske på många olika sätt. Vidare kan det vara svårt att veta vilka ämnen som kan tänkas släppas ut vilket ger en osäkerhet i bedömningen av farlighet och beständighet.

Det är också värt att poängtera att varje riskkälla har behandlats som en diskret variabel. Alla typer av bilolyckor på en och samma väg har samma sannolikhetsindex, konsekvensindex och riskindex men i själva verket, beroende på vilken bil som färdas på vägen, bör sannolikhetsindexet för att olycka sker variera. Dessutom kan man tänka sig att konsekvensen också har ett spektrum beroende på exempelvis bilens storlek och ålder. Analysen för hur utsläppet sker och hur stor mängd föroreningar som släpps ut kan göras oändligt komplex, men osäkerheten i att veta exakt vilken bil som krockar och magnituden av olyckan kvarstår. När risken sedan redovisas i punkter finns det dessutom potential för vilseledning eftersom resultatet verkar mer exakt än vad det är. Om både sannolikhets- och konsekvenskomponenterna hade representerats som ett spektrum hade riskindexet blivit mer representativt.

6.2 Förslag på vattenskyddsområde

Det föreslagna vattenskyddsområdet är större än den nuvarande primära skyddszonen. Förslaget täcker hela vattentäkten samt en buffertzona för att ta hänsyn till potentiell ytavrinning. Trots att grundvattenmagasinet är uppdelat i en nordlig och en sydlig del, där majoriteten av vattnet hämtas från den norra delen, är det viktigt att skydda även den södra delen. Detta på grund av att grundvattennivån, vid stora skyfall, skulle kunna öka tillräckligt mycket för att nå över berget som delar magasinet. Vid en situation som denna kan vattnet från de två delarna blandas. Om den södra delen inte skyddas ökar sannolikheten att råvattnet som pumpas ut ur magasinet innehåller föroreningar en tid efter kraftigt regn.

Det redan befintliga vattenskyddsområdet är indelat i primär, sekundär och tertiär skyddszon. Detta arbete avgränsades dock till att det framtagna vattenskyddsområdet inte delades in i några skyddszoner. Värt att nämna är dock att området inom det framtagna vattenskyddsområdet där både DRASTIC-indexet är högt och uppehållstiden i horisontalled är låg är i störst behov av skydd. Vid utveckling av den framtagna metoden i detta arbete hade en förbättring kunnat vara att dela in vattenskyddsområdet i skyddszoner. Indelningen hade som tidigare nämnt kunnat vara baserad på var sårbarheten med DRASTIC är som högst och var uppehållstiden i horisontalled är som lägst. Uppdelning av vattenskyddsområdet i zoner hade resulterat i ett tydligare och mer praktiskt användbart resultat av metoden.

6.3 Metodens applicerbarhet i andra områden

Den framtagna metoden i arbetet är utformad på ett sätt som gör den användbar i andra områden än Fjärås Bräcka. Vid tillämpning av metoden i ett annat område är det viktigt att notera att delar av metoden kan komma att kräva viss anpassning. I arbetet har ett antal avgränsningar gjorts som under andra förhållanden och situationer kan vara irrelevanta eller till och med felaktiga att införa.

En av de avgränsningar som gjorts i fallstudien är att grundvattenkvaliteten endast utvärderades med hänsyn till vidare användning som dricksvatten. Metoden är anpassad för att även kunna appliceras för andra vattensystemtjänster. Val av spridningsvägar samt metoder för sårbarhetsbedömning beror på vilken vattensystemtjänst som beaktas. Även konsekvensbedömningen behöver anpassas med avseende på vald vattensystemtjänst.

Nämnavärt är även att vid framtagning av DRASTIC-kartorna i detta arbete så gjordes antagandet att hela akviferen består av isälvsmaterial. Detta antagande är något som gör riskbedömningen mindre exakt och pålitlig. Trots att majoriteten av akviferen består av isälvsmaterial, finns det genomgående lager av lera och lerigt material på vissa platser (Wenner, 1950). Vid användning av metoden kan det vara bra att inte göra antagandet att hela akviferen består av samma material och att istället precisera ytterligare vilka potentiella andra material som finns. Likaså kan man åtskilja olika isälvsmaterial som grus och glacifluvialt sand, på grund av att egenskaperna för materialen kan skilja sig åt, vilket påverkar sårbarheten.

Vid beräkning av den horisontella transporten till riskbedömningen användes *Calculated Fixed Radius Method* som är baserad på Darcys lag. Det är en förenklad metod och det finns ett flertal andra, mer avancerade metoder tillgängliga för att beräkna horisontaltransport. Att metoden är enkel innebär både för- och nackdelar. En enklare metod kräver både mindre tid och expertis att genomföra. Eftersom *Calculated Fixed Radius Method* endast är ett delsteg i den framtagna metoden i detta arbete och därmed endast utgör en del i underlaget för vattenskyddsområdet, kan det anses omotiverat att använda en mer komplicerad metod.

Samtidigt blir resultatet mer tillförlitligt med en mer rigorös metodik. Med tanke på flödesriktningen för grundvattnet i Fjärås Bräcka, visar ovalerna i nordlig och sydlig riktning en konservativ klassificering av uppehållstiden. Den primära flödesriktningen är nämligen från öst och väst, mot råvattenuttaget (Lång & Lindh, 2018). Detta kan ha gjort att sannolikheten för horisontell transport, från riskkällor som befinner sig norr eller söder om råvattenuttaget har överskattats.

Vid användning av riskbedömningsmetoden kan det därmed vara värt att överväga val av annan beräkningsmetod för att få ett mer tillförlitligt resultat. Vid ett sådant avgörande bör dock beslutsfattaren ha i åtanke att det endast är ett delsteg i en större process och att hela den framtagna metodens genomförbarhet gynnas av att hålla delstegen enklare.

Ytterligare en avgränsning som har gjorts i arbetet är att ingen hänsyn tas till den inducerade infiltrationen som sker från Lygnern till grundvattenmagasinet. Inducerad infiltration från närliggande vattendrag till grundvattenmagasin kan ha stor betydelse för kvaliteten på grundvattnet. Det är ytterligare ett sätt som föroreningar kan transporteras till grundvattenmagasinet och hänsyn bör därmed tas till den inducerade infiltrationen för att få ett så noggrant resultat som möjligt.

Sammanfattningsvis finns det ett flertal parametrar som kan behövas ses över och anpassas vid applicering av metoden på ett annat område. Helheten av den framtagna riskbedömningsmetoden är dock relevant att använda som utgångspunkt vid riskbedömning och ger en förståelse kring vilka delar som är relevanta att ta hänsyn till vid utförandet av en riskbedömning.

6.4 Oförutsägbara händelser

Förutom utsläpp från de lokala riskkällorna i Fjärås Bräcka finns det även andra händelser som bör beaktas. Händelser som kris, krig, brand och sabotage är oförutsägbara och i riskbedömningen har en avgränsning gjorts som innebär att dessa händelser är uteslutna ur bedömningen. De är därför inte en del av den slutgiltiga riskmatrisen. Denna avgränsning gjordes eftersom de oförutsägbara händelserna, till skillnad från de lokala riskkällorna, är svåra att knyta till en viss punkt i området. De kan ske i alla delar av området och de är även svåra att förutse. Till skillnad från de identifierade lokala riskkällorna, där statistik över exempelvis trafikolyckor eller oljeläckage kan finnas tillgängligt, är händelser som kris, krig, brand och sabotage svåra att sannolikhetsbedöma.

Viktigt att poängtera är att den framtagna riskbedömningen i arbetet skulle sett annorlunda ut om de oförutsägbara händelserna inkluderades i bedömningen. De oförutsägbara händelserna kan utgöra stora hot mot kvaliteten på grundvatten och risken finns att hoten kan komma att bli ännu större i framtiden.

Ytterligare en svårbedömd företeelse är de långsiktiga konsekvenserna som kan orsakas av klimatförändringar. Dessa konsekvenser kan innebära att en ny riskbedömning behöver göras i framtiden. Dels på grund av de miljöförändringar som sker men även på grund av att de befintliga riskkällorna kan påverkas av klimatförändringar. Exempelvis kommer sannolikheten att en översvämning inträffar öka. Översvämningar kan i sin tur leda till att föroreningarna transporteras längre sträckor än vid normala förhållanden. Detta kan resultera i att fler verksamheter utgör riskkällor i framtiden och att vissa riskkällor utgör en större risk i framtiden än vad de gör idag.

7

Slutsats

Arbetets syfte var att ta fram en riskbedömningsmetod med avseende på vattenkvalitet med lämplighet för både dricksvattenproduktion och andra vattensystemtjänster. Resultatet från riskbedömningen skulle sedan utgöra underlag för utformade av ett vattenskyddsområde. Arbetet ledde fram till följande slutsatser:

Den framtagna riskbedömningsmetoden är användbar för att bestämma vilka områden som är i behov av skydd i fallstudien i Fjärås Bräcka men ger inte ett komplett och absolut resultat. Resultatet är en riskrankning baserad på de riskkällor som finns idag, i förhållande till varandra med avseende specifikt på dess påverkan på dricksvattenkvaliteten vid råvattenuttaget. Vår områdesundersökning visar dock att vattenkvaliteten i hela magasinet är värd att skydda i och med de övriga vattensystemtjänsterna som magasinet bidrar med. Metoden resulterar även endast i ett sätt att uttrycka risk. Riskbedömningen är delvis baserad på expertbedömningar men metoden ger en nödvändig struktur för den här typen av bedömningar och kan därmed användas av olika personer på olika platser.

Införandet av ett vattenskyddsområde ämnar dessutom att skydda vattentäkten även i framtiden, vilket innebär att eventuella, framtida riskkällor behöver regleras. För att göra detta kan sårbarhetskartorna användas eftersom de är baserade på markens förutsättningar och som visar vilka områden som är mest sårbara och därmed de områden där verksamheter kan behöva undvikas eller regleras. Sårbarhetskartorna kan dessutom ge en indikation för vilken typ av åtgärd som bör införas eftersom de visar sårbarheten med avseende på olika typer av transporter.

Vattenskyddsområden utformas även med hänsyn till andra aspekter än vattenkvalitet. Juridiska grunder och en analys av konsekvenser och möjligheter till inrättande av riktlinjer behöver komplettera riskbedömningen. Trots att avgränsningarna i detta arbete innebar att detta utslöts ur bedömningen så resulterade det i ett förslag på skyddsområde som är mycket likt det nuvarande vattenskyddsområdet.

I branschen finns det ett behov av lämpliga och tillämpbara riskbedömningsmetoder. Att ta fram en fullt standardiserad sådan är det mest önskvärda men eftersom vattentäkter kan se väldigt olika ut är detta svårt att uppnå. De huvudsakliga delstegen i metoden som togs fram i detta arbete kunde appliceras i Fjärås Bräcka och gav en omfattande beskrivning av området och uttryckte risk på ett sätt som var användbart vid utformning av ett vattenskyddsområde. Helheten av den framtagna metoden var relevant som utgångspunkt vid riskbedömningen då den gav förståelse

kring vad som är relevant att ta hänsyn till vid riskbedömning. Metodens huvudsteg är även relativt generella och anpassningsbara. Därav bedöms den framtagna metodiken var både genomförbar, användbar och ger ett någorlunda tillförlitligt underlag för inrättande av vattenskyddsområden.

Litteratur

- Airaksinen, S., Heiskanen, M.-L., & Heinonen-Tanski, H. (2007). Contamination of surface run-off water and soil in two horse paddocks. *Bioresource Technology*, 98(9), 1762–1766. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.032>
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: Standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. *Journal of the Geological Society of India*, 29.
- Andersson, R. (2022). *PFAS-föreningar i Småland* [Examensarbete i miljövetenskap]. Linnéuniversitetet [PFAS]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1687952/FULLTEXT01.pdf>
- Andréasson, P.-G. (2015). *Geobiosfären: en introduktion*. Studentlitteratur.
- Aven, T. (2007). A unified framework for risk and vulnerability analysis covering both safety and security. *Reliability Engineering and System Safety*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.03.008>
- Britannica. (2011). *Cambisol*. <https://www.britannica.com/science/Cambisol>
- Burgman, M. (2005). *Risks and decisions for conservation and environmental management*. Cambridge University Press. <https://findanexpert.unimelb.edu.au/scholarlywork/272665-risks-and-decisions-for-conservation-and-environmental-management>
- Codex Alimentarius Commission. (2003). Hazard and Critical Control Point (HACCP) System and Guidelines for its Application, Annex to the Recommended International Code of Practice-General Principle of Food Hygiene, CAC/RCP 1-1969, Rev. 4-2003 [CAC/RCP 1-1969, Rev. 4-2003].
- Dilley, M., & Boudreau, T. E. (2001). Coming to terms with vulnerability: a critique of the food security definition. *Food Policy*, 26(3), 229–247. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-9192\(00\)00046-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-9192(00)00046-4)
- Eriksson, J., Juhl, A.-K., Wikström, T., & Rinne, A. (2011). *Vägledning för risk- och sårbarhetsanalyser* (tekn. rapport). Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
- Ernervik, A., Björnfors, O., & Salberg, M. (2015). *Inventering av nedlagda deponier i Kungsbacka kommun* (tekn. rapport). Länsstyrelsen Hallands Län.
- Europaparlamentet. (2023). *Skydd och förvaltning av vattenresurser*. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/sv/sheet/74/skydd-och-forvaltning-av-vattenresurser> (besökt: 05.04.2024).
- Eveborn m.fl. (2017). *Grundvattenbildning och grundvattentillgång i Sverige*. <http://resource.sgu.se/produkter/regeringsrapporter/2017/RR1709.pdf>

- Foster, S. (1987). *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied Scientific Research P69-86*. Netherlands Organization for Applied Scientific Research. <https://books.google.se/books?id=jpKXMwEACAAJ>
- Google. (2024). Google Maps Satellitbild [Tillgänglig: Google Maps [Online]. Tillgänglig: <https://www.google.com/maps>]. <https://www.google.com/maps>
- Grip, H., & Rodhe, A. (2016). *Vattnets väg från regn till bäck*. Uppsala universitet.
- Gärtner, N., Lindhe, A., Wahtra, J., Söderqvist, T., Lång, L.-O., Nordzell, H., Norrman, J., & Rosén, L. (2022). Integrating Ecosystem Services into Risk Assessments for Drinking Water Protection. *Water*, 14(1180). <https://doi.org/10.3390/w14081180>
- Haglund, R. (2010). *Ekonomiska kriser: En studie över ekonomiska krisers påverkan på samhället* (tekn. rapport). Lunds Universitet. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOid=1786039&fileOid=1896041>
- Haimes, Y. Y. (2006). On the definition of vulnerabilities in measuring risks to infrastructures. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00755.x>
- Hamilton, P. D., Gale, P., & Pollard, S. J. (2006). A commentary on recent water safety initiatives in the context of water utility risk management. *Environment International*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.06.001>
- Hanson, G. (2000). *Konstgjord grundvattenbildning : 100-årig teknik inom svensk dricksvattenförsörjning = [Artificial groundwater recharge] : [a method ...* Svenska vatten- och avloppsverksfören.
- Havelaar, A. H. (1994). Application of HACCP to drinking water supply. *Food Control*, 5. [https://doi.org/10.1016/0956-7135\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0956-7135(94)90074-4)
- Havs- och Vattenmyndigheten. (2020). *Vattenskyddsområde*. <https://www.havochvatten.se/avlopp-och-dricksvatten/dricksvatten-och-vattenskydd/vattenskyddsomrade.html> (besökt: 29.03.2024).
- Havs- och vattenmyndigheten. (2018). *Arbete för att säkra tillgången på rent dricksvatten* [Besökt den 9 april 2024]. <https://www.sverigesvattenmiljo.se/content/skydd-av-dricksvattnet>
- Havs- och vattenmyndigheten. (2021). *Vägledning om inrättande och förvaltning av vattenskyddsområden* (tekn. rapport). <https://www.havochvatten.se/download/18.26126a9e1777ad8f0582359d/1708680806471/vagledning-om-inrattande-och-forvaltning-av-vattenskyddsomraden.pdf> (besökt: 22.03.2024).
- Holmberg, P., & Andersson, C. (2003). *Inventering av Förorenade områden Bilverkstäder i Uppsala län* (tekn. rapport). Länsstyrelsen i Uppsala län.
- Hägg, K., Persson, K. M., Persson, T., & Zhao, Q. (2018). *Infiltrationsanläggningar för dricksvattenberedning – Underlag för en drifhandbok* (SVU-rapport Nr 2018-11). Svenskt Vatten Utveckling. Bromma, Sweden.
- Iverfelt, U. (2014). *Släckvattenpartiklars spridning i mark och grundvatten* [Examensarbete i geovetenskap]. Uppsala Universitet [Brand]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:719931/FULLTEXT01.pdf>

- Johansson, J., & Hassel, H. (2010). An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.06.010>
- Kristianstads kommun. (2023). *Maglehems vattenskyddsområde*. <https://www.kristianstad.se/download/18.41c16b1618c629ae8d6976f/1702894842654/Tekniskt%20underlag%20Maglehem%202023-09-28%20PUBLIK%20.pdf> (besökt: 25.04.2024).
- Lantmäteriet. (2022). Ny topografisk karta ersätter gamla Terrängkartan – nu med täckning över hela landet [Hämtad 16 april 2024].
- Lantmäteriet. (2024). Topografisk webbkarta Nedladdning, raster [Hämtad 16 april 2024].
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper* (tekn. rapport). <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf> (besökt: 22.03.2024).
- Lindeberg, C. (2013). Hjälpredda för bedömning av grundvatten.
- Lindhe, A. (2010). *Risk Assessment and Decision Support for Managing Drinking Water Systems* [doktorsavhandling, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY].
- Livsmedelsverket. (2022). *Livsmedelsverkets föreskrifter (LIVSFS 2008:13) om åtgärder mot sabotage och annan skadegörelse riktad mot dricksvattenanläggningar*. Hämtad 25 april 2024, från <https://www.livsmedelsverket.se/globalassets/om-oss/lagstiftning/dricksvatten---naturl-mineralv---kallv/livsfs-2022-3-kons-2008-13.pdf>
- Ljung, L. (2000). *Naturgrus eller morän* (tekn. rapport). Sveriges Geologiska Undersökning.
- Lång, L.-O., & Lindh, Å. (2018). *Grundvattenmagasinet Fjärås Bräcka: K 609* (tekn. rapport). Sveriges Geologiska Undersökning. <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/k/k609karta/k609-rapport.pdf>
- Länsstyrelsen Hallands Län. (2012). *Hallands läns författningssamling*. https://www.lansstyrelsen.se/download/18.1dfa69ad1630328ad7c395d7/1526068989591/2012_005.pdf (besökt: 29.03.2024).
- Melchers, R. (2001). On the ALARP approach to risk management. *Reliability Engineering & System Safety*, 71(2), 201–208. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00096-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00096-X)
- Mittermaier, E., Granholm, N., & Veibäck, E. (2020). *Perspektiv på pandemin* (tekn. rapport Nr FOI-R-4992-SE). Totalförsvarets forskningsinstitut. <https://www.foi.se/rapportsammanfattning?reportNo=FOI-R--4992--SE>
- Miva. (2023). *Vattenskyddsområden - Miva* [Senast uppdaterad 28 augusti 2023]. Miljö och Vatten i Örnsköldsvik AB. <https://miva.se/vatten-och-avlopp/safunkar-vatten-och-avlopp/dricksvatten/vattenskyddsomraden>
- Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. (2024). *Vad är en kris?* Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Hämtad 25 april 2024, från <https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skolmaterial/samhällets-krisberedskap/vad-ar-en-kris/>
- Nationalencyklopedin. (u. å). *Grundvatten* [Tillgänglig online; besökt 6 maj 2024]. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/1%C3%A5ng/grundvatten>

- Naturskyddsföreningen. (2021). *Sveriges jordar*. <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/sveriges-jordar/>
- Naturum. (u. å-a). *Kolerakyrkogård*. <https://www.naturumfjarasbracka.se/sv/239961/Kolerakyrkogard/> (besökt: 22.03.2024).
- Naturum. (u. å-b). *Li gravfält*. <https://www.naturumfjarasbracka.se/sv/117016/Li-gravfalt/> (besökt: 22.03.2024).
- Naturvårdsverket. (2011). *Handbok om vattenskyddsområde* (tekn. rapport Nr 0170).
- Nilsson, G., Rosqvist, H., Andersson-Sköld, Y., Starzec, P., & Norrman, J. (2005). *Förorenings-spridning: Underlag för handlingsplan för att förutse och förebygga naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat* (tekn. rapport). Statens Geotekniska Institut.
- Olausson, M. (2007). *Risk- och sårbarhetsanalys för dricksvattenförsörjning*. Livsmedelsverket. <https://www.livsmedelsverket.se/globalassets/foretag-regler-kontroll/krisberedskap/krisberedskap-dricksvatten---vaka/risk--och-sarbarhetsanalys-for-dricksvattenforsorjning.-handbok.-livsmedelsverket-2007.pdf>
- Pardo, L., Beane Freeman, L., Lerro, C., m. fl. (2020). Pesticide exposure and risk of aggressive prostate cancer among private pesticide applicators. *Environmental Health*. <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00583-0>
- Pérez-Lucas, G., Vela, N., Aatik, A. E., & Navarro, S. (2018). Environmental Risk of Groundwater Pollution by Pesticide Leaching through the Soil Profile. I M. Larramendy & S. Soloneski (Red.), *Pesticides*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82418>
- Pouchieu, C., Piel, C., Carles, C., Gruber, A., Helmer, C., Tual, S., Marcotullio, E., Lebailly, P., & Baldi, I. (2017). Pesticide use in agriculture and Parkinson's disease in the AGRICAN cohort study. *International Journal of Epidemiology*, 47(1), 299–310. <https://doi.org/10.1093/ije/dyx225>
- Påsse, T. (1986). *Beskrivning till jordartskartan: Kungsbacka SO* (tekn. rapport Nr ISBN 81-7158-352-1). Sveriges Geologiska Undersökning. <https://resource.sgu.se/dokument/publikation/ae/ae56beskrivning/ae56-beskrivning.pdf>
- Rosén, B. (2006). *Dricksvattenbrunnar: Hantering av mindre vattentäkter utmed vägar* (tekn. rapport). Vägverket.
- Rosén, L. (1991). Sårbarhetsklassificering av grundvatten - Tillämpningar av standardiserade klassificeringssystem på svenska förhållanden.
- Rosén, L. (1994). A Study of the DRASTIC Methodology with Emphasis on Swedish Conditions. *Groundwater*, 32(2), 278–285. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1994.tb00642.x>
- Sara Morge. (1999). *Krisinformation på Internet* [[Online]]. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). Hämtad 2 maj 2024, från <https://rib.msb.se/filer/pdf/29774.pdf>
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2020a). *Arbete med vattenskyddsområden* [Sammanfattning av viktiga punkter i arbetet med vattenskyddsområden och SGU:s roll i att tillhandahålla geologisk information.]. <https://www.sgu.se/grundvatten/vattenskyddsomraden/>
- Singh, P., Raj, A., & Yadav, B. (2022). Impacts of Agriculture-Based Contaminants on Groundwater Quality. I B. Yadav, M. P. Mohanty, A. Pandey, V. P. Singh & R. D. Singh (Red.), *Sustainability of Water Resources: Impacts and*

- Management* (s. 249–261). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13467-8_16
- Sjöstrand, K., Lindhe, A., Söderqvist, T., Dahlqvist, P., & Rosén, L. (2019). *När vattentillgångar brister* (tekn. rapport). RISE, Research Institutes of Sweden.
- Statistikmyndigheten SCB. (2022). *Vattenanvändning 2020 efter typ av användare, per vattendistrikt*. <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/vattenanvandning/vattenuttag-och-vattenanvandning-i-sverige/pong/tabell-och-diagram/vattenanvandning-2020-efter-typ-av-anvandare-per-vattendistrikt/> (besökt: 05.04.2024).
- Strandberg, B.-M. (2020). *Riskbedömning: Sjöledning i Lygner, Dyrenäs, Flohult, Blåsås* (tekn. rapport). WSP.
- Svensk författningssamling. (2010). Plan- och bygglagen [SFS 2010:900].
- Svensk författningssamling. (1998:808). Miljöbalken (1998:808). https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/miljobalk-1998808_sfs-1998-808/#top (besökt: 22.03.2024).
- Svenskt vatten. (2023). *Världshälsoorganisationen släpper ny upplaga av Water Safety Plan Manual*. <https://www.svensktvatten.se/om-oss/nyheter-lista/varldshalsoorganisationen-slapper-ny-upplaga-av-water-safety-plan-manual/#:~:text=Den%20andra%20upplagan%20av%20Water,sl%C3%A4pptes%20i%20b%C3%B6rjan%20av%20mars.> (besökt: 14.04.2024).
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2019). *Hydrogeologisk bakgrund*. <https://www.sgu.se/anvarandarstod-for-geologiska-fragor/bedomning-av-influensomrade-avseende-grundvatten/hydrogeologisk-bakgrund-forutsattningar/>
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2020b). *Brunnar, öppen data*. <https://www.sgu.se/produkter-och-tjanster/geologiska-data/oppna-data/grundvatten-oppna-data/brunnar/> (besökt: 6.05.2024).
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2020c). *Det menas med grundvattennivå*. <https://www.sgu.se/grundvatten/grundvattennivaer/om-grundvattennivaer/det-menas-med-grundvattenniva/>
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2020d). *Isen smälter*. <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/isen-smalter/> (besökt: 28.03.2024).
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2020e). *Jord*. <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/> (besökt: 28.03.2024).
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2020f). *Vatten*. <https://www.sgu.se/om-geologi/vatten/> (besökt: 02.11.2020).
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2021). *Effekter på föroreningar i mark och vatten av ett förändrat klimat*. <https://www.sgu.se/samhallsplanering/planering-och-markanvandning/grundvatten-i-planeringen/klimatforandringar/klimatforandringar-effekter/>
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2022). *Morän - spår av inlandsisen*. <https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/inlandsisen/moran-spar-av-inlandsisen/> (besökt: 28.03.2024).
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2023). *Trender för bly*. <https://www.sgu.se/grundvatten/trender-i-grundvattenkemi/trender-for-bly/#:~:text=Som%20mest%20%C3%B6kar%20blyhalten%20med,bero%20p%C3%A5%20%C3%B6kande%20pH%2Dv%C3%A4rden.> (besökt: 04.03.2024).

- Sveriges Geologiska Undersökning. (2024a). *Grundvatten och förändrat klimat*. <https://www.sgu.se/grundvatten/grundvatten-och-forandrat-klimat/>
- Sveriges Geologiska Undersökning. (2024b). *Jordkartvisare*. <https://www.sgu.se/produkter-och-tjanster/kartor/kartvisaren/jordkartvisare/> (besökt: 28.03.2024).
- Sveriges Geologiska Undersökning. (u. å). *Grundvattenmagasin*. <https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-grundvattenmagasin.html> (besökt: 06.05.2024).
- Trafikverket. (2020). *Vägen och Vattnet*. <https://bransch.trafikverket.se/om-oss/var-verksamhet/sa-har-jobbar-vi-med/Miljo-och-halsa/Vatten-och-mark/Vagen-och-vattnet/> (besökt: 06.05.2024).
- U.S. Environmental Protection Agency. (1987). *Guidelines for delineation of well-head protection areas* (tekn. rapport).
- Water resources group. (2009). *Charting Our Water Future: Economic frameworks to inform decision-making*. https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/sustainability/pdfs/charting%20our%20water%20future/charting_our_water_future_full_report_.ashx
- Vatteninformationssystem Sverige. (u. å). *Övergödning*. <https://visshjalp.lansstyrelsen.se/detta-beskrivs-i-viss/miljoproblem-och-paverkan/miljoproblem/overgodning/> (besökt: 22.03.2024).
- Wenner, C.-G. (1950). *Fjärås Bräcka*. Sveriges Geologiska Undersökning.
- WHO, Världshälsoorganisationen. (2023). *Water Safety Plan Manual* (tekn. rapport). Världshälsoorganisationen.
- Wilson, C. P. V. (1982). *Groundwater Hydrology* (2nd edn) by D. K. Todd. Wiley, New York, 1980. 552 pp. Price: £11 · 00 (Paperback); £27 · 35 (Hardback). ISBN 0 471 08641 X. *Geological Journal*, 17(4), 345–345. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/gj.3350170407>
- Yang, K. J., Lee, J., & Park, H. L. (2020). Organophosphate Pesticide Exposure and Breast Cancer Risk: A Rapid Review of Human, Animal, and Cell-Based Studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14). <https://doi.org/10.3390/ijerph17145030>
- Żychowski, J., & Bryndal, T. (2014). Impact of cemeteries on groundwater contamination by bacteria and viruses – a review. *Journal of Water and Health*, 13(2), 285–301. <https://doi.org/10.2166/wh.2014.119>

A

Appendix

A.1 Tabell för sannolikhetsbedömning

Tabell från Excel med beräkningar av sannolikhetsnivåer och sannolikhetsindex för respektive riskkälla. Beteckningar för sannolikhetsnivån i varje beräkningssteg motsvarar beteckningarna för delstegen i sannolikhetsstrådet. Även slutgiltig sannolikhetsklass presenteras i tabellen.

Bedrägningskälla	P_u	P_p1	P_p2	P_p3	P_p4	P_s	P_r1	P_r2	P_g1	P_g2	P_g3	P_b1	P_b2	P_b3	P_total	Samolikhetklass
A1	0,75	0	0,25	0	0,6	0,8	0	0,75	0	0,875	1	0	0,66	0,414	3	
A2	0,75	0,75	0	0,25	0	0,8	0,8	0	0,75	0	0,875	1	0	0,66	0,311	2
B1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,83	0,726	4
B2	0,5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,83	0,363	2
C1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,83	0,363	3
C2	0,5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,875	0,269	2
D1	1	0,6	0	0,4	0	0,66	0,72	0	0,75	0	0,875	1	0	0,33	0,329	2
D2	0,75	0,6	0	0,4	0	0,66	0,72	0	0,75	0	0,875	1	0	0,33	0,247	2
E1	1	0	1	0	0	0	0	0,75	0	0,75	0	0	0,33	0	0,166	1
E2	0,75	0	1	0	0	0	0	0,75	0	0,75	0	0	0,33	0	0,139	1
F	1	0	0	0,5	0,5	0	0	0	0	0	1	0	0	0,66	0,330	2
G	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,66	0,576	3
H1	1	0	0,75	0,25	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,33	0,246	2
H2	1	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,33	0,083	1
H3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,33	0,000	0
I	0,75	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,33	0,217	2
J	0,75	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	1	0,656	4
K	0,5	1	0	0	0	0,8	0,8	0	0,75	0	0	1	0	0,33	0,180	1
L	0,25	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,33	0,072	1
M	0,75	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,33	0,217	2
N1	1	0,33	0,33	0,33	0	0,8	0,8	0,75	0,75	0,875	1	1	1	1	0,645	4
N2	1	0,5	0,5	0	0	0,8	0,8	0,75	0,75	0,875	1	1	1	1	0,540	3
N3	1	0	0	0	0	0,8	0,8	0,75	0,75	0,875	1	1	1	1	0,000	0
O1	0,75	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	0
O2	0,75	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,33	0,217	2
P1	0,75	0,3	0	0,5	0,2	0,66	0,8	0	0,75	0	0,875	1	0	0,58	0,264	2
P2	0,75	1	0	0	0	0,7	0,8	0	0,75	0	0	1	0	0,315	0,315	2
Q1	0,5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,33	0,144	1
Q2	0,5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,875	0	0	0,33	0,144	1
R	1	1	0	0	0	0,8	0,8	0	0,75	0	0	1	0	0,360	0,360	2

A.2 Tabell för konsekvensbedömning

Tabell från Excel med beräkningar av konsekvensindex för respektive riskkälla. Även slutgiltig konsekvensklass presenteras i tabellen.

Beteckning	Riskkälla	Farlighet	Mängd utsläpp	Beständighet	K_total	Konsekvens klass
A1	vägen vanligt utsläpp	4	1	4	16	2
A2	Sätla vägen olycka	4	4	4	64	5
B1	Livägen vanligt utsläpp	4	1	4	16	2
B2	Livägen olycka	4	3	4	48	4
C1	Fjärås bräcka väg vanligt	4	1	4	16	2
C2	Fjärås bräcka väg olycka	4	3	4	48	4
D1	Tostaredsvägen vanligt	4	1	4	16	2
D2	Tostaredsvägen	4	4	4	64	5
E1	Båttrafik vanligt utsläpp	4	1	4	16	2
E2	Båttrafik olycka	4	3	4	48	4
F	Krukväxtodling	4	2	4	32	3
G	Hästverksamhet / stall	3	2	1	6	1
H1	Åkermark 1	4	1	4	16	2
H2	Åkermark 2	4	1	4	16	2
H3	Åkermark 3				0	0
I	Fjärås Kyrkogård	4	2	1	8	1
J	Bebyggelse på	3	2	2	12	1
K	Bilverkstad	4	2	4	32	3
L	Grustäkt	4	1	4	16	2
M	Bebyggelse söderut	3	2	2	12	1
N1	Badplats 1	2	1	1	2	1
N2	Badplats 2	2	1	1	2	1
N3	Badplats 3	2	1	1	2	1
O1	Återvinningstation 1	3	1	4	12	1
O2	Återvinningstation 2	3	1	4	12	1
P1	Vandringsområde 1	2	1	2	4	1
P2	Vandringsområde 2	2	1	2	4	1
Q1	Betong- och cementind	4	2	4	32	3
Q2	Betong- och cementind	4	2	4	32	3
R	Nedlagd deponi	3	1	3	9	1

Avdelningen för Geologi och Geoteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS